

VIBRA-1-2-3:

Erschütterungs- und Körperschall- prognose bei Eisenbahnlinien

Dr. A. Ziegler; ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich

1 Einführung

Eisenbahn-Neubaustrecken, Aus- oder Umbau von bestehenden Anlagen oder der Bau von neuen Gebäuden in der Nähe von Eisenbahnlinien erfordern die Erstellung von möglichst zuverlässigen Erschütterungsprognosen. Bereits die Verschiebung einer Weiche um ca. 40 m, wie in Bild 1.1 dargestellt, kann die Immissions-Situation stark verändern und verlangt eine vorgängige Abklärung und Berechnung der zu erwartenden Immissionen.

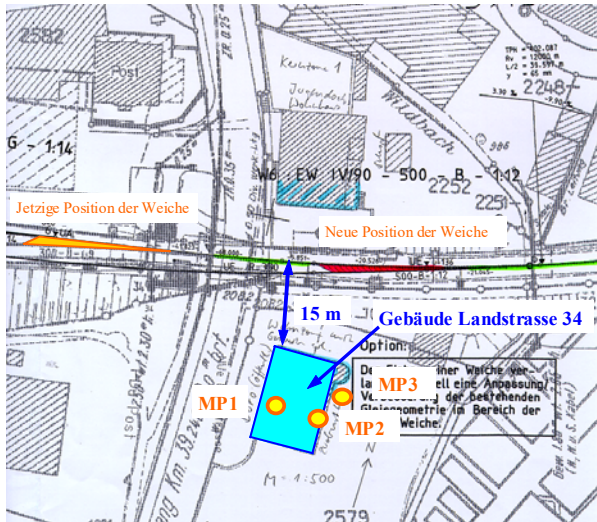


Bild 1.1a,b Projektierte Verschiebung einer Weiche um 40 m

Der Autor hat in Zusammenarbeit mit den SBB und den beiden Ingenieurbüros RUTISHA-AUSER und TROMBIK ein Verfahren zur Erstellung von Immissionsprognosen für Erschütterungen und Körperschall bei Eisenbahnlinien entwickelt. Im Auftrag der SBB entstand in der Folge das Programmpaket VIBRA 1-2-3, das im wesentlichen zwei Berechnungsverfahren (ein einfaches und ein detaillierteres) für die Erschütterungs- und Körperschallprognose sowie eine Datenbank für Erschütterungs- und Körperschallmessungen umfasst.

Im vorliegenden Bericht soll als erstes das Phänomen „Erschütterungen und Körperschall bei Eisenbahnlinien“ erläutert werden. Anschliessend werden zwei Berechnungsverfahren für die Prognose von Erschütterungen und Körperschall beschrieben. Zum Schluss soll das Programmpaket VIBRA 1-2-3 mit der Implementierung der beiden Berechnungsverfahren kurz vorgestellt werden.

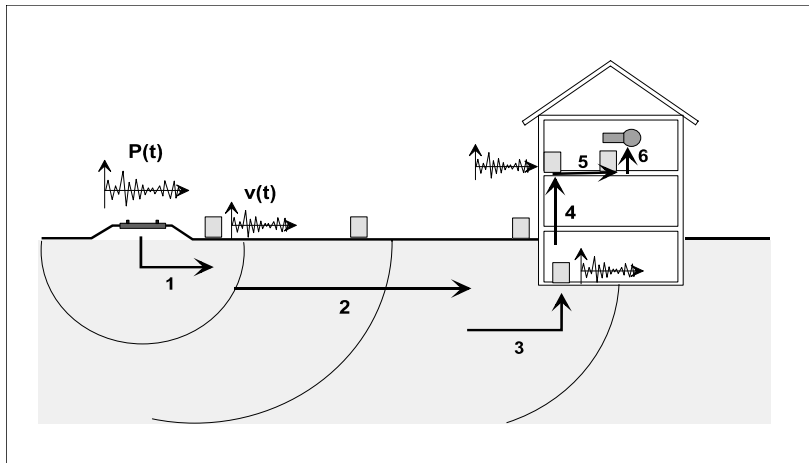
2 Das Phänomen Erschütterungsausbreitung und Körperschall

Die vom Zug verursachten Erschütterungen werden über den Boden auf die Fundamente der umliegenden Gebäude und von hier über die Mauern auf die Wohnräume übertragen. In den Wohnräumen können sich diese Erschütterungen als störende Vibrationen und als Dröhnen (d.h. abgestrahlter Körperschall) manifestieren.

Die Quelle der Erschütterung ist die vom Schienenfahrzeug verursachte zeitvariable Belastung, welche in Bild 2.1 als $P(t)$ bezeichnet ist. Die Ausbreitung der Erschütterung lässt sich in sechs Abschnitte gliedern:

1. Schiene - Trasse
2. Trasse - Freifeld
3. Freifeld - Fundament
4. Fundament - Aussenmauer

5. Aussenmauer - Geschossdecke
6. Geschossdecke - Körperschall



In jedem dieser Abschnitte herrscht ein ganz bestimmtes Ausbreitungsphänomen vor; gelingt es, dieses Ausbreitungsphänomen durch ein geeignetes Modell zu erfassen, so lässt sich eine zuverlässige Prognose über die Erschütterungen in Gebäuden in der Nähe von Eisenbahnlinien erstellen.

Bild 2.1 Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr

Erschütterung hängt nicht nur von der Schwingungsamplitude sondern auch von deren Frequenz ab. Bild 2.2 illustriert die Wahrnehmungsgrenze des „durchschnittlichen“ Menschen für Erschütterungen und zeigt verschiedene Schwingungs-Phänomene im Amplituden-Frequenz-Diagramm. Die Wahrnehmungsgrenze verläuft zwischen 8 und 80 Hz konstant und liegt etwa bei $v_{\max} = 0.2 \text{ mm/s}$. Unterhalb von 8 Hz ist die Wahrnehmungsgrenze höher, oberhalb von 80 Hz ist sie tiefer. Eisenbahnerschütterungen in Gebäuden liegen in der Regel zwischen 20 und 200 Hz und reichen von 0.1 bis 10 mm/s.

Körperschall oder korrekter „sekundärer, abgestrahlter Luftschall“ ist ein Phänomen, dass vor allem in neueren Gebäuden mit relativ steifen Decken und Wänden (i.a. in Betonbauweise) und mit guter Isolation gegen direkten Luftschall zu Problemen führen kann. Körperschall wird in der Regel als tiefes Dröhnen während der Vorbeifahrt eines Zuges wahrgenommen. Wände und Decken wirken wie riesige Lautsprecher und erzeugen durch ihre - zumeist nicht spürbaren - Vibrationen dieses tiefe Dröhnen.

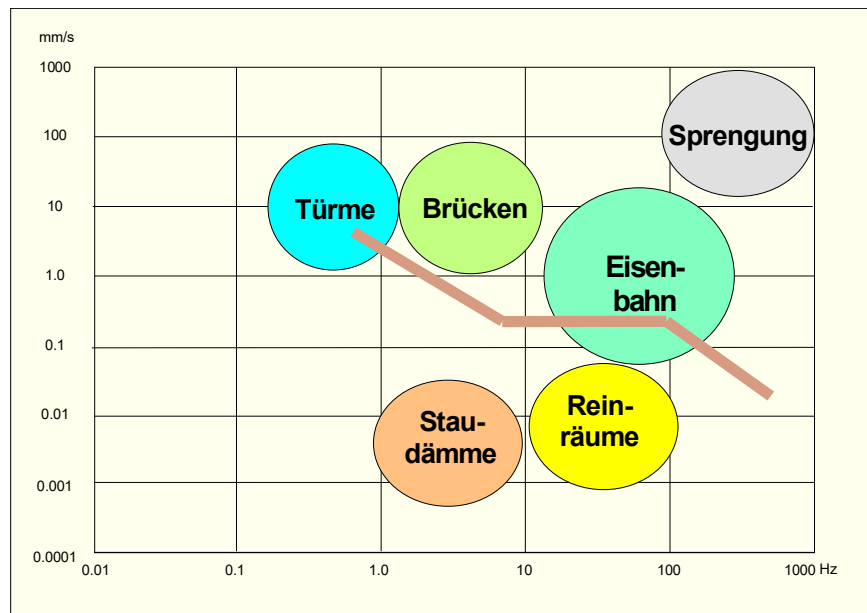


Bild 2.2 Wahrnehmungsgrenze im Vergleich mit verschiedenen Schwingungen

In Bild 2.3 sind die Wahrnehmungskurven

für Erschütterungen und Schall dargestellt. Im Kreuzungspunkt dieser Linien ist der typische, Er liegt im Frequenzbereich von Amplituden von 0.1 bis 1 mm/s. Je Immissionsquelle handeln.

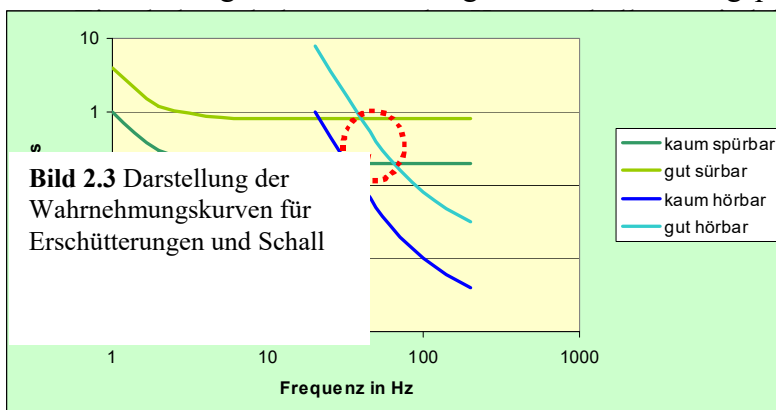


Bild 2.3 Darstellung der Wahrnehmungskurven für Erschütterungen und Schall

Der Zusammenhang zwischen Erschütterung und Körperschall lässt sich anhand der Bilder 2.4a bis e sehr schön zeigen. In einer Wohnung über einem Tunnel werden Erschütterung und Schall gleichzeitig gemessen (Bild 2.4a). Da von aussen kein direkter Luftschall eintritt, handelt es sich beim gemessenen Innenschall vollumfänglich um Körperschall. Bild 2.4b zeigt die zugehörige Erschütterungsaufzeichnung. Daraus lässt sich das Terzbandspektrum der Schwinggeschwindigkeit berechnen (Bild 2.4c). Das mit dem Schallmessgerät aufgezeichnete Terzbandspektrum (Bild 2.4d) sieht auf den ersten Blick ganz anders aus. Erst wenn man die A-Bewertung wegnimmt und die beiden Spektren im gleichen Massstab darstellt (Bild 2.4e) erkennt man die Parallelität zwischen den beiden Spektren. Es muss somit möglich sein, aufgrund der Kenntnisse über die Erschütterung den Körperschall zumindest approximativ zu berechnen.



Bild 2.4a Synchroner Messung von Erschütterung und Körperschall

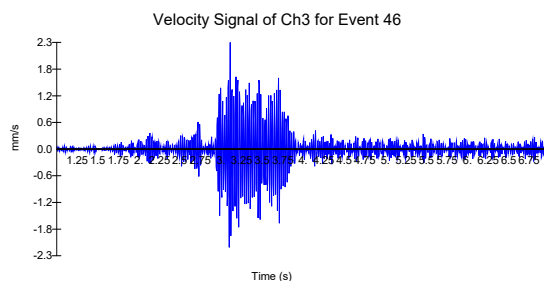


Bild 2.4b Zugvorbeifahrt (v-t-Diagramm)

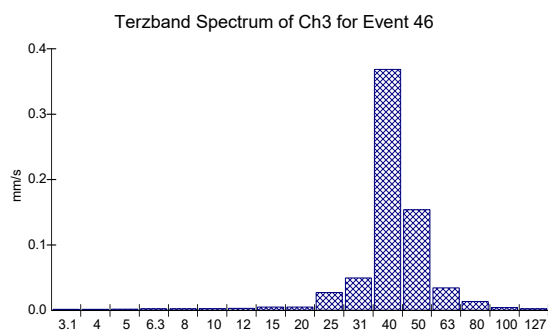


Bild 2.4c Terzbandspektrum für Erschütterung

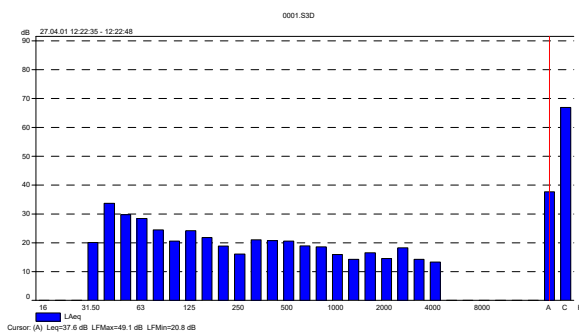


Bild 2.4d Terzbandspektrum für Schall (A-bewertet)

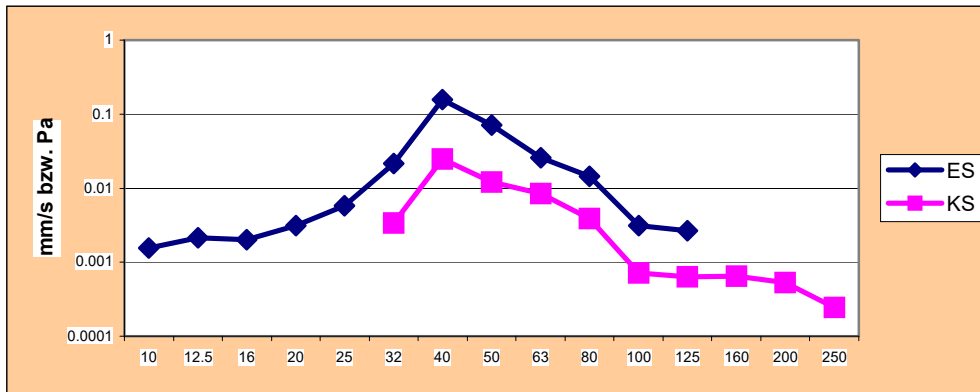


Bild 2.4e Terzbandspektrum für Erschütterung (ES) und Schall (KS) (ohne A-Bewertung)

3 Ein einfaches empirisches Modell

Die vom Zug verursachte Erschütterung wird über den Boden auf das Gebäudefundament und von hier über die Mauern auf die Wohnräume bzw. deren Geschossdecken übertragen. Auf dem Weg vom Gleis zum Gebäudefundament schwächt sich die Erschütterung infolge Ausbreitungs- und Materialdämpfung im Boden ab. Beim Übergang vom Boden auf das Fundament erfährt die Erschütterung eine weitere Reduktion, den sogenannten Ankopplungseffekt. Die Erschütterung des Gebäudefundamentes erreicht praktisch unverändert die oberen Stockwerke, wird aber durch die Eigenschwingung der Geschossdecken wiederum verstärkt. In Bild 3.1 ist dieses Abminderungsverhalten schematisch dargestellt.

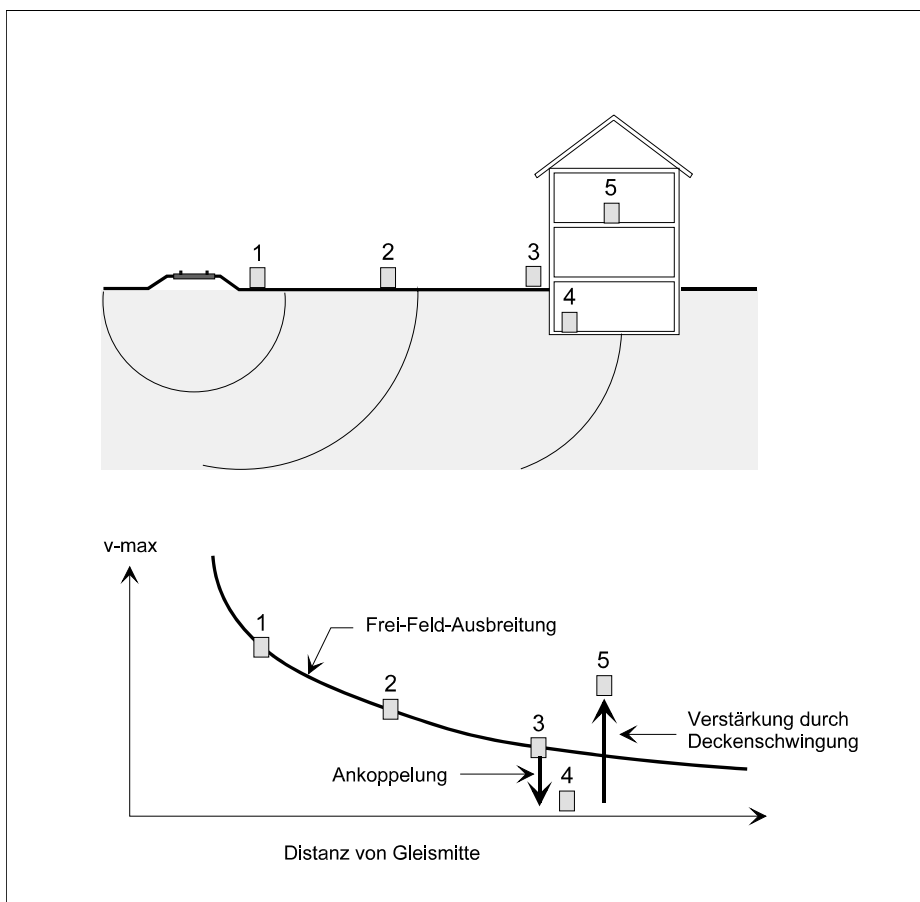


Bild 3.1 Schematische Darstellung des Abminderungsverhaltens von Erschütterungen

Das in Bild 3.1 gezeigte Abminderungsverhalten kann durch die Gleichung (1) für die Erschütterungsausbreitung wie folgt beschrieben werden:

$$v = v_0 \frac{fg}{fg_0} F_s \left(\frac{r_0}{r} \right)^m F_a \cdot F_e \quad (1)$$

mit:

- v = Gesuchte Erschütterung in Mitte des Fussbodens
- v_0 = Erschütterung in Referenz-Distanz vom Gleis
- fg = Mittlere Fahrgeschwindigkeit der Züge
- fg_0 = Referenz-Fahrgeschwindigkeit
- F_s = Schienenfaktor zur Berücksichtigung von Weichen
- r_0 = Referenzdistanz
- r = Abstand Gebäudefront – Gleismitte
- m = Exponent für geom. und Materialdämpfung im Boden
- F_a = Faktor für Ankopplungsfaktor Gebäude – Baugrund
- F_e = Faktor für Eigenschwingung der Geschossdecken

Gleichung (1) erlaubt eine einfache Berechnung der Erschütterungsübertragung vom Gleis zum Gebäude. Sie berücksichtigt die wichtigsten Einflussparameter, d.h.:

- Distanz Gleis - Gebäude
- Fahrgeschwindigkeit
- Weiche
- Gebäudetyp
- Deckentyp

Die Frequenzabhängigkeit allerdings, die bei allen oben aufgeführten Einflussfaktoren vorliegt, wird nicht explizit berücksichtigt, sondern nur implizit, und zwar indem die Faktoren - bedingt durch die statistische Auswertung - auf den dominanten Frequenzbereich zugeschnitten sind.

Abgestrahlter Körperschall wird - wie oben beschrieben - durch die Vibrationen von Fussboden und Decke und zu einem geringeren Teil auch durch die Vibrationen der Wände verursacht.

Der Zusammenhang zwischen Erschütterungsamplitude und abgestrahltem Körperschall in einem Raum ist an sich sehr komplex. Bei der Schallabstrahlung einer ausgedehnten starren Platte im Freien sind die Verhältnisse noch relativ einfach. Der theoretische Zusammenhang zwischen dem abgestrahlten Schall und der Vibration der starren Platte lautet wie folgt:

$$L_p = L_v + 10 \cdot \log \sigma \quad (2)$$

mit:

- L_p = RMS-Wert des abgestrahlten Schall in dB
($p_{\text{ref}} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
- L_v = RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit der Platte
($v_{\text{ref}} = 5 \cdot 10^{-5}$ mm/s)
- σ = Abstrahlungseffizienz

Dies bedeutet, dass - mit den gewählten Referenzwerten - der Schalldruck (in dB) zahlenmässig gleich gross ist wie die Erschütterung zuzüglich eines Terms, der die Abstrahleffizienz der Platte berücksichtigt. Für eine starre Platte im Freien gilt $\sigma = 1$, womit der letzte Term in Gleichung (2) zu Null wird. Bei geschlossenen Räumen ist dieser Term wegen der Reflexionen und dem Mitschwingen der Decke und der Wände größer als Null und kann Werte bis zu 20 dB erreichen. Auswertungen verschiedener Messungen und Publikationen zeigen, dass die Abstrahleffizienz zwischen 5 und 15 dB schwankt. Es ist nützlich sich daran zu erinnern, dass, gemäss der Definition der Dezibel-Angaben (p in dB = $20 \log p$), ein Wert von 6 einer Verdoppelung des Schalldruckes entspricht.

Als realistische Grösse kann ein Wert von 6 bis 8 dB verwendet werden. Die Berechnung der Körperschallimmission erfolgt somit nach der Formel:

$$Leq = L_v - A + s \quad (3)$$

- mit L_v = RMS-Wert von v während der Zugvorbeifahrt für Frequenzen zwischen 50 und 125 Hz in dB. Der Wert für v wird nach Gleichung 1 berechnet, allerdings mit den Parametern für Körperschall.
- A = A-Bewertung (= 26 dB für das 63-Hz-Terzband)
- s = Zuschlag für Übergang von Erschütterung zu Luftschall (Abstrahleffizienz)

Die Faktoren in den Gleichungen 1 und 3 sind nicht Grössen, die mathematisch hergeleitet werden können, sondern durch statistische Auswertung von Messdaten bestimmt werden. In Tabelle 3.1 sind diese Faktoren für „durchschnittliche Verhältnisse“ wie sie sich aus einer Auswertung von zahlreichen Messungen ergeben, zusammengestellt.

Tabelle 3.1 Faktoren für die Gleichungen (1) und (3)

		offene Strecke		Tunnelstrecke	
		Lockergestein	Fels	Lockergestein	Fels
Erschütterungen	v₀	0.47	0.24	0.24	0.16
	m	1.04	0.84	1.15	0.9
Körperschall	v₀	0.4	0.2	0.2	0.15
	m	1.18	1	1.3	1.08
		Erschütterungen		Körperschall	
		normal	Weiche	normal	Weiche
Schienenfaktor	F_s	1	2	1	1.5
		leichtes Gebäude		schweres Gebäude	
		Lockergestein	Fels	Lockergestein	Fels
Ankopplungsfaktor					
Erschütterungen	F_a	0.5	0.8	0.33	0.8
Körperschall	F_a	0.5	0.8	0.33	0.8
		Erschütterungen		Körperschall	
		Holzdecke	Betondecke	Holzdecke	Betondecke
Verstärkungsfaktor	F_e	8	4	1.8	1.8
Abstrahleffizienz		6			

Für die Parameter in Bild 3.2 gelten folgende Randbedingungen und Definitionen:

- Die Referenz-Distanz zur Gleismitte (r_0) beträgt 3 m.
- Die Fahrgeschwindigkeiten der Züge beträgt ca. 80 km/h. Im Bereich von 40 bis 120 km/h kann näherungsweise angenommen werden, dass sich die Erschütterungen proportional zur Fahrgeschwindigkeit verhalten.
- Der Wert für v_0 für Erschütterung entspricht dem Mittelwert der KB_{FTi} -Werte.
- Der Wert für v_0 für Körperschall entspricht dem mittleren Vorbeifahrtspegel (d.h. Mittelwert der RMS-Werte der Schwinggeschwindigkeit in mm/s).
- Definition für „Gebäudetyp“:
 - leicht: Betongebäude mit 1 und 2 Geschossen
Holzgebäude mit 1 bis 3 Geschossen
 - schwer: Betongebäude mit 3 und mehr Geschossen
Holzgebäude mit 4 und mehr Geschossen

4 Transferspektren-Modell

Als Ausgangsgrösse wird ein sogenanntes Quell- oder Normspektrum verwendet. Dies entspricht einem Geschwindigkeits-Terzbandspektrum eines bestimmten Zugtyps mit definierter Fahrgeschwindigkeit auf einem Norm-Boden in einer definierten Distanz von der Gleismitte. Ausgehend vom Normspektrum wird – wie in Bild 4.1 dargestellt - durch sukzessive Multiplikation mit den entsprechenden Transferspektren das Erschütterungs-Spektrum für die verschiedenen Bereiche gewonnen.

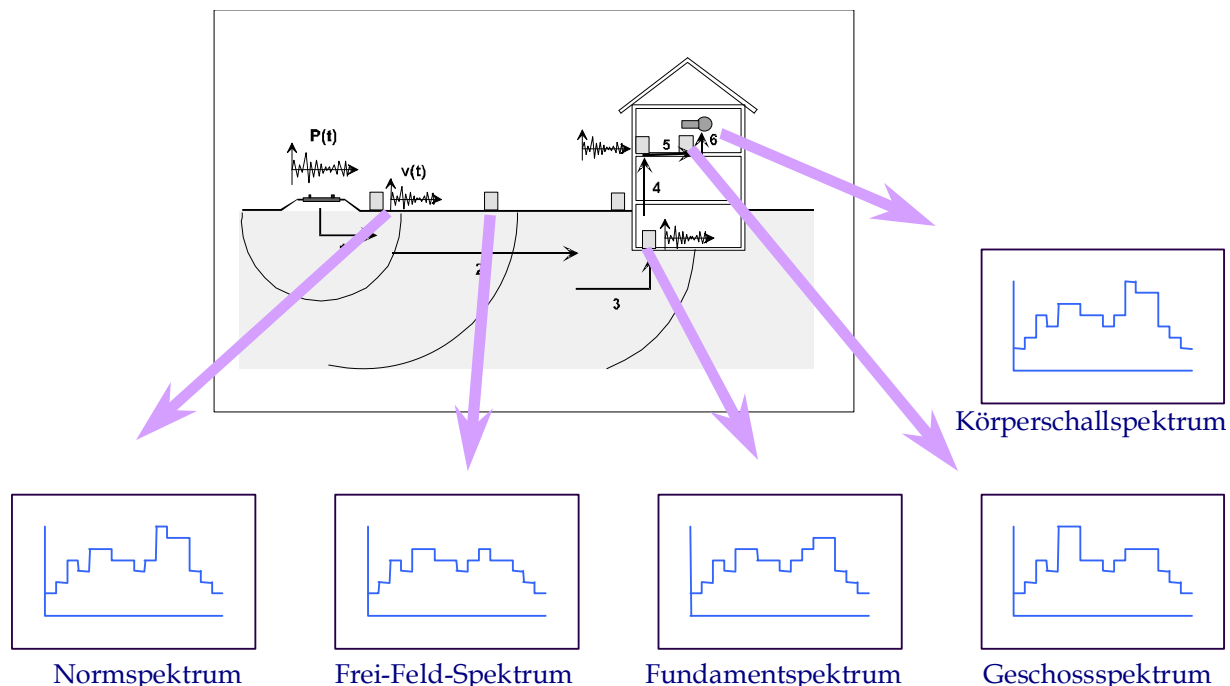


Bild 4.1 Schematische Darstellung der Berechnung mittels Norm- und Transferspektren

Aufgrund des Normspektrums berechnet sich durch Multiplikation mit den Transferspektren für Gleistyp/Gleiszustand, lokale Gleisbesonderheiten (Weichen), Gleisolation und Boden im Gleisbereich das Trassespektrum, d.h. das Spektrum, das bei einem Messpunkt in der gewählten Referenz-Distanz neben dem Gleis gemessen würde.

Aus dem Trasse-Spektrum ergibt sich durch Multiplikation mit dem Spektrum zur Berücksichtigung der Gleislage/Gleisbesonderheit (Damm, Einschnitt) und dem Transferspektrum für geometrische Dämpfung und Materialdämpfung das Frei-Feld-Spektrum, d.h. das Spektrum, welches bei einem Messpunkt im freien Feld gemessen würde. Zusätzlich kann hier auch noch ein Spektrum für Frei-Feld-Besonderheit verwendet werden, mit dem z.B. Abschirmungsmassnahmen im Boden berücksichtigt werden können.

Als frequenzabhängige Abminderungsfunktion wird die Gleichung

$$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n(f)} e^{\left(-\frac{2\pi f D}{v_B} (r-r_0) \right)} \quad 4.1$$

verwendet, mit

- v = Schwinggeschwindigkeit im Abstand r vom Gleis
- v_0 = Schwinggeschwindigkeit im Abstand r_0 vom Gleis

r_0	=	In der Regel 4 m
r	=	Abstand von Gleismitte
n	=	Exponent für geometrische Dämpfung
f	=	Frequenz
D	=	Materialdämpfung
v_B	=	Oberflächenwellen-Geschwindigkeit

Aus dem Freifeld-Spektrum ergibt sich durch Multiplikation mit dem Ankoppelungsspektrum das Fundament-Spektrum.

Aus dem Fundament-Spektrum ergibt sich durch Multiplikation mit der Transferfunktion für die Geschossdecke das Etagenspektrum. Zusätzlich könnte hier auch noch ein Spektrum für Gebäude-Besonderheit verwendet werden.

Aus dem Etagen-Spektrum ergibt sich durch Multiplikation mit der Transferfunktion für die Abstrahleffizienz das Spektrum für den abgestrahlten Luftschall.

Auf diese Weise ergibt sich durch sukzessive Multiplikation des Quellspektrums (i.e. Normspektrums) mit Transferspektren die Erschütterung und der Körperschall im Wohnraum.

Das oben skizzierte Modell ist nach folgenden Grundsätzen aufgebaut:

- Das Modell soll umfassend sein. Es soll die Erschütterungsausbreitung vom Trasse bis zu den Vibrationen in den Wohnräumen inklusive abgestrahlter Luftschall berechnen können.
- Das Modell soll eine offene Struktur aufweisen, so dass die einzelnen Berechnungsschritte kontrolliert und beeinflusst werden können.
- Das Modell soll flexibel sein, so dass neue Erkenntnisse leicht eingebaut werden können. Es sollen vor allem Ergebnisse aus Erschütterungsmessungen berücksichtigt werden können.
- Das Modell soll einen sinnvollen Detaillierungsgrad aufweisen. Der Detaillierungsgrad kann nicht so weit gehen wie bei den FE-Modellen, doch sollen Einflüsse von Unterschottermatten oder von Deckeneigenfrequenzen berücksichtigt werden können.

5 Das Programm-Paket VIBRA-1-2-3

Das Programmpaket VIBRA-1-2-3 wurde durch ZIEGLER CONSULTANTS im Auftrag der SBB entwickelt. Es umfasst folgende Teil-Programme:

- VIBRA-1: Approximative Immissionsberechnung für Erschütterung und Körperschall
- VIBRA-2: Detaillierte Immissionsberechnung für Erschütterung und Körperschall
- VIBRA-3: Datenbank für Erschütterungs- und Körperschallmessungen

5.1 VIBRA-1

VIBRA-1 ist ein Computerprogramm für die approximative Berechnung der durch den Zugverkehr verursachten Immissionen. Aufgrund der wichtigsten und im allgemeinen auch leicht erhältlichen Daten über den Zugverkehr, über die Gleisführung, über den Baugrund und über die Bauweise der Gebäude entlang der Eisenbahnstrecke werden die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen berechnet. Als Berechnungsgrundlage wird das semi-empirische Modell von Kapitel 3 verwendet.

Mit übersichtlichen Eingabemasken für Zugsfrequenzen und Gebäude-Eigenschaften lassen sich in VIBRA-1 die für die Berechnung erforderlichen Parameter leicht eingeben. Aufgrund der Daten über die Zugsfrequenzen und Fahrgeschwindigkeiten wird die mittlere Zugsfrequenz, die mittlere Vorbeifahrtsdauer und die mittlere Fahrgeschwindigkeit während des Tages und während der Nacht berechnet. Diese werden verwendet, um die KB_{Fmax} und KB_{FT} -Werte der Erschütterung und die Leq -Werte des Körperschalls zu bestimmen. Im Programmteil *Gebäude* werden die einzelnen Strecken und die dazugehörigen Gebäude erfasst. Hier wird auch festgelegt, welches Verkehrs-Szenario, welche Grenzwerte und welche Modell-Parameter in der Immissionsberechnung verwendet werden sollen. Die Ergebnisse der Immissionsberechnung lassen sich unmittelbar nach Eingabe der Gebäude am Bildschirm anzeigen (siehe Bild 5.1).

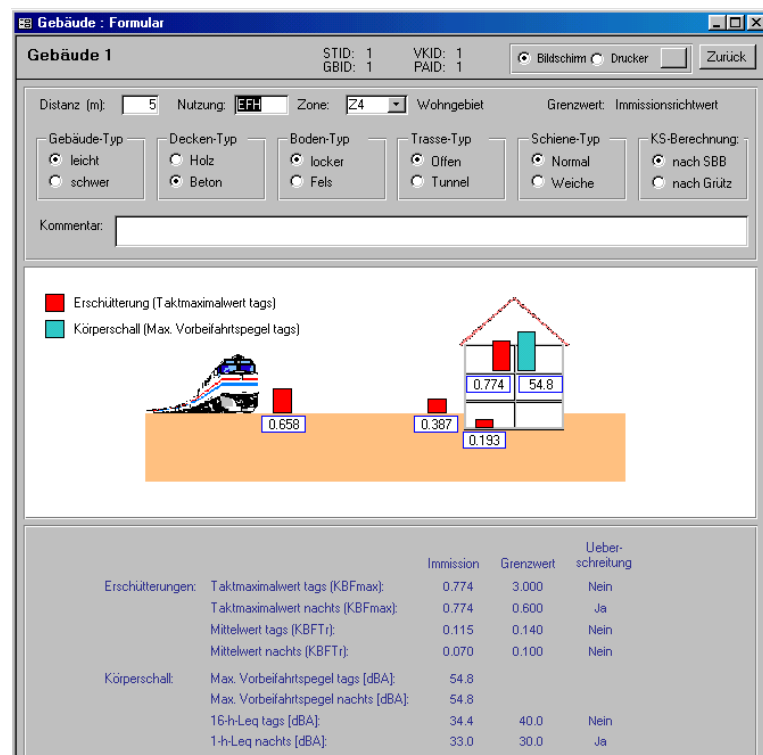


Bild 5.1 Darstellung des Abminderungsverhaltens von Erschütterungen in VIBRA-1

5.2 VIBRA-2

VIBRA-2 ist ein Computerprogramm für die Berechnung der durch den Zugverkehr verursachten Erschütterungs- und Körperschallimmissionen. Während bei VIBRA-1 die Immissio-

nen mit dem einfachen Berechnungsmodell von Kapitel 3 bestimmt werden, verwendet VIBRA-2 das Transfer-Spektren-Modell von Kapitel 4, womit alle wichtigen Aspekte der Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr berücksichtigt werden können.

Als Ausgangsgröße wird ein sogenanntes Quellspektrum verwendet. Ausgehend vom Quellspektrum wird – wie in Bild 5.2 dargestellt - durch sukzessive Multiplikation mit den entsprechenden Transferspektren das Erschütterungs-Spektrum für die verschiedenen Bereiche gewonnen.

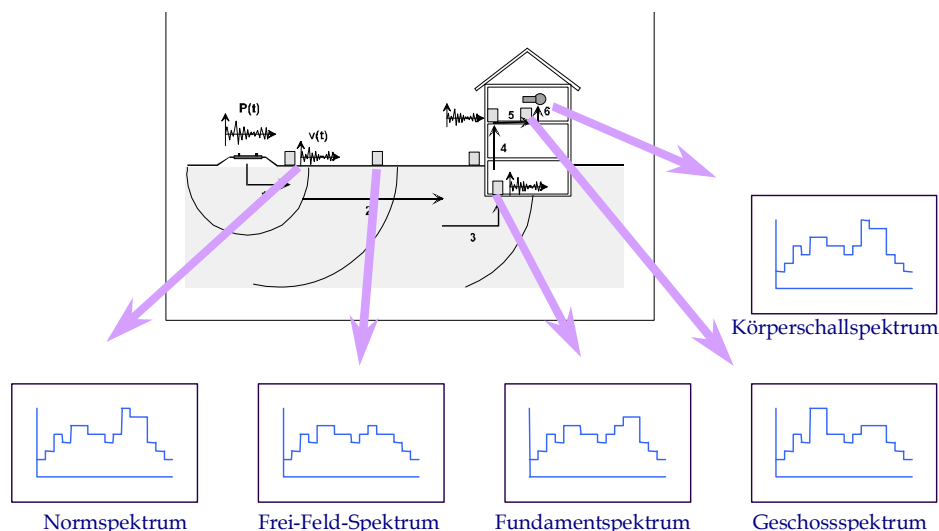


Bild 5.2 Schematische Darstellung der Berechnung mittels Quell- und Transferspektren beim VIBRA-2-Modell.

Insgesamt können 11 Transferspektren verwendet werden, um die spektrale Veränderung der Erschütterung vom Gleis bis in die Wohnung inklusive Umwandlung in Körperschall zu modellieren.

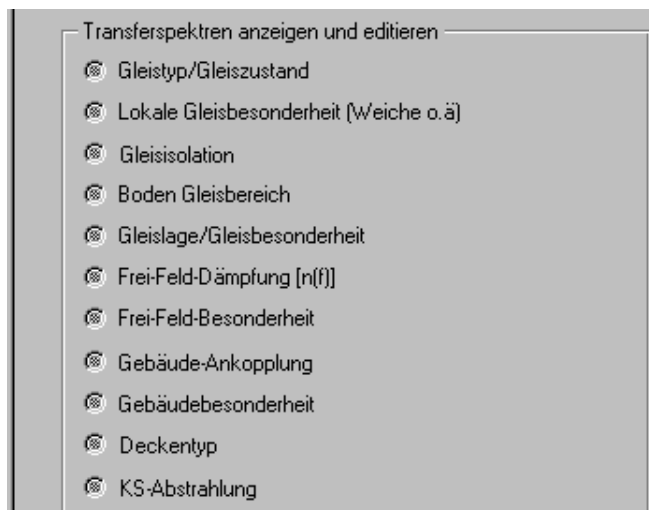


Bild 5.3 Auswahl von 11 Transferspektren im Programm VIBRA-2

Mit übersichtlichen Grafiken werden die Ergebnisse für einzelne Zugdurchfahrten (Bild 5.5) oder für alle Zugdurchfahrten (Bild 5.6) am Bildschirm dargestellt oder als Bericht ausgedruckt.

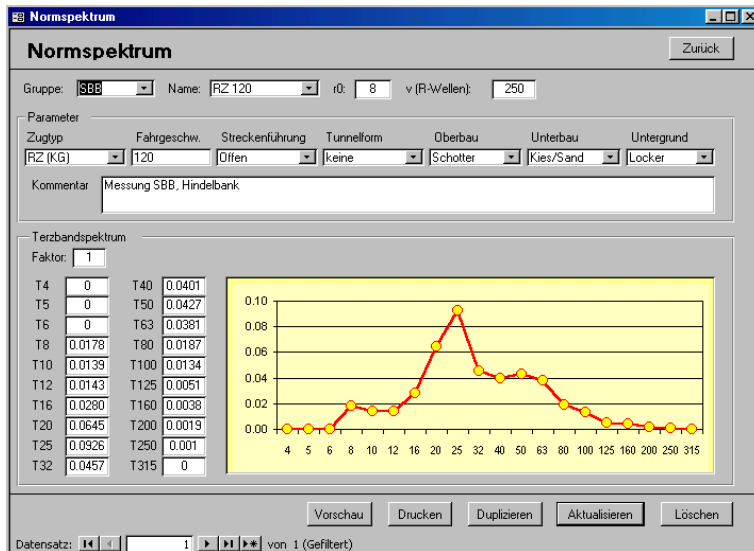


Bild 5.4 Formular für Normspekren

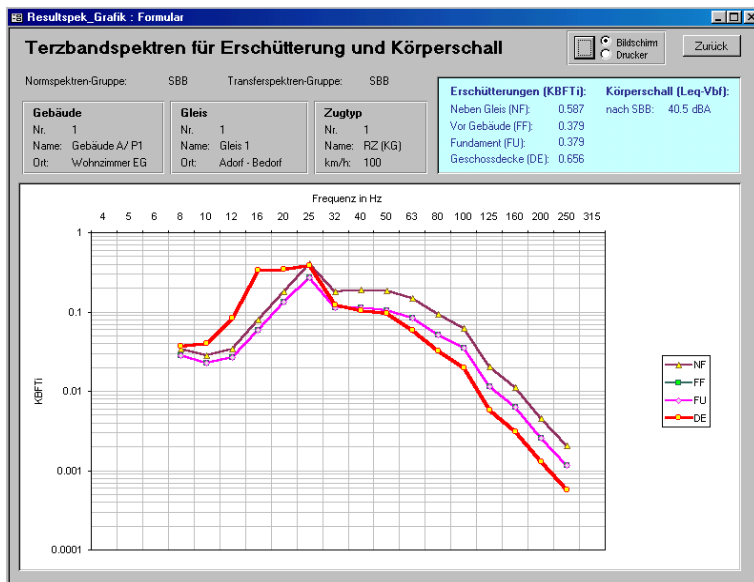


Bild 5.5 Graphische Darstellung der Berechnungsergebnisse für eine einzelne Zugdurchfahrt

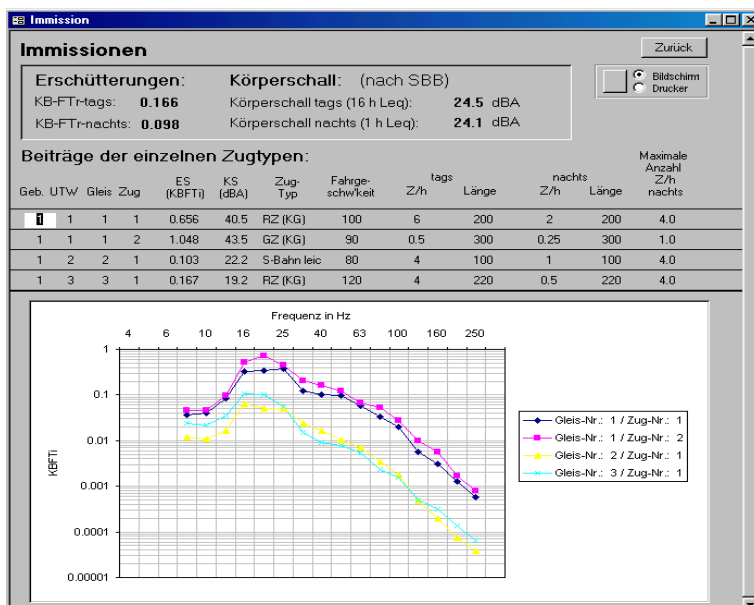


Bild 5.6 Graphische Darstellung der Gesamtimmisionen aus allen Zugdurchfahrten

5.3 VIBRA-3: Datenbank

VIBRA-3 ist eine Datenbank zur Speicherung, Verwaltung und Auswertung von Erschütterungs- und Körperschallmessungen bei Gebäuden im Nahbereich von Eisenbahngleisen. Das Programm enthält alle Elemente für den Aufbau und für die Auswertung. In übersichtlichen Bildschirmformularen werden die Daten eingegeben und können jederzeit leicht abgerufen werden. Die wichtigsten Auswerteprogramme sind bereits vorprogrammiert. Weitere Auswerteprogramme können vom Benutzer selbst eingebaut werden.

Die Bedeutung von VIBRA-3 ist auch im Zusammenhang mit VIBRA-1 und VIBRA-2 zu sehen: Auswertungen von VIBRA-3 ergeben eine wichtige Grundlage für die Festlegung der Parameter in VIBRA-1 und für die Transferspektren in VIBRA-2.

Die Messdaten werden in VIBRA-3 in die einzelnen Formulare eingegeben, sodass sie für die späteren statistischen Auswertungen zur Verfügung stehen. Der Bildschirm *Messreihe* (in Bild 5.7) enthält alle wichtigen Informationen zur gewählten Messreihe. In der oberen Hälfte sind alle Daten, welche die gesamte Messreihe beschreiben, enthalten. In der unteren Hälfte finden sich zwei Tabellen, eine über die eingesetzten Sensoren und eine über die Zugsvorfahrten. Zu jeder Messreihe können neben den Messdaten Pläne und Fotos abgespeichert werden.

Messreihe: Henggart / Wolfwingertenstrasse 18 AUID: 1 MRID: 1074 Zurück

Ort: Henggart Boden: Lockergesteir Oberbau: Bildschirm Drucker
 Standort: Wolfwingertenstrasse 18 Gleis: Normal Streckenführung:
 Datum: 29.09.00 Trasse: Niveau Distanz: 13 m
 Kommentar: _____

Sensoren:				
Nr.	Sensortyp	Messort	Distanz	
<input type="checkbox"/>	1	Geschwindigkeit	Betondecke	16.0
<input type="checkbox"/>	2	Geschwindigkeit	Fundament	13.0
<input type="checkbox"/>	3	Geschwindigkeit	Im Freien	16.0
<input type="checkbox"/>	4	Geschwindigkeit	Im Freien	8.0
<input type="checkbox"/>	5	Geschwindigkeit	Im Freien	4.0
<input checked="" type="checkbox"/>	*			0.0

Zugdurchfahrten:							
Nr.	Datum	Zeit	Zugsart	Geschwind.	Zuglänge	Gleisdist.	
<input type="checkbox"/>	3	29.09.00	09:30	DZ	43	60	0
<input type="checkbox"/>	5	29.09.00	09:57	S-Bahn	36	100	0
<input type="checkbox"/>	7	29.09.00	10:13	S-Bahn	80	100	0
<input type="checkbox"/>	11	29.09.00	10:59	RZ	28	108	0
<input type="checkbox"/>	12	29.09.00	11:10	S-Bahn	80	100	0
<input checked="" type="checkbox"/>	*						0

Bild 5.7 Formular für die Messdatenerfassung

Die Auswertungen gliedern sich in zwei Gruppen: Die erste Gruppe umfasst die Korrelationen zwischen Messgrößen, die zweite Gruppe die Korrelationen zwischen Messorten. Mit Hilfe verschiedener Auswahlkriterien können die Messdaten gezielt eingeschränkt werden, um für ganz bestimmte Randbedingungen Abminderungsfunktionen oder Transferspektren zu erstellen.

Zum Abschluss soll die Anwendung von VIBRA-3 für die Bestimmung des Transferspektrums zwischen Erschütterung und Körperschall gezeigt werden. Als Datengrundlage dienen 23 Messungen in einer modernen Siedlung über einem Tunnel. In allen 23 Wohnungen ist ein mittelmässig bis stark störender Körperschall wahrzunehmen.

Bild 5.8 zeigt die Auswahlkriterien, mit denen in VIBRA-3 Transferspektren berechnet werden können. Bild 5.9 zeigt das mit VIBRA-3 berechnete Transferspektrum zwischen Erschüt-

terung und Körperschall. Der Mittelwert liegt zwischen 40 und 50 Hz bei 0.5 und steigt dann gegen 100 Hz auf einen Wert von 1.6. Hierbei ist zu beachten, dass dieses Transferspektrum auf den natürlichen Messeinheiten mm/s und Pa basiert und nicht auf den dB-Werten. Die Umrechnung in dB erfolgt nach Gl. (4):

$$F_{dB} = 20 \cdot \log\left(F \frac{ref_{ES}}{ref_{KS}}\right)$$

Damit entspricht ein Faktor von 0.5 einem Zuschlag von 2 dB, ein Faktor von 1.0 einem Zuschlag von 8 dB und ein Faktor von 1.5 einem Zuschlag von 11.5 dB. Diese Werte stehen im Einklang mit den üblicherweise verwendeten Werten für Abstrahleffizienz von 5 bis 15 dB bzw. mit den in Kapitel 3 empfohlenen Werten von 6 bis 8 dB.

Bild 5.8 Auswahlkriterien für Transferspektren

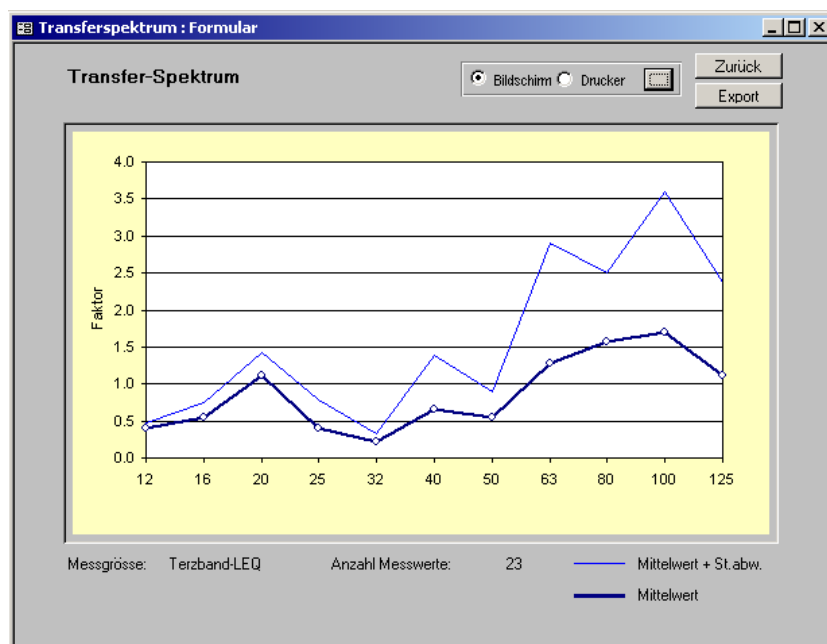


Bild 5.9 Transferspektrum zwischen Erschütterung und Körperschall