



**BAW**

Gutachten  
über Erschütterungsimmissionen  
durch Schiffahrtsbetrieb



**Bundesanstalt für Wasserbau**

# BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

( B A W )

## Gutachten über Erschütterungsimmissionen durch Schiffahrtsbetrieb

Auftraggeber: Wasserstraßen-Neubauamt Berlin  
Postfach 1125, 10203 Berlin

Auftrag vom: 28.08.96

Auftrags-Nr. : BAW-Nr. 96-67-1604,

Aufgestellt von: Abteilung: Außenstelle Berlin  
Referat: Projektgruppe Dynamik  
Bearbeiter: Dipl.-Phys. Zierach

Berlin, Dezember 1997

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

### Zusammenfassung

Mit dem Ausbau der Berliner Wasserstraßen ist das WNA Berlin in den öffentlich rechtlichen Genehmigungsverfahren zunehmend mit der Fragestellung konfrontiert, ob Schwingungsimmissionen von Binnenschiffen Schäden an baulichen Anlagen hervorrufen können, bzw. ob Belästigungen für Menschen in Gebäuden zu erwarten sind. Bisher fehlten verallgemeinerungsfähige quantitative sowie qualitative Aussagen und Bewertungsmöglichkeiten. Die BAW-AB sollte die Schwingungsimmission von Schiffen sowie die Übertragung der Schwingungen über den Baugrund untersuchen und die Auswirkungen auf Gebäude und Menschen bewerten.

Da die Größe und die Art der Schwingungen aus dem Schiffahrtsbetrieb von vielen zufälligen und nicht zu beeinflussenden Faktoren abhängen, wurden die Schwingungsimmissionen aus Schiffsvorbeifahrten an Bodenmeßpunkten in verschiedenen Entfernungen zum Ufer an mehreren Wasserstraßen bestimmt. Berücksichtigt wurden mehrere hundert Schiffsvorbeifahrten an verschieden ausgebauten Ufern, sowie Passagen durch Schleusen und Vorhäfen. Auf Grundlage dieser Messungen und den vorliegenden Erfahrungen für andere Schwingungsquellen wurden Abhängigkeiten für die Ausbreitung der Schwingungen im Baugrund und für deren Übergang in Gebäude und auf Decken bestimmt. Aus den vorliegenden Untersuchungen wurde eine Prognosemöglichkeit für ähnliche zu betrachtende Fälle abgeleitet.

Für Gebäude sind Schäden bzw. eine Verminderung der Gebrauchsfähigkeit durch Einwirkung von Schiffsschwingungen aus dem Verkehr auf Wasserstraßen nach dem Vergleich der gemessenen und prognostizierten Werte für  $v_{i \max}$  mit den Anhaltswerten aus der DIN4150 Teil 3 nicht zu erwarten.

Für die Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden sind die Anhaltswerte aus der DIN4150 Teil 2 heranzuziehen, bei deren Einhaltung "in der Regel erhebliche Belästigungen...vermieden werden". Wird ausschließlich tagsüber in der Zeit von 6 bis 22 Uhr gefahren, dann sind bei einer Entfernung zum Ufer von  $R \geq 7$  m für alle Einwirkungsorte nach Tabelle 1 der DIN4150 Teil 2 keine erheblichen Belästigungen zu erwarten. Im Falle von Tag- und Nachtverkehr ist die Norm für Entfernungen von  $R \geq 23$  m zum Ufer mit großer Wahrscheinlichkeit für alle Einwirkungsorte erfüllt. Da der Anhaltswert  $A_0$  jedoch

bei Nachtverkehr zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf, sind die in der Tabelle 4 angegebenen prognostischen Abstände von bewohnten Gebäuden zum Ufer etwas unsicherer. Für die Beurteilung eines speziellen Einzelfalls im Nahbereich dieser Abstände sollten deshalb die konkrete Baugrundsituation und die Lage der Fahrrinne berücksichtigt werden und gezielte Schwingungsmessungen an den Decken des Gebäudes zur Ermittlung der Eigenfrequenzen und der Dämpfungen vorgenommen werden. Die genannten Unsicherheiten bestehen insbesondere im Bereich schmaler Wasserstraßen mit ufernahen Fahrrinnen. Nach einem Wasserstraßenausbau mit Vergrößerung des Querschnittes ist im Allgemeinen mit einer Verminderung der Erschütterungseinwirkungen aus dem Schiffsverkehr zu rechnen.

- 1 -

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	6
2	Unterlagen	6
3	Allgemeine Betrachtungen zur Erschütterungsemission von Schiffen	7
4	Erfassung von Schiffsschwingungen	8
4.1	Meßapparatur	11
4.2	Bodenerschütterungen , Zeitabhängigkeit $V_{B,i}(t)$ für $f = 1 \dots 80$ Hz	12
4.3	Bodenerschütterungen, Entfernungsabhängigkeit $v_B(R)$	12
4.4	Erschütterungen an Fundamenten und Decken	13
5	Einwirkung auf Menschen in Gebäuden	16
5.1	Beurteilungsgrößen	16
5.1.1	Die maximale Bewertete Schwingstärke $KB_{F_{max}}$	16
5.1.2	Die Beurteilungs-Schwingstärke $K_{Ftr}$	17
5.2	Anhaltswerte und Beurteilung der Erschütterungen	19
6	Einwirkung von Schiffsschwingungen auf bauliche Anlagen	23
7	Schlußfolgerungen und Empfehlungen	24
8	Literatur	27

- II -

### Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Entfernungabhängigkeit  $v_B(R)$  von Bodenerschütterungen für Berliner Bau-  
grundverhältnisse
- Anlage 2 Entfernungabhängigkeit  $v_B(R)$  von Bodenerschütterungen für die Messung am  
MLK Hannover
- Anlage 3 Häufigkeitsverteilung der Frequenz von Schiffsschwingungen
- Anlage 4 Verhältnis Decken- zu Stützenschwingung bei einer Proberammung am Seiten-  
kanal Wieblingen
- Anlage 5 Resonanzüberhöhungen bei Deckenschwingungen
- Anlage 6 Prognose der Entfernungabhängigkeit von  $KB_{Fmax}$  für Deckenerschütterungen
- Anlage 7 Flußdiagramm für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen aus Schiff-  
fahrtsbetrieb

### Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1 Typische Grundsituationen für Schwingungsemissionen von Schiffen
- Tabelle 2 Einwirkungsorte für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen (aus der  
DIN 4150, Teil 2, Tabelle 1)
- Tabelle 3 Anhaltswerte für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen (aus der  
DIN 4150, Teil 2, Tabelle 1)
- Tabelle 4 Prognose für die Mindestabstände von Gebäuden zu Wasserstraßen, bei denen  
die Anhaltswerte aus der DIN 4150 Teil 2 für bis zu 300 Schiffsvorbeifahrten je  
Beurteilungszeit eingehalten werden
- Tabelle 5 Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit  $v_i$  zur Beurteilung der Wirkung  
von kurzzeitigen Erschütterungen auf Bauwerke (DIN4150 Teil 3 Tabelle 1)

### Abbildungen

- Bild 1 Zeitlicher Verlauf der Schwinggeschwindigkeit bei einer Schiffsvorbeifahrt

**1           Veranlassung und Aufgabenstellung**

Mit dem Ausbau der Berliner Wasserstraßen ist das WNA Berlin zunehmend in den öffentlich rechtlichen Genehmigungsverfahren mit Forderungen nach quantitativ konkreten und nachvollziehbaren Bemessungen von schiffahrtsbetriebsbedingten Lärm-, Erschütterungs- und Schadstoffemissionen konfrontiert.

Von besonderem Interesse bei den hier zu behandelnden Erschütterungen sind die möglichen Veränderungen gegenüber der jeweils vorliegenden Situation, die sich durch Ausbau- und Erweiterungsmaßnahmen (z.B. Profilverbreiterungen) ergeben. Sehr häufig wird von Anliegern befürchtet, daß durch eine Kanalausbaumaßnahme die Schwingungsimmissionen durch verringerten Abstand des Kanals zur vorhandenen Bebauung größer werden und zu Schäden an Gebäuden oder zu dauerhafter Belästigung führen. Zur Klärung derartiger Einwendungen mußten bisher für den aufgeworfenen Einzelfall beim Einwender kurzfristige Untersuchungen durchgeführt werden. Die Möglichkeiten einer Verallgemeinerung auf andere Gegebenheiten waren in der Regel jedoch sehr gering. Um von verschiedenen Einzelfällen zu einer allgemeingültigen Aussage als möglicher Bemessungsgrundlage zu kommen, wurde die BAW beauftragt, aufbauend auf den vorliegenden Erfahrungen und durch weiterreichende, gezielte Untersuchungen und Naturmessungen, gesicherte quantitative Aussagen zu den tatsächlich auftretenden Erschütterungen und deren Bewertung zu erarbeiten. Insbesondere sollte dabei geklärt werden, bis zu welchen Abständen von Gebäuden zu Wasserstraßen Probleme zu erwarten sind bzw. spezielle Untersuchungen notwendig werden könnten.

**2           Unterlagen**

- Auftragschreiben vom 25.07.1996
- Konzeption vom 5.11.1996
- Besprechung beim WNA Berlin am 6.11.1996
- Gutachten und Schwingungsmessungen zum Neubau Schleuse Fankel 3/97, BAW
- Schwingungsmessungen Schleuse Plötzensee 8/97, BAW
- Schwingungsmessungen Schleuse Charlottenburg 8/97, BAW

- Gutachten und Schwingungsmessungen Hannover, Mittellandkanal 1993, BAW
- Schwingungsmessungen Recke, Mittellandkanal 9/97, BAW
- Schwingungsmessungen Oder-Havel-Kanal 6/97, BAW
- Richtlinie für Regelquerschnitte von Schiffahrtskanälen, Ausgabe 1994

### 3 Allgemeine Betrachtungen zur Erschütterungsemission von Schiffen

Neben stationären Maschinen in Betrieben und mobilen Geräten auf Baustellen sind die verschiedenen Verkehrsträger wie Kraftfahrzeuge, Schienenfahrzeuge und Schiffe an der Erzeugung von Erschütterungen beteiligt. Für Maschinen lassen sich schon bei der Planung und Inbetriebnahme Aussagen zur Schwingungsemission treffen. Darauf aufbauend können geeignete aktive oder passive Schutzmaßnahmen zur Minimierung der Emission vorgesehen werden.

Anders gestaltet sich die Situation bei Schwingungen, die von den verschiedenen Land- und Wasserfahrzeugen ausgehen. Die Lage der jeweiligen Erschütterungsquelle ist veränderlich und die Einwirkdauer hängt von der Geschwindigkeit des Einzelfahrzeuges sowie der Anzahl der Fahrzeuge in einem bestimmten Zeitabschnitt ab. Wirken KFZ idealisiert als Punktquellen für die Schwingungen, so ist ein fahrender Zug einer Linienquelle bzw. einer großen Anzahl von Punktquellen gleichzusetzen. Die Einkopplung der Schwingungen in den Baugrund erfolgt bei Schienenfahrzeugen über den Weg "Radsatz-Schiene-Schwelle-Oberbau" und bei Straßenfahrzeugen über den Weg "Rad-Straßendecke", das heißt, es liegt jeweils eine direkte Kopplung mit dem Baugrund vor. Die Erzeugung von Schwingungen erfolgt sogar z. T. direkt an dieser Kopplungsgrenze. Weiterhin sind die in den Baugrund eingetragenen Schwingungen in den oben genannten Fällen in ihrer Art und Größe vom Gewicht und der Geschwindigkeit des Fahrzeuges, der Beschaffenheit des jeweiligen Schienenweges bzw. der Straße abhängig. Neben systematischen Einflußgrößen sind in starkem Maße stochastische Einflüsse zu berücksichtigen. Eine Bewertung der Schwingungsemission kann z. T. nur durch statistische Verfahren erfolgen.

Bei der Schwingungsemission aus dem Schiffsverkehr gibt es im Vergleich zu Landfahrzeugen erhebliche Unterschiede. Die Quellen der Erschütterungen, d.h. die Maschinenanlagen der Schiffe, sind nicht direkt mit dem Baugrund gekoppelt. Zwischen der Schiffs-

außenhaut und dem (Bau)-Grund befindet sich als Übertragungsmedium Wasser. Je nach Tauchtiefe eines Schiffes ist diese Kopplung variabel. Während bei Schienen- und Straßenfahrzeugen transiente Schwingungen mit überwiegend stoßartigen und stochastischen sowie geringen periodischen Anteilen über einem breiten Frequenzband vorherrschen, sind die von Schiffen erzeugten transienten Schwingungen überwiegend periodisch, d.h. mit einer Hauptfrequenz und z.T. einer oder mehreren Nebenfrequenzen. Die Einwirkdauer auf die Umgebung ist entsprechend den vergleichsweise geringen Fahrgeschwindigkeiten von Binnenfrachtschiffen von ca. 8 - 15 km/h (2,2 - 4,1 m/s) länger als bei einem einzelnen KFZ. Diese beiden Eigenschaften ermöglichen, daß es an Bauteilen oder Decken von Gebäuden bei Übereinstimmung von Anregungs- und Eigenfrequenz zu Resonanzerscheinungen kommen kann, das bedeutet eine Verstärkung der eingetragenen Schwingungen.

Da Schiffe neben der Hauptfahrtrichtung im Gewässer auch den Abstand parallel zum Ufer (je nach Querschnittsprofil) relativ frei wählen können, muß außerdem bei den späteren Betrachtungen von beweglichen Quellen mit unterschiedlichen Abständen zum Ufer (als nächstgelegenen Einwirkungsort) bzw. zur anliegenden Bebauung ausgegangen werden.

#### 4 Erfassung von Schiffsschwingungen

Da die Schwingungen relativ klein sind, werden sie von Erschütterungen aus dem Straßenverkehr häufig stark überlagert oder gar vollständig verdeckt. Bei der Erfassung von Schiffsschwingungen ergeben sich daraus eine Reihe von Schwierigkeiten, die eine spätere Verallgemeinerung erschweren. Ein möglicher Ansatz wäre, die Schwingungen am Emissionsort, also dem Schiff zu messen.

In der BAW durchgeführte Modellversuche mit einem Modellschiffskörper in einem Bassin ergaben, daß der Großteil der Schwingungen von der Antriebsmaschine auf den Rumpf übertragen wird und über die Schiffsaußenhaut abgestrahlt wird. Die Schwingungen der Schiffsaußenhaut korrelieren dann mit den Schwingungen am "Grund". Die Größe und die Blattzahl der Schiffsschraube spielen hingegen eine untergeordnete Rolle. Durch unterschiedliche Bauarten der Maschinen, deren Aufhängungen im Schiffskörper und die unterschiedlichen Bootstypen unterliegen die realen "Schwingungsquellen" großen Eigenschaftsschwankungen. Als weitere Parameter kommen noch die jeweils bei einer Messung vorlie-

gende Motordrehzahl, die Geschwindigkeit, die Entfernung zum Ufer und die Eintauchtiefe (Ladungszustand) des Schiffes hinzu. Daraus ergibt sich, daß Schwingungsmessungen am Emissionsort (Schiff) nicht sinnvoll sind. Statt dessen sollten die Immissionen, also die Einwirkungen in unterschiedlichen Abständen (vom Schiff) am Ufer erfaßt werden. Für einen Großteil der Messungen wurden solche Bereiche ausgesucht, bei denen zwischen Schiffen und Meßstellen die kleinsten bei tatsächlichem Schiffsverkehr vorkommenden Abstände zum Ufer auftraten. Für die "Nahmessungen" wurden an solchen Orten Bodenmeßpunkte in 4 bis 6 m Entfernung zum Ufer eingerichtet, um dann gesicherte Daten für die Untersuchung der Ausbreitung der Schwingungen zur Verfügung zu haben. Für das Erreichen einer hohen statistischen Sicherheit war es Notwendigkeit, an verschiedenen Wasserstraßen eine große Anzahl von Schiffvorbeifahrten zu messen und in die Auswertung eingehen zu lassen.

Im innerstädtischen Bereich ist eine genaue Messung der Ausbreitung der Schwingungen im Boden wegen der häufigen starken Überlagerung durch andere Erschütterungsquellen, insbesondere den Straßenverkehr, nur schwer realisierbar bzw. nicht möglich. Genauere Aussagen sind zu erwarten, wenn die Ausbreitung der Schwingungen bei Kenntnis der Immissionsgröße in Quellnähe im Analogieschluß aus vorliegenden Messungen und gesicherten Erfahrungen mit "ähnlichen", jedoch stärkeren Quellen wie Vibratoren aus dem Bauwesen oder stationär betriebenen Maschinen beschrieben werden. Ergänzend wurden für ausgewählte Fälle, das heißt "sehr ruhige" Gebiete mit geringer Grundunruhe, Meßprofile quer zur Wasserstraße angelegt, um die Ausbreitung der Schiffsschwingungen mit der Entfernung nachzuweisen, und damit die oben beschriebene Verfahrensweise zu stützen. Fehlinterpretationen durch Störeinwirkungen aus dem Straßenverkehr und anderen Erschütterungsquellen ließen sich so vermeiden.

Für den Schiffsbetrieb lassen sich unterschiedliche Grundsituationen beschreiben, die sich in ihrer zeitlichen und örtlichen Häufigkeit unterscheiden (siehe Tabelle 1). In die Auswertung der Naturmessungen wurden in großer Zahl die Vorgänge 1 bis 3 der Tabelle 1 einbezogen, der Fall 4 wurde nur einmal beobachtet. Die unter 5 genannten stoßartigen Erschütterungen gehen nicht in die folgenden Bewertungen ein, da sie nur bei örtlichem Bezug zu einer Schleuse bzw. Häfen eine Rolle spielen.

Vorgang	Ort	Häufigkeit
1. reiner Fahrbetrieb mit konstanter Nenndrehzahl der Hauptmaschine(n)	freie Strecken	tritt an freien Strecken, bezogen auf einen festen Punkt in der Nähe des Ufers, am häufigsten auf
2. Schiffsbegegnungen, für die nötigen Ausweichmanöver wird die Maschinendrehzahl häufig geändert,	freie Strecken	tritt bezogen auf einen festen Punkt in der Nähe des Ufers sehr selten auf,
3. Einfahrt und Ausfahrt aus Schleusen,	Schleusen	-
4. Manövrieren in Vorhäfen von Schleusen	Vorhäfen von Schleusen	hängt von der Notwendigkeit ab, ob Schubverbände geteilt bzw. gekoppelt werden müssen
5. Stoß gegen Dalben und Anfahren von Schleusenwänden und Einfahrten	Dalben, Schleusenwände	selten

Tabelle 1: Typische Grundsituationen für Schwingungsemissionen von Schiffen

Die Besonderheit der gemessenen Ein- und Ausfahrten aus Schleusen bestand darin, daß der Abstand der Schiffe zum Ufer minimal war (z.T. bis auf wenige dm), geringere Abstände zum Ufer sind praktisch nicht mehr möglich. Damit wurden die am Ufer größtmöglichen Schwingungsereignisse bei Schiffsvorbeifahrten registriert. Bei den Doppelschleusen in Berlin Plötzensee und Charlottenburg wurden ausschließlich die gemessenen Fahrten durch die Schleusenkammer direkt neben dem Meßprofil gewertet, die Fahrten durch die 2. Kammer wurden als Schwingungsereignisse wegen der äußerst geringen Schwingungspegel und der ungenauen Entfernungsbestimmungen zum Ufer nicht herangezogen. In die Auswertung gingen die Ergebnisse von Messungen an Ufern mit Spundwänden und geböschten Ufern ein.

Als Verursacher von Schwingungen gelten im Weiteren nur Fahrgastschiffe, Motorgüter- und Tankschiffe sowie Schubverbände. Die Schwingungsimmission von Sportbooten ist so gering, daß sie nahezu immer in der vorherrschenden Grundunruhe "verschwindet". Die im weiteren betrachteten Häufigkeiten von Schiffsvorbeifahrten beziehen sich also ausschließlich auf die Binnenberufsschifffahrt. In die Bewertung gingen sowohl die im Berliner Raum anzutreffenden Fahrzeugtypen, die etwas größeren Schiffe auf dem Mittellandkanal und

große Schubverbände bis 180 m Gesamtlänge, wie sie auf der Mosel und dem Rhein anzutreffen sind, ein.

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen war die Verkehrsdichte auf den Wasserstraßen im Berliner Raum sehr ungleichmäßig verteilt, von wenigen Schiffen am Tag bis zu etwa 150 Schiffen und Schubverbänden an der Schleuse Charlottenburg. Dieser letztgenannte Wert ist für Berliner Verhältnisse sehr hoch und hing mit Verkehrsumleitungen und den Baumaßnahmen am Potsdamer Platz zusammen.

Die Schwingungsausbreitung wird im weiteren systematisch in folgenden Schritten betrachtet:

- Schwingungsgröße (Immission) am Ufer
- Ausbreitung der Schwingungen im Boden
- Schwingungsübernahme Boden-Bauwerksfundament
- Schwingungsübernahme Fundament-Decke

Die Bewertung der Schwingungen erfolgt dann entsprechend der Verfahrensweise aus der DIN 4150 Teil 2 und 3.

#### 4.1 Meßapparatur

Als meßbare Größe zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkung sowohl auf Bauwerke als auch auf Menschen in Gebäuden wird vorrangig die Schwinggeschwindigkeit  $v_i$  (Index  $i$  = Richtungskomponente X, Y oder Z mit dem größten Wert) und deren Frequenz herangezogen. Die Messung der Schwinggeschwindigkeit erfolgte an den untersuchten Stellen jeweils an ein bis zwei Meßplätzen mit Schwingungsmessern SMK-4812 und 3D-Geophonen der Kebe Scientific Instruments GmbH, nach DIN 45669-C8HV1-80. (3D = dreidimensional). Die Aufzeichnung der Messungen erfolgte auf einem Meßcomputer IP-Lite der Fa. Kontron und 12-Bit AD-Wandlerkarte PCI von Intelligent Instruments mit 300 Hz Abtastrate bzw. auf einem digitalen Meßwerterfassungssystem SC9060 von pk-systeme mit 312.5 Hz Abtastrate.

Die eingesetzten Meßapparaturen gestatten die Speicherung des zeitlichen Verlaufs der Schwinggeschwindigkeit  $v$  ( $v = ds/dt$ ,  $s$  = Schwingweg,  $t$  = Zeit). Bei Langzeitpegelmessungen an der Schleuse Fankel wurden für vier 3D-Meßpunkte (12 Meßkanäle) die Größtwerte der Schwinggeschwindigkeit je Sekunde registriert. Die verwendeten 3D-Geophone sind im Frequenzbereich von 1 Hz bis 315 Hz kalibriert. Zur Aufzeichnung, Auswertung und Analyse der Meßdaten wurde die Software DIA-DAGO von der GFS-Aachen eingesetzt.

#### 4.2 Bodenerschütterungen, Zeitabhängigkeit $V_{B,i}(t)$ für $f = 1 \dots 80$ Hz

Bild 1 zeigt den typischen Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit für eine Komponente  $v_{B,i}(t)$  bei einer Schiffsvorbeifahrt an einem ufernahen Meßpunkt. Das Maximum der an einer Meßstelle auftretenden transienten Schwingung ist im Mittel nach ca. 30 s durchlaufen. Für die weiteren Betrachtungen wird je Schiffsvorbeifahrt das auftretende Maximum aller Komponenten der Schwingungen  $v_B$  verwendet.

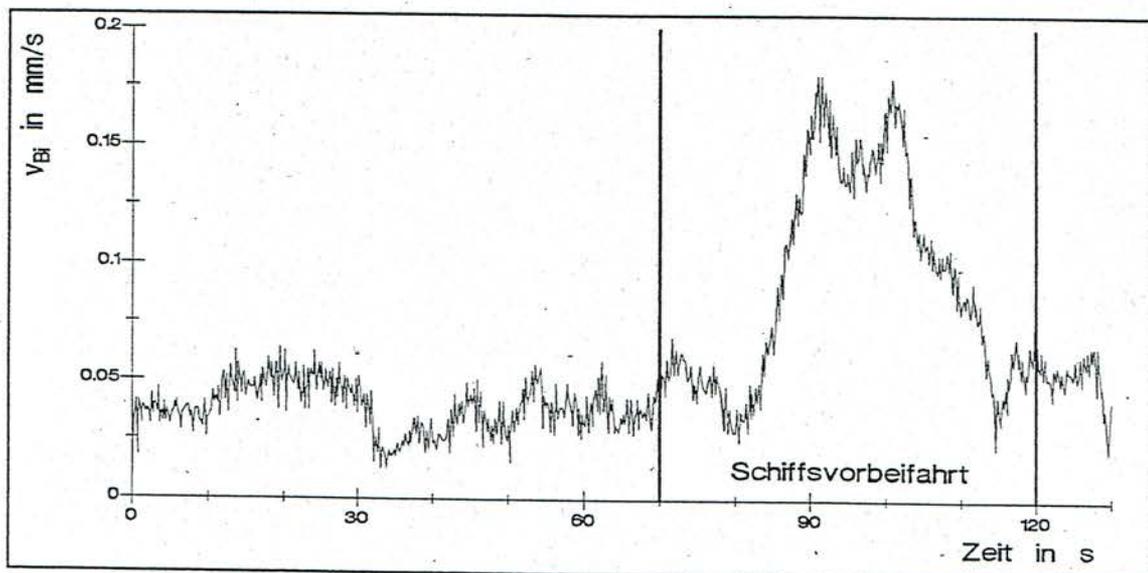


Bild 1 Zeitlicher Verlauf der Schwinggeschwindigkeit bei einer Schiffsvorbeifahrt

#### 4.3 Bodenerschütterungen, Entfernungsabhängigkeit $v_B(R)$

In Anlage 1 sind mehrere hundert Erschütterungsmessungen für verschiedene Meßorte aufgetragen. Jeder dargestellte Meßwert entspricht dem aufgetretenen Maximum der

Schwinggeschwindigkeit  $v_B$  am Boden bei einer Schiffsvorbeifahrt. Zum Vergleich ist die menschliche Fühlschwelle für sinusförmige Ganzkörperschwingungen nach /1/ bei 0,20 mm/s als Maß für die subjektive Wahrnehmung eingetragen. Wie die Abbildung in Anlage 1 zeigt, kann die Ausbreitung der Schwingungen für typische Berliner Baugrundverhältnisse (überwiegend Sande) durch folgende Regressionen beschrieben werden:

$$v_{B, \text{mittel}} = 1,02 \text{ mm/s} * (R/1\text{m})^{-1,08} \quad (1)$$

$$v_{B, 95\%} = 2,43 \text{ mm/s} * (R/1\text{m})^{-1,08} \quad (2)$$

mit  $R$  = Abstand vom Ufer (Rand des Wasserspiegels)

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich vorerst auf diesen Abstand  $R$  zum Ufer, das heißt den Rand des Wasserspiegels der Wasserstraße. Damit ergibt sich für das  $R$ -Profil der Regelquerschnitte (senkrechte Spundwände) entsprechend der Richtlinie vom BMV ein minimaler Abstand vom Ufer zur Schiffsaußenkante von  $R_s \geq 4 \text{ m}$ .

In Ausnahmefällen kann es bei besonderen Baugrundsituationen wie z.B. sehr festen Ton- oder Mergelböden sowie Schichtungen mit großen Festigkeitsunterschieden zu einer geringeren Dämpfung der Schwingungsausbreitung als in Gleichung (1) kommen. Bei einer Messung am Mittellandkanal in Hannover wurde dieser Effekt in einem Gebiete angetroffen, wo sich eine vom Kanalboden in die Umgebung ansteigende gesteinsfeste Tonmergelschicht befand (siehe Anlage 2).

#### 4.4 Erschütterungen an Fundamenten und Decken

Bei den Untersuchungen von Schiffsschwingungen erwiesen sich die Erschütterungsmessungen auf Decken als sehr fehleranfällig, da die von den Bewohnern erzeugten Erschütterungen meist wesentlich stärker sind. Aufgrund der Schwierigkeiten beim Zugang zu fremden Wohnungen und wegen der sich daraus ergebenden unzumutbaren Belästigungen für die Bewohner bei Messungen über längere Zeiträume wurden Messungen auf Decken nur in einigen Fällen durchgeführt. Ergebnisse über Schiffsschwingungen konnten exemplarisch an Gebäudedecken in Fankel und Hannover gewonnen werden. Die Untersuchungen zeigten, daß im Bereich von Gebäuden gemessene Bodenschwingungen als alter-

native Bezugsgröße zu den Deckenschwingungen vernünftige Aussagen zulassen. Die Größe von Deckenschwingungen  $v_D$  ( $v_D$  = Maximale Schwinggeschwindigkeit je Schiffs vorbeifahrt) hängt neben der Größe der über den Boden  $v_B$  in die Fundamente  $v_F$  eingeleiteten Erschütterungen wesentlich von den Schwingungseigenschaften der betroffenen Decke ab. Sind im Spektrum der Erregung Frequenzanteile enthalten, die mit Eigenfrequenzen oder deren Harmonischen von Decken übereinstimmen, ist mit einer Vergrößerung der Schwingungsamplituden zu rechnen. An Decken können, je nach der Dämpfung (abhängig von der Bauart und Möblierung) und der Differenz von Anregungs- und Bauteileigenfrequenz bis zu 15fach, in äußerst seltenen Ausnahmefällen bis zu 30fach höhere Schwinggeschwindigkeiten als an den Fundamenten auftreten.

Die Übertragung der Bodenerschütterungen über die Fundamente auf Decken läßt sich für eine statistische Betrachtungsweise mit Hilfe von frequenzabhängigen Übertragungsfaktoren mit

$$F_1(f) = v_F / v_B$$

und

$$F_2(f) = v_D / v_F$$

beschreiben, so daß für Decken gilt:

$$v_D = F_1 * F_2 * v_B \quad (3)$$

Der Faktor für die Übertragung Boden - Fundament beträgt im Mittel  $F_1 \approx 0.5$ . Als Größtwert ist  $F_1 \leq 2$  für den Resonanzfall des gesamten Gebäudes möglich. Für die Übertragung Fundament - Decke kann im Mittel angegeben werden:

$F_2 \approx 2$	für Frequenzen	$f_{\text{Schiff}} / f_{\text{Decke}} < 0,8$
	und	$f_{\text{Schiff}} / f_{\text{Decke}} > 1,2$

$F_2 \approx 6$	für Frequenzen	$0,8 < f_{\text{Schiff}}/f_{\text{Decke}} < 0,98^{(1)}$
	und	$1,02 < f_{\text{Schiff}}/f_{\text{Decke}} < 1,2$

$f_{\text{Schiff}}$  = vom Schiff angeregte Frequenz

$f_{\text{Decke}}$  = Resonanzfrequenz der Decke

Eine Klassierung der bei den Schifferschütterungen aufgetretenen Frequenzen mit einer Frequenzklassenbreite von 2.5 Hz ergibt als maximale relative Häufigkeit ca.10 % (s. Anlage 3). Das Auftreten eines Übertragungsfaktors von  $F_2 \approx 6$  kann etwa dieser maximalen relativen Häufigkeit gleichgesetzt werden.

<sup>(1)</sup> In Fällen sehr gering gedämpfter Decken kann gerechnet werden mit:

$$F_2 \leq 15 \quad \text{für Frequenzen} \quad 0,98 < f_{\text{Schiff}}/f_{\text{Decke}} < 1,02$$

Durch schwache Kopplung der Decke mit den tragenden Wänden oder eine ungleichphasige Anregung der Wände muß diese Resonanzüberhöhung jedoch nicht zwingend eintreten. In Anlage 4 wird dieses Verhalten bei der Gegenüberstellung von theoretisch möglicher Resonanzüberhöhung und der bei Messungen tatsächlich aufgetretenen sichtbar. Nur in wenigen Fällen wird die mögliche Resonanzüberhöhung beim Zusammentreffen von Decken- und Anregungsfrequenz auch erreicht. Die Häufigkeit des Auftretens von Deckenresonanzen mit Übertragungsfaktoren bis zu  $F_2 \approx 15$  liegt nach den Erfahrungen aus Messungen auf Decken (Hannover, Fankel) bei  $\leq 1$  % der Schiffspassagen. Ein einziger gemessener Resonanzfall trat bei einer in Bezug auf einen festen Uferpunkt als selten anzusehenden Schiffsbegegnung auf, wobei die gemessenen Anregungsfrequenzen wegen eines Ausweichmanövers der Schiffe, verbunden mit einer Verringerung der Schiffsgeschwindigkeit und anschließendem Hochdrehen der Antriebsmaschinen einen größeren Bereich durchliefen und damit die Deckeneigenfrequenz "getroffen" wurde (siehe auch Tabelle 1). Dieser Betriebsfall tritt in der hier beobachteten Form nur in engen und nichtausgebauten Kanälen auf. In Anlage 5 ist zur Veranschaulichung der Zusammenhang zwischen der Resonanzüberhöhung einer Decke und dem Verhältnis von anregender Frequenz zu Deckeneigenfrequenz mit der Dämpfung als Parameter dargestellt.

Aus den durchgeführten Untersuchungen kann für die Größe der zu erwartenden Deckenschwingungen (Schwinggeschwindigkeit  $v_D$ ) in Abhängigkeit von den Bodenschwingungen folgende Häufigkeitsverteilung abgeleitet werden:

- |   |  |   |
|---|--|---|
| - | $\approx 89$ %-Häufigkeit (im Mittel): | $v_{D,1} \approx v_{B,\text{mittel}}$       |
| - | $\approx 10$ %-Häufigkeit:             | $v_{D,2} \approx 3 * v_{B,\text{mittel}}$   |
| - | $\approx 1$ %-Häufigkeit:              | $v_{D,3} \approx 7.5 * v_{B,\text{mittel}}$ |

## 5 Einwirkung auf Menschen in Gebäuden

Die zur Beurteilung der Einwirkung von Schwingungen auf Menschen in Gebäuden heranzuziehende DIN 4150 Teil 2 nennt Anhaltswerte, bei deren Einhaltung in der Regel erhebliche Belästigungen von Menschen vermieden werden. Die Belästigung durch Erschütterungen hängt im wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- der Größe der auftretenden Erschütterungen
- der Frequenz
- der Einwirkungsdauer
- der Häufigkeit und der Tageszeit des Auftretens

Die Berücksichtigung und Wertung dieser Faktoren für die Erschütterungseinwirkungen erfolgt durch die Bestimmung der Beurteilungsgrößen maximale Bewertete Schwingstärke  $KB_{F_{max}}$  und, falls erforderlich, der Beurteilungsschwingstärke  $KB_{F_{Tr}}$ . Die Ausgangsgrößen zur Bestimmung der Beurteilungsgrößen  $KB_{F_{max}}$  und  $KB_{F_{Tr}}$  sind die drei Komponenten der Schwinggeschwindigkeit  $v_i$ , gemessen auf dem Fußboden des Wohnraumes eines zu betrachtenden Gebäudes, in dem die größten Schwingungen auftreten bzw. zu erwarten sind (meist Fußbodenmitte). Als Grundlage für eine allgemeine Betrachtung werden im Weiteren die in 4.4 angegebenen Abhängigkeiten herangezogen.

### 5.1 Beurteilungsgrößen

#### 5.1.1 Die maximale Bewertete Schwingstärke $KB_{F_{max}}$

Aus dem unbewerteten Erschütterungssignal  $v(t)$  (Schwinggeschwindigkeit in den Frequenzen 1 bis 80 Hz bandbegrenzt) wird durch Frequenzbewertung (Hochpass 1. Grades,  $f_0 = 5,6$  Hz) und gleitende Effektivwertbildung (Zeitkonstante 125 ms) die Bewertete Schwingstärke gebildet. Die maximale Bewertete Schwingstärke  $KB_{F_{max}}$  ist dann der im vorgegebenen Beurteilungszeitraum aufgetretene Maximalwert der Bewerteten Schwingstärke. Die Bewertete Schwingstärke wird in der Regel apparativ aus der frequenzbewerteten Schwinggeschwindigkeit gebildet. Näherungsweise kann  $KB_{F_{max}}$  aus der Aufzeichnung von  $v(t)$  nach der Gleichung (4) bestimmt werden.

$$KB_{F \max} = c_F * \frac{1}{\sqrt{2}} * \frac{V_{D \max}}{\sqrt{1 + \left(\frac{5,6}{f}\right)^2}} \quad (4)$$

mit:

- $c_F$  - ein von der Art der Erschütterungseinwirkung abhängiger Faktor (für harmonisch unverzerrte Erschütterungen ist  $c_F \approx 0,9$ )
- $V_{D \max}$  - Größtwert der Schwinggeschwindigkeit auf der Decke im Beurteilungszeitraum
- $f$  - Frequenz der Grundschiwingung

Für eine mittlere Frequenz von  $f = 16$  Hz ist  $KB_{F \max}$  für Gebäude mit der Entfernung  $R$  zum Ufer nach (4):

$$KB_{F \max} \approx 0,6 * V_{D \max} \quad (5)$$

Aus (1) und für den Fall der statistisch zu erwartenden größten Deckenschwingung mit  $v_{D,3} \approx 7,5 * v_{B, \text{mittel}}$  ergibt sich:

$$KB_{F \max} \approx 4,5 * (R/1m)^{-1,08} \quad (6)$$

### 5.1.2 Die Beurteilungs-Schwingstärke $KB_{Ftr}$

Die Beurteilungs-Schwingstärke  $KB_{Ftr}$  wird gebildet, um neben einer Wichtung der Größe der Schwingung eine Bewertung der Einwirkungsdauer vornehmen zu können.

Zur Bestimmung der Beurteilungs-Schwingstärke  $KB_{Ftr}$  werden die Beobachtungszeiten in Takte von je  $T = 30$  s eingeteilt. Für die Betrachtung von Schiffsschwingungen ist ein 24-Stunden Tag für den Fall von Nachtverkehr in zwei Beurteilungszeiten mit folgender Anzahl für die Takte aufzuteilen:

Tag (16 h) :	$N_{T,1} = 1440$ (7 -19 Uhr, Werktags)
	$N_{T,2} = 480$ (Ruhezeit 6-7 Uhr und 19-22 Uhr, Werktags)

Nacht (8h):

$$N_{T,3} = 960$$

Für den Fall von ausschließlichem Verkehr in der Zeit von 6 - 22 Uhr muß  $KB_{Ftr}$  nur für eine Beurteilungszeit (Tag) gebildet werden.

Der Wert der Beurteilungs-Schwingstärke  $KB_{Ftr}$  ist der Taktmaximal-Effektivwert  $KB_{FTm}$  über die Beurteilungszeit (tags:  $T_r = 16$  h und nachts:  $T_r = 8$  h) unter Berücksichtigung eines Gewichtungsfaktors für Einwirkungen, die in Ruhezeiten fallen.

$$KB_{FTr} = \sqrt{\frac{1}{T_r} * (T_{e1} * KB_{FTm1}^2 + 2T_{e2} * KB_{FTm2}^2)} \quad (7)$$

Hierin bedeuten:

$T_r$	Beurteilungszeit
$T_{e1}$	Einwirkungszeit außerhalb von Ruhezeiten = 12 h
$T_{e2}$	Einwirkungszeit während der Ruhezeiten = 4h
$KB_{FTm1}$	Taktmaximal-Effektivwert außerhalb der Ruhezeiten
$KB_{FTm2}$	Taktmaximal-Effektivwert während der Ruhezeiten

Wie Abbildung 1 zeigt, kann eine Schiffspassage zeitlich etwa einem Takt gleichgesetzt werden. Die Taktmaximalwerte der Bewerteten Schwingstärke nach (1) betragen somit für:

89 % der Takte:	$KB_{FT1} \approx 0,6 * V_{D,1} \approx 0,6 * R^{-1,08}$
10 % der Takte:	$KB_{FT2} \approx 0,6 * V_{D,2} \approx 1,8 * R^{-1,08}$
1 % der Takte:	$KB_{FT3} \approx 0,6 * V_{D,3} \approx 4,5 * R^{-1,08}$

Der Taktmaximal-Effektivwert

$$KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N_T} \sum_{l=1}^N KB_{FTl}^2} \quad (8)$$

beträgt außerhalb der Ruhezeiten:

$$KB_{FTm1} \approx 2.1 * 10^{-2} * N_{S,Tag}^{0.5} * (R/1m)^{-1.08} \quad (9)$$

in Ruhezeiten:

$$KB_{FTm2} \approx 2.1 * 10^{-2} * N_{S,Tag}^{0.5} * (R/1m)^{-1.08} \quad (10)$$

1

und nachts:

$$KB_{FTm3} \approx 3.0 * 10^{-2} * N_{S,Nacht}^{0.5} * (R/1m)^{-1.08} \quad (11)$$

mit:

$N_{S,Tag}$  - Anzahl der Schiffspassagen am Tag

$N_{S,Nacht}$  - Anzahl der Schiffspassagen nachts

Unter der Voraussetzung, daß Schiffe etwa gleichverteilt über den jeweils ganzen Beurteilungszeitraum verkehren, ergibt sich nach (7) die Beurteilungs-Schwingstärke  $KB_{FTr}$  näherungsweise für den Beurteilungszeitraum am Tage (6.00 bis 22.00 Uhr) zu:

$$KB_{FTr} \approx 2.3 * 10^{-2} * N_{S,Tag}^{0.5} * (R/1m)^{-1.08} \quad (12)$$

und für den Fall von Nachtverkehr (22.00 bis 6.00 Uhr) zu:

$$KB_{FTr} \approx 3.0 * 10^{-2} * N_{S,Nacht}^{0.5} * (R/1m)^{-1.08} \quad (13)$$

## 5.2 Anhaltswerte und Beurteilung der Erschütterungen

In der Tabelle 1 in der DIN 4150, Teil 2 sind Anhaltswerte für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen in Wohnungen und vergleichbar genutzten Räumen für Situationen angegeben, in denen Erschütterungsquellen über mehrere Monate und Jahre auf Immissionsorte einwirken. Nach dem Gesichtspunkt der Schutzbedürftigkeit gegen Erschütterungen werden in der Norm fünf unterschiedlich bewertete Einwirkungsorte (Zeile 1 bis 5 der Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 2) beschrieben. (siehe Tabelle 2)

Zeile Nr.	Einwirkungsort
1	Einwirkungsorte, in deren Umgebung nur gewerbliche Anlagen und gegebenenfalls ausnahmsweise Wohnungen für Inhaber und Leiter der Betriebe sowie für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen untergebracht sind (vergleiche Industriegebiete § 9 BauNVO)
2	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend gewerbliche Anlagen untergebracht sind (vergleiche Gewerbegebiete § 8 BauNVO)
3	Einwirkungsorte, in deren Umgebung weder vorwiegend gewerbliche Anlagen noch vorwiegend Wohnungen untergebracht sind (vergleiche Kerngebiete § 7 BauNVO, Mischgebiete § 6 BauNVO, Dorfgebiete § 5 BauNVO)
4	Einwirkungsorte, in deren Umgebung vorwiegend oder ausschließlich Wohnungen untergebracht sind (vergleiche reines Wohngebiet § 3 BauNVO, allgemeine Wohngebiete § 4 BauNVO, Kleinsiedlungsgebiete § 2 BauNVO)
5	Besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte, z.B. in Krankenhäusern, in Kurkliniken, soweit sie in dafür ausgewiesenen Sondergebieten liegen

Tabelle 2 Einwirkungsorte für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen (aus der DIN 4150, Teil 2, Tabelle 1)

Zur weiteren Beurteilung werden die ermittelten  $KB_{F_{max}}$  und  $KB_{F_{Tr}}$  Werte mit den Anhaltswerten  $A_u$ ,  $A_o$  und  $A_r$  (siehe Tabelle 3) verglichen.

Einwirkungs- ort nach Zeile	tags			nachts		
	$A_u$	$A_o$	$A_r$	$A_u$	$A_o$	$A_r$
1	0,40	6	0,20	0,30	0,60	0,15
2	0,30	6	0,15	0,20	0,40	0,10
3	0,20	5	0,10	0,15	0,30	0,07
4	0,15	3	0,07	0,10	0,20	0,05
5	0,10	3	0,05	0,10	0,15	0,05

Tabelle 3 Anhaltswerte für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen (aus DIN 4150, Teil 2, Tabelle 1)

Die Bewertung der Erschütterungseinwirkung wird nach den folgenden Kriterien vorgenommen:

Bei  $KB_{F_{max}} < A_u$  ist die Norm eingehalten, d.h. mit erheblichen Belästigungen ist nicht zu rechnen. Bei  $KB_{F_{max}} > A_o$  ist die Norm nicht eingehalten. Im Falle  $A_u < KB_{F_{max}} < A_o$  ist die Norm bei selten auftretenden Ereignissen (bis zu 3 mal täglich) erfüllt. Bei häufigeren Ereignissen gilt die Norm bei  $KB_{F_{Tr}} < A_r$  als erfüllt.

Zeile	tags			nachts		
	$KB_{F_{max}} < A_u$	$KB_{F_{max}} < A_o$	$KB_{F_{Tr}}^{(1)} < A_r$	$KB_{F_{max}} < A_u$	$KB_{F_{max}} < A_o$	$KB_{F_{Tr}}^{(1)} < A_r$
1	R > 10 m	R > 1 m	R > 2 m	R > 12 m	R > 7 m	R > 3 m
2	R > 12 m	R > 1 m	R > 3 m	R > 18 m	R > 10 m	R > 5 m
3	R > 18 m	R > 1 m	R > 4 m	R > 23 m	R > 12 m	R > 7 m
4	R > 23 m	R > 2 m	R > 5 m	R > 34 m	R > 18 m	R > 9 m
5	R > 34 m	R > 2 m	R > 7 m	R > 34 m	R > 23 m	R > 9 m

Tabelle 4 Prognose für die Abstände von Gebäuden zur Uferlinie von Kanälen, bei denen die Anhaltswerte aus der DIN4150 Teil 2 für bis zu 300 Schiffsvorbeifahrten<sup>(1)</sup> je Beurteilungszeit mit großer Wahrscheinlichkeit eingehalten werden (Entfernung R auf volle m gerundet)

Unter Zugrundelegung von (2), (3) und (4) wurden Mindestabstände zwischen Gebäude und Ufer bestimmt und in der Tabelle 4 angegeben, für die die obigen Anhaltswerte mit hoher Wahrscheinlichkeit eingehalten werden können. Für die Prognose wurde dabei von 300 Schiffsvorbeifahrten je Bewertungszeit ausgegangen. Die oben genannten Abstände gelten für Kanäle mit senkrechten und geböschten Ufern entsprechen der Richtlinie für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen. Hierin wird der Abstand  $S_u$  zwischen der Wasserlinie am Ufer bei Oberwasserstand und der Begrenzung der Fahrrinne mit 4 bzw. 11 m angegeben.

Bei größeren Abständen der Fahrinnen zum Ufer ( $S_u \geq 11$  m) verringern sich die in Tabelle 4 angegebenen Abstände zur Uferlinie. Die Möglichkeit kleinerer Abstände von Gebäuden zum Ufer gegenüber den Angaben in der Tabelle 4 zuzulassen, dürfte jedoch nur bei der Annahme von Nachtverkehr von praktischem Interesse sein. Für die Ermittlung verringerter Abstände von bewohnten Gebäuden zum Ufer ist wie folgt zu verfahren:

- Entfernung der Uferlinie zur Fahrrinne ermitteln und hiervon 11 m abziehen
- Ergebnis zu der Entfernung Uferlinie - Gebäude addieren

- zur neuen Entfernung zugehörigen  $KB_{F_{max}}$ -Wert in Anlage 6 ermitteln und mit den entsprechenden Anhaltswerten  $A_0$  in Tabelle 3 vergleichen

Am Tage sind für Bauwerksabstände zum Ufer von  $R > 7$  m bei bis zu 300 Schiffsvorbeifahrten je Bewertungszeitraum für alle Einwirkungsorte die Anhaltswerte der Norm mit hoher Wahrscheinlichkeit eingehalten, d.h. es ist nicht mit erheblichen Belästigungen zu rechnen. Das Kriterium für die Einhaltung der Norm ist hier die Bewertungsgröße  $KB_{FT} < A_r$ .

Bei nächtlichem Schiffsverkehr sind in unmittelbarer Ufernähe in Schutzgebieten nach Zeile 5 bei  $R < 23$  m, in Wohngebieten nach Zeile 4 bei  $R < 18$  m und in Wohngebieten nach Zeile 3 bei  $R < 12$  m Überschreitungen des Anhaltswertes  $A_0$  möglich. Das Kriterium für die Einhaltung der Norm ist hier die Bewertungsgröße  $KB_{F_{max}}$ . Da der Anhaltswert  $A_0$  bei der Bewertung aber zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf, ist die prognostische Sicherheit dieser Entfernungsangaben für nächtlichen Schiffsverkehr geringer als für die  $KB_{FT}$ -Bewertung am Tage. Ob Schutzgebiete nach Zeile 5 im Bereich von vorhandenen Schiffahrtskanälen überhaupt ausgewiesen werden können, kann hier nicht geklärt werden. Die Notwendigkeit der größeren Abstände zu Wasserstraßen für den Nachtfahrbetrieb ergibt sich aus der starken Herabsetzung der Anhaltswerte  $A_0$  für die Zeilen 2 bis 5 in der Tabelle 3.

Als kritische Anmerkung zur vorliegenden Form der DIN4150 soll noch auf folgenden Sachverhalt hingewiesen werden. Für neu zu errichtende Fern- und S-Bahnstrecken gilt als Sonderregel gebietsunabhängig  $A_0 = 0,6$ . Weiterhin werden für oberirdisch geführte Straßen-, Stadt- und U-Bahnstrecken sowie für bestehende Schienenwege in der DIN 4150 Teil 2 keine Aussagen getroffen. Von allen vorhandenen Verkehrsträgern müssen zur Zeit nur die Immissionen des Schiffsverkehrs in vollem Umfang nach Tabelle 3 bewertet werden, da keine Ausnahmeregelung für den Schiffsverkehr vorhanden ist. Das führt zu der paradoxen Situation, daß in den Einwirkungsorten nach Zeile 2 bis 5 durch andere Verkehrsträger als den Schiffsverkehr hervorgerufene höhere Erschütterungsimmissionen in den Nachtstunden zulässig sind. Es ist also bei der Interpretation der oben gemachten Aussagen durchaus sinnvoll, die Gesamtverkehrssituation für einen zu untersuchenden Bereich zu betrachten.

## 6 Einwirkung von Schiffsschwingungen auf bauliche Anlagen

Für die Beurteilung der Wirkung von Schwingungen aus dem Schiffsverkehr auf bauliche Anlagen sind die Anhaltswerte aus der DIN 4150 Teil 3 heranzuziehen. Da eine Zuordnung der Schwingungen zu den Grundbegriffen der Norm nicht eindeutig ausfällt, ist es sinnvoll, die ermittelten Schwingungsgrößen mit den jeweiligen Anhaltswerten sowohl für kurzzeitige Erschütterungen als auch für stationäre Erschütterungen zu vergleichen.

Für die Beurteilung der Einwirkungen wird der größte Wert (Maximalwert) der drei Einzelkomponenten der Schwinggeschwindigkeit am Fundament  $v_{i \text{ Fundament}}$  herangezogen. Darüberhinaus werden die Schwingungen in der Deckenebene des obersten Vollgeschosses betrachtet. Aus den vorliegenden Messungen an Gebäudefundamenten und Decken sowie Bodenmeßpunkten (wie oben beschrieben) läßt sich folgende Abschätzung vornehmen: Der größte Wert aus allen Messungen für die Schwinggeschwindigkeit am Boden lag für einen Abstand von ca. 5 m zur Wasserstraße bei  $v_{i \text{ Boden}} \approx 0,6 \text{ mm/s}$ . Dieser Wert entspricht als zu erwartender Größtwert aus der Summe aller Messungen einer statistischen Wahrscheinlichkeit (Sicherheit) von 95 % und kann damit repräsentativ herangezogen werden. Am Fundament sind für eine Größtwertabschätzung daraus  $v_{i \text{ Fundament}} \leq 0,6 \text{ mm/s}$  zu erwarten. Theoretisch könnte für die oberste Vollgeschoßebene noch eine Vergrößerung dieses Wertes auf  $v_i \leq 1,2 \text{ mm/s}$  angenommen werden.

Die Anhaltswerte der Tabelle 1 aus der DIN 4150 (siehe Tabelle 5) werden damit für alle Gebäudekategorien an jedem Ort am Ufer sicher eingehalten (bis einschließlich Zeile 3). Für stationäre Bauwerksschwingungen sind bei andauernden horizontalen Schwingungen mit Schwinggeschwindigkeiten bis 5 mm/s im oberen Vollgeschoß keine Schäden im Sinne einer Verminderung des Gebrauchswertes und auch keine leichteren Schäden festgestellt worden. Für besonders erschütterungsempfindliche und besonders erhaltenswerte Bauten ist dieser Anhaltswert im überarbeiteten Normentwurf der DIN 4150 Teil 3 vom April 1997 auf 2,5 mm/s abgemindert. Auch von diesem Wert liegen alle gemessenen Erschütterungen weit ab.

Für Decken- und Bauteilschwingungen führen Schwinggeschwindigkeiten von  $v_{i \text{ max}} \leq 10 \text{ mm/s}$  erfahrungsgemäß nicht zu Schäden. Dieser Wert würde für das zufällige Zusammentreffen von  $v_{i \text{ Fundament}} \leq 0,6 \text{ mm/s}$  und dem gleichzeitigen Treffen einer Deckenre-

sonanz mit einer Überhöhung vom Faktor 15 noch unterschritten. Diese Abschätzung zeigt, daß auf Grundlage der vorliegenden Kenntnisse eventuelle Schäden an Gebäuden durch Erschütterungen aus Schiffsverkehr mit großer Wahrscheinlichkeit auszuschließen sind.

Zeile	Gebäudeart	Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit $v$ , in mm/s			
		Fundament			Deckenebene des obersten Vollgeschosses
		Frequenzen			
		$\leq 10$ Hz	10 bis 50 Hz	50 bis 100*) Hz	
1	Gewerblich genutzte Bauten, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten	20	20 bis 40	40 bis 50	40
2	Wohngebäude und in ihrer Konstruktion und/oder Nutzung gleichartige Bauten	5	5 bis 15	15 bis 20	15
3	Bauten, die wegen ihrer besonderen Erschütterungsempfindlichkeit nicht denen nach Zeile 1 und 2 entsprechen und besonders erhaltenswert (z.B. unter Denkmalschutz stehend) sind	3	3 bis 8	8 bis 10	8

\*) Bei Frequenzen über 100 Hz dürfen mindestens die Anhaltswerte für 100 Hz angesetzt werden

Tabelle 5 Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit  $v_i$  zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen auf Bauwerke (DIN4150 Teil 3 Tabelle 1)

## 7 Schlußfolgerungen und Empfehlungen

Für die Bewertung von Erschütterungseinwirkungen auf Menschen und Gebäude aus Schiffsvorbeifahrten kann das oben beschriebene Verfahren für eine Prognose der zu erwartenden Erschütterungen herangezogen werden. Es wurden Schiffsschwingungen an Bodenmeßpunkten gemessen und die Abhängigkeiten für die Schwingungsausbreitung im Boden sowie für die Übernahme der Schwingungen zum Fundament und zu den Decken eines Gebäudes ermittelt. Es konnten gesicherte Beziehungen für  $v_{B, \text{mittel}}$  und  $v_{B, 95\%}$  für die Quantifizierung der durch ufernahe Schiffsvorbeifahrten erzeugten Bodenerschütterungen und deren Abnahme mit der Entfernung erhalten werden. Die getroffenen Annahmen sind typisch für Berliner Baugrundverhältnisse und ebenfalls anwendbar für Böden mit nicht felsartigen Eigenschaften. Sie gelten für Kanäle, die entsprechend der Richtlinie für Regelquerschnitte ausgebaut sind. Bei Fahrrinnenabständen von mehr als 11 m zur Uferlinie

verringern sich die in Tabelle 4 angegebenen Abstände von bewohnten Gebäuden zum Ufer. Für die Einschätzung dieser Fälle wird ein gesondertes Verfahren angegeben.

Für die Bewertung der Erschütterungen in bezug auf Gebäude ergeben sich folgende Aussagen:

Für Gebäude sind Schäden bzw. eine Verminderung der Gebrauchsfähigkeit durch Einwirkung von Schiffsschwingungen aus dem Verkehr auf Wasserstraßen durch Vergleich der gemessenen und prognostizierten Werte für  $v_{i\max}$  mit den Anhaltswerten aus der DIN4150 Teil 3 nicht zu erwarten bzw. auszuschließen. Diese Aussage trifft auf beliebige Entfernungen von Gebäuden zum Ufer einer Wasserstraße zu. Unter Verminderung der Gebrauchsfähigkeit werden im Sinne der DIN bereits leichte Schäden verstanden, wenn z.B. Risse im Putz auftreten oder sich vergrößern.

Für die Einwirkung von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden sind die Anhaltswerte aus der DIN4150 Teil 2 heranzuziehen, bei deren Einhaltung "in der Regel erhebliche Belästigungen...vermieden werden". Die Untersuchungen zeigen, daß in einem gewissen Entfernungsbereich zum Ufer erhebliche Belästigungen auftreten können. Dabei muß unterschieden werden, ob der Berufsschiffsverkehr nur tagsüber in den Zeiten von 6 bis 22 Uhr stattfindet, oder ob auch nachts in der Zeit von 22 bis 6 Uhr gefahren wird. Wird ausschließlich tagsüber gefahren, dann sind bei einer Entfernung zum Ufer von  $R \geq 7$  m für alle Einwirkungsorte nach Tabelle 2 keine erheblichen Belästigungen zu erwarten. Diese Prognose beruht auf der Annahme von bis zu 300 Schiffspassagen je Beurteilungszeit. Das Kriterium für die Einhaltung der Norm bei ausschließlichem Tagesverkehr ist der Anhaltswert  $A_0$ , der von der Größe und Einwirkungsdauer der Erschütterungen im Beurteilungszeitraum abhängig ist.

Für Nachtverkehr ist als Kriterium für die Entfernungen  $KB_{F\max} \leq A_0$  heranzuziehen. Da der Anhaltswert  $A_0$  jedoch zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf, ist die prognostische Sicherheit der Entfernungsangaben in der Spalte 6 der Tabelle 4 geringer als für die  $KB_{FTr}$  Bewertung am Tage.

Für die Beurteilung von Einwirkungsorten nach Zeile 4 und 5 sollten deshalb bei Entfernungen unter 30 m die konkrete Baugrundsituation berücksichtigt werden und u.U. gezielte Schwingungsmessungen zur Ermittlung der Eigenfrequenzen und der Dämpfungen der Decken des zu betrachtenden Gebäudes vorgenommen werden. Die oben genannten

Unsicherheiten bestehen insbesondere im Bereich schmaler Wasserstraßen. Nach einem Wasserstraßenausbau mit Vergrößerung des Querschnittes ist im allgemeinen mit einer Verminderung der Erschütterungseinwirkungen aus dem Schiffsverkehr zu rechnen.

Im Auftrag

Bearbeiter

  
(Dipl.- Geophys. Palloks)

(Dipl.- Phys. Zierach)

8            Literatur

- /1/ Splittgerber, H.            Wahrnehmungsschwelle für sinusförmige Ganzkörperschwin-  
gungen, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 37 (1990), S. 61-68
- DIN4150 Teil 1            Erschütterungen im Bauwesen, Grundsätze, Vorermittlung  
und Messung von Schwingungsgrößen
- DIN4150 Teil 2            Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in  
Gebäuden
- DIN4150 Teil 3            Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche  
Anlagen



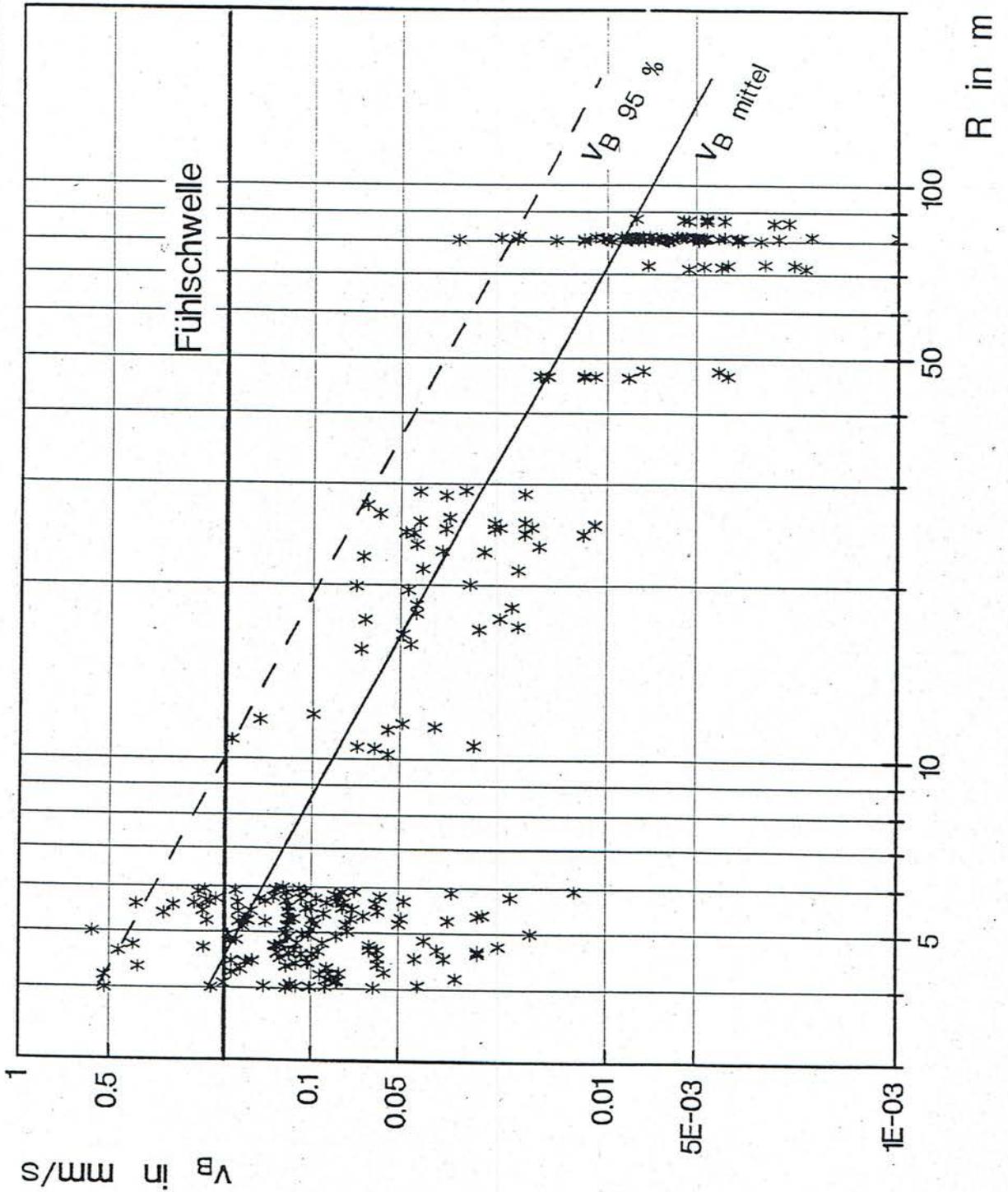
# Schiffsschwingungen

Entfernungsabhängigkeit  $v_B(R)$  für Bodenerschütterungen

Berliner Baugrundverhältnisse

Datei BILD1

Anlage 1





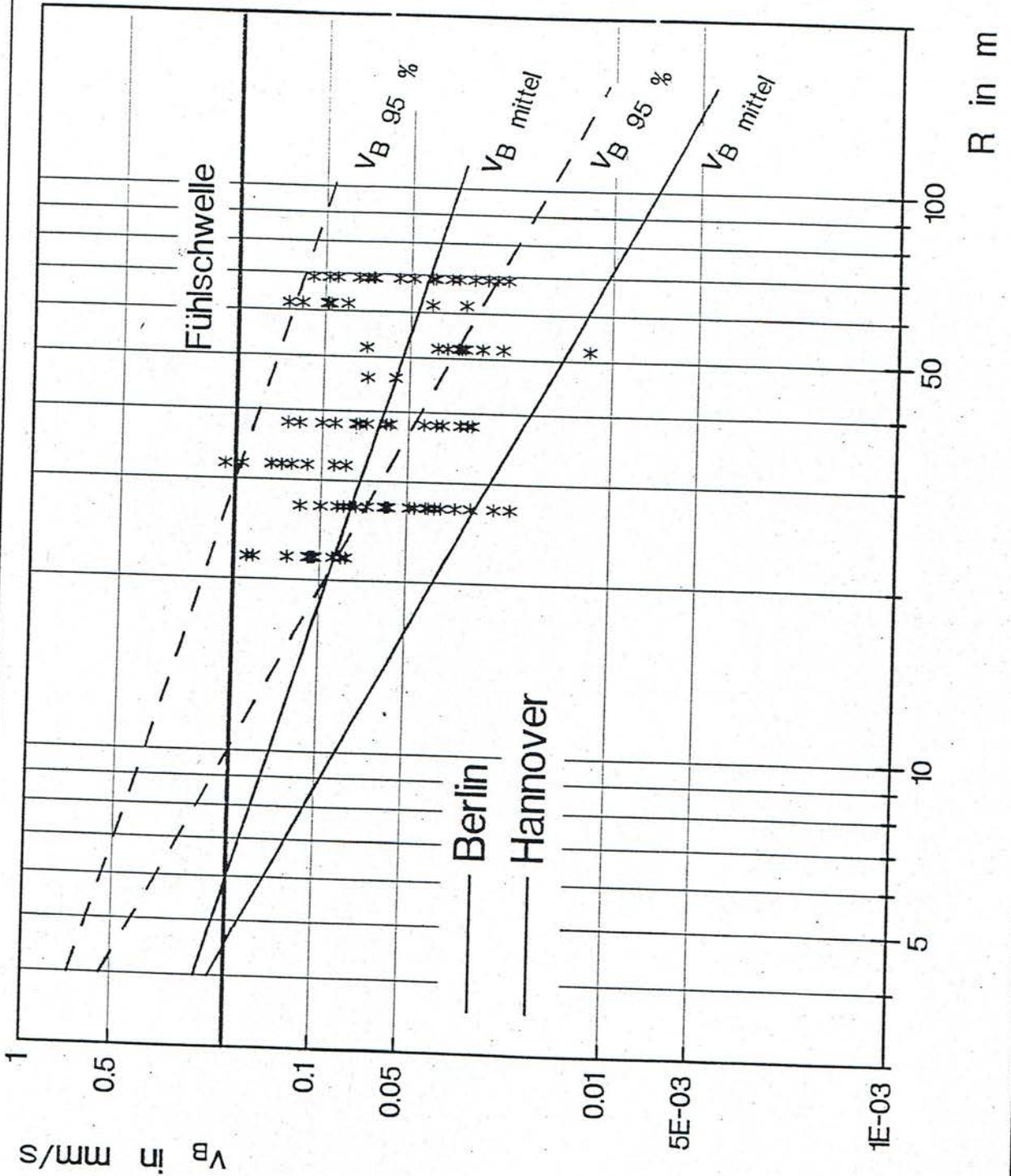
# Schiffsschwingungen

Entfernungsabhängigkeit  $v_B(R)$  für Bodenerschütterungen

Messung am MLK Hannover

Datei BILD1

Anlage 2





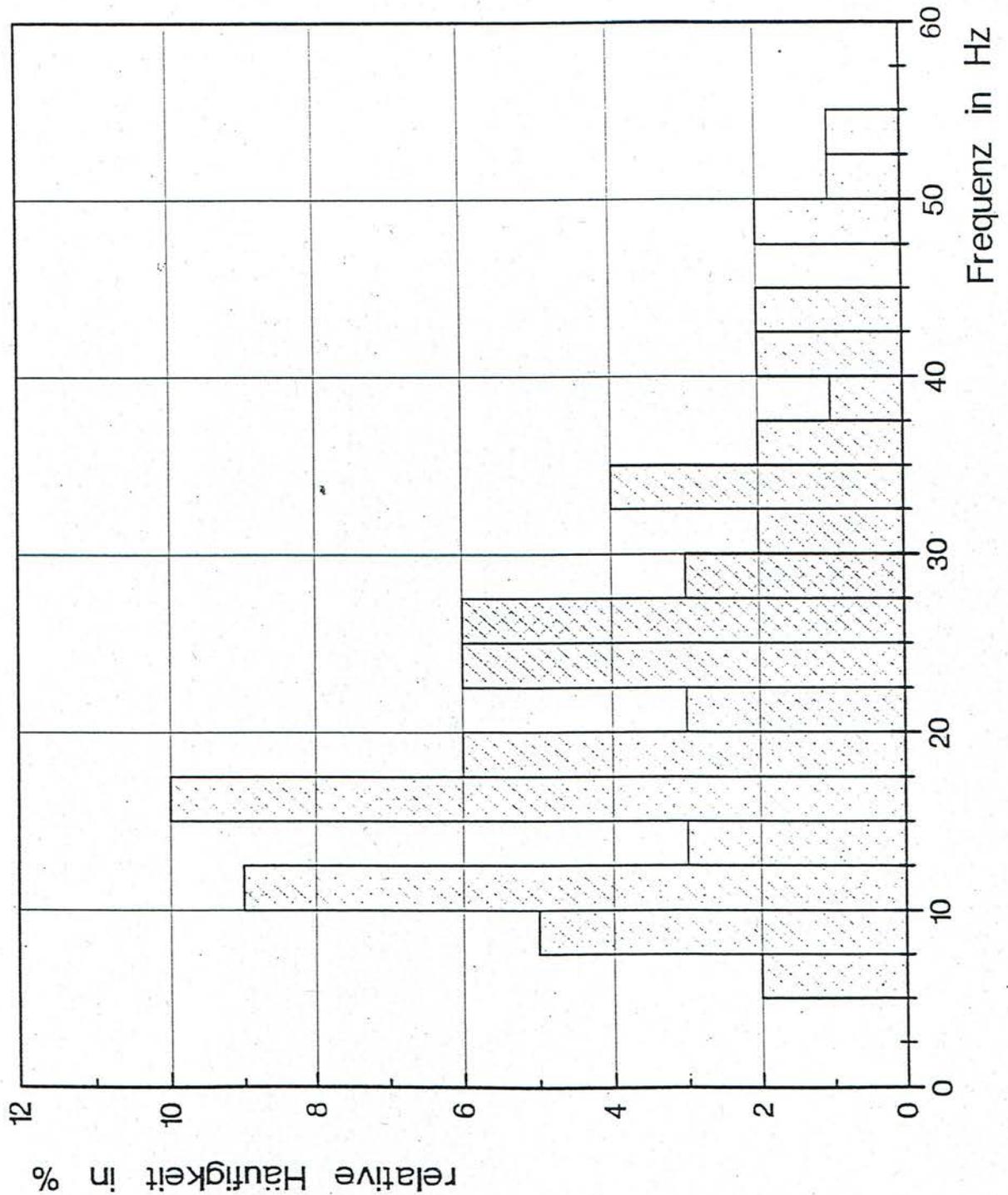
# Schiffsschwingungen

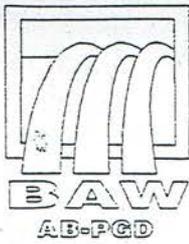
Häufigkeitsverteilung der Frequenz

von Schiffsschwingungen, Klassenbreite 2,5 Hz

Datei FREQUENZ

Anlage 3





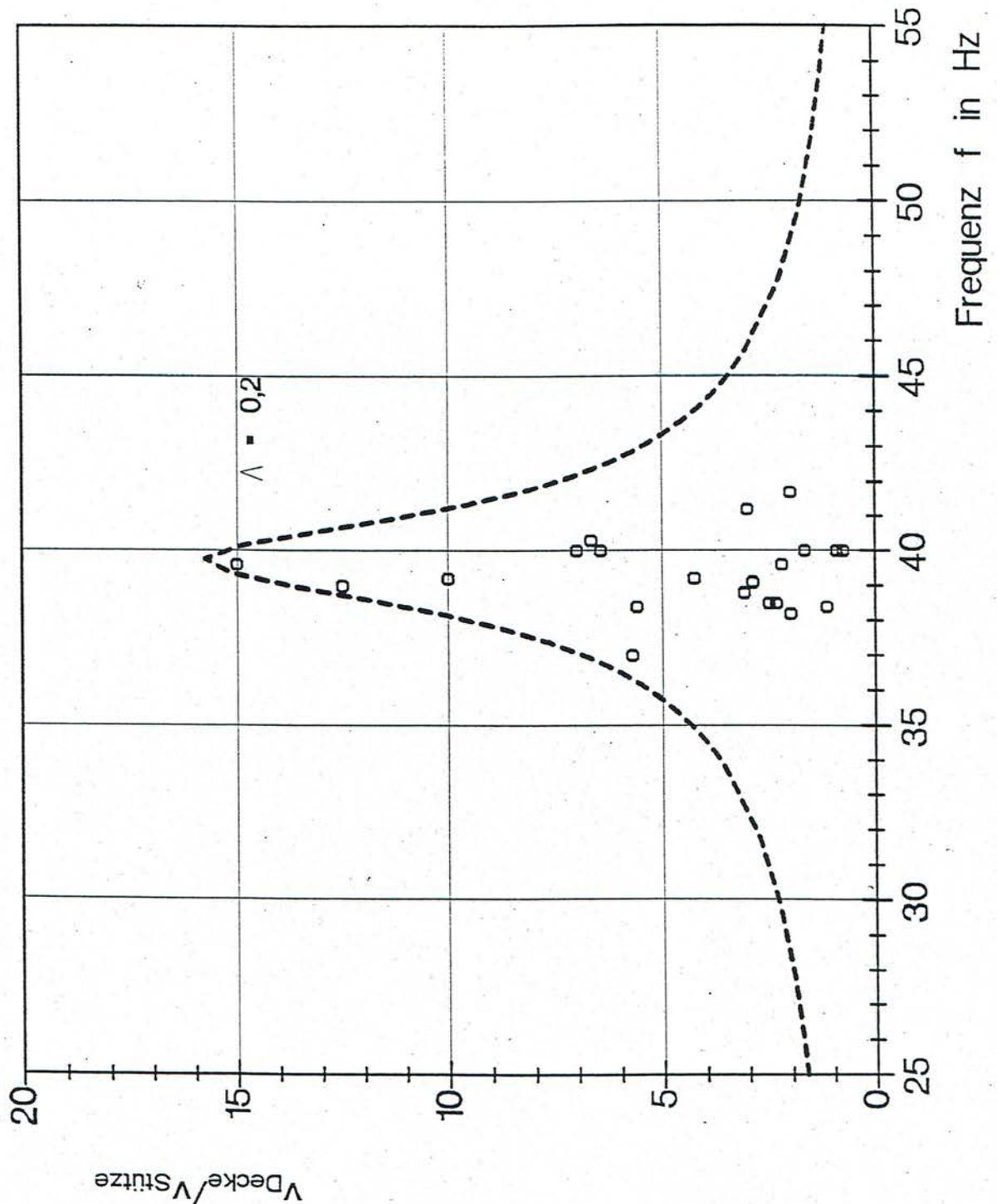
# Verhältnis Decken- zu Stützenschwingung

bei einer Proberammung am Seitenkanal Wieblingen

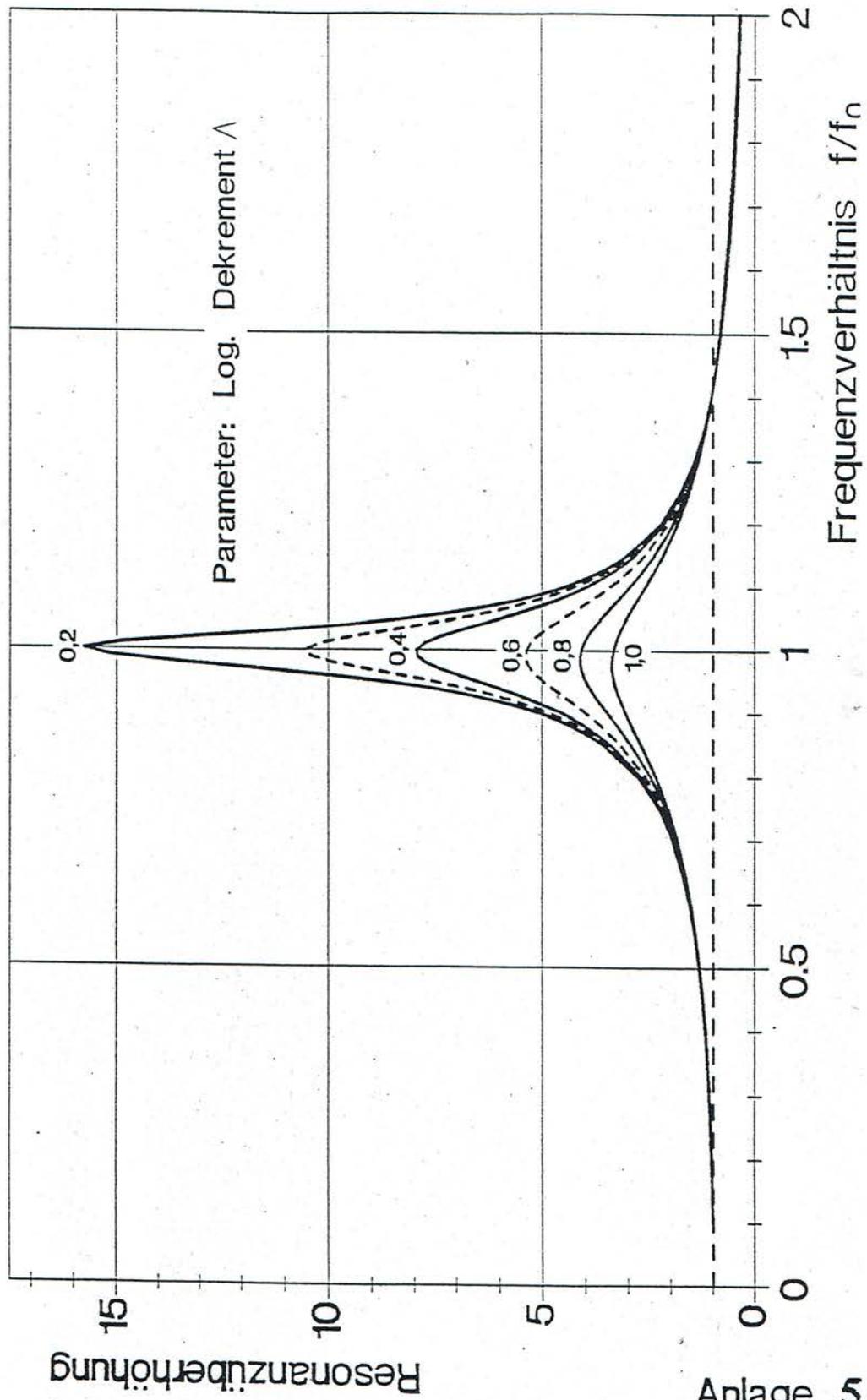
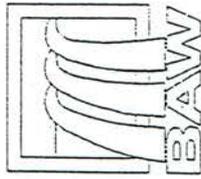
Verlagshaus Springer, Ramme MS 32 HFV

Datei DECKRESO

Anlage 4



# Deckenschwingungen Resonanzüberhöhung



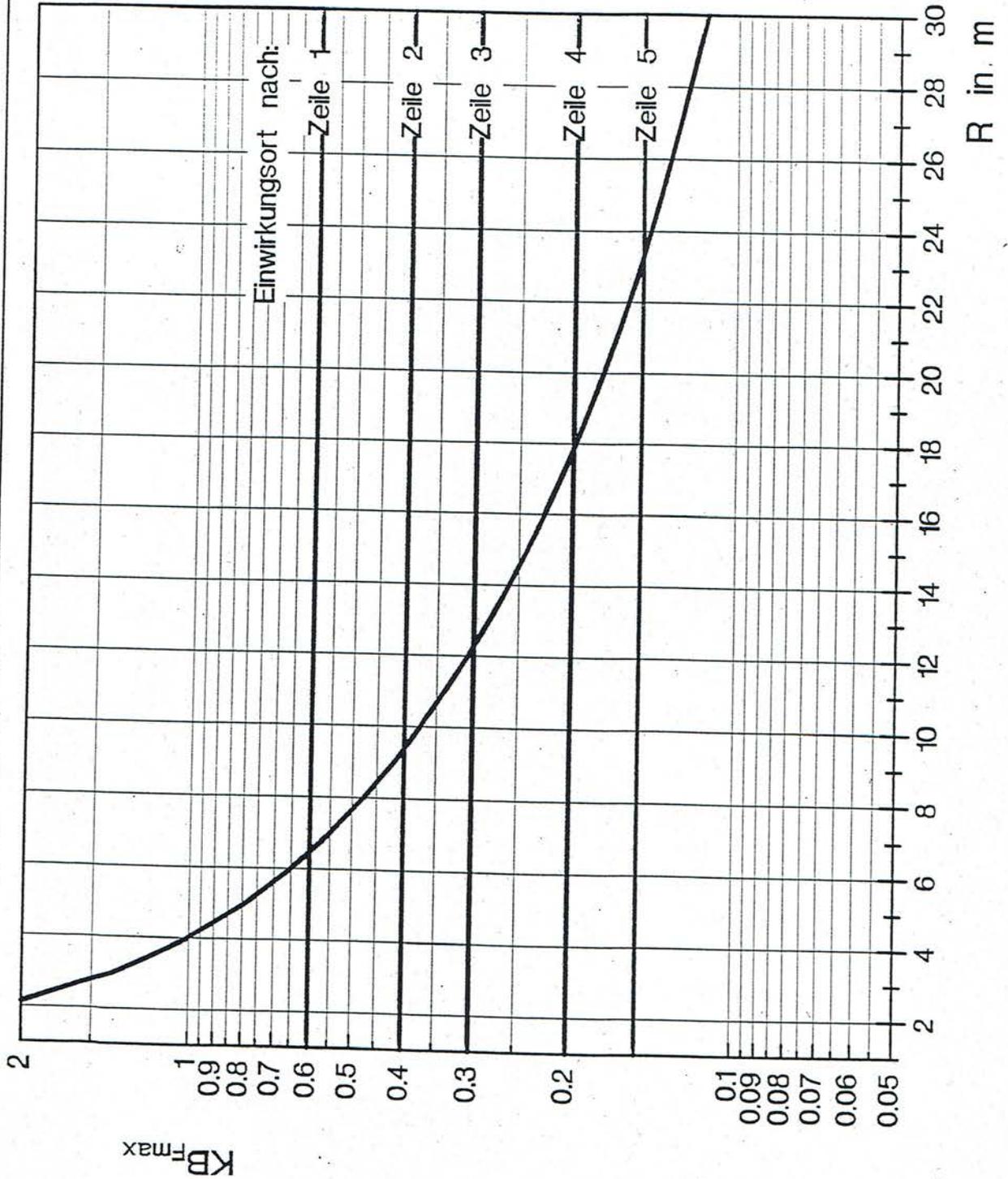


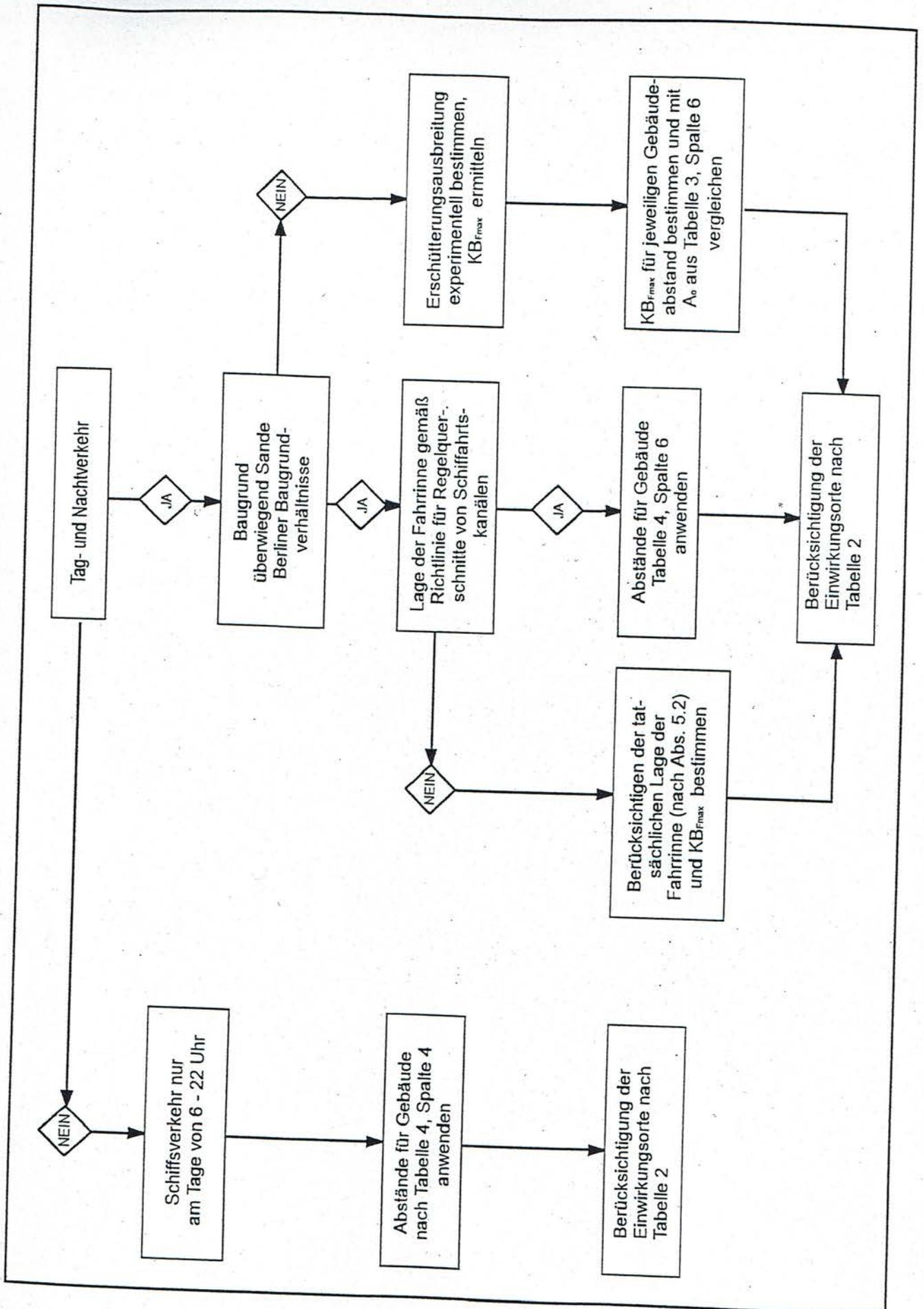
# Schiffsschwingungen

Prognose der Entfernungsabhängigkeit von  $KB_{Fmax}$   
für Deckenerschütterungen  
Berliner Baugrundverhältnisse

Datei KBFMAX

Anlage 6





Anlage 7: Flußdiagramm für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen aus Schifffahrtsbetrieb

