

**ANLAGE 12.4.1.1**

- Nur zur Information -

**S-Bahn Rhein-Main, Nordmainische S-Bahn  
Planfeststellungsabschnitt 1 – Frankfurt - Tunnel**

**MESSBERICHT ERSCHÜTTERUNGEN**

zur Ermittlung der schienenverkehrsinduzierten Immissionen  
aus Erschütterungen und der baulastdynamischen Kenndaten  
für die Erschütterungsprognose

**Bericht-Nr.**

08500-VME-7

**Datum:**

29.08.2008

**Auftraggeber:**

DB ProjektBau GmbH  
Hahnstraße 49  
60528 Frankfurt am Main

**Bearbeitung:**

ARGE S-E-Nordmainische S-Bahn

FRITZ GmbH  
Beratende Ingenieure VBI  
Fehlheimer Straße 24  
64683 Einhausen  
Telefon: 06251 – 9646 0  
Telefax: 06251 – 9646 46  
E-Mail: [info@fritz-ingenieure.de](mailto:info@fritz-ingenieure.de)

Dipl.-Phys. Peter Fritz  
Dipl.-Ing. Rolf Schneider

**Umfang des Dokumentes:**

Textteil: 16 Seiten

Anhänge: 25 Seiten

## INHALT

<b>1</b>	<b>Sachverhalt und Aufgabenstellung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Bearbeitungsgrundlagen</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Messdurchführung</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Messobjekte</b>	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>Beschreibung der Messkette</b>	<b>7</b>
3.2.1	Messgeräte	7
3.2.2	Anordnung der Sensoren	11
<b>3.3</b>	<b>Messdurchführung</b>	<b>11</b>
<b>3.4</b>	<b>Auswertung der Messungen</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b>	<b>15</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Prinzipskizze der Messanordnung	8
Abbildung 2	Systemskizze zur Anordnung des Geophons auf der Decke für die Erfassung des Ausschwingvorganges	12
Abbildung 3	Messtechnische Analyse von Ausschwingvorgängen	14

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Messobjekte mit Angabe des Messdatums und Anhang Nr. 7	
Tabelle 2	Komponenten des verwendeten Messsystems	11

## Anhänge

Anhang 1	Messprotokoll Hanauer Landstraße 17, Frankfurt am Main
Anhang 2	Messprotokoll Theobald-Christ-Straße 2, Frankfurt am Main
Anhang 3	Messprotokoll Hanauer Landstraße 30, Frankfurt am Main
Anhang 4	Messprotokoll Hanauer Landstraße 32, Frankfurt am Main
Anhang 5	Messprotokoll Rückertstraße 59, Frankfurt am Main
Anhang 6	Messprotokoll Rückertstraße 50-52, Frankfurt am Main
Anhang 7	Messprotokoll Windeckstraße 39, Frankfurt am Main

Anhang 8	Messprotokoll Windeckstraße 37, Frankfurt am Main
Anhang 9	Messprotokoll Windeckstraße 58/60, Frankfurt am Main
Anhang 10	Messprotokoll Windeckstraße 56, Frankfurt am Main
Anhang 11	Messprotokoll Ostendstraße 63, Frankfurt am Main
Anhang 12	Messprotokoll Ostendstraße 67, Frankfurt am Main
Anhang 13	Messprotokoll Ostendstraße 69, Frankfurt am Main
Anhang 14	Messprotokoll Ostendstraße 71, Frankfurt am Main
Anhang 15	Messprotokoll Howaldtstraße 12, Frankfurt am Main
Anhang 16	Messprotokoll Ostendstraße 78, Frankfurt am Main
Anhang 17	Messprotokoll Ostendstraße 80, Frankfurt am Main
Anhang 18	Messprotokoll Ostendstraße 82, Frankfurt am Main
Anhang 19	Messprotokoll Ostendstraße 84, Frankfurt am Main
Anhang 20	Messprotokoll Schichaustraße 11, Frankfurt am Main
Anhang 21	Messprotokoll Schichaustraße 13, Frankfurt am Main
Anhang 22	Messprotokoll Schichaustraße 15, Frankfurt am Main
Anhang 23	Messprotokoll Ostbahnhofstraße 16, Frankfurt am Main
Anhang 24	Messprotokoll Danziger Straße 2, Frankfurt am Main
Anhang 25	Messprotokoll Grusonstraße 9, Frankfurt am Main

## Abkürzungsverzeichnis

D	Lehrsches Dämpfungsmaß
dB	Dezibel
EG	Geschossangabe Erdgeschoss,
f	Frequenz [Hz]
$\Delta f$	Frequenzauflösung [Hz]
$f_0$	Eigenfrequenz
$\eta$	Verhältnis Eigenfrequenz der Decke $f_0$ zur Frequenz f
FFT	Fast Fourier Transformation
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz, Schwingung je Sekunde
$KB_{FTm}$	Taktmaximal-Effektivwert [-]
$KB_{Fmax}$	maximale bewertete Schwingstärke [-]
$KB_{FTr}$	Beurteilungsschwingstärke [-]
ln	natürlicher Logarithmus mit e (Eulerzahl) als Basis
lg / log	10er Logarithmus mit 10 als Basis
$\Delta L$	Pegeldifferenz
$\Lambda$	Logarithmisches Dekrement
m	Meter

MP	Messpunkt
MW	Mittelwert
OG	Geschossangabe Obergeschoss
r, R	Abstand
Stabw.	Standardabweichung
$T_3$	Übertragungsfunktion der Decke [dB]
U(t)	Spannung in Abhängigkeit von der Zeit
V (f)	Übertragungsverhältnis $f_0 / f$
$v / v(t)$	Schwingschnelle
$v_0$	Referenzwert für die Schwingschnelle [ $5 \cdot 10^{-8}$ m/s]
[V]	Volt
V(f)	Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von der Frequenz [-]
$x_m$	Amplitude des ersten Ausschlags
$x_n$	Amplitude des zweiten Ausschlags
X;x	1. Koordinate in der Ebene
Y;y	2. Koordinate in der Ebene
Z;z	3. Koordinate senkrecht zur Ebene

## 1 Sachverhalt und Aufgabenstellung

Erschütterungen zählen gemäß § 3 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (**BImSchG**) je nach Stärke und Wahrnehmbarkeit zu den Immissionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen. Da von Schienenverkehrswegen dynamische Lasten in den Untergrund eingeleitet werden, die zu Erschütterungsimmissionen in Gebäuden führen, ist der Sachverhalt im Regelfall beim Neubau oder bei der wesentlichen Änderung von Schienenverkehrswegen zu prüfen. Der Tunnelabschnitt stellt einen Neubau dar. Eine erschütterungstechnische Vorbelastung ist daher nicht vorhanden. Da die Erschütterungseinwirkungen auf Menschen in Gebäuden stets innerhalb von Gebäuden zu beurteilen sind, ist in der Prognose ebenfalls das Übertragungsverhalten der jeweiligen Bauwerke zu berücksichtigen. Daher ist es erforderlich, das Übertragungsverhalten exemplarischer Gebäude im Bereich der geplanten Tunneltrasse zu analysieren.

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für die „S-Bahn Rhein-Main, Nordmainische S-Bahn“ wurden in insgesamt 25 Gebäuden im Planfeststellungsabschnitt 1 - Frankfurt Tunnelbereich, Schwingungsmessungen durchgeführt. Ziel der Erschütterungsmessungen ist es das erschütterungsrelevante baudynamische Verhalten der Gebäude zu bestimmen. Im vorliegenden Bericht wird ausschließlich dargestellt, wie die Übertragungsfunktionen ermittelt wurden und zu welchen Ergebnissen die messtechnischen Erhebungen geführt haben. Die Erschütterungsprognose und die Beurteilung der prognostizierten Erschütterungsimmissionen werden im Bericht Nr. 08500-VVE-7 behandelt.

## 2 Bearbeitungsgrundlagen

Den durchgeführten erschütterungstechnischen Messungen wurden die folgenden Normen und Regelwerke herangezogen.

- /1/ DIN 4150, Teil 2 „Erschütterungen im Bauwesen“, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Juni 1999
- /2/ DIN 45669 Teil 1, „Messung von Schwingungsimmissionen“ Anforderungen an Schwingungsmesser, September 2008

- /3/ DIN 45669 Teil 2, „Messung von Schwingungsimmissionen“ Messverfahren, Juni 2005
- /4/ DIN 45669 Teil 3 „Messung von Schwingungsimmissionen: Prüfung (Kalibrierung und Beurteilung) der Schwingungsmesseinrichtung; Erstprüfung, Nachprüfung, Zwischenprüfung, Prüfung beim Messeinsatz, Mai 2004
- /5/ DIN 1311 „Schwingungen und schwingungsfähige Systeme Teil 1: Grundbegriffe, Einleitung“, Februar 2000
- /6/ DIN 1311 „Schwingungen und schwingungsfähige Systeme Teil 2: Lineare, zeitinvariante schwingungsfähige Systeme mit einem Freiheitsgrad“, Entwurf Juni 1999

### 3 Messdurchführung

Die Messungen der Übertragungsfunktionen wurden im Zeitraum von 04.08.2008 bis 08.08.2008 durchgeführt. Hierbei wurden pro Messobjekt (Gebäude) jeweils 3 Geschossdecken untersucht.

#### 3.1 Messobjekte

Die ausgewählten Messobjekte sind in **Tabelle 1** aufgeführt. Des Weiteren findet sich hier die Angabe in welchem Anhang zu diesem Bericht die Ergebnisse dokumentiert sind.

Die Schwingungsmessungen werden für 25 exemplarisch ausgewählten Gebäude durchgeführt. Es wurden hierbei die Gebäude so gewählt, in denen die größten Konflikte aus Sicht des Erschütterungsschutzes zu erwarten sind.

Die relevanten Angaben zu den 25 untersuchten Gebäuden finden sich in **Anhang 1** bis **Anhang 25**. Hier sind die Geschosslage, , Hinweise zur Konstruktion der jeweiligen Geschossdecken sowie der Bodenbelag dargestellt.

**Tabelle 1** Messobjekte mit Angabe des Messdatums und Anhang Nr.

Nr.	Adresse des Messobjektes	Dokumentation in Anhang
MP01	Hanauer Landstraße 17	Anhang 1
MP02	Theobald-Christ-Straße 2	Anhang 2
MP03	Hanauer Landstraße 30	Anhang 3
MP04	Hanauer Landstraße 32	Anhang 4
MP05	Rückertstraße 59	Anhang 5
MP06	Rückertstraße 50-52	Anhang 6
MP07	Windeckstraße 39	Anhang 7
MP08	Windeckstraße 37	Anhang 8
MP09	Windeckstraße 58/60	Anhang 9
MP10	Windeckstraße 56	Anhang 10
MP11	Ostendstraße 63	Anhang 11
MP12	Ostendstraße 67	Anhang 12
MP13	Ostendstraße 69	Anhang 13
MP14	Ostendstraße 71	Anhang 14
MP15	Howaldtstraße 12	Anhang 15
MP16	Ostendstraße 78	Anhang 16
MP17	Ostendstraße 80	Anhang 17
MP18	Ostendstraße 82	Anhang 18
MP19	Ostendstraße 84	Anhang 19
MP20	Schichaustraße 11	Anhang 20
MP21	Schichaustraße 13	Anhang 21
MP22	Schichaustraße 15	Anhang 22
MP23	Ostbahnhofstraße 16	Anhang 23
MP24	Danziger Straße 2	Anhang 24
MP25	Grusonstraße 9	Anhang 25

## 3.2 Beschreibung der Messkette

### 3.2.1 Messgeräte

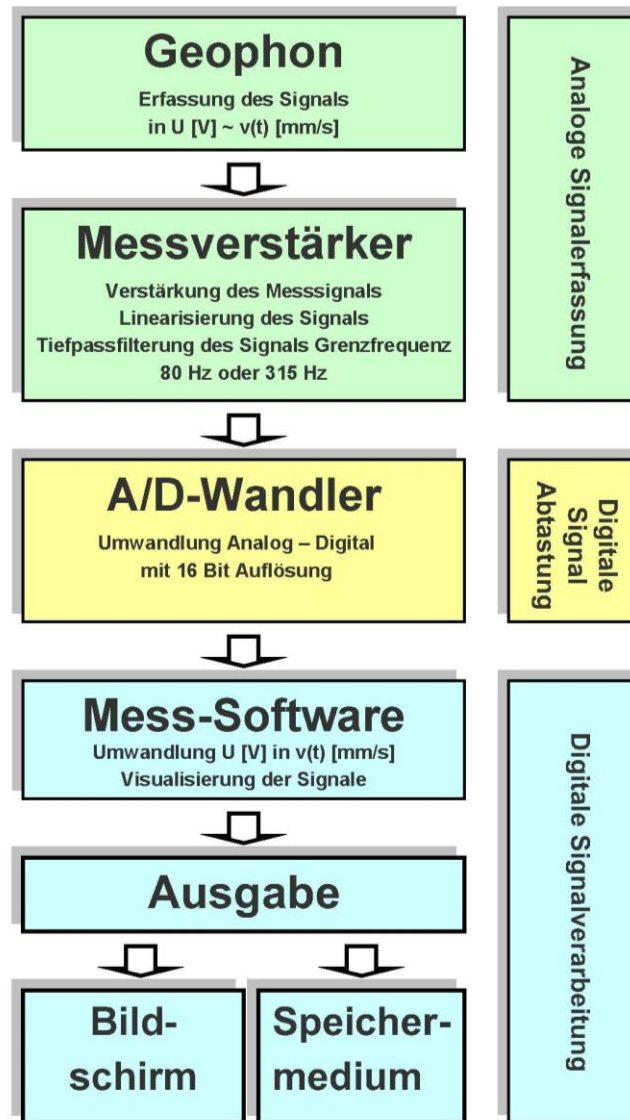
Der analoge Teil der Messkette besteht aus dem Sensor (Geophon) der ein der Schwinggeschwindigkeit proportionales Spannungssignal liefert und aus dem Messverstärker, der das analoge Messsignal konditioniert. Hierbei wird der Spannungsbereich des Messsignals angepasst, so dass beim Ausschöpfen der Messbereichsgrenze ein Messsignal von 10 V zur

Digitalisierung ansteht. Des Weiteren wird im Verstärker eine Tiefpassfilterung der Signale mit einer Grenzfrequenz von

$$f_G = 315 \text{ Hz}$$

vorgenommen. Das Filter entspricht den Anforderungen an Schwingungsmesser nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Es handelt sich demnach um einen Filter 2. Ordnung. Die Komponenten der Messanlage sind in der Prinzipskizze in **Abbildung 1** dargestellt. In **Tabelle 2** sind die einzelnen Komponenten des Messsystems beschrieben.

**Abbildung 1**      Prinzipskizze der Messanordnung



Die digitale Abtastung der analogen Messsignale erfolgte mit einer Frequenz von

$$f_s = 2048 \text{ Hz.}$$

Somit werden die Zeitverläufe der Schwingungssignale mit einer spektralen Bandbreite von bis zu

$$f_G = 1000 \text{ Hz}$$

erfasst.

Um eine hinreichende spektrale Auflösung zu realisieren, wurden die Schwingungssignale in Zeitfenstern von

$$T = 3 \text{ sec}$$

Dauer erfasst. Bei der spektralen Auswertung konnte somit eine Auflösung von

$$\Delta f = 1/T = 1/3\text{sec} = 0,333 \text{ Hz}$$

realisiert werden. Diese Auflösung ist für die hier bestehende Aufgabenstellung vollkommen ausreichend, da die Übertragungsfunktionen für die Erschütterungsprognose in Terzbandbreite benötigt werden. Die oben angegebene hohe Auflösung ist insbesondere für die Ermittlung der Terzpegel unterhalb von 10 Hz erforderlich. Für den Frequenzbereich darüber wäre eine deutlich geringere spektrale Auflösung ausreichend.

Die Messdaten wurden für jedes Schwingungsereignis, hier für jede erfasste Impulsantwort einer Geschossdecke, unmittelbar nach Messdurchführung auf dem Bildschirm des Messrechners angezeigt und auf Plausibilität geprüft. Sofern Übersteuerungen oder Untersteuerungen auftraten, wurde die Messung verworfen, die Aussteuerung angepasst und eine erneute Messung durchgeführt. Die auf dem Bildschirm angezeigten  $v(t)$ -Signale werden nach Sichtung des Messergebnisses abgespeichert und anschließend, d.h. nach Absolvierung des Messprogramms, im Labor ausgewertet.

**Tabelle 2** Komponenten des verwendeten Messsystems

<b>GEOPHONE:</b>	elektrodynam. Absolutschwingungsaufnehmer
Hersteller:	Western Data Systems, Typ SM6
Kennfrequenz:	4,5 + 0,5 Hz für alle 3 Komponenten
Empfindlichkeit:	0,29 + 5% V/cm/s für alle 3 Komponenten
<b>MESSVERSTÄRKER:</b>	
Hersteller:	EBG Darmstadt
Verstärkungsfaktoren:	1 / 20 / 50
<b>LAPTOP</b>	
Hersteller:	Medion
CPU:	Intel Atom N270 1,6 GHz
<b>A/D-WANDLER</b>	<b>DT2801A</b>
Hersteller:	Data Translation
Wandlungsrate:	16 Bit
<b>SOFTWARE:</b>	<b>MEDA-AD</b>
Hersteller:	Wölfel Meßsysteme Software GmbH + Co. KG
Version:	8.1

### 3.2.2 Anordnung der Sensoren

Die Anordnung der Sensoren in den einzelnen Räumen ist in den **Anhänge 1 bis 8** angegeben. Hierbei wurde der Sensor in der Mitte des Deckenfeldes aufgestellt.

Die Ankopplung der Sensoren erfolgte gemäß **DIN 45669-2** /3/. In Anbetracht des Sachverhaltes, dass die am Sensor anstehenden Schwingbeschleunigungen stets deutlich unterhalb der Erdbeschleunigung liegen, reicht die Gravitationskraft aus um den Sensor in Position zu halten. Kontaktresonanzen werden durch Beachtung der Vorgaben in /3/ vermieden.

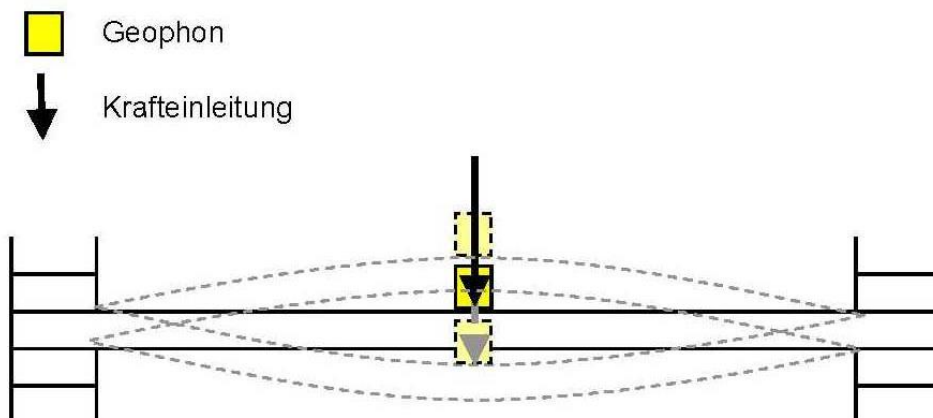
## 3.3 Messdurchführung

Ziel der hier beschriebenen bauphysikalischen Grundlagenerhebung ist es das schwingungstechnische Übertragungsverhaltens von Geschoßdecken im Hinblick auf die Durchführung einer Erschütterungsprognose zur Beurteilung von Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden zu quantifizieren. Daher wird die Auswahl der Messpositionen gemäß den Vorgaben der **DIN 4150-2** /1/ vorgenommen. Konkret wurden, soweit dies möglich war,

Messungen in 3 verschiedenen Geschossen des zu untersuchenden Gebäudes jeweils in dem Raum mit der größten Deckenspannweite durchgeführt, da für diese Deckenfelder die niedrigsten Eigenfrequenzen und die stärksten resonanzbedingten Schwingungsverstärkungen zu erwarten sind. Die Sensoren wurden in Deckenmitte bzw. Deckenfeldmitte positioniert. Die Messpositionen sind in einer Prinzipskizze in **Abbildung 2** dargestellt.

Die Messanordnung zielt darauf ab, die 1. Biegeeigenschwingung der Geschoßdecke bzw. des Deckenfeldes anzuregen und zu analysieren. Dies ist sinnvoll, da aus umfangreichen Immissionsmessungen an Bahnstrecken bekannt ist, dass es in der Regel zur Anregung dieser Grundschwingungsform der Geschoßdecke kommt. Dies ergibt sich aus dem Sachverhalt, dass der Anregungsprozess der Geschossdecke als eine Fußpunkterregung anzusehen ist, wobei die Anregung über die vertikale Schwingungsamplitude der aufgehenden Wände näherungsweise gleichphasig erfolgt.

**Abbildung 2** Systemskizze zur Anordnung des Geophons auf der Decke für die Erfassung des Ausschwingvorganges



Nachdem die Messpositionen eingerichtet wurden, wurde ein Kraftimpuls durch einen fallenden Sandsack in die Decke eingeleitet, dieser regt die Decke zu Eigenschwingungen an. Die Position der Anregung wird hierbei so gewählt, dass möglichst die erste Biegeschwingungsform angeregt wird. Die Impulsantwort der Decke wird mit dem Messsystem als Zeitsignale  $v(t)$  [mm/s] erfasst und digital abgespeichert. Im Prinzip wird das

„Ausschwingen“ der durch den Impuls des Sandsackes angeregten Decke digital aufgezeichnet. Dieser im Zeitbereich aufgezeichnete Ausschwingvorgang wird anschließend ausgewertet.

### 3.4 Auswertung der Messungen

Die Auswertung der Messungen erfolgt nach Abschluss der durchgeführten Messungen im Labor. Nach Sichtung der Signale werden die Signale einer digitalen Tiefpassfilterung mit einer Grenzfrequenz von

$$f_G = 80 \text{ Hz}$$

unterzogen. Hierdurch werden störende höherfrequente Nebeneffekte (z. B. das mit Schwingen des Bodenbelages) eliminiert. Im Anschluss werden aus den gefilterten Signalen mittels FFT-Analyse Schmalbandspektren erzeugt. Diese liefert direkt als Ergebnis die Eigenfrequenz der jeweiligen Decke.

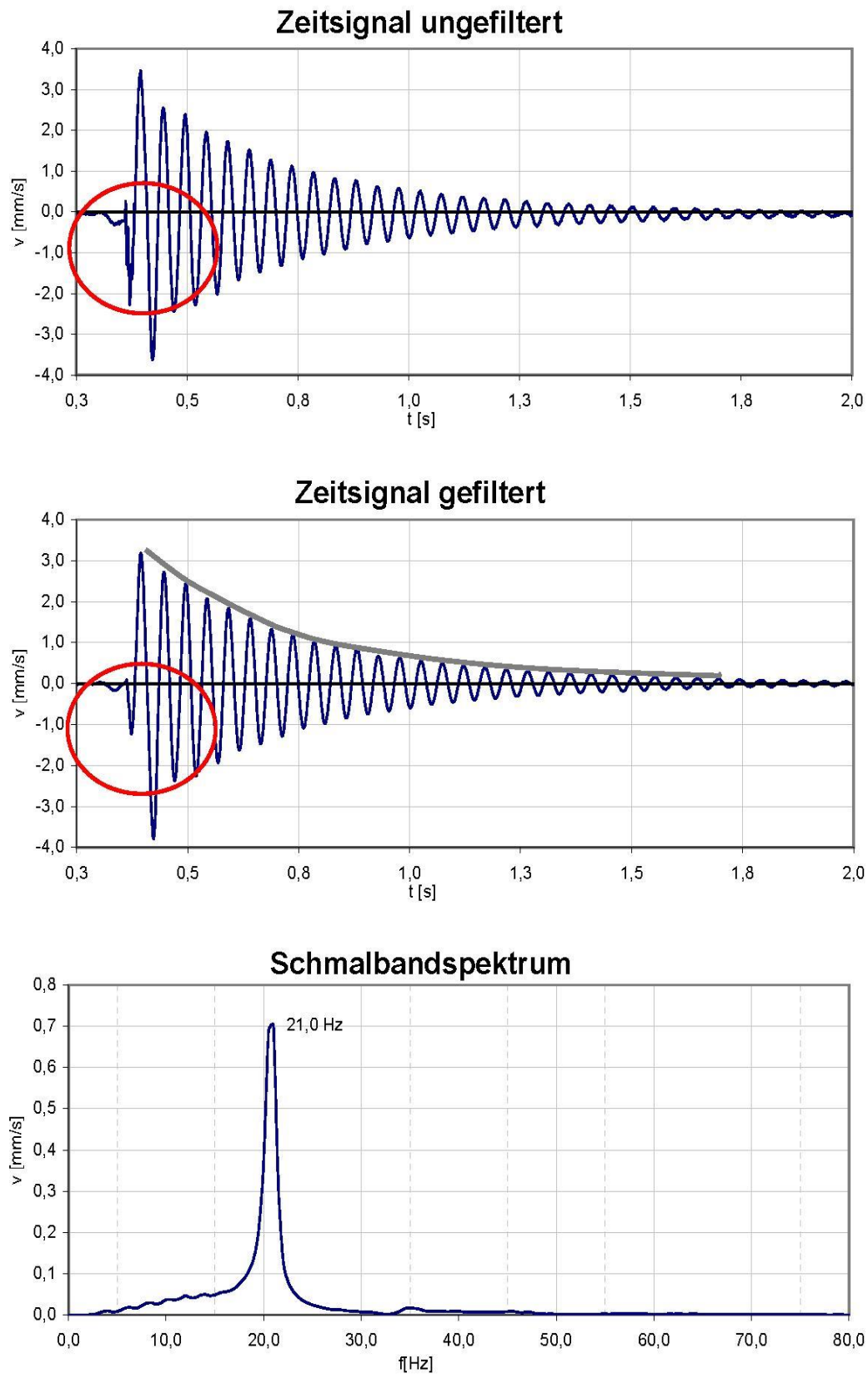
In **Abbildung 3** ist der typische Verlauf eines Ausschwingssignales im Zeitbereich dargestellt. Der Rote Kreis kennzeichnet eine Störung durch Nebeneffekte, die nach der Filterung eliminiert ist. Das gefilterte Signal ist im zweiten Fenster der **Abbildung 3** dargestellt. Das 3. Fenster zeigt das Schmalbandspektrum mit der ausgeprägten Spitze bei 21 Hz, hierbei handelt es sich um die Eigenfrequenz  $f_0$  der Decke.

Der Amplitudenverlauf beim Ausschwingen der Decke lässt Rückschlüsse auf das Schwingungsverhalten der Decke d.h. seine Eigenfrequenz, wie bereits dargestellt, und auch auf die Dämpfung der Schwingung zu. Der Grad der Dämpfung kann anhand des logarithmischen Dekrements quantifiziert werden. Es gilt

$$\Lambda = \ln (x_m/x_n)$$

$\Lambda$	Logarithmisches Dekrement
$x_m$	Amplitude des ersten Ausschlags
$x_n$	Amplitude des zweiten Ausschlags

**Abbildung 3** Messtechnische Analyse von Ausschwingvorgängen



Es wird also eine Auswertung der logarithmischen Verhältniszahlen aufeinander folgender Amplituden vorgenommen (siehe Abbildung 3 graue Linie im gefilterten Zeitverlauf). Aus dem logarithmischen Dekrement lässt sich das Lehrsche Dämpfungsmaß für das System ermitteln. Das Lehrsche Dämpfungsmaß ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$D = \frac{\Lambda}{\sqrt{(2 \cdot \pi)^2 + \Lambda^2}}$$

$\Lambda$       Logarithmisches Dekrement  
 $D$       Lehrsches Dämpfungsmaß

Die Berechnung der Übertragungsfunktionen der Geschossdecken erfolgte durch die Abbildung der Decke als Einmassenschwinger mit der messtechnisch ermittelten Eigenfrequenz und der messtechnisch erhobenen Dämpfung. Die Übertragungsfunktion ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$V(f) = \frac{\sqrt{1 + 4 \cdot D^2 \cdot \eta^2}}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4 \cdot D^2 \cdot \eta^2}}$$

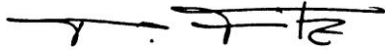
$V(f)$       Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$   
 $\eta$       Frequenzverhältnis Eigenfrequenz der Decke  $f_0$  zur Frequenz  $f$  es gilt  $\eta = f_0/f$   
 $D$       Lehrsches Dämpfungsmaß

Dieses Ergebnis erhält man eine lineare Übertragungsfunktion im Schmalband. Aus der Schmalbandfunktion werden Terzbandfunktionen erstellt die anschließend logarithmiert werden. Die Ergebnisse sind in den Anhängen **Anhang 1** bis **Anhang 25** dargestellt.

## 4 Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse für die repräsentativen Gebäude und der hierin ausgewählten Deckenfelder sind in den **Anhängen 1** bis **25** dokumentiert.

In diesen Anhängen finden sich die Übertragungsfunktionen für die messtechnisch untersuchten Geschossdecken. Die Zuordnung der Untersuchungsergebnisse zu den einzelnen Objekten ist **Tabelle 1** zu entnehmen.



**Dipl.-Phys. Peter Fritz**



**Dipl.-Ing. Rolf Schneider**



# ANHANG