Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS
Forschungsbericht 2/87

Erschütterungseinwirkungen auf Menschen Richtwerte für die Belästigung

Kurzbericht

Dr. J. Studer, Studer Engineering, Zürich
M. Stolz, dipl. Ing. ETH, M. Stolz Ingenieurbüro, Muri (Bern)
Mitarbeit:
Dr. J. Kastka, Universität Düsseldorf, Düsseldorf

2009/JST/MS/Kastka

Zürich, 8. August 1994

Kommentar zum VSS-Forschungsbericht 2/87 (Erschütterungswirkungen auf den Menschen)

Der vorliegende Bericht bezieht sich auf Untersuchungen aus den Jahren 1988 und 1989. Diesen lagen 3 Zielsetzungen zugrunde:

1. Probleme der Messmethodik erfassen und beurteilen
2. Psychologische Bewertung von Erschütterungen hinsichtlich der Belästungswirkung
3. Bewertungsvorschlag zur Erfassung der Erschütterungsbelästigung

Am Schluss des Berichtes wird auf (ausländische) Untersuchungen hingewiesen, die zwischen dem Abschluss der obigen Untersuchungen und der Ablieferung des Kurzberichtes erfolgt sind. Die meisten dieser Untersuchungen befassten sich mit der Beurteilung der Störwirkung von Erschütterungen auf den Menschen.

Mit den vorliegenden Untersuchungen wurde letztendlich die Festlegung von Erschütterungs- und Körperschallgrenzwerten, als Basis für die Festlegung von allfällig notwendigen Schutzmassnahmen, beabsichtigt. Um dieses Ziel realisieren zu können, sind aber genauere Kenntnisse über die Störwirkung von Erschütterungen und Körperschall (als Grundlage für die Festlegung von Grenzwerten) und über die technische, betriebliche und finanzielle Machbarkeit von Schutzmassnahmen notwendig. Der Forschungsbericht 2/87 gibt weder auf die eine noch auf die andere Fragestellung eine befriedigende Antwort. Insbesondere konnten die folgenden offenen Punkte nicht geklärt werden:

- Im Bereich der Messtechnik wurde die Ankoppelung an das schwingende Element untersucht. Die Frage, ob der bis heute allgemein verwendete Messort im Raum (Zimmermitte) für die Erfassung der Störwirkung überhaupt repräsentativ ist, war nicht Gegenstand der Untersuchungen und ist bis heute ungeklärt.

- Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die Beurteilung von nicht dauernd einwirkenden Ereignissen (z.B. Lastwagen- und Schienenverkehr) am problematischsten sind. Hierzu lieferte die vorliegende Studie kaum neue Erkenntnisse.

- Die Erkenntnisse der Belästigungswirkung wurden fast ausschliesslich aus Fragebogenauswertungen gewonnen. Die individuelle Belastungsempfindung wurde nicht oder nur stichprobenartig mit Messungen überprüft. Die Übereinstimmung der physikalischen mit der psychologischen Belästigungshöhe konnte deshalb nicht überprüft werden.

- Die Untersuchungsstandorte wurden zwar so ausgewählt, dass Erschütterungsimmissionen dominant sein sollten. Trotzdem traten auch dort die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen meist gleichzeitig mit Aussenlärm (Quellenlärm) auf. Die Befragten nahmen die gesamte Immissionssituation wahr und waren oft kaum in der Lage zwischen Körperschall und Aussenschall (der rechtlich gemäss der geltenden Lärmschutzverordnung zu beurteilen ist) zu unterscheiden. Aufgrund der gestellten Fragen (Anhang 3) ist es daher fast unmöglich, mit den erhaltenen Antworten die Störwirkung von Aussenschall, Erschütterungen und Körperschall getrennt zu erfassen. Verschiedene Laboruntersuchungen, die seit Abschluss der hier vorliegenden Forschungen erfolgt sind, aber auch Schienenverkehrs-studien aus Deutschland zeigen deutliche Hinweise für die interaktive Störwirkung von Erschütterungs- und Lärmbelastungen. Deshalb wird entgegen der hier aufgestellten Forderung (aus Gründen der Einfachheit und Praktikabilität auf die kombinierte Bewertung zu verzichten) in neueren Studien die kombinierte Bewertung verlangt. Dies wäre, falls praktikabel, auch deshalb wünschbar, da Masnahmen gegen Aussen- und Körperschall sowie Erschütterungen sich gegenseitig beeinflussen können.

Die Resultate der vorliegenden Studie decken sich insbesondere bezüglich der Messtechnik mit ähnlichen Studien. Gewisse Feststellungen (z.B. bezüglich der Belästigungswirkung) liefern aber ebensowenig eine Klärung der Situation, wie andere seither durchgeführte Untersuchungen.

Das Thema Erschütterungs- und Körperschallschutz wird zunehmend bedeutungsvoller, da vom Bundesgesetzgeber geplant ist, eine auf dem Umweltschutzgesetz basierende Erschütterungsverordnung zu erlassen. **Die bis heute vorhandenen Erkenntnisse genügen noch in keiner Weise, um Richt- oder Grenzwerte festzulegen**. Bis die diesbezüglichen Bundesaktivitäten weiter fortgeschritten sind, sollten Dritte mit Aktivitäten zur Grenzwertsetzung daher noch zuzuwarten.

Bis eine Erschütterungsverordnung erlassen werden kann, sind noch etliche offene Fragen zu klären. Bei der Suche nach einer Lösung, sind vor allem die Ursachen der Erschütterungen zu untersuchen. Es ist nicht die Aufgabe einer Fachvereinigung Grenzwerte festzulegen. Diese müssen in einem gesellschaftspolitischen Prozess, auch unter Beachtung der volkswirtschaftlichen Aspekte, definiert werden. Aufgrund der Komplexität des Themas müssen, wie am Schluss des Berichtes gefordert wird, die interessierten Kreise gemeinsam Lösungen erarbeiten. Dabei sind die Untersuchungen über die Belästigungswirkung in Zukunft mit Abklärungen bezüglich der technischen, betrieblichen und finanziellen Machbarkeit von allfälligen Erschütterungs- und Körperschallschutzmassnahmen zu ergänzen. Eine Grenzwertfestlegung ist nur dann sinnvoll, wenn bei deren Überschreitung auch Schutzmassnahmen getroffen werden können. Es muss in jedem Fall vermieden werden, dass ein ähnlicher Vollzugsnotstand eintritt, wie er sich heute beim Aussenlärm (der gemäss Lärmschutzverordnung beurteilt wird) präsentiert.

Zürich, 15. November 1994

VSS-Fachkommission 272
"Unterbau und Fundationsschichten"

Inhalt

Seite

0.	**Zusammenfassung**	**1**
1.	**Einleitung**	**5**
1.1.	Ausgangslage	5
1.2.	Problemstellung	5
1.3.	Auftrag	8
1.4.	Aufbau und Gliederung des vorliegenden Berichtes	9
2.	**Vorgehen und Methodik**	**10**
3.	**Physikalische Daten**	**13**
3.1.	Erschütterungs-Messeinrichtungen	13
3.2.	Messungen	16
4.	**Psychologische Untersuchungen zur Belästigungswirkung von Geräusch- und Erschütterungsimmissionen**	**25**
5.	**Richtwerte für die Beurteilung der Belästigung**	**32**
6.	**Schlussfolgerungen**	**36**

Anhänge

1	Vergleich von Messketten
2	Messungen
3	Fragebogen

Literatur

0. Zusammenfassung

Infolge der immer dichteren Bebauung und der damit verbundenen wachsenden Nachbarschaft von Bewohnern mit Baustellen und Verkehrsträgern, häufen sich in den letzten Jahren immer mehr die Fälle, in denen die Belästigung infolge Erschütterungen und dem damit verbundenen abgestrahlten Körperschall in den Vordergrund tritt.

Der vorliegende Bericht stellt die zwischen 1988 und 1989 erarbeiteten Resultate von Untersuchungen im Rahmen der Strassenbauforschung dar (Auftrag 2/87 Erschütterungseinwirkungen auf Menschen, Richtwerte für Belästigung).

Durch eine Feldstudie waren Unterlagen für einen ersten Entwurf einer Richtlinie zur Bewertung der Belästigung von Menschen durch Erschütterungen zu erarbeiten.

Die Feldstudie umfasst:

1. Untersuchung der Probleme der messtechnischen Erfassung von Erschütterungen, der Signalverarbeitung und deren Einfluss auf die Bewertungsgrössen.
2. Psychologische Bewertung der Erschütterungen im Hinblick auf die Belästigung (ausgewählte Standorte). Da Erschütterungen im allgemeinen zusammen mit direktem Luftschall oder mit abgestrahltem Körperschall auftreten, sind Grundlagen wie weit die Belästigung durch die Kombination "Erschütterung / abgestrahlter Körperschall" vergrössert oder veringert wird von Bedeutung.
3. Ausarbeiten eines ersten Bewertungsvorschlages zur Erfassung der Belästigung von Erschütterungen

Die dritte Zielsetzung ist nur teilweise erreicht worden. Es war geplant, basierend auf einer sehr beschränkten Datenbasis (Umfrage/Messungen) einen ersten Bewertungsvorschlag auszuarbeiten. Dieser sollte anschliessend durch eine breiter abgestützte Untersuchung verifiziert und modifiziert werden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen liessen sich aber nur die wesentlichen Eckpunkte eines Bewertungsvorschlages ableiten. Die wichtigsten Resultate der Untersuchung können wie folgt dargestellt werden:

Messtechnische Probleme:

- moderne kommerzielle Aufnehmer (üblicherweise Beschleunigungsaufnehmer, bzw. Geschwindigkeitsaufnehmer) genügen den messtechnischen Anordnungen weitgehend.
- spezielles Augenmerk ist der Ankoppelung der Aufnehmer an das Bauwerk zu schenken. Die in der Praxis verwendeten Systeme genügen der Anforderungen oft nicht. Bewährt hat sich das Ankoppelungselement gemäss DIN 4566/2: 1984.

Psychologische Bewertung

- Im allgemeinen werden Erschütterungen in Kombination mit Lärm beobachtet. Neben reinem abgestrahltem Körperschall werden oft auch durch Vibrationen ausgelöste Geräusche (Sekundärgeräusche) wahrgenommen.
- Der durch Erschütterungen belastete Bereich ist im allgemeinen wesentlich kleiner als bei Lärmbelastungen. Zudem ist die Erschütterungsbelastung eng mit einzelnen, spezifischen Quellen (z.B. spezielle Bauverfahren, Schienenverkehr etc) verbunden.
- Belästigung durch Erschütterungen tritt primär infolge Bautätigkeit und nahegelegenem Schienenverkehr auf. Erschütterungen infolge Strassenverkehr ist auf Schwerverkehr und eine im allgemeinen unebene Fahrbahnoberfläche beschränkt.
- Die Toleranzgrenze gegenüber singulären Ereignissen, wie z.B. Sprengungen oder bei Störungen von zeitlich absehbarer Dauer, wie z.B. infolge Baustellen, ist wesentlich höher als für dauernde Ereignisse oder für Ereignisse deren zeitliche Dauer unbeschränkt erscheint.
- Die Zumutbarkeitsschwelle für langdauernde Vibrationen und Quellengeräusche liegt auf dem Niveau schwach bis deutlich spürbar bzw. im Bereich kaum hörbar.

Bewertungsvorschlag

Für die Bewertung sind folgende Eckpunkte zu beachten:

1) Spürbare Erschütterung und abgestrahlter Körperschall sind getrennt zu bewerten.

   Es wird empfohlen, trotz des wissenschaftlich nachgewiesenen stärkeren Belästigungsempfinden beim gleichzeitigen Auftreten von Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall (vorwiegend bei höheren Immissionswerten) aus Einfachheits- und Praktikabilitätsgründen auf eine kombinierte Bewertung (kein Verstärkungsfaktor) der Belästigung zu verzichten.

2) Abgestrahlter Körperschall ist wegen seiner besonders unangenehmen Charakteristik eventuell strenger zu bewerten als dies bei der üblichen Lärmbelastung heute praktiziert wird (tieferer L_{eq}).

3) Die Richtwerte (nicht Grenzwerte) für spürbare Erschütterungen sollen gemäss folgenden Kriterien abgestuft werden:
   - Vorbelastung und Zielwert der Zone:
     Ruhezone bis Industriezone
   - Zeitpunkt der Einwirkung während dem Tag:
     Tag: 0600 - 2200 Uhr (höhere Werte als Nachts)
     Nacht: 2200 - 0600 Uhr
   - Dauer der Einwirkung pro Tag:
     - Dauernd und langandauernde Einwirkungen (mehr als 2 - 3 Stunden, täglich):
       Richtwerte im Bereich der Fühlbarkeitsschwelle leicht spürbar
     - Einzelereignisse von kurzer Dauer (je max. 1 bis 3 Sekunden,1 bis 3 täglich):
       Richtwerte wie 4150/2 (1992)
     - Häufig auftretende Ereignisse (mehr als 3 mal täglich) oder Einzelereignisse von längerer Dauer (mehr als 3 Sekunden bis Minuten):
       Ableiten der Beurteilungswerte über eine Energiemittelung ähnlich einem L_{eq} und zusätzlich die maximale Intensität der Einzelereignisse beschränken.
   - Absehbarkeit der totalen Einwirkungszeit (z.B. Baustellen)
     Es ist zu prüfen ob für solche Verhältnisse (z.B. beschränkte Zeit einer Baustelle, z.B. 3 bis 6 Monate) höhere Richtwerte praktikabel sind. Aus wirtschaftlichen Gründen wären angehobene Richtwerte für Baustellen zu empfehlen.

Weiteres Vorgehen

Seit Abschluss der Untersuchungen sind im Ausland namentlich durch Laboruntersuchungen Fortschritte erzielt worden. Im weiteren ist DIN 4150/2 revidiert worden. Zwar ist die neue Fassung paraktikabler als die Vorläufer der revidierten Norm, unserer Ansicht nach lässt sie aber für Erschütterungsprognoseberechnungen Sensitivitätsanalysen nur beschränkt zu (black-box Verarbeitung der Messresultate). Es ist im angesicht der Entwicklungen im europäischen Normenwesen zu prüfen, wie weit noch schweizerische Richtwerte erarbeitet werden sollen.

In jedem Fall aber ist die Zusammenarbeit mir ausländischen Stellen zu suchen, da nur mit ihnen eine genügend breite Datenbasis gefunden werden kann. Für die Ausarbeitung von allfälligen Richtwerten für die Schweiz ist eine Zusammenarbeit VSS, SBB, BUWAL, und evtl. Sprengfirmen zu suchen.

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

In der Schweiz wurde 1983 das Umweltschutzgesetz [1] eingeführt. Nach diesem Gesetz sind Lebewesen vor lästigen Einwirkungen zu schützen. Gemäss Artikel 15 dieses Gesetzes gilt dies nicht nur für Lärm- sondern auch für Erschütterungseinwirkungen.

Im Dezember 1986 wurde die Lärmschutz-Verordnung [2] herausgegeben, die sich auf das Umweltschutzgesetz abstützt. Eine Verordnung über Erschütterungsschutz wurde bis jetzt noch nicht veröffentlicht, unter anderem auch deshalb, weil die dazu benötigten wissenschaftlichen Grundlagen noch fehlen.

Der vorliegende Bericht stellt die Zusammenfassung der Resultate des zwischen 1988/ 1989 erarbeiteten Forschungsvorhabens 2/87 (Erschütterungseinwirkungen auf Menschen, Richtwerte für die Belästigung) dar und soll einige offene Fragen in diesem Problemkreis beantworten.

1.2. Problemstellung

Immissionsschutz gewinnt im Strassenbau immer mehr an Bedeutung.

Die im Juni 1979 erschienene Norm SN 640 312 "Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke" [3] legte erstmals in der Schweiz Richtwerte fest, die, wenn sie nicht überschritten werden, auch kleine Schäden an Bauwerken wenig wahrscheinlich machen. Die in der Norm enthaltenen Richtwerte sind aufgrund der seinerzeit in der Schweiz vorhandenen Daten (Forschungsprojekte 5/72 [4] und 21/74 [5]) und aufgrund der allgemeinen Erfahrung von einer Arbeitsgruppe festgelegt worden. Dabei konnten die Richtwerte in vielen Fällen höher angesetzt werden als bis dahin in der Schweiz üblich. Dies führte in der Regel zu wirtschaftlicheren Bauvorgängen. Eine revidierte Fassung der Norm SN 640 312 [6] erschien 1992. Diese gibt für kurze, hochfrequente seltene Ereignisse nochmals höhere Richtwerte, für dauernd einwirkende und erschütterungsempfindliche Bauwerke niedrige Richtwerte. Alle Richtwerte liegen dabei

aber noch mindestens 10 mal höher als die Fühlbarkeitsschwelle für Erschütterungen bei Menschen.

Infolge der immer dichteren Bebauung und der damit verbundenen wachsenden Nachbarschaft von Bewohnern mit Baustellen und Verkehrsträgern häufen sich in den letzten Jahren immer mehr die Fälle, in denen die Belästigung der Anwohner infolge Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall in den Vordergrund tritt. Der Mensch reagiert sehr empfindlich auf Erschütterungen. Starke Belästigungen können bei Körperschall und Erschütterungsintensitäten auftreten, die an Gebäuden überhaupt keine Schäden hervorrufen. Dies ist vor allem im Zusammenhang mit Verkehrseinwirkungen von Bedeutung (vergleiche Bild 1.1).

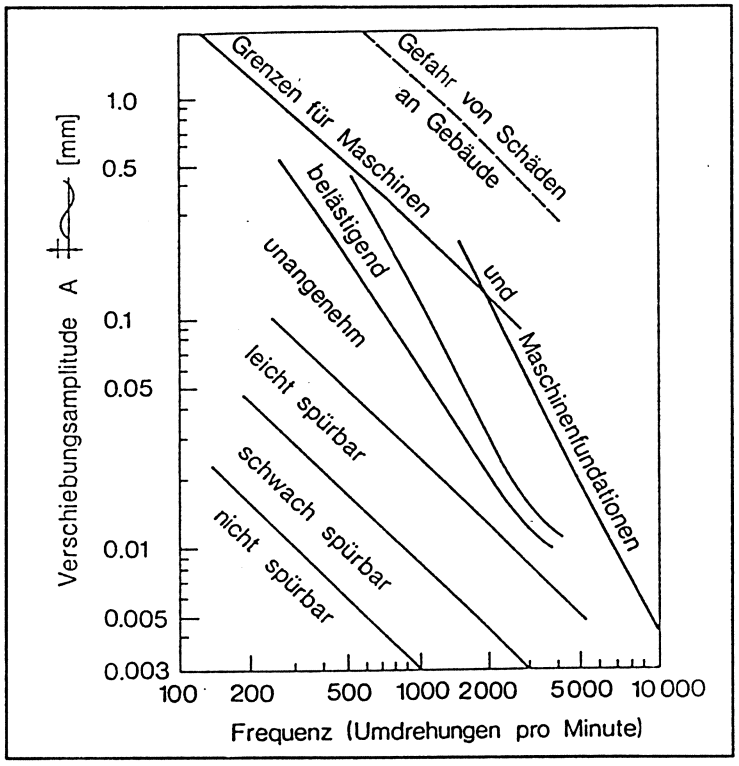


Bild 1.1 **Allgemeine Richtwerte der Wegamplitude für Erschütterungen. Gut erkennbar ist die vergleichsweise tiefe Fühlbarkeitsschwelle des Menschen.**

Aus diesem Grund wurde mit dem Forschungsauftrag 22/84 des Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartementes (EVED) der heutige Wissensstand auf dem Gebiet der Einwirkungen von Erschütterungen auf den Menschen zusammengestellt.

Die Resultate dieser Arbeit sind im Schlussbericht 22/84 [7] zusammengestellt, hier seien sie nur kurz erwähnt:

- Die Problemstellung ist sehr komplex und deshalb schwierig anzupacken. Die Belästigung wird sowohl durch physikalische sowie psychologische Komponenten beeinflusst. Beurteilungskriterien haben einerseits die "menschlichen" Faktoren zu erfassen, andererseits die Art und Weise wie das Immissionsereignis gemessen wird zu berücksichtigen. Die Belästigungsgrenzen sind deshalb auf verschiedenen Untersuchungsebenen, mit verschiedenen Methoden zu erarbeiten.

- Sowohl im Bereich Grundlagen wie auch im Bereich "Umsetzen von Kenntnissen in die Baupraxis" sind noch Fragen offen.

- Im Ausland, namentlich in Deutschland und Grossbritannien, sind grosse Anstrengungen unternommen worden, Belästigungsgrenzen zu definieren und zu quantifizieren.

- Mit den führenden deutschen Stellen (Dr. Splittgerber, Dr. Beizer, Dr. Kastka), die massgeblich an der Erarbeitung der DIN-Normen beteiligt sind, wurde Kontakt aufgenommen und grundsätzlich eine Kooperation vereinbart.

Die bisherigen Arbeiten vernachlässigen folgende wesentlichen Aspekte:

- Kombination von Erschütterungen und Lärm. Bei den meisten praktischen Problemen treten Erschütterungen und Lärm gemeinsam auf. Die Bedeutung dieser Tatsache ist generell anerkannt. Dabei stehen drei Fragekreise im Vordergrund:

  - Gegenseitige Beeinflussung der Wahrnehmungsschwelle von Lärm- und Erschütterungseinwirkungen. Wird sie erhöht oder erniedrigt?

  - Beurteilungskriterien: namentlich beim infolge von Erschütterungen abgestrahlten sekundären Luftschall stellt sich die Frage, ob er wegen seinem speziellen Frequenzinhalt (vorwiegend tiefe Frequenzen) und seiner Nichtlokalisierbarkeit im Raum anders als der übrige Lärm beurteilt werden sollte.

  - Messtechnische und auswertungstechnische Probleme bei der Messung der einzelnen Grössen und der Ermittlung von Beurteilungswerten.

Obwohl es international unbestritten ist, die Ermittlung der Belästigung des Menschen durch Erschütterungs-Messungen im Aufenthaltsraum durchzuführen, bestehen ausführungstechnisch verschiedene Möglichkeiten. Die Messanordnung und die Messwertverarbeitung haben einen grossen Einfluss auf die resultierende Bewertungsgrösse. Damit eine einheitliche Beurteilung eines Ereignisses möglich ist, muss daher der Messvorgang und die Messwertaufbereitung genau definiert werden.

Aufgrund der Resultate des Forschungsprojektes 22/84 ergibt sich folgendes Vorgehen:

- Ermittlung der Abhängigkeit der Wahrnehmungsschwelle (Erschütterungen) von gleichzeitig wirkenden Lärmimmissionen. Dieses Projekt soll durch das Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie der ETHZ mittels Nationalfondsforschungskrediten bearbeitet werden.

- Psychologische Bewertung der Erschütterungen (Belästigung). Dieser Aspekt wird durch Dr. Kastka, Medizinisches Institut für Umwelthygiene der Universität Düsseldorf bearbeitet und durch deutsche Forschungsgelder finanziert. Grundsätzlich werden Methoden angewandt, die sich bei der Beurteilung von Lärmimmissionen bewährt haben. Die Resultate werden sowohl im Nationalforschungsprojekt des IHA, wie auch im vorliegenden Projekt überprüft.

- Praktische Probleme des messtechnischen Erfassens der Erschütterungen und der Signalverarbeitung und deren Einfluss auf die Bewertungsgrössen. Dieser Aspekt soll im vorliegenden Bericht erarbeitet werden.

- Bewertungsvorschlag zur Erfassung der Belästigung von Erschütterungen bei gleichzeitig vorhandenem abgestrahlten Körperschall. Dieser Aspekt umfasst die Synthese obiger Punkte. Die vorliegende Arbeit gibt erste Hinweise.

1.3. Auftrag

In der vorliegenden Arbeit sollen die praktischen Probleme bei der messtechnischen Erfassung von Erschütterungen und bei der Signalverarbeitung erkannt und deren Einfluss auf die Bewertungsgrössen dargestellt werden.

Die Minimalanforderungen an eine Messkette sollen formuliert werden, damit zuverlässige und vergleichbare Messungen garantiert sind.

Ein erster Bewertungsvorschlag zur Erfassung der Belästigung von Erschütterungen bei gleichzeitigen Lärmeinwirkungen soll skizziert werden. Dieser Aspekt beinhaltet die Tatsache, dass die Wahrnehmungsschwelle und die Belästigung durch Erschütterungen von gleichzeitig wirkendem Lärm beeinflusst wird.

1.4. Aufbau und Gliederung des vorliegenden Berichtes

Der vorliegende Bericht ist wie folgt aufgebaut:

Im Kapitel 2 wird das Vorgehen zur Lösung der Problemstellungen erläutert.

Im Kapitel 3 wird die physikalische Seite der Problematik dargestellt. Dazu gehören eine Beschreibung der Messtechnik mit Minimalanforderungen an die Geräte und eine Untersuchung der Quellen. Die Messresultate werden kommentiert.

Kapitel 4 stellt die psychologische Seite des Problems dar. Dazu gehören die Beschreibung des Fragebogens mit den Resultaten der Befragungen.

Kapitel 5 leitet aus den Untersuchungsergebnissen die massgebenden Eckpunkte von Richtwerten zur Bewertung der Belästigung durch Erschütterungen ab.

Im Kapitel 6 wird das weitere Vorgehen vorgeschlagen.

2. Vorgehen und Methodik

Grundsätzlich kann der Einfluss von Immissionen auf den Menschen auf zwei Arten erfasst werden. Einerseits können die Einwirkungen in einem Labor simuliert werden, indem Versuchspersonen künstlichen Signalen - wie Erschütterungen und Lärm - ausgesetzt werden. Andererseits können mit einer Feldstudie die physikalischen und psychologischen Gegebenheiten erfasst werden. Eine Feldstudie beruht auf der Durchführung von Lärm- und Erschütterungs-Messungen in Wohnungen zur Erfassung des physikalischen Zustandes und einer Fragebogenaktion zur Erfassung der psychologischen Daten. Die vorliegende Arbeit basiert auf einer Feldstudie.

Parallel zu dieser Arbeit wurde an der ETH Zürich, am Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie eine Laborstudie, die zum Teil auf den vorliegenden Feldmessungen beruht, durchgeführt (Stärke der Einwirkungen).

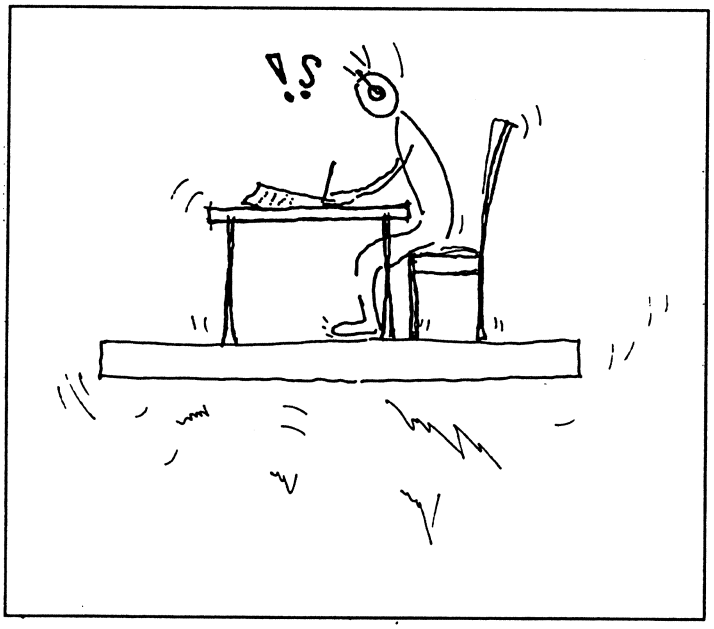


Bild 2.1 Erfassen der Belästigung mit einer Versuchsperson, welche auf einem Schütteltisch sitzt. Über Kopfhörer wird sie einer zusätzlichen Lärmbelastung ausgesetzt. Sie führt verschiedene Tätigkeiten aus und bewertet die erzeugte Störung.

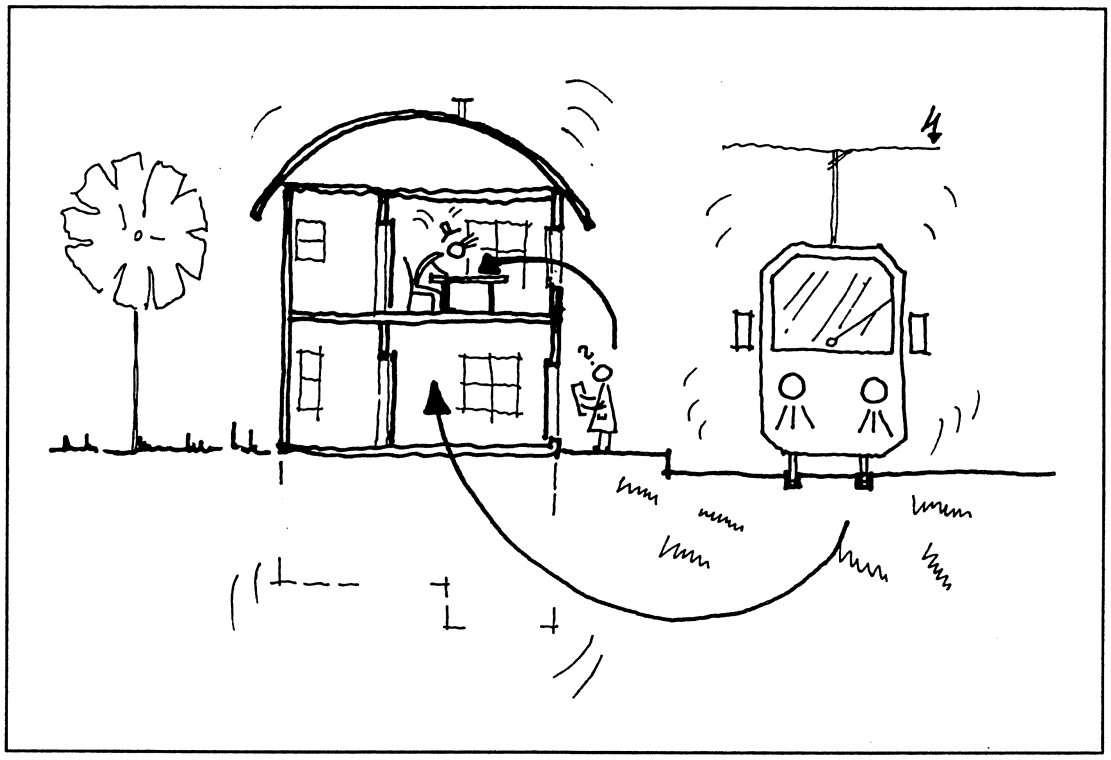


Bild 2.2 Erfassen der Belästigung mittels einer Feldstudie. Die kombinierte Lärm- und Erschütterungsbelastung wird gemessen und mittels Fragebogen bewertet. Es ist besonders darauf zu achten, dass der direkt einwirkende Luftschall wenn möglich vom abgestrahlten Körperschall getrennt erfasst wird.

Die vorliegende Arbeit basiert auf den Resultaten der Zusammenarbeit eines Psychologen, von Bauingenieuren und Elektroingenieuren.

Die vorgeschlagenen Eckpunkte des Bewertungsvorschlages entstanden aufgrund von Messungen und Befragungen in fünf typischen Immissionsgebieten:

- Strassenverkehr (Strassenbahn und Schwerverkehr)
- Eisenbahn
- Rammarbeiten (Spundwände)
- Verdichtungsarbeiten (Walzen)
- Immissionen aus einem Tunnel

Für die physikalische Beschreibung der Messignale werden die folgenden charakteristischen Grössen beigezogen:

- Häufigkeit der Einwirkungsgrösse
- zeitlicher Verlauf der Einwirkungsgrösse
- Frequenzinhalt des Signales
- Verhältnis von Lärmintensität zur Erschütterungsstärke

Besonderes Gewicht wird auf die Beurteilung von häufigen, aber nicht dauernd einwirkenden Ereignissen (z.B. Lastwagenverkehr, Schienenverkehr) gelegt. Diese wurden in den bisherigen Arbeiten stark vernachlässigt, obwohl gerade diese, bezüglich Belästigung, am schwierigsten zu bewerten sind. Allerdings konnten auch mit dieser Studie die Kenntnisslücken nicht in der gewünschten Tiefe geschlossen werden.

3. Physikalische Daten

In diesem Kapitel werden zwei wichtige Grundlagen zur Erfassung der Belästigung dokumentiert. Einerseits werden die Minimalanforderungen an Messketten definiert und andererseits werden die Messungen in den typischen Immissionsgebieten beschrieben.

3.1. Erschütterungs-Messeinrichtungen

Da die Messvorrichtung einen grossen Einfluss auf die Messresultate hat, soll in diesem Abschnitt auf deren Minimalanforderungen eingegangen werden. Deshalb wurden vier verschiedene Messketten verglichen und ausgewertet. Die genauen Angaben zu den Untersuchungen sind im Anhang 1 enthalten. Zusammenfassend sind die wichtigsten Punkte hier aufgeführt.

3.1.1. Elemente einer Messkette

Die Erschütterungsmesseinrichtung setzt sich in der Regel aus folgenden Elementen zusammen (nach DIN 45669/2 [8]):

- **Ankoppelungselement** (1)
  Die Schwingungsaufnehmer müssen so angebracht werden, dass im Bereich der Arbeitsfrequenz des Schwingungsmessers die Bewegung des Messobjektes unverfälscht auf die Messaufnehmer übertragen wird.
- **Schwingungsaufnehmer** (1)
  Der eigentliche Signalempfänger wird fest mit dem Ankoppelungselement verbunden.
- **Ladungsverstärker** (2)
- **Tief- und Hochpassfilter** (3)
- **Registriergerät** (4)
  Für die Aufzeichnung der Signale kommen Drucker, magnetische oder optische Speichermedien in Frage.

- **Auswertungsgerät** (5)
  Für die Auswertung der Signale werden Geräte, die Methoden der Messdatenauswertung zulassen, benötigt.

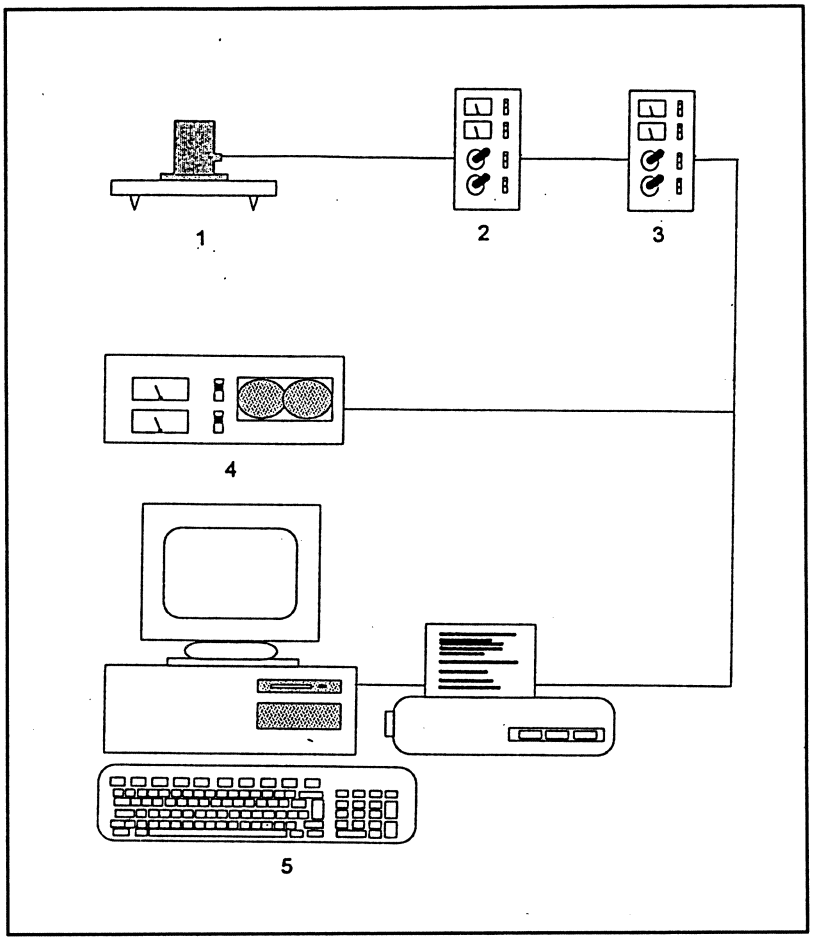


Bild 3.1 Elemente einer Messkette

Legende:

1 Aufnehmer auf Ankopplungselement
2 (Ladungs-)Verstärker
3 Tief-/Hochpassfilter
4 on-line Registrierung
5 EDV - Registrierung für einfache Auswertung

3.1.2. Vergleich verschiedener Messketten

Um die Minimalanforderungen an die Messkette festzulegen, wurden die Messresultate von vier verschiedene Messketten miteinander verglichen. Im Labor wurde eine Betonplatte auf einer gegen Schwingungen isolierenden Gummimatte auf der ganzen Fläche gelagert. Die Platte wurde mit einem Schwingerreger angeregt, der am Rand der Platte stand. Als Referenz-Aufnehmer diente ein mit der Platte starr verbundener Beschleunigungsaufnehmer. Wenn im folgenden von Resonanzerscheinungen die Rede sein wird, wird der Unterschied der Messsignale zwischen diesem Referenzaufnehmer und dem Test-Aufnehmer angesprochen.

In einer ersten Phase wurden die vier verschiedenen Test-Aufnehmer nacheinander an der gleichen Stelle, unmittelbar neben dem Referenz-Aufnehmer auf die Platte geklebt. Es stellte sich heraus, dass alle Aufnehmer und Verstärker bei gleicher Bewegung das gleiche Resultat zeigten: Die Amplituden im Frequenzbereich entsprachen sich. Das Resultat erstaunt eigentlich nicht, denn die Aufnehmer wurden so ausgewählt, dass sie im erforderlichen Bereich korrekte Resultate liefern. Es darf geschlossen werden, dass kommerziell erhältliche Aufnehmer der oberen Qualitätsstufe die gestellten Anforderungen erfüllen.

In den nächsten Phasen wurde der Einfluss verschiedener in Wohnräumen vorkommenden Bodenbeläge überprüft: Ein Parkettelement, ein Linolboden und ein Spannteppich wurden auf die Betonplatte nahe beim Referenzaufnehmer verlegt. Mit den Test-Aufnehmern wurde nun auf diesen Bodenbelägen gemessen, die Aufnehmer wurden nicht mehr verklebt, sondern mit einem Ankoppelungselement ('Böckli') - wie es bei Messungen in Wohn- und Büroräumen üblich ist - auf den Boden gestellt. Der Vergleich mit dem Referenz-Aufnehmer lässt dann auf die Qualität dieses Ankoppelungselementes schliessen.

Generell lassen sich die folgenden Aussagen machen:

- Je weicher die Oberfläche ist (z. B. Spannteppiche), desto mehr muss auf die Ankoppelung der Aufnehmer an die Struktur geachtet werden.

- Spitze Füsse ("Zirkelspitzen") ermöglichen ein Durchstossen der weichen Oberfläche und verhindern damit weitgehend Resonanzerscheinungen.

- Die Aufnehmer müssen im Bereich von 3 bis 80 Hz eine lineare Charakteristik zeigen.

Die Versuchs-Serie zeigte, dass ein Ankoppelungselement nach DIN 45669/2:1984 [8] diese Bedingungen weitgehend erfüllt.

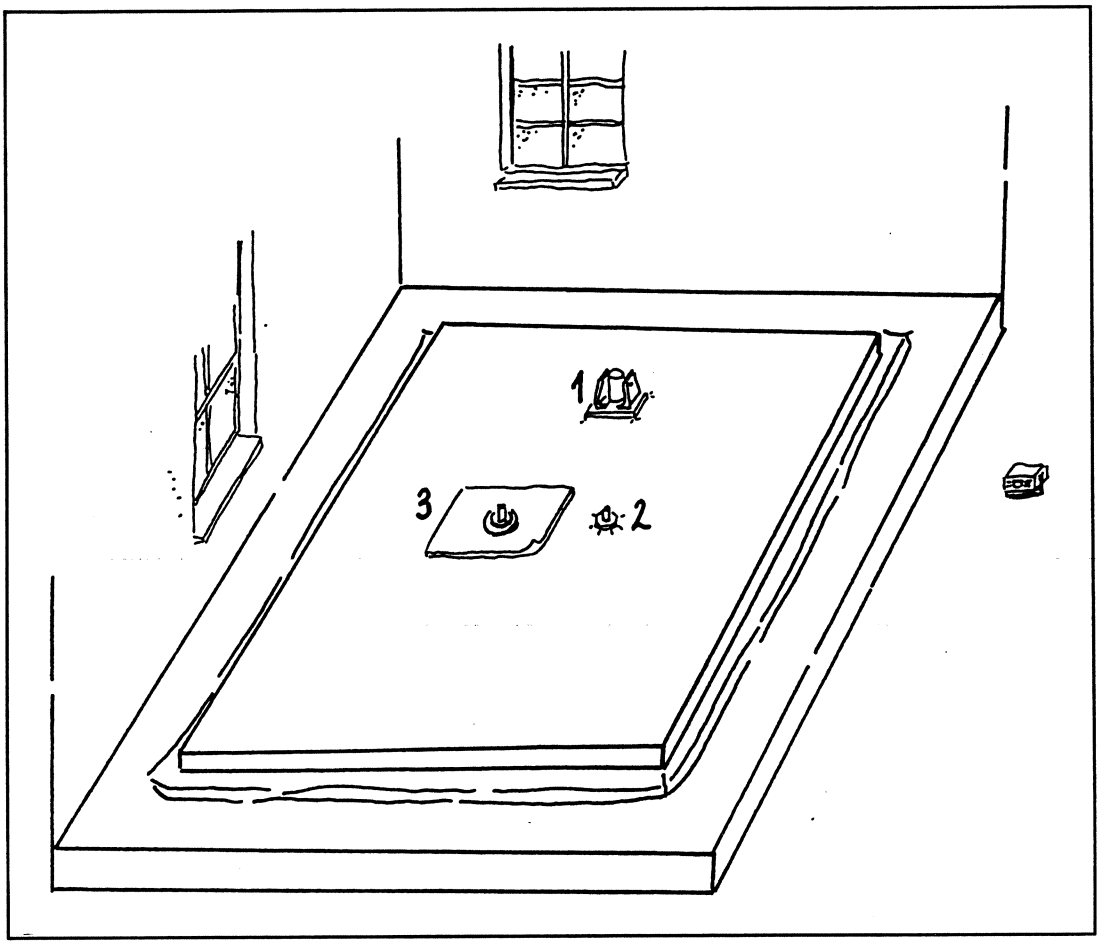


Bild 3.2 Versuchsanordnung für den Vergleich verschiedener Messketten auf einer Betonplatte. 1 Schwinger 2 Referenzaufnehmer 3 Testaufnehmer auf verschiedenen Bodenbelägen

3.2. Messungen

In diesem Abschnitt werden die Resultate der Messungen kurz dargestellt und kommentiert. Der Anhang A2 enthält die Unterlagen über die Messgebiete und eine Zusammenfassung der massgebenden Immissionswerte.

3.2.1. Strassenbahnen

An der Forchstrasse in der Stadt Zürich wurden Messungen von Strassenbahn-Immissionen durchgeführt. Diese Strasse ist eine der am stärksten durch den Individualverkehr belasteten Strassen in der Schweiz, ungefähr alle 2 bis 3 Minuten ist zusätzlich mit einer Tramvorbeifahrt zu rechnen. Lärm- und Erschütterungsimmissionen wurden gleichzeitig aufgezeichnet. Dabei waren die Fenster geschlossen. Bild 3.3 zeigt die Situation und den Messort. In Bild 3.4a ist ein typischer Zeitverlauf einer Tramvorbeifahrt (Tram 2000 der Städtischen Verkehrsbetriebe Zürichs) dargestellt, Bild 3.4b zeigt die entsprechende Frequenzanalyse. Die grössten Amplituden liegen im Bereich von 40 bis 80 Hz. Bild 3.5b zeigt die Frequenzanalyse einer Vorbeifahrt der Forchbahn, einer Schmalspur-Vorortsbahn, die innerorts das Trasse der Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich benützt. Die Immissionen sind zwar deutlich schwächer, dafür aber über einen grösseren Frequenzbereich verteilt.

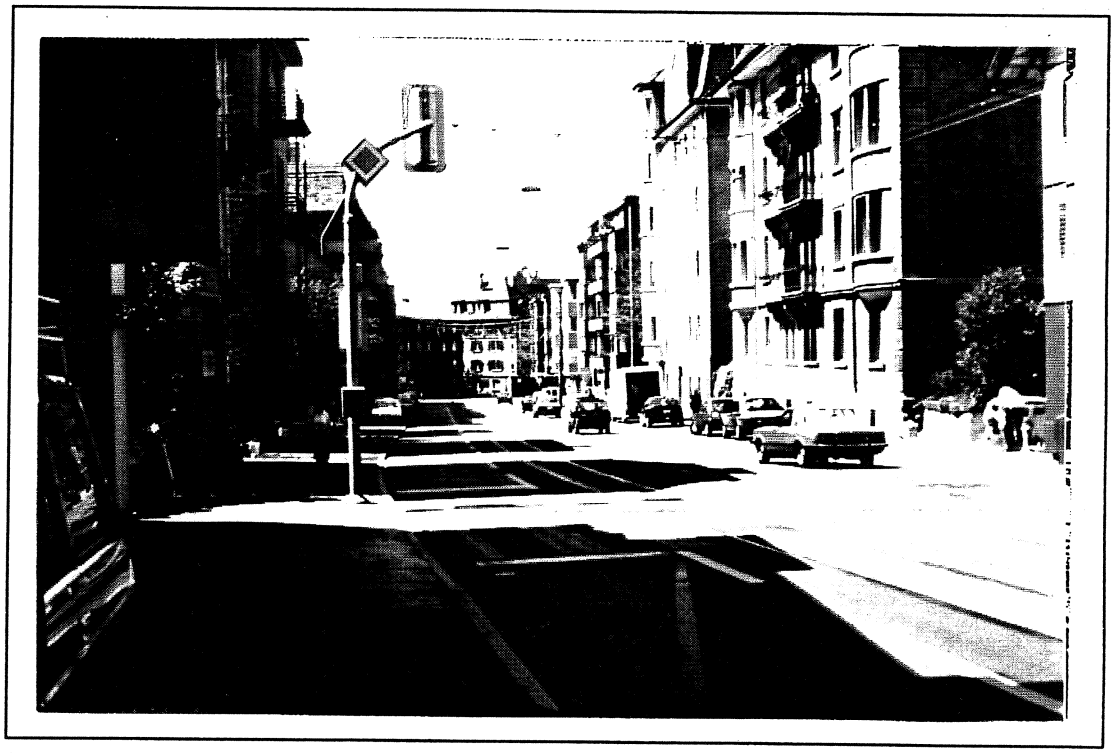


Bild 3.3 Messgebiet der Strassenbahn-Immissionen

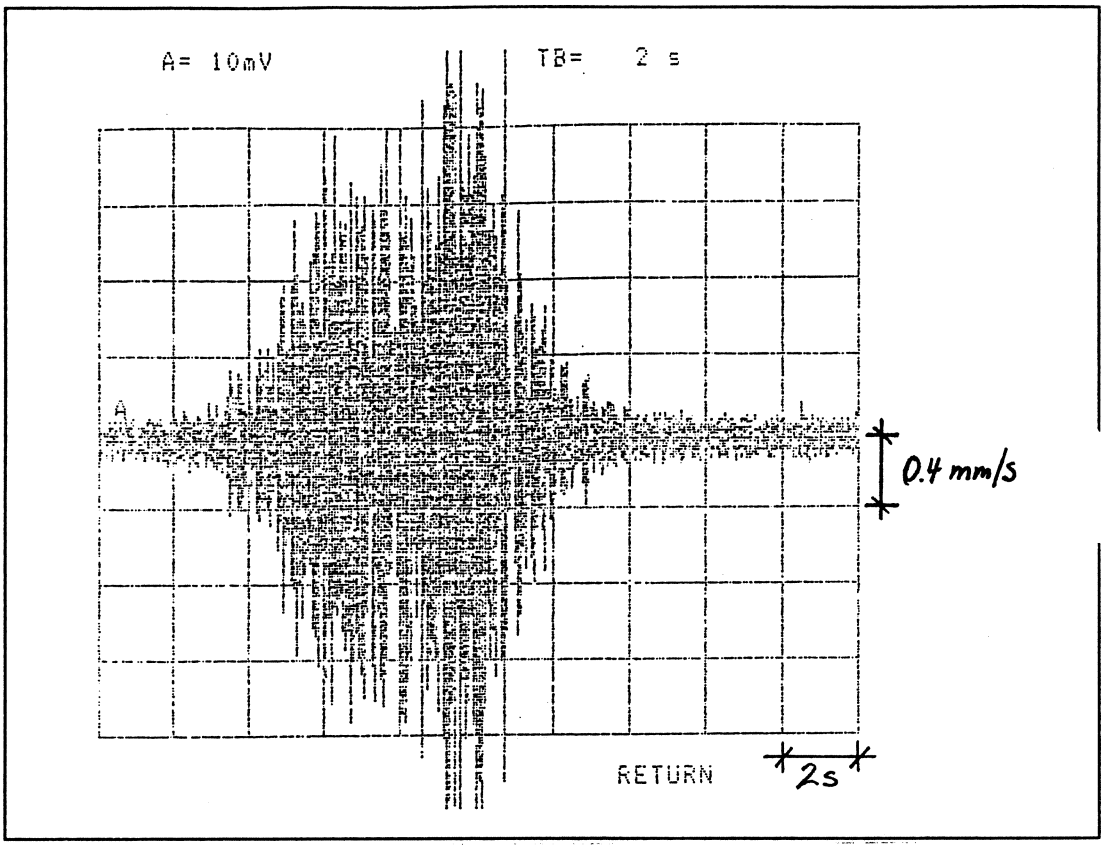


Bild 3.4a Zeitverlauf einer Strassenbahnvorbeifahrt

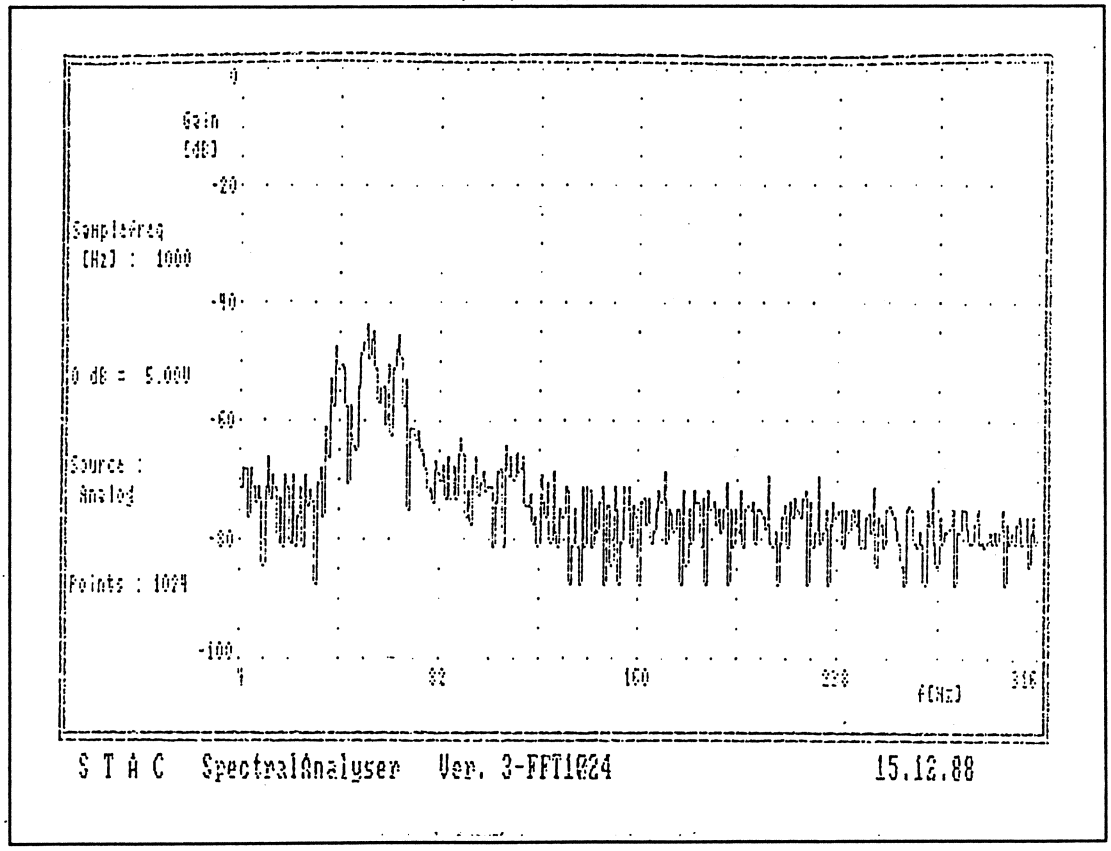


Bild 3.4.b Frequenzanalyse der Strassenbahn-Immissionen

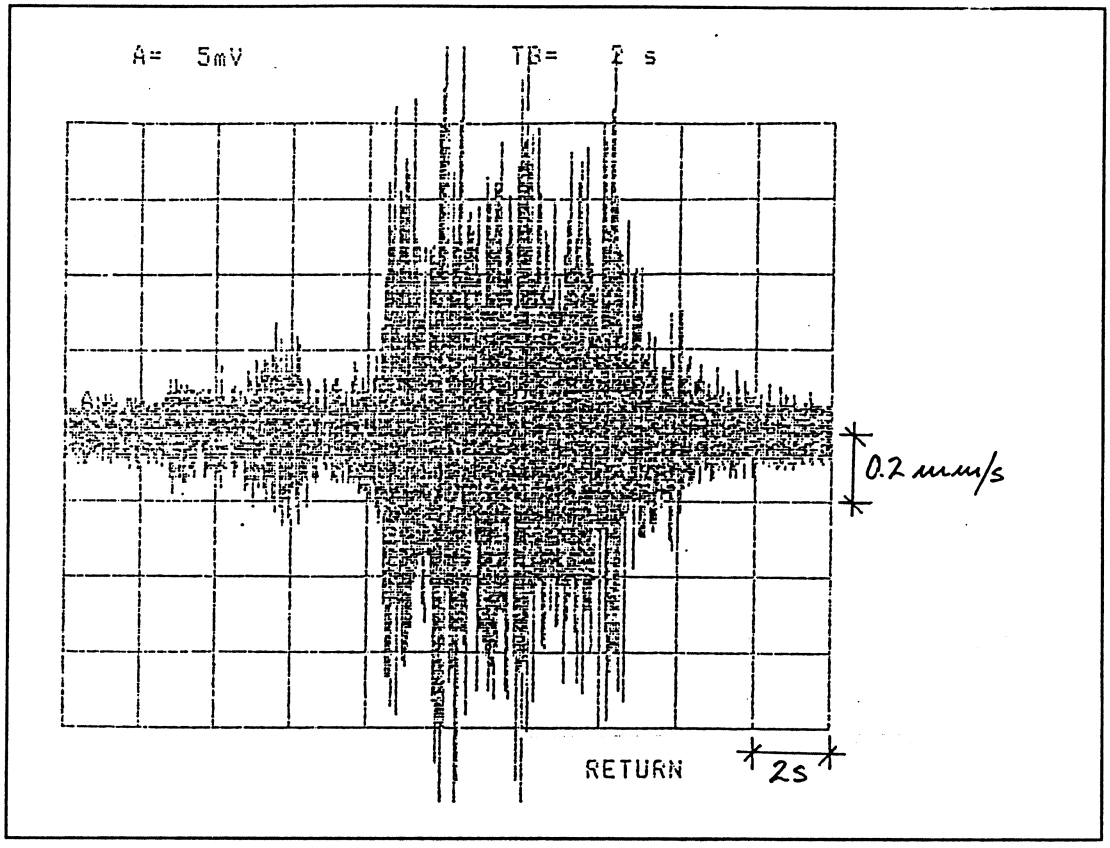


Bild 3.5a Zeitverlauf einer Forchbahnvorbeifahrt

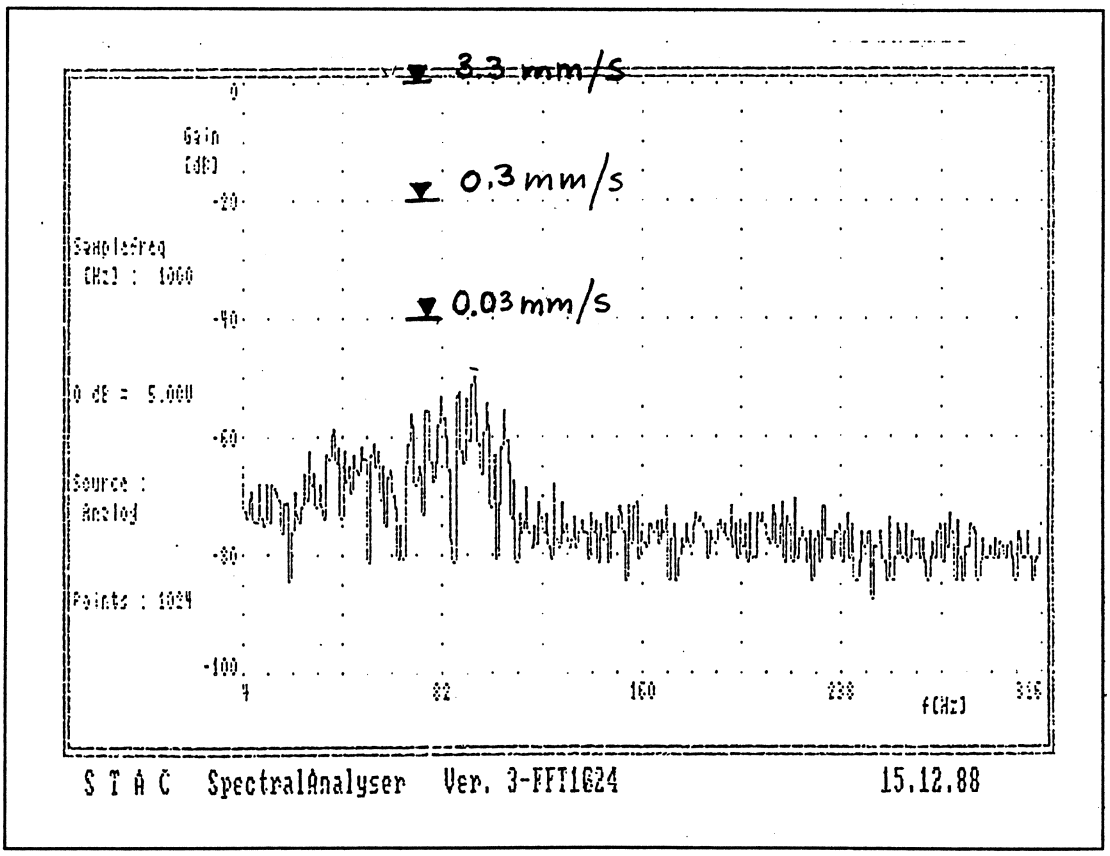


Bild 3.5b Frequenzanalyse der Forchbahn-Immissionen

3.2.2. Schwerverkehr

Die durch den Schwerverkehr verursachten Immissionen wurden in der gleichen Wohnung wie die Strassenbahn-Immissionen aufgezeichnet. Bild 3.6a zeigt die Vorbeifahrt eines Lastenzuges (Zugfahrzeug mit Anhänger). Die entsprechende Frequenzanalyse (Bild 3.6b) zeigt, dass das Ereignis breitbandige und relativ schwache Immissionen erzeugt.

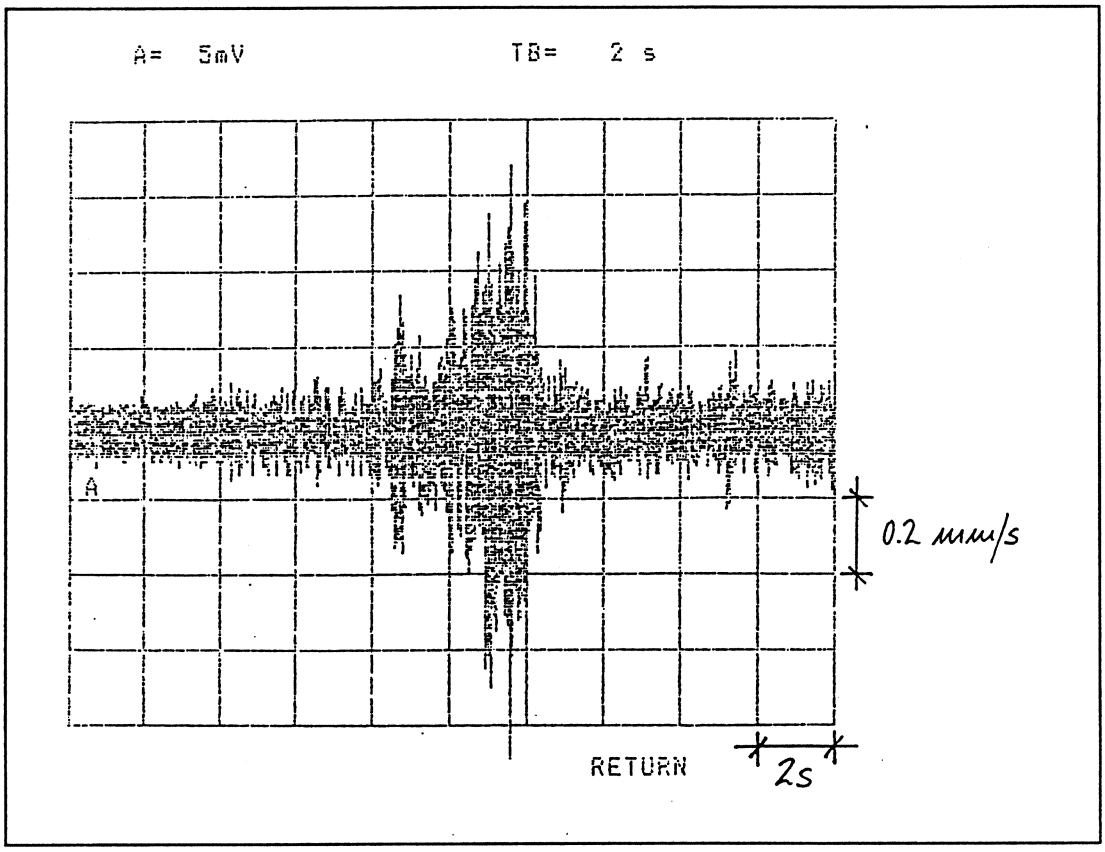


Bild 3.6a Zeitverlauf einer Lastwagen-Vorbeifahrt

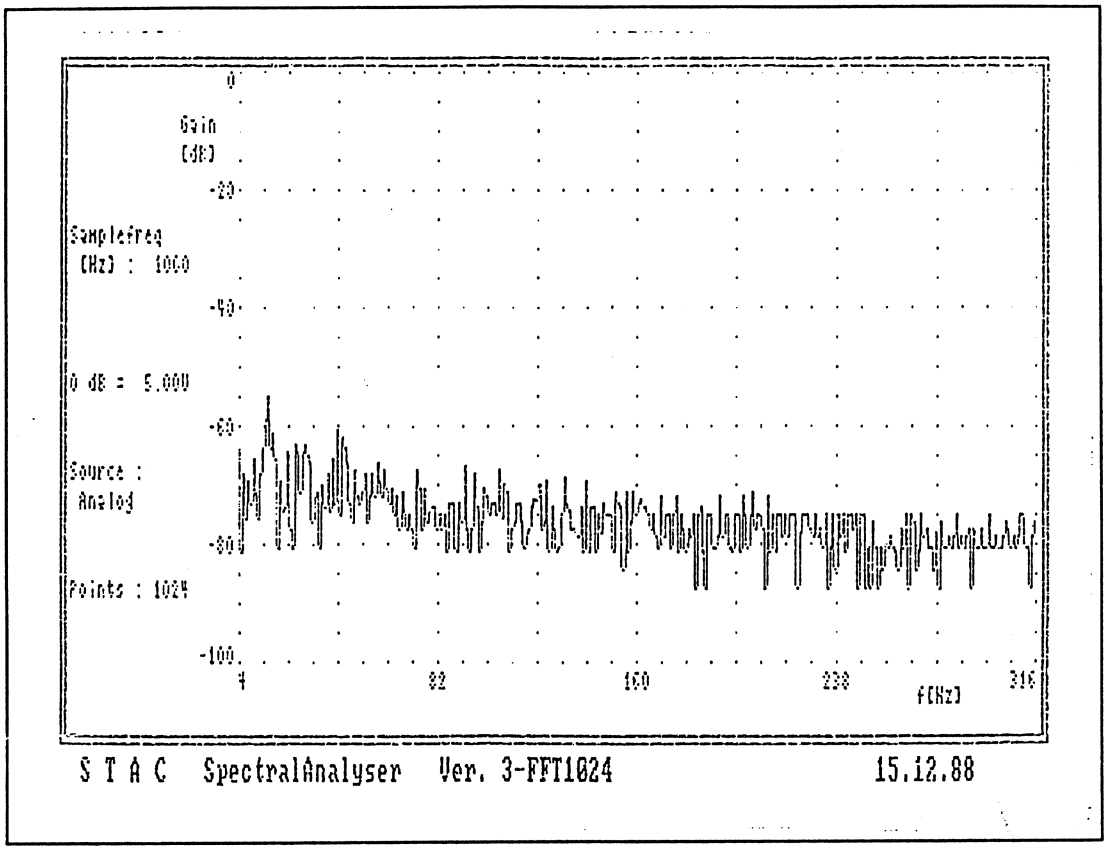


Bild 3.6b Frequenzanalyse einer Lastwagen-Vorbeifahrt

3.2.3. Eisenbahnen

Als Beispiel für eine stark befahrene Eisenbahnstrecke wurde die Intercity-Linie Zürich-Winterthur im innerstädtischen Bereich von Winterthur gewählt. Diese Linie wird auch sehr häufig von Güterzügen benutzt. Es wurde gleichzeitig an verschiedenen Stellen auf verschiedenen Bodenbelägen gemessen. Die Bilder 3.7a und b zeigen den typischen Zeitverlauf der Beschleunigung während der Vorbeifahrt eines Güterzuges und einer Intercity-Komposition. In den Bildern 3.7c und d sind die entsprechenden Frequenzanteile in einem Frequenz-Amplituden-Diagramm dargestellt. Die Hauptfrequenz liegt bei 50 Hz. Es handelt sich dabei nicht um ein einzelnes sinusförmiges Signal, sondern um eine breitbandige Einwirkung.

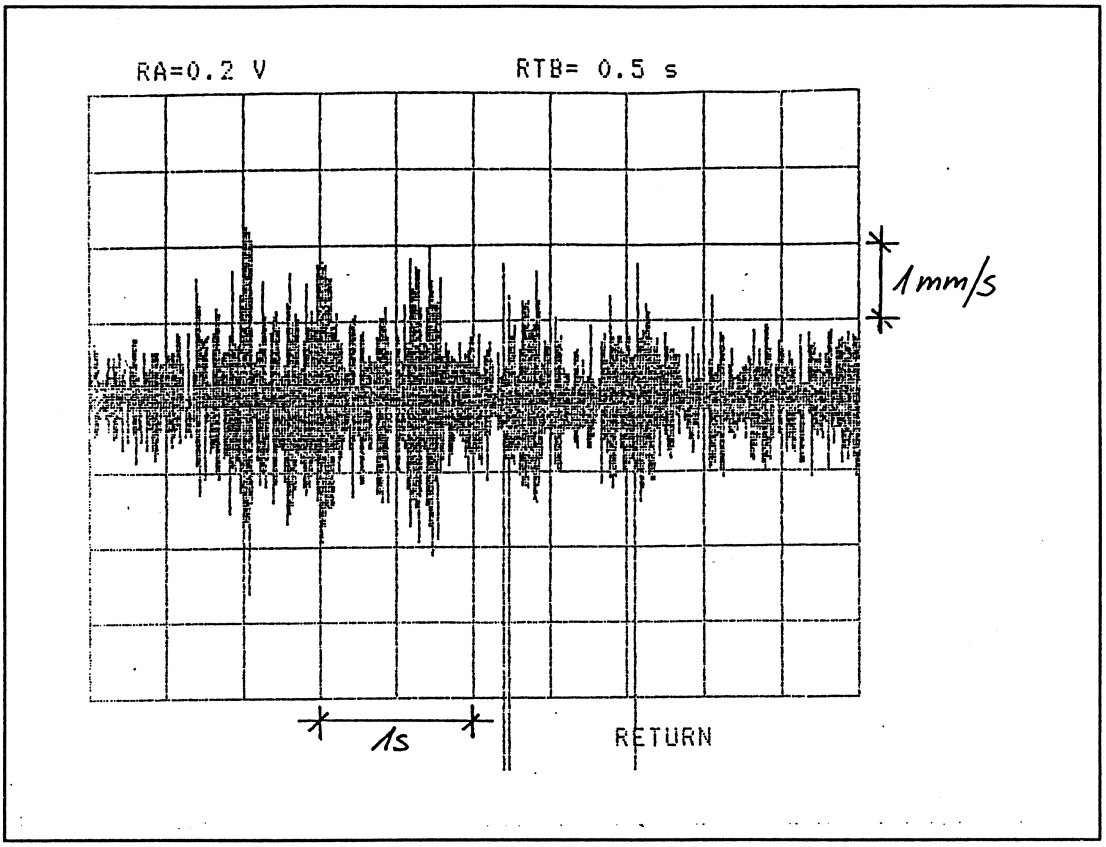


Bild 3.7a Zeitverlauf einer Güterzug-Vorbeifahrt

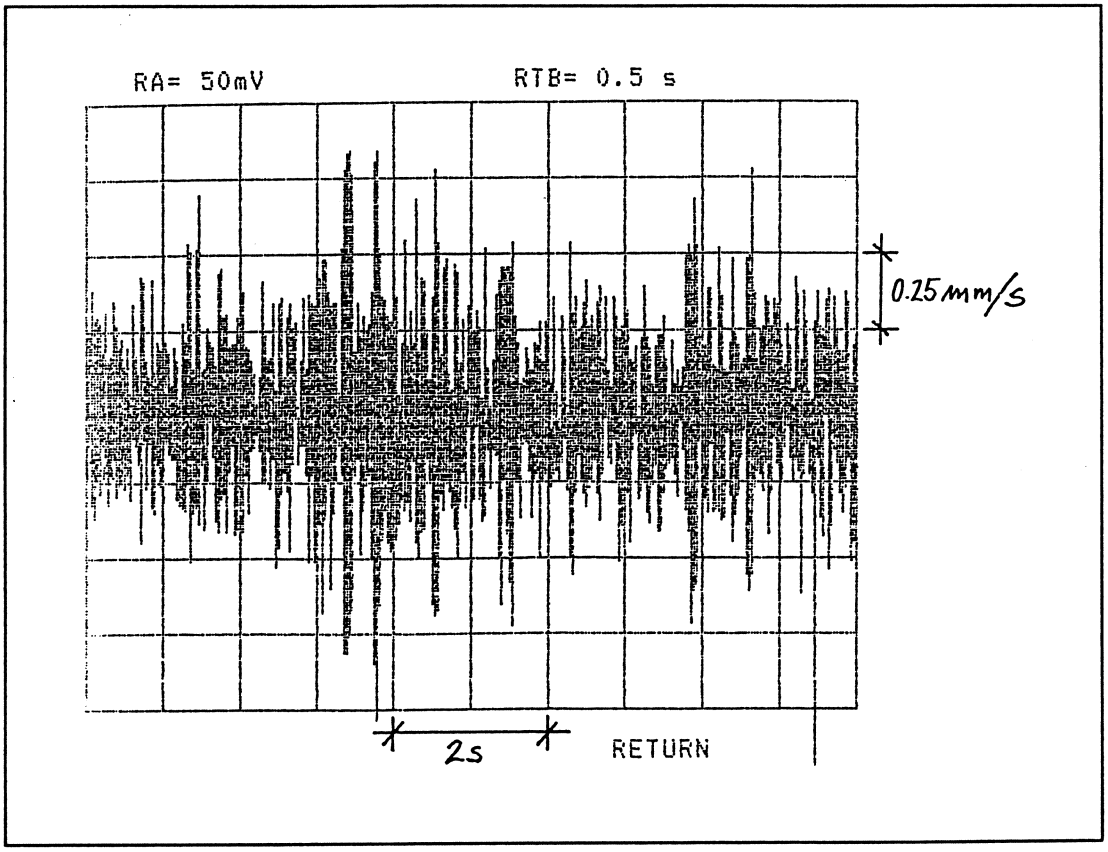


Bild 3.7b Zeitverlauf einer Intercity-Vorbeifahrt

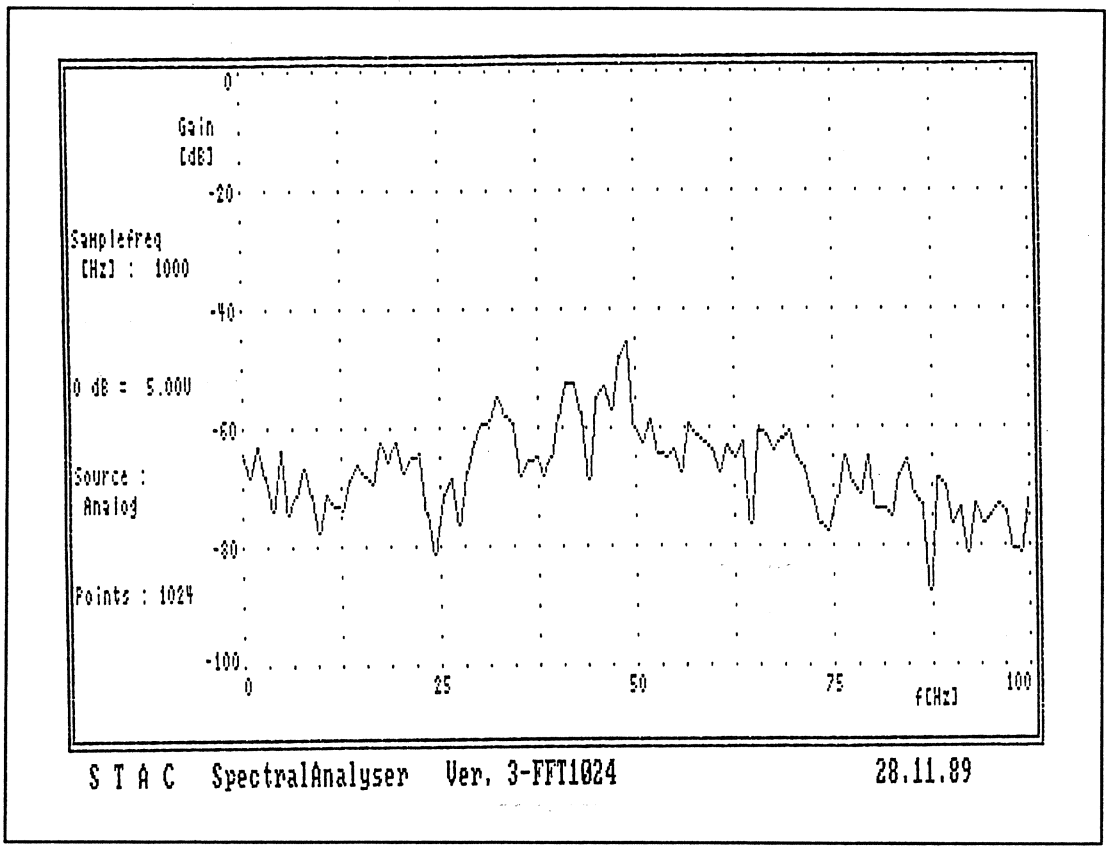


Bild 3.7c Frequenzanalyse einer Güterzug-Vorbeifahrt

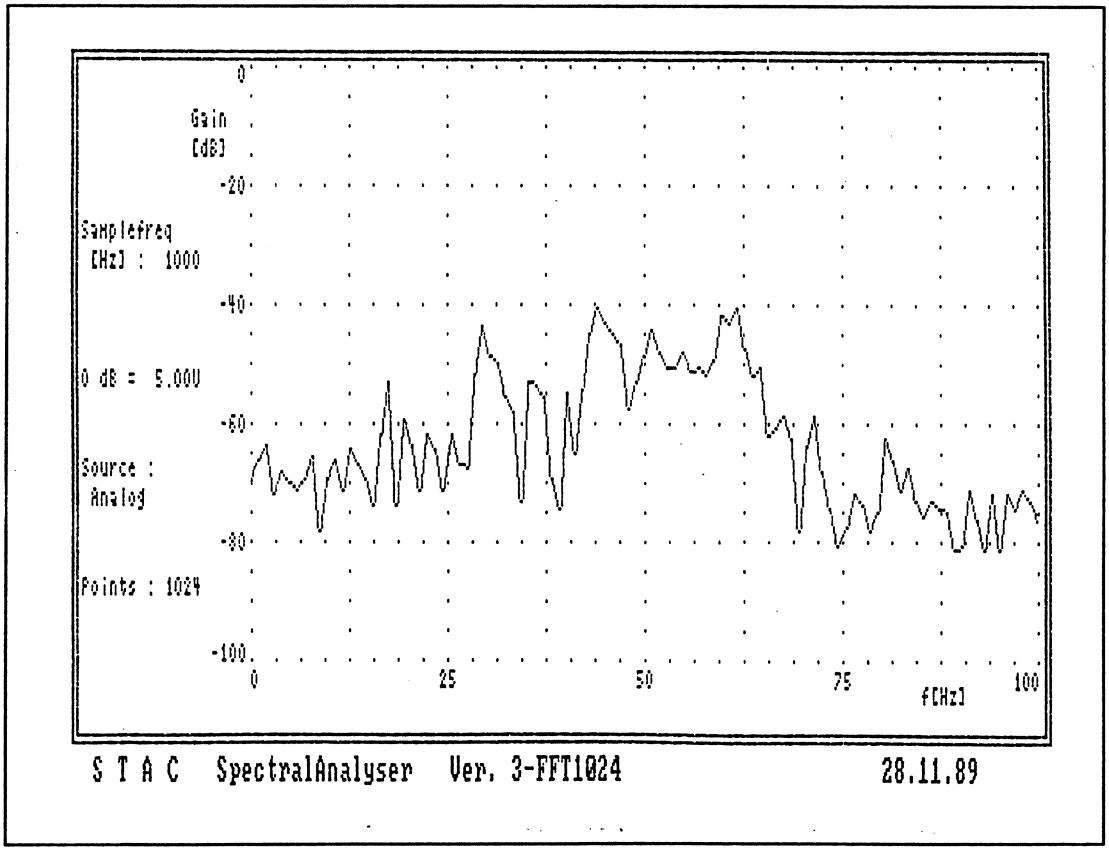


Bild 3.7d Frequenzanalyse einer Intercity-Vorbeifahrt

3.2.4. Rammarbeiten

Die typischen Frequenzen bei Rammarbeiten liegen im Bereich zwischen 20 und 23 Hz. Da sie mit einem einfacheren Messgerät erfasst wurden, können sie nicht als Frequenzverlauf dargestellt werden (Zeitverlauf gespreizt, dominierende Frequenz durch Auszählen der Maxima ermittelt).

4. Psychologische Untersuchungen zur Belästigungswirkung von Geräusch- und Erschütterungsimmissionen

Geräusche und Erschütterungen sind zwei Reize, die in unserer technisierten Umwelt häufig gemeinsam auftreten. Eisenbahnen, schwere LKW und grosse Maschinen emittieren nicht nur Schall, sondern lösen auch Vibrationen aus, die sich über das Erdreich und die Fundamente bis in die Wohnungen ausbreiten. In Laborversuchen (vergl. z.B. [10], [11], [12]) wurde festgestellt, dass bei der Beurteilung der Lästigkeit von Geräuschen gleichzeitig auftretende Erschütterungen die Reaktion verstärken. Dies gilt insbesondere für niedrige Innenraumpegel, wie sie in Wohnungen nach Durchführung von Schallschutzmassnahmen zu beobachten sind. Wird nicht nur nach dem Geräusch gefragt, sondern nach dem Gesamtreiz, so ist der Anteil in der Beurteilung, der Belästigung, die durch die Vibrationen begründet wird, noch höher.

Die Laborsituation ist nicht ohne weiteres auf das Feld zu übertragen. Darum wurde eine Felduntersuchung durchgeführt, mit der zunächst einmal qualitativ geprüft werden sollte, in welchem Umfang die Anwohner belasteter Gebiete Erschütterungen und Geräusche verschiedener Quellen wahrnehmen und zu welchen Belästigungsreaktionen diese führen.

Die nachfolgenden Resultate basieren auf den Fragebogenauswertungen des VSS-Projektes und einer Untersuchung der Universität Düsseldorf im Raum Düsseldorf. Beide Untersuchungen wurden mit vergleichbaren Fragebogen durchgeführt. Die Fragebogenerhebungen wurden in Gebieten durchgeführt, die durch verschiedene Quellen (Strassenverkehr: LKW und Strassenbahn, Eisenbahn: Tunnel und oberirdisch, Gewinnsprengungen; (nur Deutschland) und Baustellen) offensichtlich belastet sind oder waren. Dargestellt sind im Text die generellen Resultate beider Untersuchungen, die Abbildungen umfassen jedoch nur die schweizerische Untersuchung.

Bei diesen Untersuchungen handelt es sich primär um sozialpsychologische Studien, in denen zunächst nur geprüft werden sollte, wie die Reaktionen der Anwohner auf die beiden Stimuli Geräusch und Erschütterung aussehen. Aus diesem Grunde wurde auf die sehr aufwendige Messung der individuellen Belastung durch diese beiden Reize in der deutschen Untersuchung ganz verzichtet; in der schweizerischen wurden weitgehend nur stichprobenartige Messungen durchgeführt.

Für die Erhebungen wurden Stichproben ausgewählt, die durch die Quellen Strassenverkehr (schwere LKW und Strassenbahnen), Eisenbahn (ober- und unterirdisch, Güter- und Personenverkehr), Sprengungen (nur Deutschland) und Baustellen (Rammarbeiten) belastet werden bzw. wurden.

Je Gebiet wurden zwischen 14 und 20 Anwohner durch Interviewer mit einem standardisierten Fragebogen (Anhang 3) befragt. Der Fragebogen enthielt verschiedene Fragen zu Stärke, Belästigung und Zumutbarkeit der Erschütterungen und des Lärms. Ergänzend wurden die Wohndauer, die Einschätzung der Lebensqualität im Wohngebiet und des eigenen Gesundheitszustandes erfragt.

Durch Erschütterungen ausgelöste Geräusche (z.B. Fensterklirren) werden im folgenden mit Sekundärlärm, quellenspezifische Geräusche, welche in Verbindung mit der die Erschütterung auslösenden Quelle auftreten, mit Quellenlärm bezeichnet.

Für die hier im Text vorgestellten Ergebnisse werden die einzelnen Gebiete zu Gruppen entsprechend den Emittenten zusammengefasst. Es sind dies:

- **Strassenverkehr**: Gebiete mit Belastung durch schwere LKW und Strassenbahnen, die Verkehrsbelastung ist unterschiedlich (4 Stichproben, n = 75).

- **Eisenbahnen**: Bahnen mit reinem Güterverkehr, reinem Personenschnellverkehr (IC u.ä.) sowie gemischten Aufkommen. Zwischen ober- und unterirdischer Streckenführung wird zunächst nicht unterschieden. Die Belastung durch Strassenverkehr war in diesen Gebieten gering (5 Stichproben, n = 93).

- **Sprengungen**: Hier handelt es sich um zwei Wohngebiete in der Nähe eines Tagebaues, in dem regelmässig Gewinnsprengungen durchgeführt wurden. Die Verkehrsbelastung ist gering (2 Stichproben, n = 40).

- **Baustellen**: Hier wurde in Strassenzügen befragt, in denen zuvor häufig Baustellen mit Rammarbeiten eingerichtet worden waren. Die Verkehrsbelastung war unterschiedlich (2 Stichproben, n = 32).

Die in den Bildern 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 dargestellten Stichproben sind die folgenden:

I. Winterthur, Eichliackerstrasse/Maienstrasse; Quelle: Eisenbahnlinie, Wohnqualität gut, keine bzw. geringe Verkehrsbelastung, Belastung 0.1 - 0.2 mm/sec, 60 - 80 Hertz, bahnbedingte Vibrationen.

II. Forchstrasse in Zürich; Ausfallstrasse starke Verkehrsbelastung, Strassenbahn und etwas schwerere Vorortsbahn (Forchbahn), ca. 30 Trams pro Stunde, 480 pro Tag

III. Dufourstrasse in Zürich; Strassenverkehr und Bauarbeiten, starker Eingriff in den Verkehr mit Absperrungen/Umleitungen, 3-mal hintereinander wurde Strasse aufgerissen, verdichtet und zugeschüttet; Betriebsgeräusche; Typus des seltenen, aber intensiven Ereignisses, welches im Umfeld von negativ bewerteten Unbequemlichkeiten erlebt wird.

IV. Böcklistrasse/Uraniastrasse/Dirsanastrasse/Müller-Friedbergstasse./St. Jacobstrasse/Tiegerbergstrasse, Bauarbeiten wie bei Dufourstrasse, innerhalb von 3 Monaten 3-mal alles aufgerissen, einmalige begrenzte Einwirkungsperiode; ingesamt wenig Verkehr und Tiefbauarbeiten.

V. St. Gallen, Gebiet über Eisenbahntunnel, keine Eisenbahngeräusche bei Durchfahrt zu hören, Verkehrsbelastung gering, Lockergestein 0 - 30 m Ueberdeckung, Zuglärm 30 - 40 dB, Zahl der Ereignisse unbekannt, 0.1 - 0.15 mm/sec

Die Auswertung der Frage nach Wahrnehmbarkeit von Geräuschen bzw. Vibrationen in der Wohnung zeigt, dass der Verkehrslärm und Erschütterungen in fast allen Wohnungen hörbar ist. Die Quellgeräusche werden in mindestens 70% der Wohnungen gehört. 60 - 80% der Befragten geben an, in ihrer Wohnung Erschütterungen wahrzunehmen. Auch durch Vibrationen ausgelöste Geräusche (Sekundärgeräusche) werden in vielen Wohnungen, wenn auch weit geringer, wahrgenommen (vgl. Bild 4.1 und Bild 4.2).

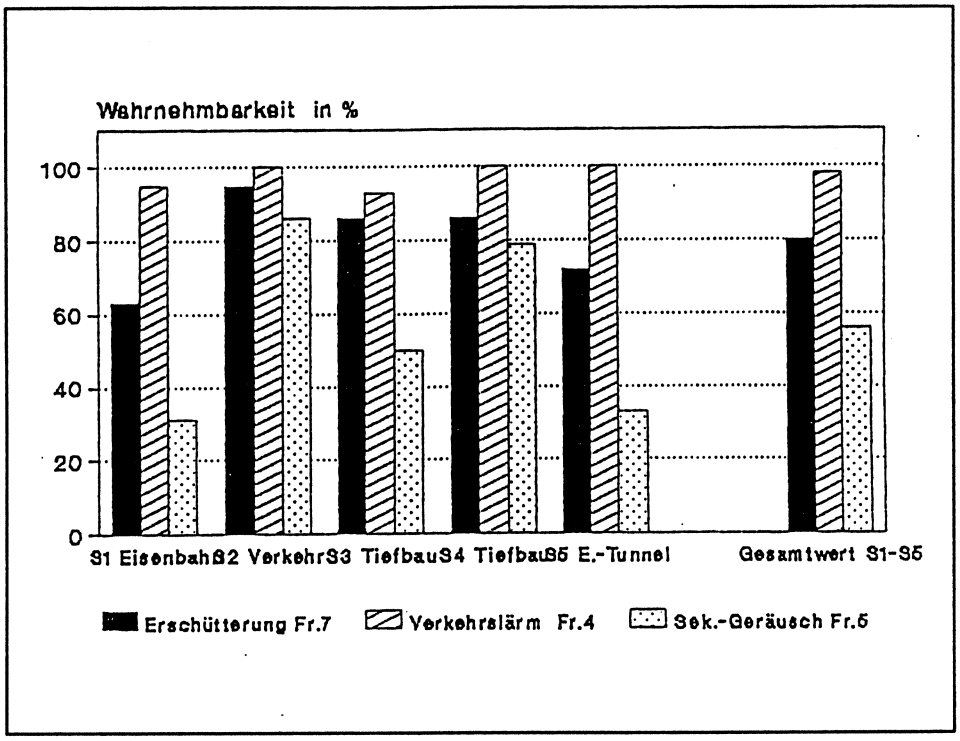


Bild 4.1 Wahrnehmbarkeit von Immissionen durch die Anwohner (5 Stichproben, Resultate Umfrage Schweiz)

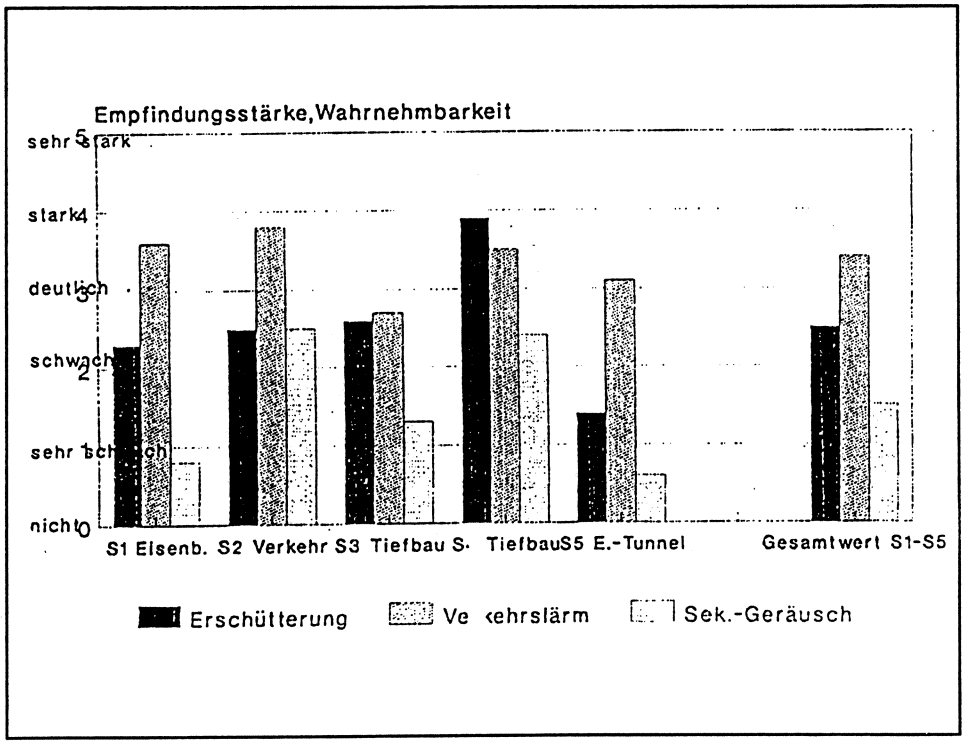


Bild 4.2 Stärke der Wahrnehmnung der Erschütterungen, Verkehrslärm, Sekundärgeräusche (Resultate Umfrage Schweiz)

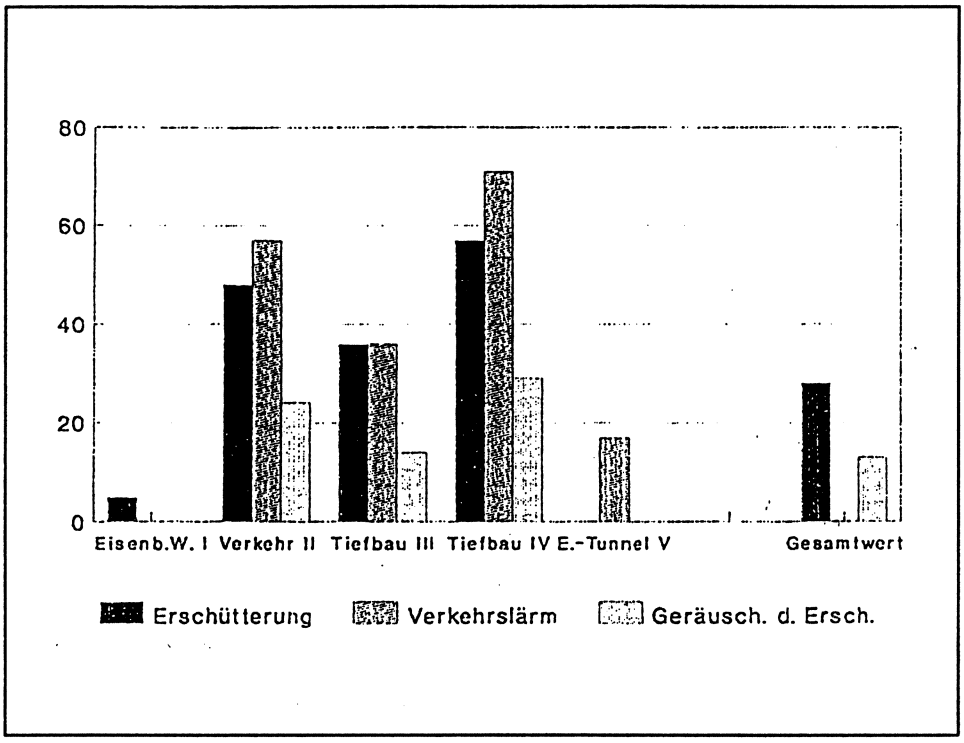


Bild 4.3 **Beurteilung der Unzumutbarkeit (in %) der Immissionen**

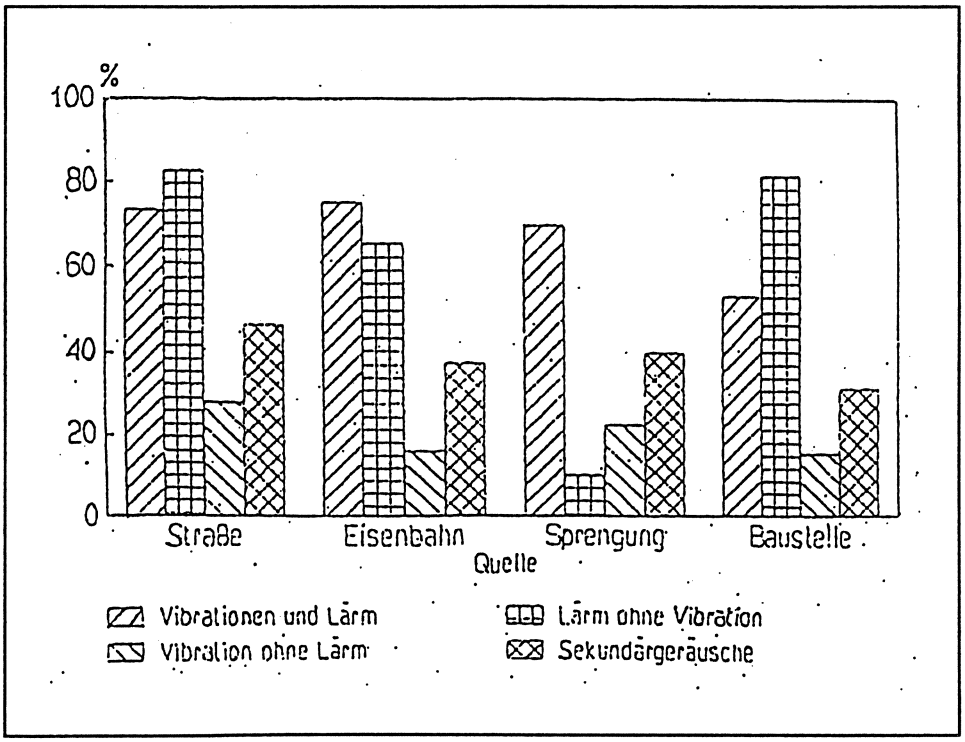


Bild 4.4 **Häufigkeit des Auftretens (schweizerische Untersuchung)**

Die Skalierung der Hörbarkeit der Geräusche und der Stärke der Erschütterungen in der Wohnung weist bis auf eine Ausnahme keine signifikante Unterschiede auf. Die Verkehrsgeräusche werden im Mittel als deutlich zu hören skaliert. Quellengeräusche werden in allen Gebieten als schwach bis deutlich hörbar eingestuft. Bei den Strassenverkehrsgeräuschen werden die Quellengeräusche im Mittel mit der Kategorie "stark" bewertet. Hier wird offensichtlich noch vom allgemeinen Verkehrsgeräusch unterschieden. Die Sekundärgeräusche werden in ihrer Stärke geringer eingestuft und mit schwach kategorisiert. Die in der Wohnung registrierten Erschütterungen werden in allen Gebieten in der gleichen Grösse skaliert, wie die Quellengeräusche (Ausnahme: Strasse). Die Toleranz gegenüber den wahrgenommen Geräusche und Erschütterungen lässt sich aus den Angaben zu deren Zumutbarkeit ablesen.

Die Umfrage zeigte, dass die Zumutbarkeitsschwelle für die Hörbarkeit von Verkehrslärm in der Wohnung dann erreicht ist, wenn er deutlich bis stark hörbar ist. Aehnliche Resultate zeigte die Umfrage für Quellengeräusche und Erschütterungen. Erschütterungen werden als belästigend empfunden, wenn sie deutlich bis stark spürbar sind und längere Zeit andauern.

Die Toleranz gegenüber Erschütterungen und Sekundärgeräuschen wird für singuläre Ereignisse (Sprengungen) oder zeitlich begrenzte und absehbare Situationen (Baustellen) deutlich nach oben verschoben. Hier wird die Grenze zur Unzumutbarkeit (50% der Befragten) erst bei dem Skalenwert "sehr stark hörbar" bzw. "stark bis sehr stark spürbar" erreicht. **Bei Baustellen werden also auch stärkere Vibrationen und Quellengeräusche durchaus noch toleriert, auch wenn sie relativ die stärksten Belästigungswerte aufweisen (vgl. Bild 4.2 und 4.3). Dies ist wohl mit der zeitlichen Befristung der Belastung zu begründen.**

Die Lästigkeit der Erschütterungen wird wie deren Wahrnehmbarkeit für alle Quellen mit "schwach" bis "deutlich" skaliert, dabei erreichen die Baustellen die geringste Lästigkeit, was wieder mit den oben genannten Gründen erklärt werden kann. Ein ähnliches Verhalten ergibt sich für die Quellengeräusche (Skalenwert "sehr schwach" bis "schwach", in den Strassenverkehrsstichproben "deutlich") und den Sekundärgeräuschen ("sehr schwach" bis "schwach" belästigend).

Das gemeinsame Auftreten von Lärm, mit dem jetzt nicht explizit der Quellenlärm gemeint ist, und Erschütterungen wird von 70% der Befragten Anwohner häufig beobachtet (Angaben manchmal bis sehr oft). Dagegen geben nur 20% an, häufig Erschütterungen ohne Geräusche wahrzunehmen. Sekundärgeräusche als Ergebnis auftretender Erschütterungen werden von 40% der Befragten häufig beobachtet. Für diese Angaben bestehen zwischen den verschiedenen Gruppen bis auf eine Ausnahme keine signifikanten Unterschiede. Auf Grund ihrer homogenen niedrigen Verkehrsbelastung geben die Anwohner der "Sprengungenstichproben" (deutsche Untersuchung) an, Lärm ohne Erschütterungen weniger häufig wahrzunehmen.

Die Untersuchungsgebiete in der Schweiz wurden bewusst in Bezug auf starke Erschütterungseinwirkungen ausgewählt. Bild 4.3 zeigt, dass im allgemeinen die Zumutbarkeitsschwelle von den Betroffenen bei Erschütterungen relativ höher angesetzt wird, als beim Lärm. Gleichzeitg ist zu bemerken, dass der Einflussbereich von Lärmimmissionen im allgemeinen grösser ist als der infolge Erschütterungen. Diese beiden Gegebenheiten zeigen, dass Erschütterungen zwar nicht zu vernachlässigende Immissionen sind, aber im Vergleich zur Lärmbelastung von geringerer umweltpolitischer Bedeutung sind.

Es muss daran erinnert werden, dass sowohl die deutschen wie auch die schweizerischen Untersuchungen auf einer beschränkten Anzahl von Stichproben basieren. Die Resultate müssen deshalb mittels weiterer Untersuchungen abgesichert werden.

5. Richtwerte für die Beurteilung der Belästigung

Die Umfrageergebnisse zeigen:

- Die meisten Bewohner nehmen Erschütterungen durch die entsprechenden Quellen wahr. Diese und der Lärm führen auch zu Belästigungsreaktionen (Angaben "schwach" bis "deutlich").
- Baustellen, Bahn und LKW-Verkehr liegen im Bereich der 50 % Schwellen der Unzumutbarkeit der Erschütterungen. Die absolut stärksten Empfindungen bei Erschütterungen wird von Baustellen ausgelöst. Vergleichbar stark bzw. stärker sind lediglich die quellenbezogenen Lärmempfindungen für LKW- und Eisenbahnlärm. Da die Verkehrslärmbewertung Unzumutbarkeitsschwellen von 60 bis 80 % erreichen, die Erschütterungen infolge Baustellen im Bereich von 40 bis 60 % liegen, kann dies als Hinweis für eine höhere Toleranz gegenüber Erschütterungen infolge Bautätigkeit interpretiert werden. Diese Toleranz kann auf der absehbaren zeitlichen Begrenzung der Immissionen bei Baustellen beruhen.
- Geräusche und Erschütterungen treten in der Regel gemeinsam auf, dabei müssen die Geräusche allerdings nicht notwendig Quellengeräusche sein. Die Erschütterungen werden - trotz der in der vorliegenden Untersuchung "erschütterungsdominant" ausgesuchten Stichproben - mehrheitlich weniger stark belästigend empfunden als Lärm (vgl. Bild 4.3).
- In den Umweltbereichen, in denen auf Grund der Gegebenheiten von einem Auftreten von Erschütterungen ausgegangen werden muss, sollten deshalb spürbare Erschütterungen und Quellengeräusche in ihrer Wirkung zusammen betrachtet werden.
- Sekundargeräusche spielen im Vergleich zu Erschütterungen und quellenbezogenen Geräuschen eine untergeordnete Rolle. Sie sind aber subjektiv nachweisbar und treten häufiger auf als Erschütterungen alleine (vgl. Bild 4.4).

Massgebende Kriterien für die Festlegung von Richtwerten für die Beurteilung der Belästigung durch Erschütterungen sind folgende:

Generelle Kriterien

- Spürbare Erschütterungen und abgestrahlter Körperschall soll getrennt bewertet werden (vgl. Bild 5.1). Es sind deutlich zwei Bereiche unterscheidbar, in denen entweder die Erschütterung spürbar oder der abgestrahlte Körperschall hörbar dominant sind. Howarth und Griffin haben in ihrem Laboruntersuchungen ([10], [11], [12]) nachgewiesen, dass die Belästigung durch gleichzeitg auftretende Stimuli erhöht wird. Dieses Ergebnis ist allerdings aus den Resultaten der Feldumfragen nicht eigentlich erkennbar. Es stellt sich deshalb die Frage, ob in der Praxis dieser Effekt berücksichtigt werden muss oder vernachlässigt werden darf. Die Autoren empfehlen aus Gründen der Einfachheit und Praktikabilität beim gleichzeitigen Auftreten von Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall jedes Stimuli einzeln zu bewerten (kein Verstärkungsfaktor für die Bewertung kombinierter Einwirkung gegenüber der Einzeleinwirkung).

Kriterien zur Beurteilung des abgestrahlten Körperschall

- abgestrahlter Körperschall ist in jedem Raum eines Gebäudes (nicht nur in denjenigen nahe der Quelle) zu hören. Er ist unverhältnissmässig tieffrequent. Beides macht ihn stärker belästigend als ein direkt einwirkender Lärm. Es ist zu prüfen ob für abgestrahlter Körperschall strengere Kriterien zu verwenden sind als die zur Zeit gegebenen Richtwerte für Lärm (tieferer L_{eq}).

Kriterien zur Beurteilung spürbarer Erschütterungen

Richtwerte sind in Abhängigkeit folgender Gegebenheiten abzustufen:

- Berücksichtigung der Vorbelastung und der Zielvorgaben für genau definierte Zonen. z.B.:
  - Kur- Spitalzone, Wohnzone
  - gemischte Wohn- und Gewerbezone
  - Industriezone
  - etc.
- Zeitpunkt der Einwirkung während des Tages:
  - 0600 - 2200 Tag (höhere Werte als Nacht)
  - 2200 - 0600 Nacht

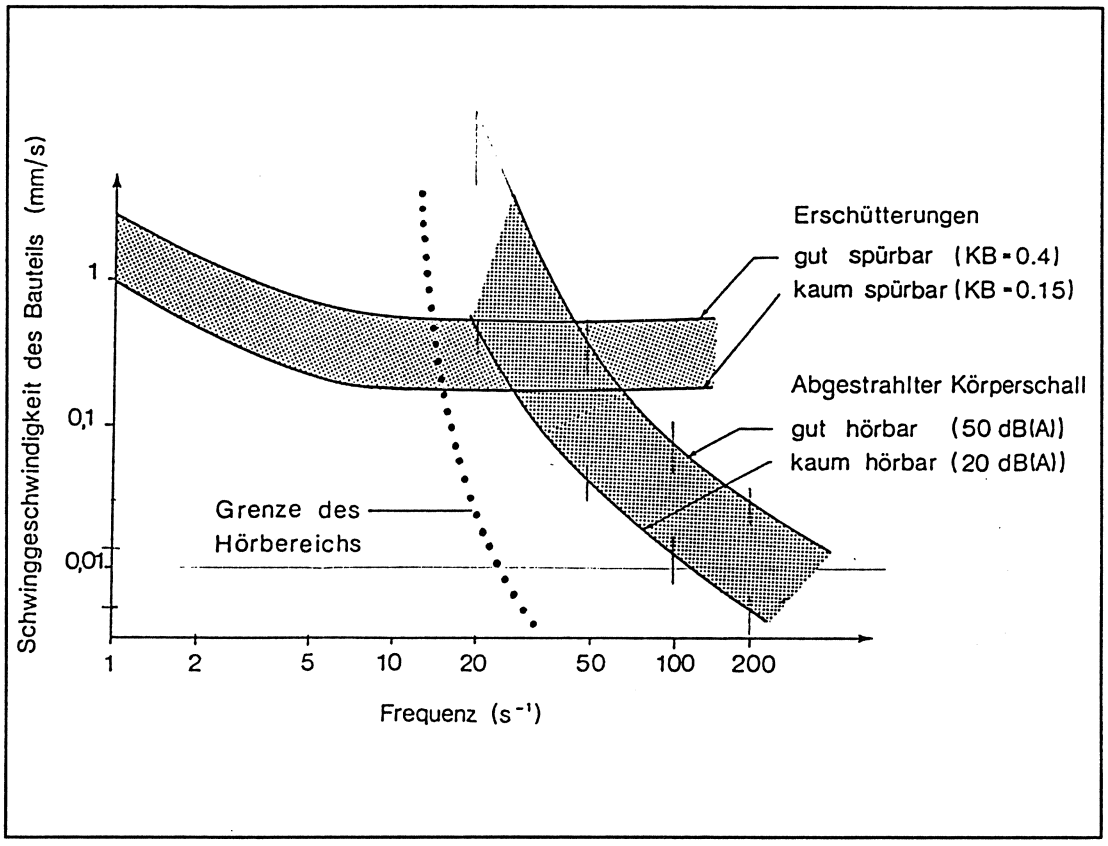


Bild 5.1 Massgebende Bereiche für Erschütterungen und Körperschall (nach Studer Engineering)

- Dauer der Einwirkung pro Tag:
  - Dauernd (totale Zeit täglich grösser als 2 bis 3 Stunden);
    Richtwerte: Fühlbarkeitsschwelle bis leicht oberhalb Fühlbarkeitsschwelle.
  - Einzelereignisse von kurzer Dauer (kürzer als 1 bis 3 s, 1 - 3 täglich):
    Hier sind Richtwerte wie sie DIN 4150/2 Fassung 1977 vorgibt sinnvoll.
  - Mehrfach (mehr als 3 mal täglich) und längerdauernde Ereignisse (länger als 3 s):
    Solche Ereignisse sind relativ häufig zu beobachten (z.B. infolge Schienenverkehr). Sie können deutlich spürbar sein, deren Intensität liegt jedoch stets wesentlich unter denjenigen Werten wie sie für Einzelereignisse zugelassen werden können.
    Zur Bewertung drängt sich eine Energiemittelung ähnlich einem L_{eq} beim Lärm auf. Allerdings sollte als zusätzliches Kriterium die Stärke eines maximalen Einzelereignisses definiert werden, da sonst relativ wenige starke Ereignisse pro Zeiteinheit - vor allem nachts - stark störend beurteilt werden.

- Absehbarkeit der Dauer der Einwirkung:
  Es hat sich gezeigt, dass wenn die Dauer der Einwirkung absehbar ist, das Akzeptanzniveau ansteigt. Es ist deshalb zu prüfen ob für derartige Einwirkungen (z.B. Baustellen, Dauer der Einwirkungen z. B. weniger als 3 Monate) eine Erhöhung der Richtwerte praktikabel ist. Im allgemeinen wäre dies aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll.
- Belästigung infolge Ereignisse unterschiedlicher Frequenzinhalte:
  Die in der Norm DIN 4150/2 (1977) enthaltenen KB-Kurven sind aus der Sicht der Praxis vernünftig. Sie sind jedoch nicht wie oft in der Literatur zitiert Kurven gleicher Empfindlichkeit, sondern sind Umhüllende der Kurven gleicher Empfindlichkeit für die Positionen stehen / liegen / sitzen.

6. Schlussfolgerungen

Seit dem Abschluss der eigentlichen Untersuchungen sind weitere Fortschritte erzielt worden. Resultate verschiedener Laboruntersuchungen (z.B. [10], [11], [12]), namentlich bezüglich der Belästigung infolge der kombinierten Einwirkung von Erschütterungen und Lärm, sind publiziert worden. Die Untersuchungen zeigen die Komplexität der Problemstellung auf. Allerdings muss man sich die Frage stellen, ob es in der Praxis möglich und sinnvoll ist, derart differenziert die Belästigung zu erfassen, dies speziell auch im Hinblick auf die stark unterschiedliche individuelle Empflindlichkeit. Im weiteren ist die Norm DIN 4150/2 [13] nach mehreren Entwürfen stark revidiert worden. Sie berücksichtigt die Mehrzahl der in Abschnitt 5 dargestellten Anforderungen. Sie ist nach Meinung der Verfasser in der vorliegenden Form zwar wesentlich übersichtlicher und anwendungsfreundlicher als die Vorläufer. Sie lässt aber unserer Ansicht nach für Erschütterungsprognoseberechnungen Sensitivitätsanalysen nur beschränkt zu. Ebenso ist die wissenschaftliche Absicherung einzelner Algorythmen nach Meinung der Autoren wenig gesichert. Die Norm spiegelt deshalb in der vorliegenden Form eine Genauigkeit und Zuverlässigkeit vor, die nach dem heutigen Kenntnisstand nicht gegeben ist.

Weiteres Vorgehen

Es ist angesichts der Entwicklungen im europäischen Normenwesen zu prüfen, wie weit noch schweizerische Richtwerte erarbeitet werden sollen. In jedem Fall aber ist die Zusammenarbeit mit ausländischen Stellen zu suchen, da nur mit ihnen eine genügend breite Datenbasis zur Absicherung der Richtwerte gefunden werden kann. Für die Ausarbeitung von allfälligen Richtwerten für die Schweiz ist eine Zusammenarbeit VSS, SBB, BUWAL und evtl. Sprengfirmen zu suchen.

Erschütterungseinwirkungen auf Menschen
Richtwerte für die Belästigung

Anhang 1: Vergleich von Messketten

Inhalt

Seite

1	**Einleitung**	**1**
2	**Versuchsanordnung**	**1**
3	**Elemente der Messketten**	**3**
4	**Eigenfrequenzen der Stative**	**5**
5	**Einfluss der Ankoppelung**	**7**
5.1	Stativ A (EMPA)	7
5.2	Stativ B (GSS ohne Winkel)	9
5.3	Stativ C (GSS mit Winkel)	10
5.4	Stativ D (IHA)	11
5.5	Vergleich der Stative auf Parkett	12
5.6	Vergleich der Stative auf Nadelfilz	13
5.7	Vergleich der Stative auf Teppich	14
5.8	Vergleich der Stative auf Linol	15
6	**Schlussfolgerungen**	**16**

1 Einleitung

Der Vergleich der 4 verschiedenen Messketten, der im folgenden beschrieben wird, basiert auf einer Versuchsserie, die am 18. März 1988 in der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (EMPA) in Dübendorf durchgeführt wurde.

2 Versuchsanordnung

Der Versuch wurde im Schallhaus 1 der EMPA durchgeführt. Eine Betonplatte mit den Abmessungen von ungefähr 2 mal 3 Metern wurde auf ihrer gesamten Fläche auf eine Gummimatte gelegt. Auf der Betonplatte wurde ein Vibrator angebracht, der die Platte anregte. Die von der Testmesskette empfangenen Signale wurden mit denjenigen eines Referenzaufnehmers, der in unmittelbarer Nähe starr mit der Betonplatte verbunden wurde, verglichen. Dadurch, dass der Referenzaufnehmer nahe beim Testaufnehmer liegt, wird vermieden, dass sich lokale Unterschiede der Bewegungen auf der Platte im Resultat bemerkbar machen. Die Platte wurde mit einem Signal angeregt, das in einem massgebenden Frequenzbereich eine konstante Energie beinhaltete.

Dargestellt werden im folgenden jeweils die Amplitudenverhältnisse zwischen Test- und Referenzaufnehmer in Funktion der Frequenz. Die Grössenachse ist im logarithmischen Massstab dargestellt, also in der Einheit [dB]. Aufgezeichnet wird das Verhältnis der Beschleunigungswerte.

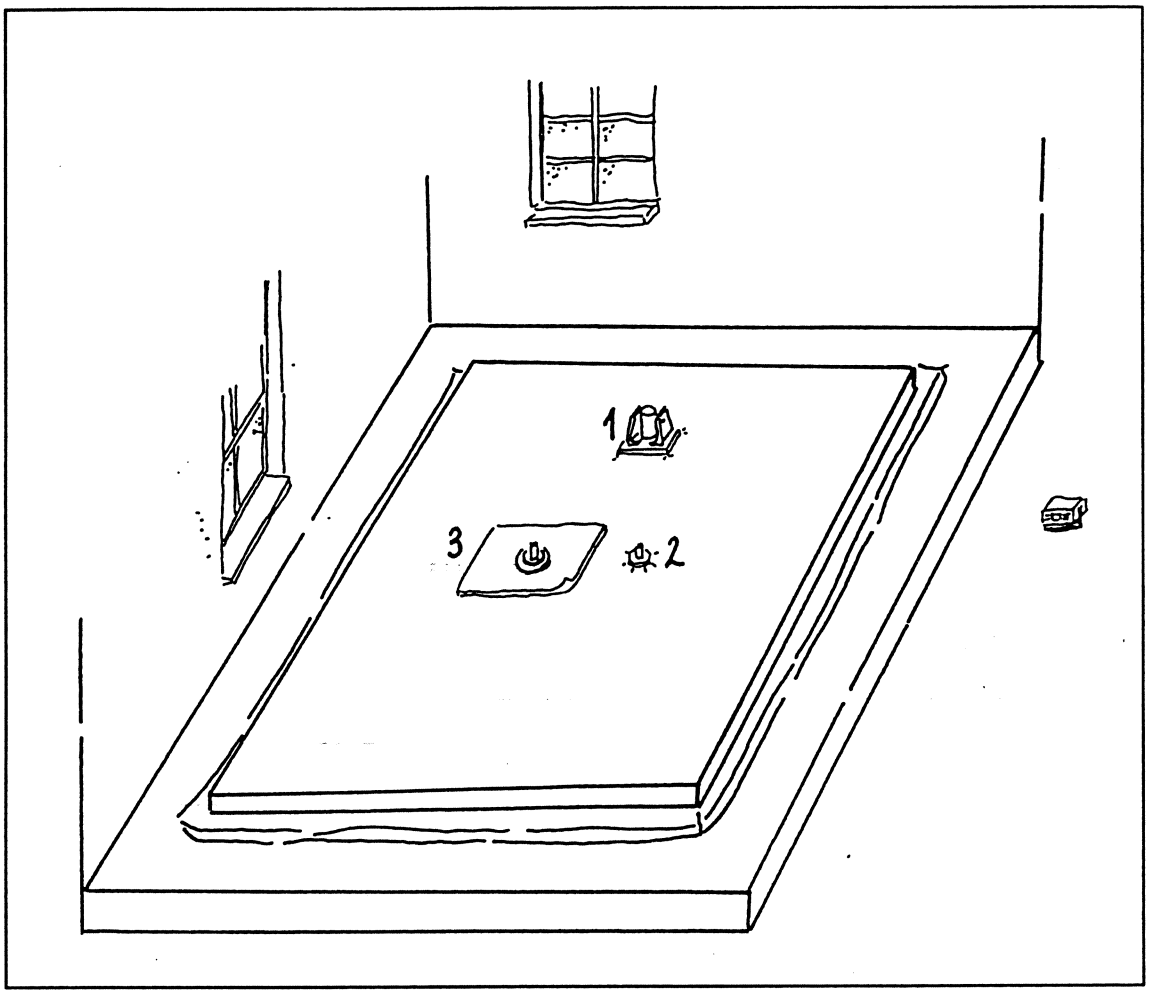


Bild A1.1 Versuchsanordnung für den Vergleich verschiedener Messketten auf einer Betonplatte. 1 Shaker 2 Referenzaufnehmer
3 Testaufnehmer auf verschiedenen Bodenbelägen

3 Elemente der Messketten

Die Bestandteile einer Messkette sind im Abschnitt 3.1.1 des Berichtes beschrieben. Tabelle A1.1 enthält die technischen Angaben der Messketten.

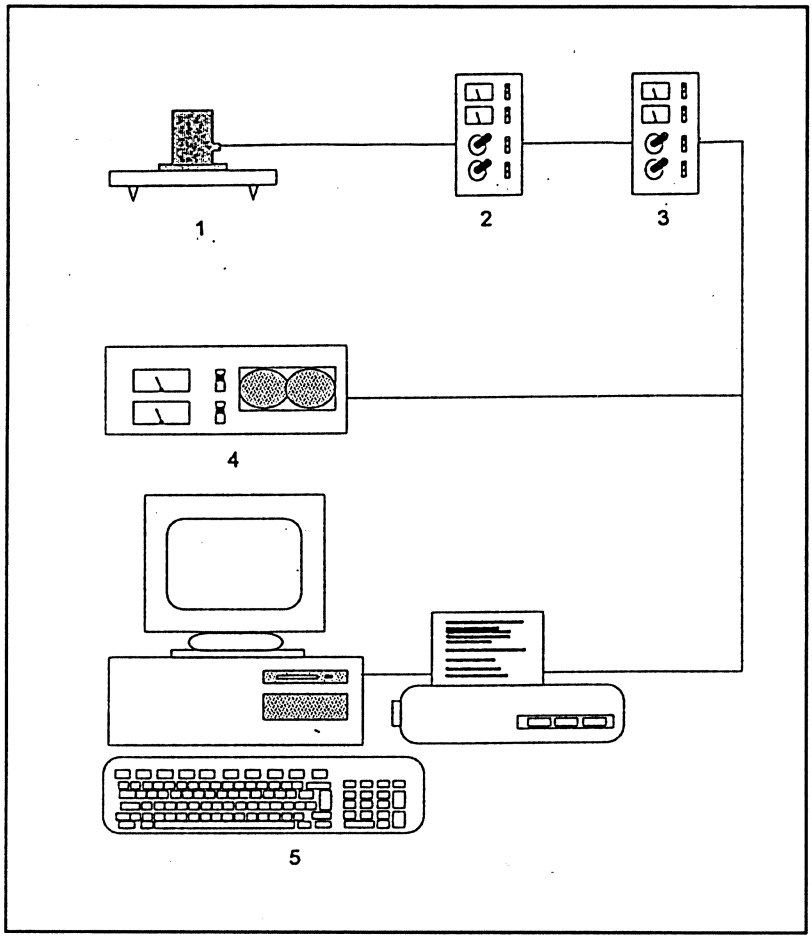


Bild A1.2 Elemente einer Messkette

Legende:

1 Aufnehmer auf Ankopplungselement
2 (Ladungs-)Verstärker
3 Tief-/Hochpassfilter
4 online Registrierung
5 EDV - Registrierung für einfache Auswertung

Die Auswertung des ersten Versuches zeigt, dass alle Messketten die gleichen Resultate ergeben, wenn der Aufnehmer fest mit der schwingenden Struktur verbunden wird. Mögliche Verfälschungen der Messresultate können vermieden werden, wenn das Ankoppelungselement (Stativ) den in den folgenden Abschnitten beschriebenen Anforderungen genügt.

Messkette	Aufnehmer	Ankoppelungselement Gewicht [kg]	Abmessungen L*B*H [mm]
1	Brüel&Kjör	3.2 kg	20*25*73
2	PCB	4.9 kg	20*25*73
3	Brüel&Kjör	5.7 kg	20*25*73
4	Brüel&Kjör	2.5 kg	20*25*73

Tabelle A1.1 Technische Angaben der Aufnehmer

4 Eigenfrequenzen der Stative

Bei diesem Test wurden die 4 Stative nacheinander direkt neben dem Referenzaufnehmer auf die Betonplatte gestellt. Alle Stative zeigten Resonanzerscheinungen in Frequenzbereichen, die deutlich über 200 Hz lagen. Für Messungen auf harten Oberflächen sind also alle Stative genügend, die Unterschiede stammen einerseits von der unterschiedlichen Masse der Stative und andererseits von der Ausbildung der Füsse, die sich in der Federkonstante des Systems äussert.

Die Bilder A1.3 bis A1.5 zeigen die Eigenfrequenzen der Stative.

Die Ausbildung der Füsse lässt sich vergleichen, wenn fiktive Federkonstanten (Einmassenschwiegeranalogie) auf die gleiche Masse bezogen wird.

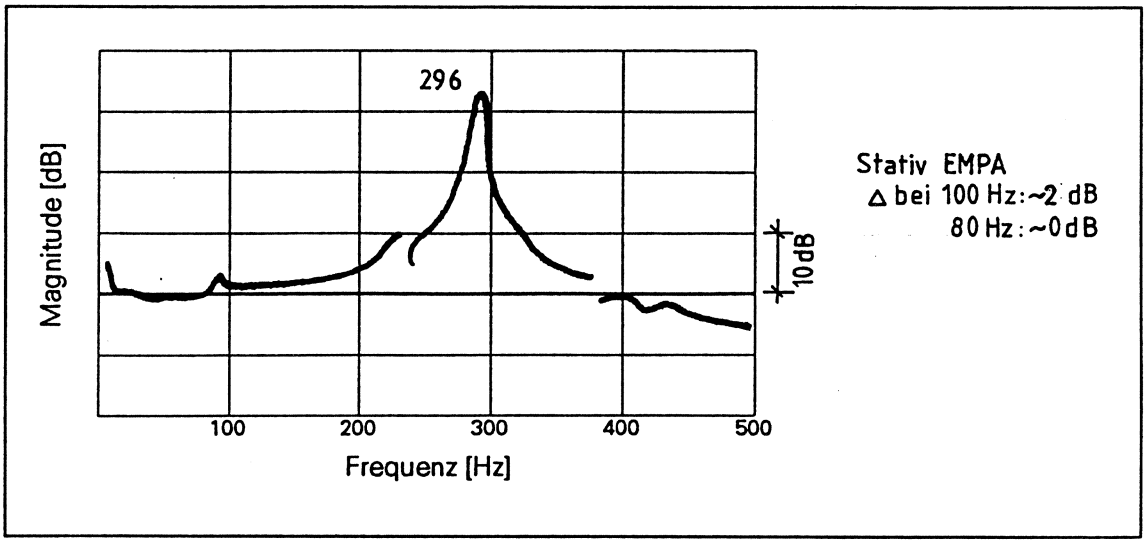


Bild A1.3 Eigenfrequenzen des Statives A

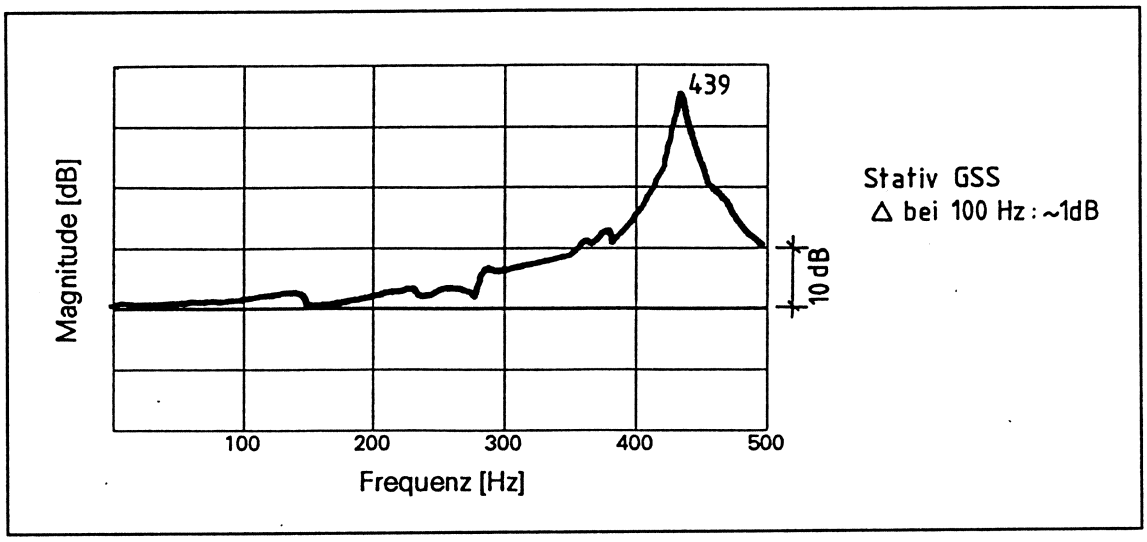


Bild A1.4 Eigenfrequenzen des Stativ es C

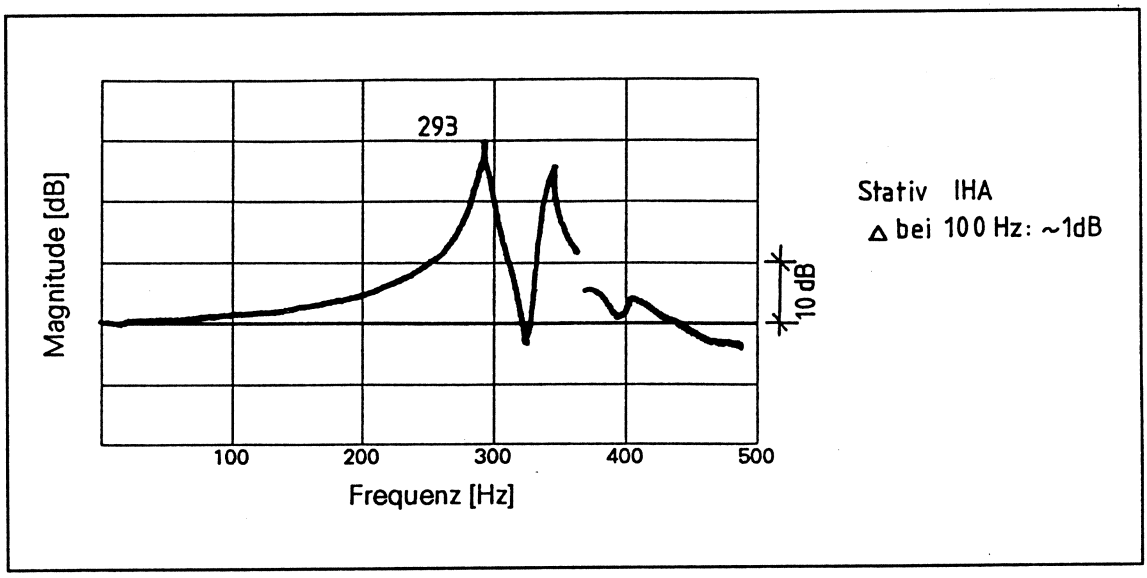


Bild A1.5 Eigenfrequenzen des Stativ es D

5 Einfluss der Ankoppelung

Der Einfluss der Ankoppelung wird im folgenden aus zwei verschiedenen Blickwinkeln betrachtet:

- In den Abschnitten A1 5.1 bis A1 5.4 wird beschrieben, wie sich ein Stativ auf 4 verschiedenen Unterlagen verhält. (Bilder A1.6 bis A1.9)
- In den Abschnitten A1 5.5 bis A1 5.9 wird beschrieben, wie sich eine Unterlage auf die verschiedenen Stative auswirkt. (Bilder A1.10 bis A1.13)

5.1 Stativ A (EMPA)

Das Stativ A zeigt auf drei von vier Bodenbelägen (Teppich, Parkett und Nadelfilz) ein ähnliches Verhalten: Eine starke Resonanzerscheinung ist zwischen 50 und 80 Hz vorhanden. Die Überhöhung liegt jeweils im Bereich von 15 bis 20 dB der Amplitudenverhältnisse (verglichen wird mit der Amplitude eines starr verklebten Referenzaufnehmers an der gleichen Stelle.)

Beim Linolboden liegt die Resonanzfrequenz über 100 Hz, das Amplitudenverhältnis beträgt etwa 8 dB.

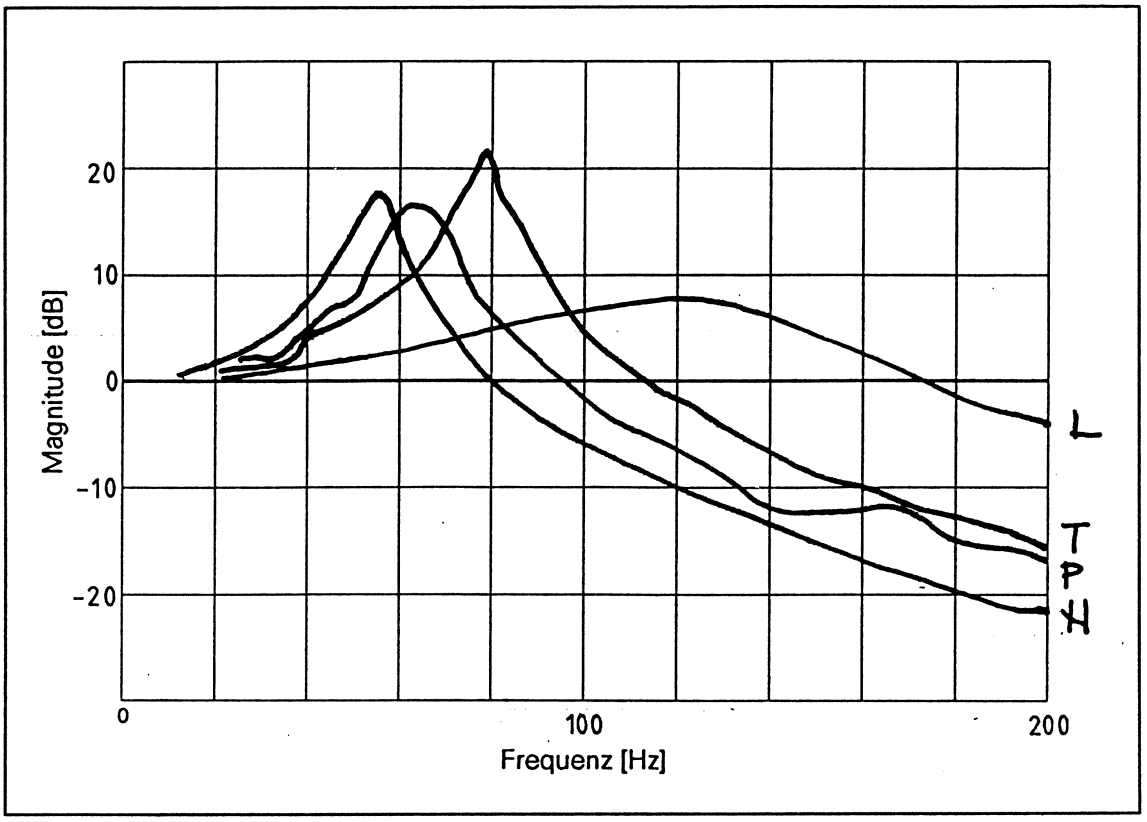


Bild A1.6a Verhalten von Stativ A (spitze Füsse) auf vier verschiedenen Bodenbelägen

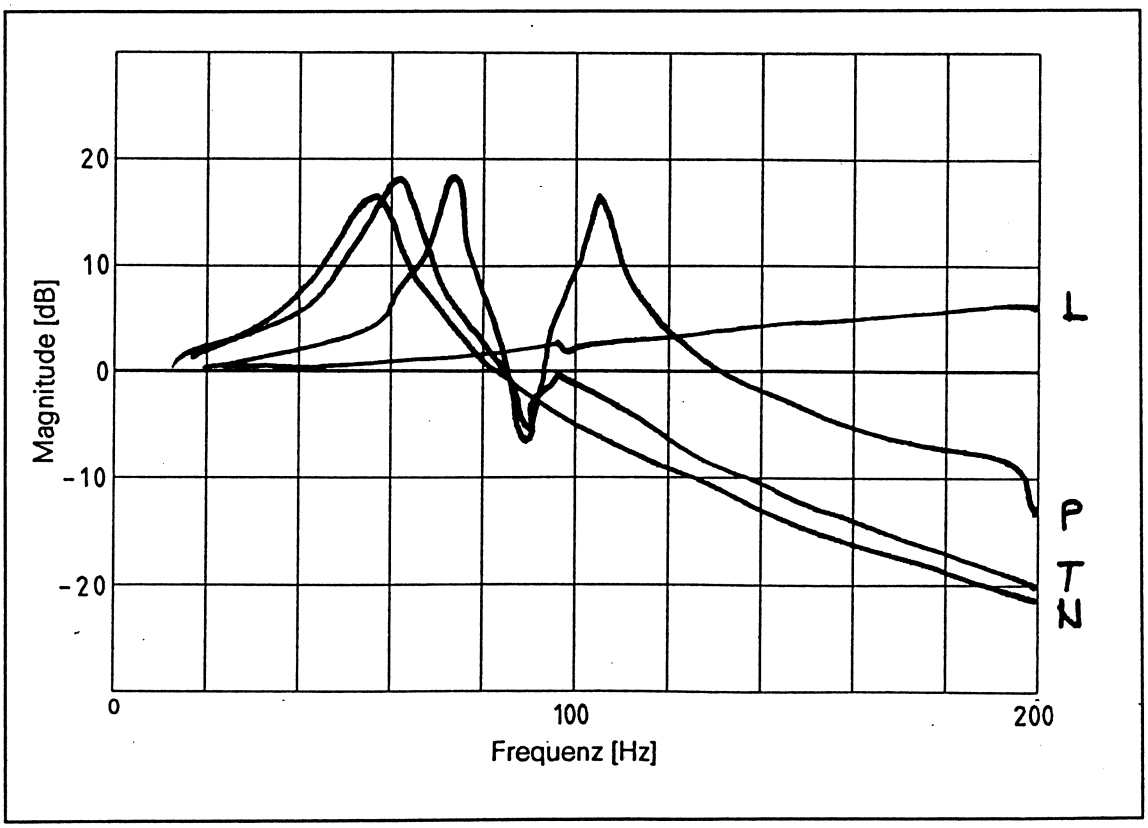


Bild A1.6b Verhalten von Stativ A (runde Füsse) auf vier verschiedenen Bodenbelägen

5.2 Stativ B (GSS ohne Winkel)

Stativ B zeigt ein ähnliches Verhalten wie Stativ A.

Die Resonanzfrequenzen liegen jedoch für Teppich und Nadelfilz zwischen 55 und 65 Hz, beim Parkett bei 100 Hz, die Amplitudenverhältnisse liegen wie beim Stativ A im Bereich von 80 dB.

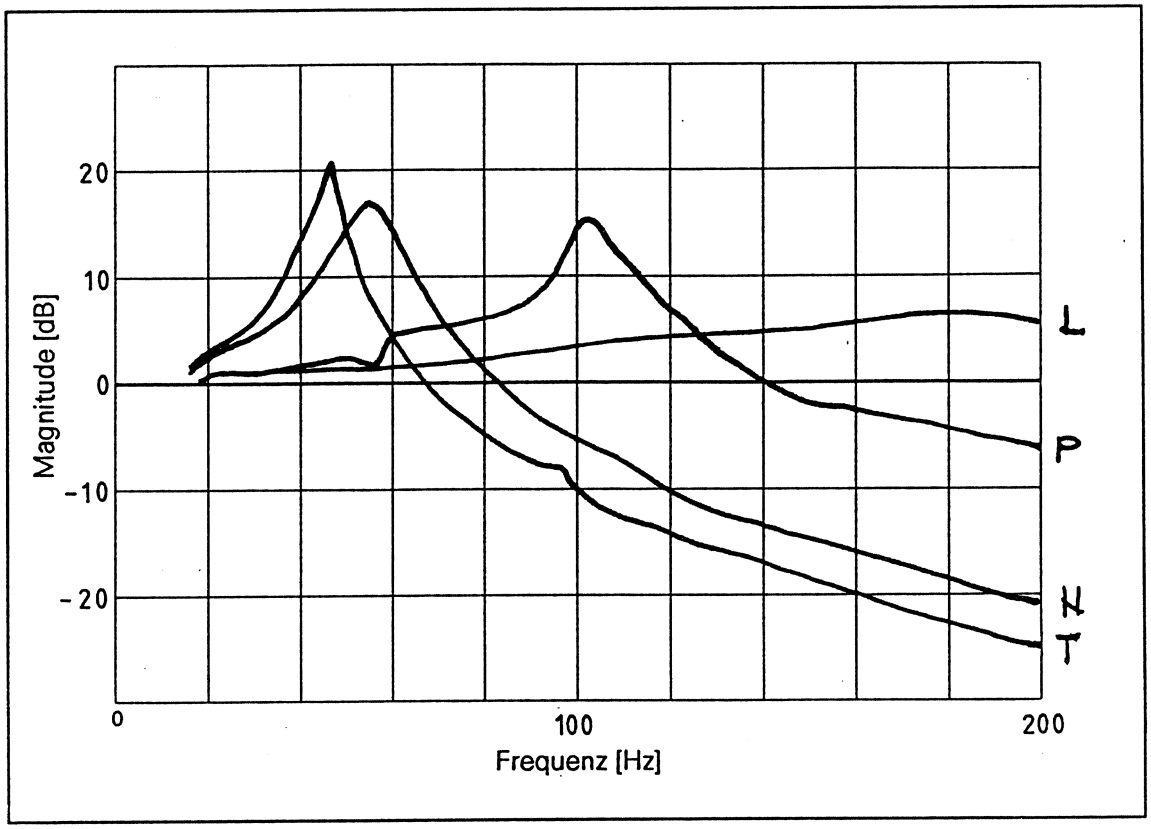


Bild A1.7 Verhalten von Stativ B auf vier verschiedenen Bodenbelägen

5.3 Stativ C (GSS mit Winkel)

Stativ C entspricht weitgehend Stativ B, der Unterschied liegt darin, dass eine Winkelplatte seitlich montiert wurde. Das Stativ ist somit nicht rotationssymetrisch. Das Stativ zeigt ein ähnliches Verhalten, jedoch mit dem Unterschied, dass bei ungefähr 2/3 der Resonanzfrequenz der jeweiligen Unterlage eine zweite, allerdings kleinere Amplitudenverstärkung gemessen wird.

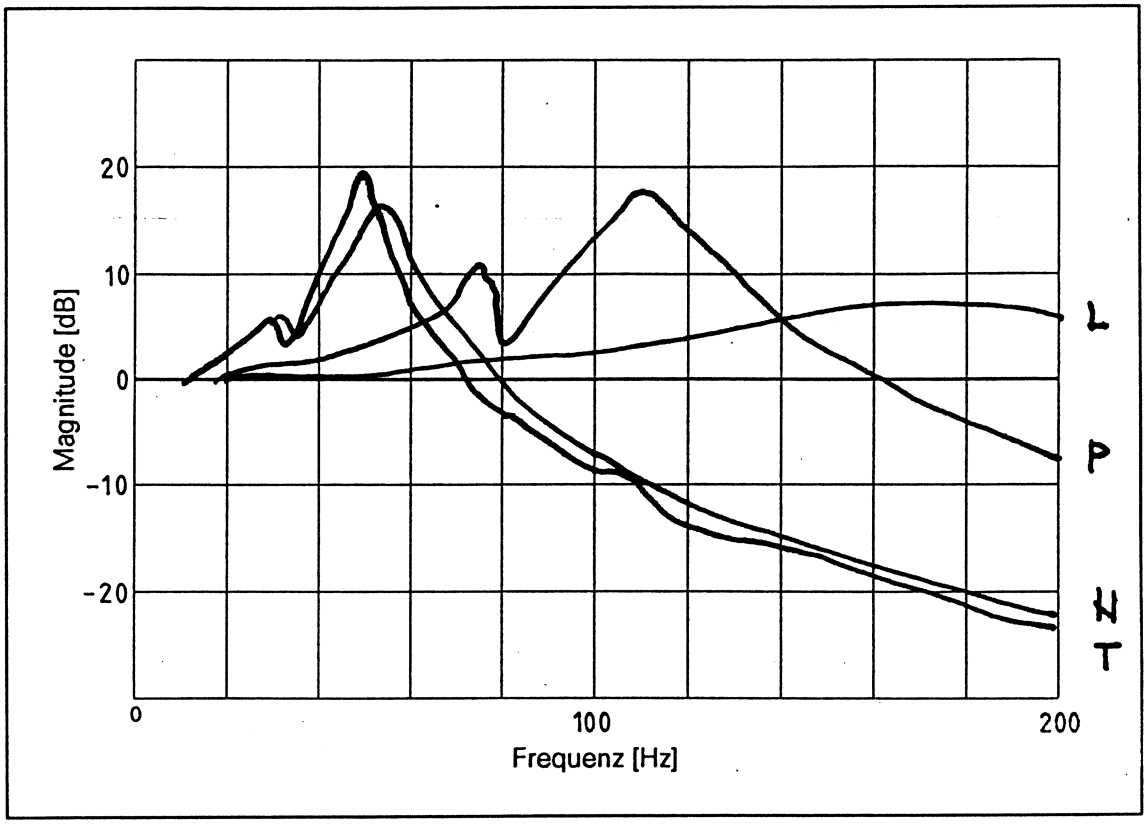


Bild A1.8 Verhalten von Stativ C auf vier verschiedenen Bodenbelägen

5.4 Stativ D (IHA)

Stativ D zeigt ein viel ruhigeres Verhalten als die anderen. Teppich- und Linolboden verursachen überhaupt keine Resonanzerscheinung, beim Nadelfilz liegt die grösste Amplitude über 100 Hz, bei 80 Hz beträgt die Abweichung etwa 3 dB. Das Parkettelement erzeugt eine Resonanzerscheinung bei 85 Hz, das Amplitudenverhältnis liegt bei ca. 10 dB, bei 85 Hz und bei 70 Hz bei ca. 3 dB.

Zwischen 0 und 80 Hz zeigt dieses Stativ eine weitgehend ausgeglichene Charakteristik.

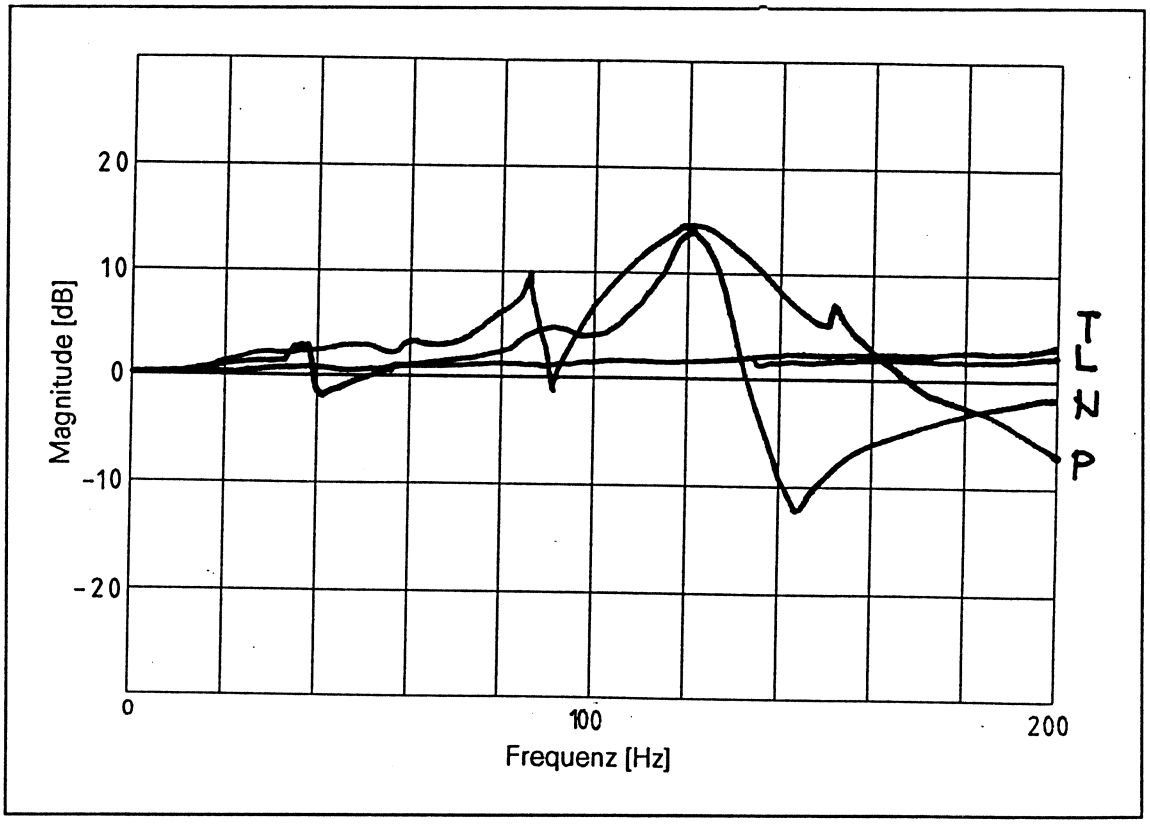


Bild A1.9 Verhalten von Stativ D auf vier verschiedenen Bodenbelägen

5.5 Vergleich der Stative auf Parkett

Auf dem Parkettelement zeigen alle Stative relativ grosse Resonanzerscheinungen. Sie liegen zwischen 60 und 120 Hz. Offenbar war das Parkettelement schlecht mit der Betonplatte verklebt, es zeigte ein Eigenleben.

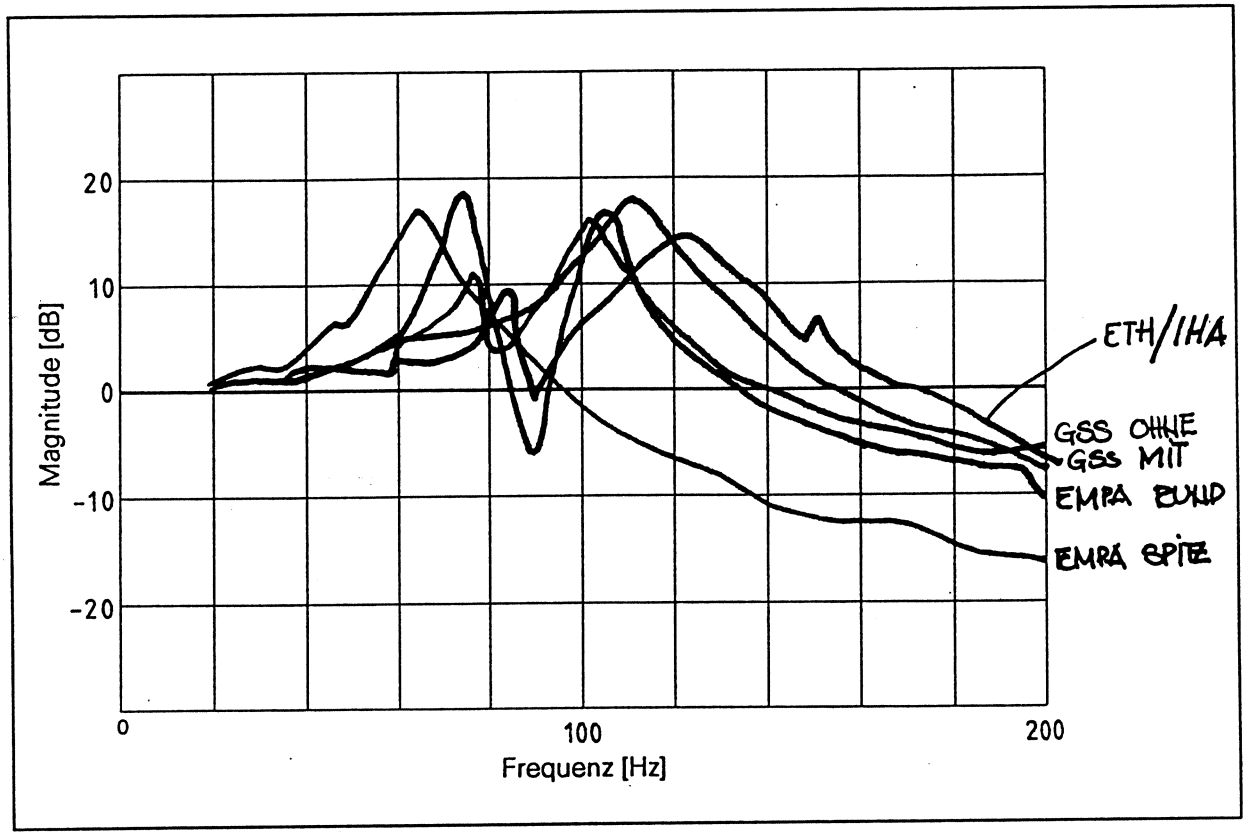


Bild A1.10 Verhalten der vier Stative auf Parkett

5.6 Vergleich der Stative auf Nadelfilz

Stativ D zeigt unter 80 Hz lediglich eine Verfälschung von ca. 3 dB. Bei den anderen Stativen lag dieser Wert fast bei 20 dB.

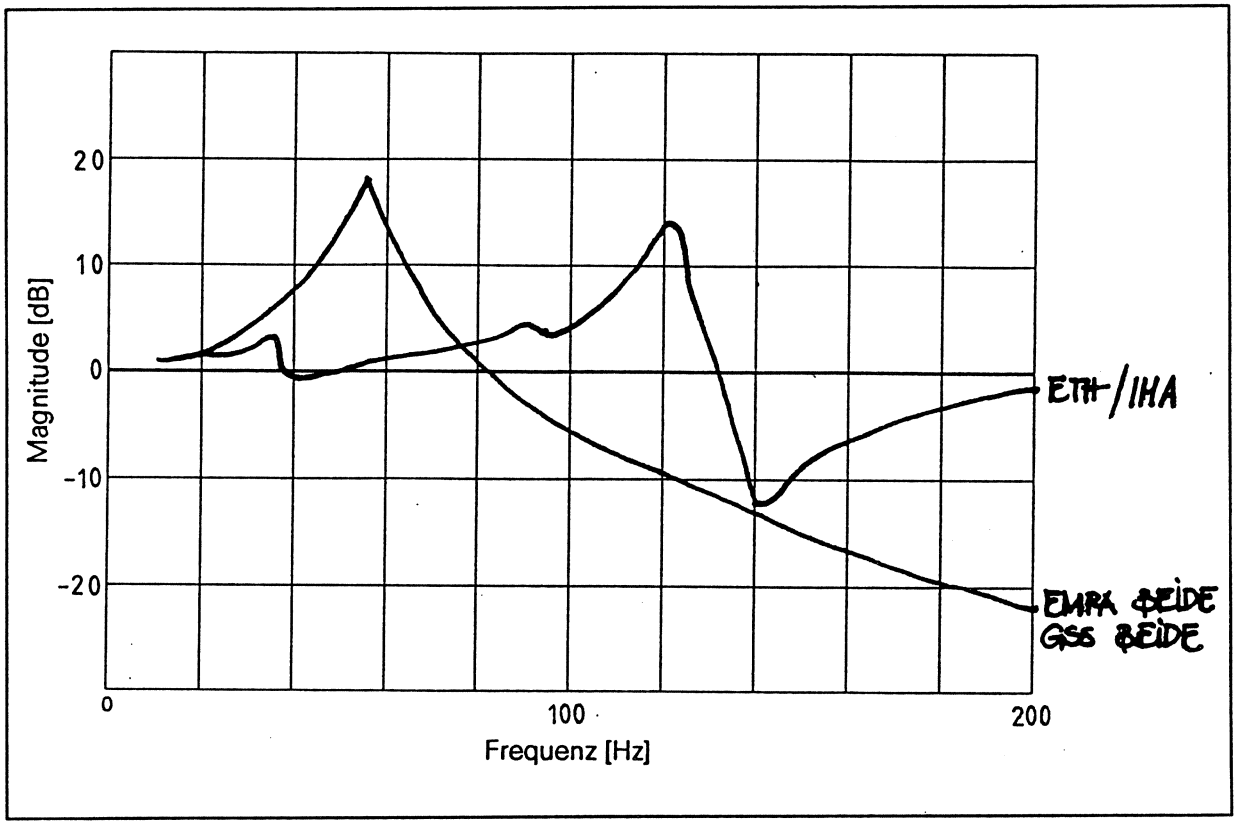


Bild A1.11 Verhalten der vier Stative auf Nadelfilz

5.7 Vergleich der Stative auf Teppich

Stativ D zeigt eine lineare Charakteristik, bei 80 Hz liegt die Überhöhung bei ca. 1 dB. Alle anderen Stative zeigen ein Amplitudenverhältnis von ca. 20 dB, das zwischen 40 und 80 Hz liegt.

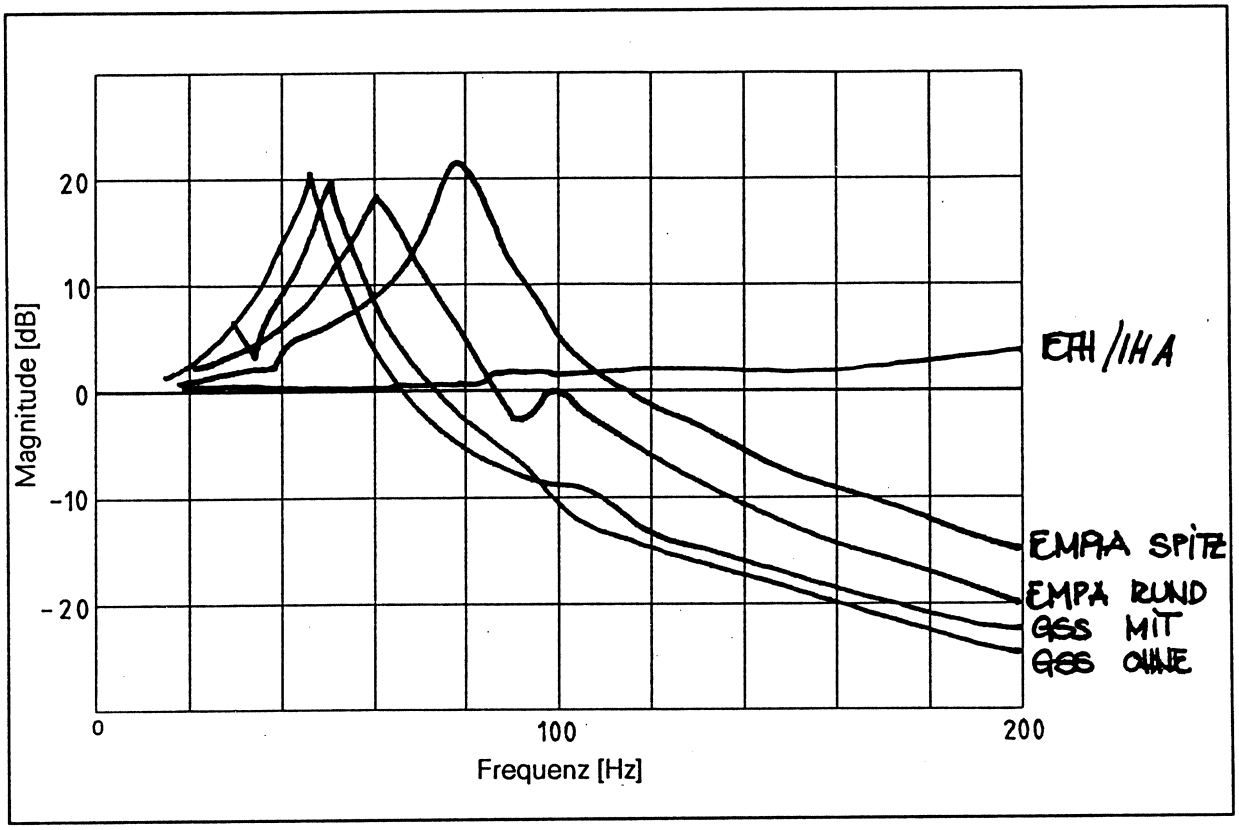


Bild A1.12 Verhalten der vier Stative auf Teppich

5.8 Vergleich der Stative auf Linol

Bei diesem Test zeigen alle Stative eine lineare Charakteristik. Bei 80 Hz sind folgende Amplitudenverhältnisse festzustellen:

- Stativ A 2 dB
- Stativ B 2 dB
- Stativ C 2 dB
- Stativ D 1 dB

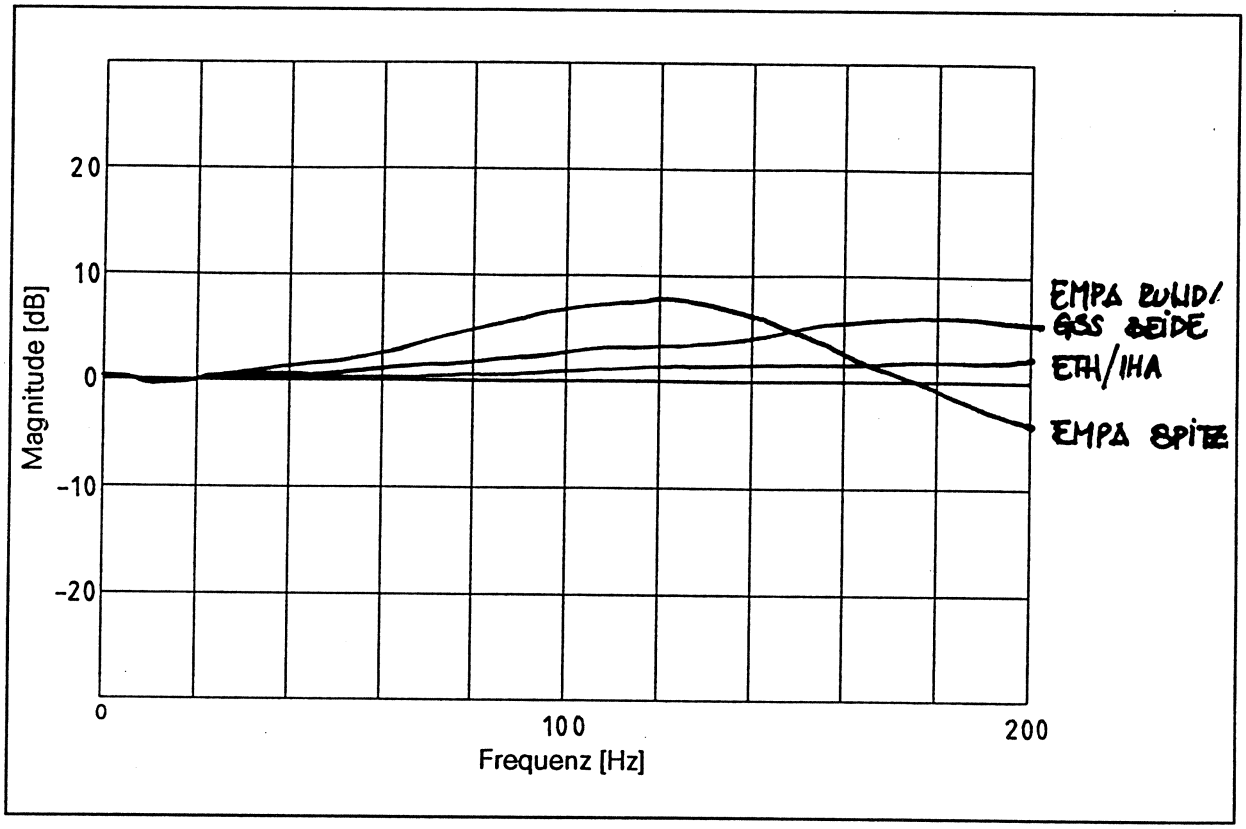


Bild A1.13 Verhalten der vier Stative auf Linol

6 Schlussfolgerungen

Die Elemente der Messkette müssen eine sinnvolle Auswertung der Messungen im Bereich zwischen 5 und 80 Hz erlauben. Die Resultate dürfen nur soweit beurteilt werden, wie es die Messkette erlaubt. Die Fehler der Messung geben eine maximale Aussagegenauigkeit.

Dem Ankoppelungselement ist grosse Aufmerksamkeit entgegenzubringen. Sehr wichtig ist eine symmetrische Ausbildung und spitze Füsse (Zirkelspitzen). Diese erlauben ein Durchdringen von weichen Bodenbelägen und somit eine genügende Verbindung.

Dort wo es möglich ist, den Aufnehmer starr mit der Struktur zu verbinden, ist dieser einzudübeln oder bei leichten Aufnehmern mit Wachs oder Teppichklebband zu befestigen.

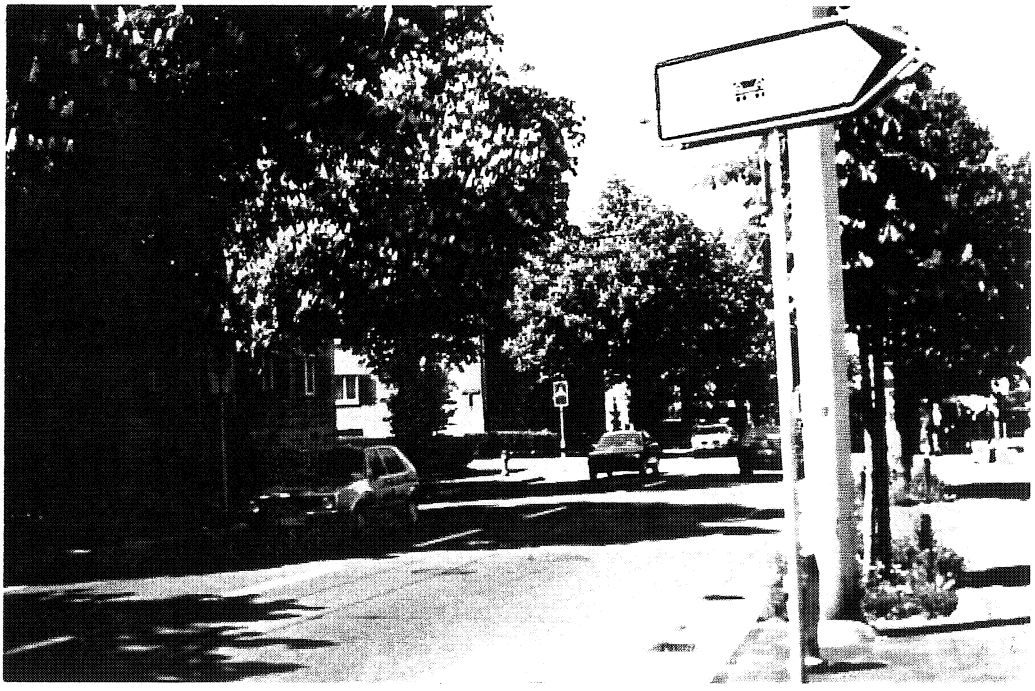
Wird das Stativ nach DIN 45669/2:1984 (entspricht dem Stativ ETH/IHA) ausgebildet, ist stets eine gute Messung möglich.

Erschütterungseinwirkungen auf Menschen
Richtwerte für die Belästigung

Anhang 2: Messungen

Baustelle mit Spundwänden

Messgebiet:	Hohlstrasse, 8048 Zürich
Messort:	Wohnung 3. Stock, Deckenmitte
Erschütterungen:	v_{max} = 3,8 mm/s
Lärmimmission:	Maximal Pegel = 86 dBA, L_{eq} = 60 dBA

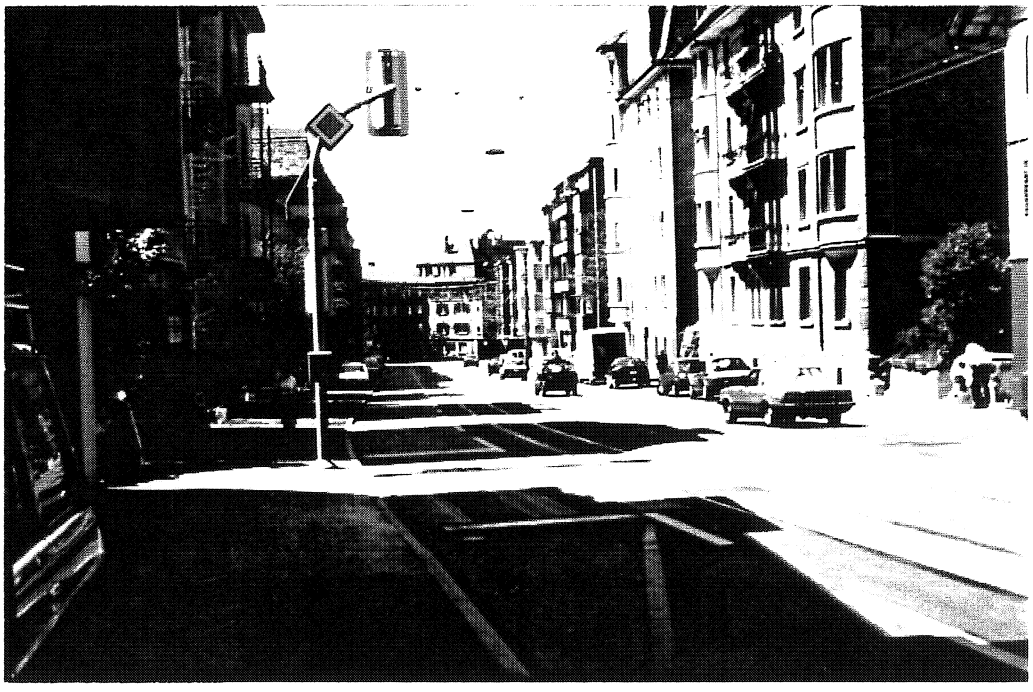


Vibrationswalze (Strassenbau)

Messgebiet:	Dufourstarsse, 8008 Zürich
Messort:	Wohnung 3. Stockwerk
Erschütterungen:	182 mm/s^2 bei 23,7 Hz
Lärmimmission:	L_{eq} = 47,2 dBA

Strassenbahn

Messgebiet:	Forchstrasse, 8032 Zürich
Messort:	Büroraum im Hochparterre
Erschütterungen:	12,9 (bis 24) mm/s^2 bei 92,1 Hz
Lärmimmission:	L_{eq} = 53,8 dBA



Schwerverkehr

Messgebiet:	Forchstrasse, 8032 Zürich (vgl. A2.3)
Messort:	Büroraum im Hochparterre
Erschütterungen:	5,3 mm/s^2 bei 21,8 Hz
Lärmimmission:	L_{eq} = 49,3 dBA

Vorortsbahn (Forchbahn)

Messgebiet:	Forchstrasse, 8032 Zürich (vgl. A2.3)
Messort:	Büroraum im Hochparterre
Erschütterungen:	8,4 (bis 24) mm/s^2 bei 92 Hz
Lärmimmission:	L_{eq} = 51,7 dBA

Eisenbahn

Messgebiet:	Winterthur
Messort:	Wohnung Deckenmitte
Erschütterungen:	0,6 mm/s
Lärmimmission:	Keine Messung

Anhang 3: Fragebogen

A3 Fragebogen

Fragebogen lfd. - Nr.:	
Adresse:	
Stockwerk:	
Abstand zur Erschütterungsquelle:	

1 Wie lange leben Sie schon in dieser Wohnung?

seit weniger als einem Jahr 1
seit 1 - 3 Jahren 2
seit 4 -10 Jahren 3
seit mehr als 10 Jahren 4

2 Wenn man alle äusseren Lebensbedingungen zusammenfasst, wie würden Sie die Lebensqualität in Ihrer Wohngegend einschätzen?

unerträglich schlecht 0
sehr schlecht 1
schlecht 2
durchschnittlich 3
gut 4
sehr gut 5
ideal 6

3 Glauben Sie, dass in Ihrer Wohngegend eine Belästigung der Anwohner vorliegt

	ja	nein
durch Betriebslärm	1	0
durch Verkehrslärm	1	0
durch Erschütterungen	1	0
durch Geräusche, die durch Erschütterungen hervorgerufen werden	1	0

4 Wie stark ist der Verkehrslärm / Betriebslärm in der Wohnung zuhören?

	Verkehrslärm	Betriebslärm
nicht zu hören	0	0
sehr schwach zu hören	1	1
schwach zu hören	2	2
deutlich zu hören	3	3
stark zu hören	4	4
sehr stark zu hören	5	5
unerträglich zu hören	6	6

5 Wie stark sind Geräusche, die durch Erschütterungen hervorgerufen werden, zu hören?

nicht zu hören	0
sehr schwach zu hören	1
schwach zu hören	2
deutlich zu hören	3
stark zu hören	4
sehr stark zu hören	5
unerträglich zu hören	6

6 Wie häufig treten/tritt

	nie	selten	manchmal	oft	sehr oft
Erschütterungen und Lärm gemeinsam auf	0	1	2	3	4
Lärm ohne Erschütterungen auf	0	1	2	3	4
Erschütterungen ohne Lärm auf	0	1	2	3	4
Lärm zufolge Erschütterungen auf	0	1	2	3	4

7 Wie stark sind die Erschütterungen im Haus wahrnehmbar?

nicht wahrnehmbar	0
sehr schwach wahrnehmbar	1
schwach wahrnehmbar	2
deutlich wahrnehmbar	3
stark wahrnehmbar	4
sehr stark wahrnehmbar	5
unerträglich stark wahrnehmbar	6

8 Halten Sie zuhause die Belästigung durch Erschütterungen für

zumutbar	0
unzumutbar	1

9 Halten Sie zuhause die Belästigug durch Verkehrslärm / Betriebslärm für

	zumutbar	unzumutbar
Verkehrslärm	0	1
Betriebslärm	0	1

10 Halten Sie zuhause die Belästigung durch Geräusche, die durch Erschütterungen entstehen, für

zumutbar 0
unzumutbar 1

11 Bitte geben Sie an, wie stark Sie zuhause durch Verkehrslärm / Betriebslärm durch Erschütterungen und durch Geräusche, die durch Erschütterungen entstehen belästigt werden:

	Vl	Bl	Ers	Ger d. Ers
nicht belästigt	0	0	0	0
sehr schwach belästigt	1	1	1	1
schwach belästigt	2	2	2	2
deutlich belästigt	3	3	3	3
stark belästigt	4	4	4	4
sehr stark belästigt	5	5	5	5
unerträglich stark belästigt	6	6	6	6

12 Wie stark stören Erschütterungen zu verschiedenen Tages- und Nachtzeiten?

	nicht	schwach	deutlich	stark	sehr stark
tagsüber (6-22 Uhr)	0	1	2	3	4
nachts (22- 6 Uhr)	0	1	2	3	4
abends (18-22 Uhr)	0	1	2	3	4
morgens (6- 8 Uhr)	0	1	2	3	4

13 **Wie stark stört Verkehrslärm zu verschiedenen Tages- und Nachtzeiten?**

	nicht	schwach	deutlich	stark	sehr stark
tagsüber (6-22 Uhr)	0	1	2	3	4
nachts (22- 6 Uhr)	0	1	2	3	4
abends (18-22 Uhr)	0	1	2	3	4
morgens (6- 8 Uhr)	0	1	2	3	4

14 **Wie stark stört Betriebslärm zu verschiedenen Tages- und Nachtzeiten?**

	nicht	schwach	deutlich	stark	sehr stark
tagsüber (6-22 Uhr)	0	1	2	3	4
nachts (22- 6 Uhr)	0	1	2	3	4
abends (18-22 Uhr)	0	1	2	3	4
morgens (6- 8 Uhr)	0	1	2	3	4

15 **Hier finden Sie eine Reihe von Auswirkungen von Erschütterungen. Bitte geben Sie an, ob und wie häufig diese als Folge von Erschütterungen auftreten.**

	nie	selten	manchmal	oft	sehr oft
man kommt ungern nach Hause	0	1	2	3	4
man ist gereizter	0	1	2	3	4
man fühlt sich wehrlos	0	1	2	3	4
hindert am Einschlafen	0	1	2	3	4
man bekommt Kopfschmerzen	0	1	2	3	4
stört bei Unterhaltung mit Freunden oder Bekannten	0	1	2	3	4
man ärgert sich	0	1	2	3	4
man erschreckt sich	0	1	2	3	4
führt zu Uebelkeit	0	1	2	3	4
man hat Schwierigkeiten beim Lesen	0	1	2	3	4

16 Hier finden Sie eine Reihe von Auswirkungen von Verkehrslärm / Betriebslärm. Bitte geben Sie an, ob und wie häufig diese als folge von Verkehrslärm / Betriebslärm auftreten.

	nie	selten	manchmal	oft	sehr oft
Verkehrslärm					
man ist gereizt	0	1	2	3	4
hindert am Einschlafen	0	1	2	3	4
man bekommt Kopfschmerzen	0	1	2	3	4
man wacht nachts davon auf	0	1	2	3	4
stört bei Unterhaltung mit Freunden oder Bekannten	0	1	2	3	4
hindert am Lesen und Nachdenken	0	1	2	3	4
Betriebslärm					
man ist gereizt	0	1	2	3	4
hindert am Einschlafen	0	1	2	3	4
man bekommt Kopfschmerzen	0	1	2	3	4
man wacht nachts davon auf	0	1	2	3	4
stört bei Unterhaltung mit Freunden oder Bekannten	0	1	2	3	4

17 Wie zufrieden sind Sie mit Ihrem Gesundheitszustand?

sehr zufrieden	0
ziemlich zufrieden	1
mittelmässig zufrieden	2
wenig zufrieden	3
nicht zufrieden	4

18 Geschlecht

männlich 1
weiblich 2

19 Alter

20-29 Jahre 1
30-39 Jahre 2
40-49 Jahre 3
50-59 Jahre 4

Erschütterungseinwirkungen auf Menschen
Richtwerte für die Belästigung

Literatur

Literaturverzeichnis

[1] Umweltschutz-Gesetz (USG) vom 7. Oktober 1983

[2] Lärmschutz-Verordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986

[3] Schweizerische Normenvereinigung, SN 649 312,
Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke, Juni 1979

[4] Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, VSS
Forschungsbericht 5/72

[5] Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, VSS
Forschungsbericht 21/74

[6] Schweizerische Normenvereinigung, SN 649 312a,
Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke, 1992

[7] Studer J., Stolz M., et al., Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute,
Immissionsschutz, Grundlagen zur Festlegung von Richtwerten zur Beurteilung von
Erschütterungen, Mai 1987, Forschungsbericht 22/84

[8] Deutsches Institut für Normung, DIN 45669 Teil 2,
Messungen von Schwingungsimmissionen, Messverfahren, Januar 1984

[9] Deutsches Institut für Normung, DIN 4150 Teil 2,
Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden,
September 1977

[10] H. V. C. Howarth, M. J. Griffin; Subjective rsponse to combined noise and vibration:
summation and interaction effects; Journal of Sound and Vibration (1990) 143(3)
page 443 to 454, 1990

[11] H. V. C. Howarth, M. J. Griffin; The relative importance of noise and vibration: from
railways; Applied Ergonomics, Butterworth and Co. Ltd; June 1990

[12] H. V. C. Howarth, M. J. Griffin; The annoyance caused by simultaneous noise and vibration from railways; J. Acoust Soc. Am. 89(5), may 1991

[13] Deutsches Institut für Normung, DIN 4150 Teil 2,
Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden,
1993