

GRUNDLAGEN DER BAUDYNAMIK - ERSCHÜTTERUNGSSCHUTZ

ÖVG – Symposium
Erschütterungen bei Schienenbahnen
Technische Universität Graz
9. September 2013

Univ.- Prof. DI Dr. Rainer FLESCHE

INHALT

1. Dynamische Aufgabenstellungen
 - Einwirkende dynamische Kräfte
 - Bauwerksantwort
Bei Übereinstimmung der Frequenzen \Rightarrow Resonanzverstärkungen
2. Darstellung der Schwingungen
 - Im Zeitbereich
 - Im Frequenzbereich
3. Einmassenschwinger
 - Bewegungsgleichung
 - Schwingungsantwort bei impulsförmiger Anregung
 - Schwingungsantwort bei sinusförmiger Anregung
 - Schwingungsisolierung, Frequenzabstimmung, Lastübertragungsfaktor

INHALT

4. Mehrmassenschwinger
 - Gekoppeltes Differentialgleichungssystem
 - Entkoppelte Differentialgleichungen, generalisierte Größen ⇒ „fiktive Einmassenschwinger“
5. Maßnahmen zur Schwingungsminderung
6. Schwingungsprognose

1.1 Dynamische Kräfte

- Jede fortbewegte Last (auf dem Boden, auf einem Kunstbauwerk) erzeugt Schwingungen
- Unregelmäßige Fahrzeugbewegungen (Tauchen, Rollen, Drehen, Nicken, Schlingern); Frequenzen meist < 10 Hz
- Lotrechte Biegeschwingungen der belasteten Radsätze auf dem elastischen Gleis; Frequenzen im Bereich 40 – 90 Hz
- Lotrechte Tauchschwingungen der Radsätze auf dem elastischen Gleis; Frequenzen ebenfalls im **Bereich 40 – 90 Hz**; maßgeblich ist Gesamtsteifigkeit des Fahrweges sowie ungefederte Radsatzmasse
- Dynamische Kräfte zufolge bestimmter Fahrzeugeigenschaften: Radunregelmäßigkeiten (Unrundheit, Unwucht, Flachstellen) sowie Fahrzeu glänge, Achs- und Drehgestellabstand ⇒ **Frequenz der Fahrgeschwindigkeit proportional**
- Dynamische Kräfte zufolge bestimmter Oberbaueigenschaften: z.B. Schwellenabstand, Weichen, Hohlage von Schwellen, Steifigkeitsänderungen, Riffelbildung

1.2 Bauwerksantwort

Schwingungsfähige Medien:

- Fahrweg (inkl. Maßnahmen)
- (Tunnel)
- Untergrund
- Fundamentbereich
- Bauwerk, insb. Decken

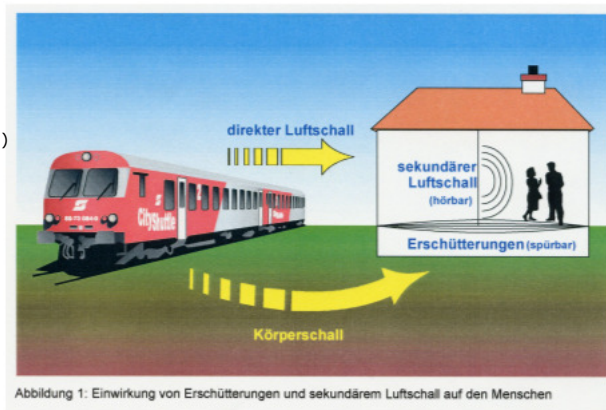


Abbildung 1: Einwirkung von Erschütterungen und sekundärem Luftschall auf den Menschen

© R. Flesch u. Austrian Standards plus GmbH

www.as-plus.at/trainings

5

1.2 Bauwerksantwort/ Fühlbarkeit von Schwingungen

Stärkste
Fühlbarkeit im
Bereich 8 – 80 Hz

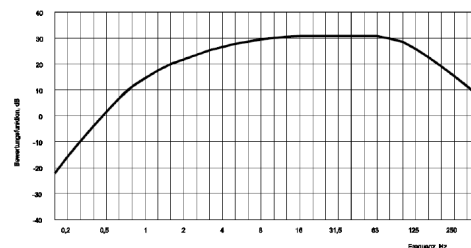


Bild 4-1: schematische Darstellung der Bewertungsfunktion W_n mit der Schwinggeschwindigkeit als Eingangsgröße

Messungen:

- Schwinggeschwindigkeit
- Schwingbeschleunigung

© R. Flesch u. Austrian Standards plus GmbH

www.as-plus.at/trainings

6

2.1 Darstellung der Schwingungen im Zeitbereich (1)

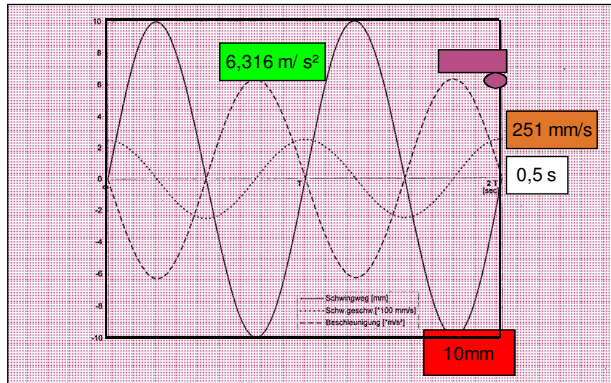


Fig. 1.1 Zusammenhänge Schwingweg, Schwinggeschwindigkeit und Schwingbeschleunigung für eine Sinusschwingung mit 4 Hz und 10 mm Schwingweg

$$u_{\max} = 2\pi f \cdot u_{\max} = 4\pi^2 f^2 u_{\max}$$

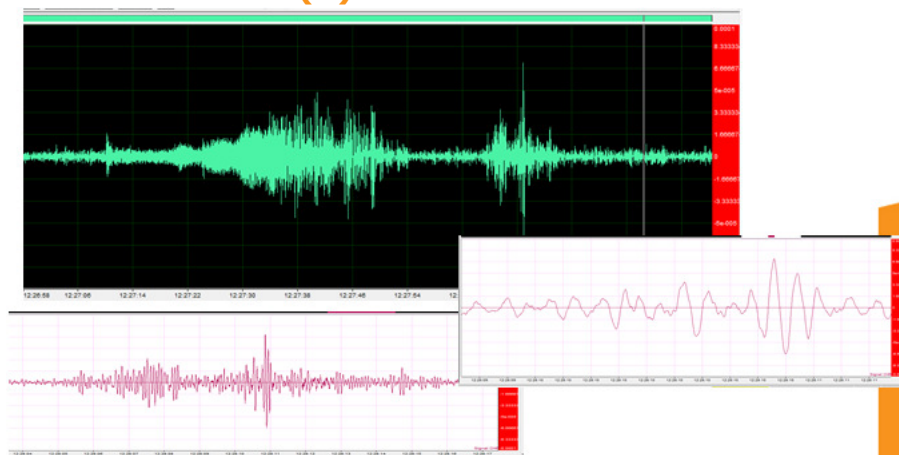
$$u = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\dot{u} = \omega \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$\ddot{u} = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

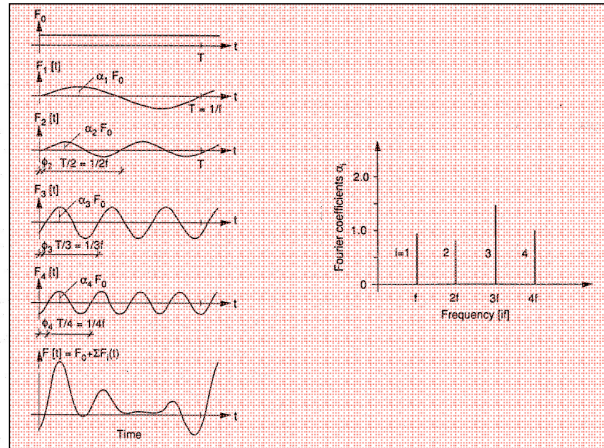
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

2.1 Darstellung der Schwingungen im Zeitbereich (2)



2.2 Darstellung der Schwingungen im Frequenzbereich (1)

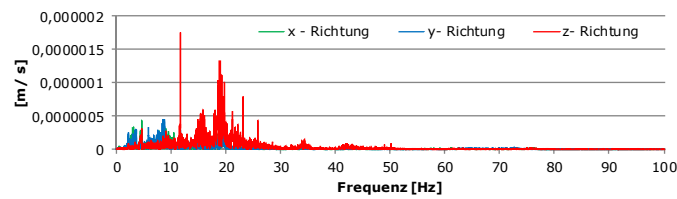
Fourier-
darstellung



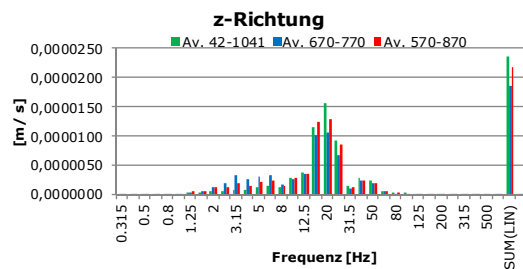
© R. Flesch u. Austrian Standards | Fig. 1.1a Fourierzerlegung einer periodischen Funktion im Zeitbereich und diskretes Fourierspektrum

9

2.2 Darstellung der Schwingungen im Frequenzbereich (2)



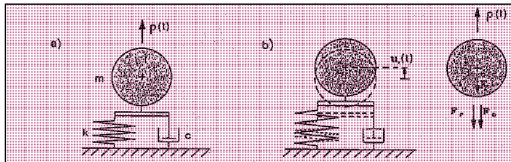
FFT-
Spektrum
 $\Delta = 0,0197$ Hz



Terz-
Spektrum

10

3. Einmassenschwinger/ Bewegungsgleichung



$$\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad f_o = \frac{\omega_o}{2\pi}, \quad T = \frac{1}{f_o}$$

$$\omega_o = \frac{2\pi}{T} \quad (1.20)$$

ω_o ... Eigenkreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit

Fig. 1.2. Einmassenschwinger [1.12]
a) Ruhelage; Masse m , Federsteifigkeit k , Dämpfungskoeffizient c
b) Ausgelenkte Lage mit den angreifenden Kräften $p(t)$, F_I , F_D und F_F

$$F_I + F_D + F_F = p(t) \quad (1.11)$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (1.12)$$

3. Einmassenschwinger/ freies Ausschwingen

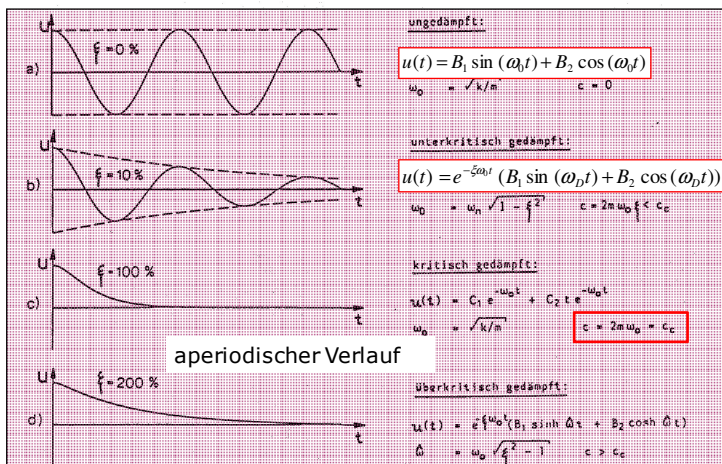


Fig. 1-4: Bewegungsverlauf bei verschiedenen Dämpfungen [1.12]

3. Einmassenschwinger/ sinusförmige Anregung $p(t) = p_0 \sin(\omega t)$

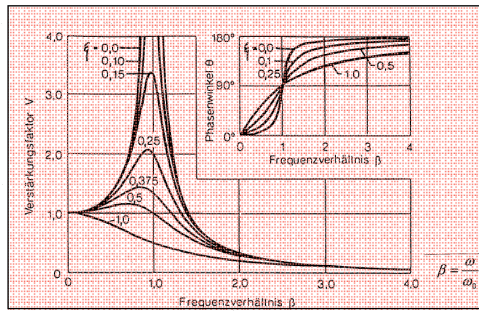


Fig. 1.6: Resonanzkurven und Phasenverschiebung für verschiedene Dämpfungsverhältnisse [1.12]

$$u_p(t) = \frac{p_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \sin(\omega t - \theta) \quad (1.46)$$

und für die Phasenverschiebung θ

$$\theta = \arctan \frac{2\xi\beta}{1-\beta^2}, \quad 0 \leq \theta \leq 180^\circ. \quad (1.47)$$

$$V(\beta, \xi) = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (1.48)$$

$$V_{\beta=1} = \frac{1}{2\xi} \quad (1.49)$$

3. Einmassenschwinger/ Schwingungsisolierung/ Lastübertragungsfaktor

$$V_R = V \sqrt{1 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.10)$$

$$p(t) = p_0 \sin(\omega t)$$

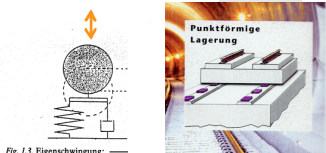


Fig. 1.3: Eigenschwingung: ...

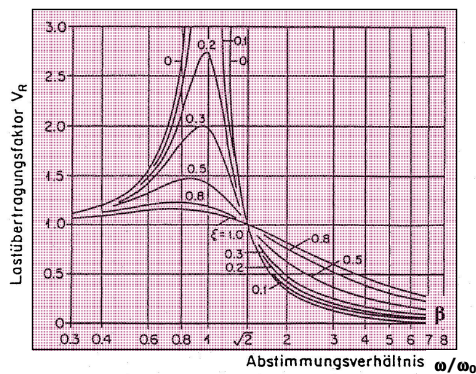


Fig. 2.8: Lastübertragungsfaktor für verschiedene Dämpfungszahlen in Funktion des Abstimmungsverhältnisses (Verhältnis Betriebsfrequenz/Eigenfrequenz des Bauwerks bzw. Bauteils) [2.2]

4. Mehrmassenschwinger

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P(t)\} \quad \text{Ursprüngliches, gekoppeltes Gleichungssystem (1.52)}$$

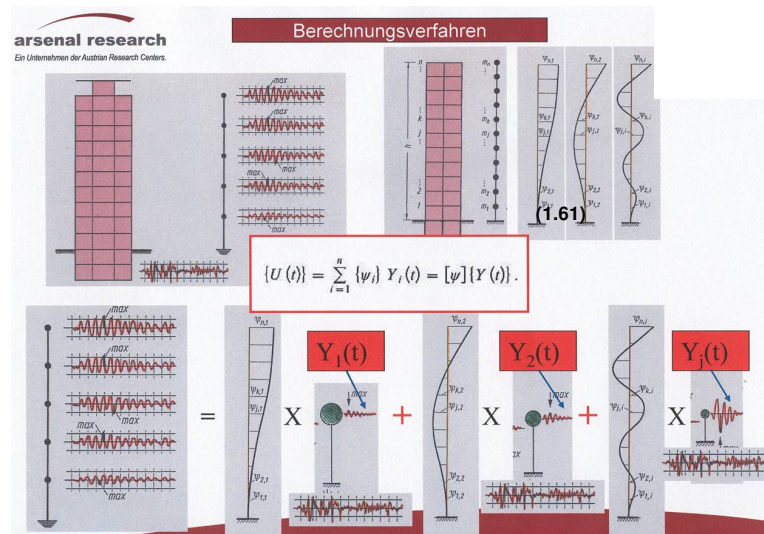
$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad \text{freie, ungedämpfte Schwingungen (1.53)}$$

$$\{U\} = \{\bar{U}\} \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{Lösungsansatz}$$

$$([K] - \omega^2 [M])\{\bar{U}\} = \{0\} \quad \text{homogenes Gleichungssystem (1.54)}$$

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad \text{nichttriviale Lösungen, wenn Det = 0 (1.55)}$$

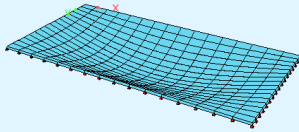
⇒ Gleichung n-ten Grades in ω^2 ; charakteristische Gleichung, mit n Lösungen ω_i (**Eigenkreisfrequenzen**)



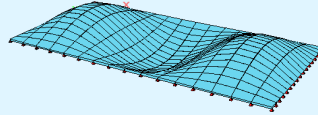
4. Mehrmassenschwinger (3)

Decke 12 x 6 m, d = 0,1 m

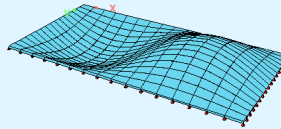
1. Eigenfrequenz: 5,5 Hz



3. Eigenfrequenz: 14,3 Hz



2. Eigenfrequenz: 5,5 Hz

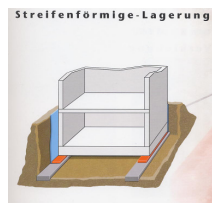
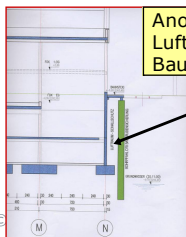


© R. Flesch u. Austrian Standards plus GmbH

www.as-plus.at/trainings

17

5. Dämmmaßnahmen



© Austrian Standards plus GmbH

www.as-plus.at/trainings

18

6. Prognose

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

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n(f)}$$

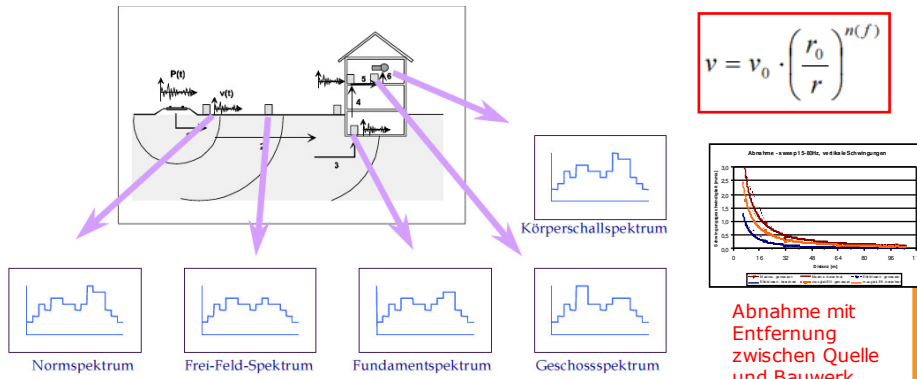


Abbildung 5-1: Schematischer Ablauf des Berechnungsverlaufes mit Vibra 2.

6. Prognose (2)

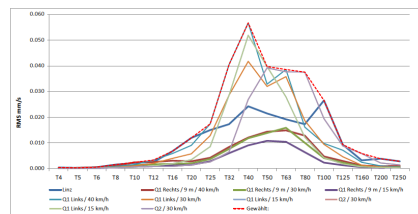


Abbildung 5-2: Der Modellrechnung zugrundeliegende Emissionsspektren.

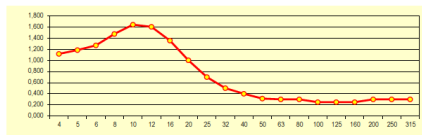


Abbildung 5-5 Einfluss der erschütterungsgedämmten Bauweise ca. 12-13 Hz

Quelle: tappauf.consultants

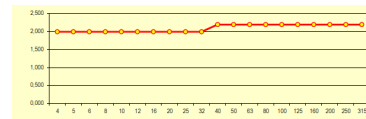


Abbildung 5-4 Einfluss Weiche.

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n(f)}$$

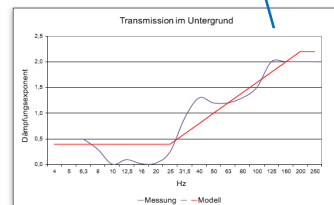
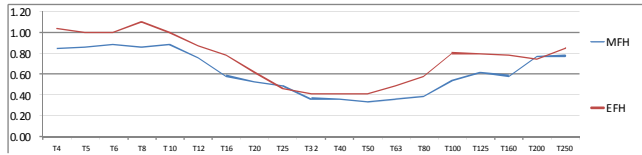
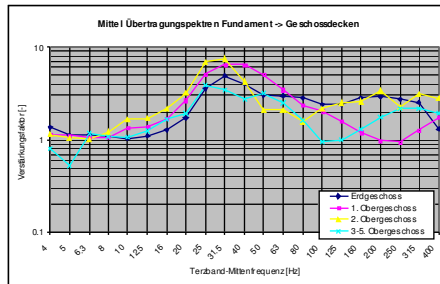


Abbildung 5-6 Dämpfungsbeiwert

6. Prognose (3)



Transferspektrum Übergang Boden - Fundament



Transferspektrum Geschossdecken

© R. Flesch u. Austrian Standards plus GmbH

www.as-plus.at/trainings

21

6. Prognose (4)

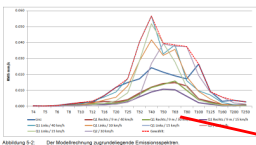


Abbildung 5.2: Die Messrechnung zugrundeliegende Emissionsspektren

Abstand Emissionsmesspunkt [m]:	8
Projekt-Fahrtgeschw. [km/h]:	15
Basis-Fahrtgeschw. [km/h]:	30
Sicherheitsfaktor:	1.42
$K_E V_{eff}$:	0.67
V_{eff} :	5.00E-05

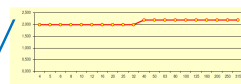


Abbildung 5.4: Einfluss Messp.

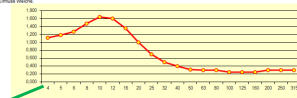


Abbildung 5.5: Einfluss der erschlüßungsgläubigen Bauweise ca. 12-13 Hz

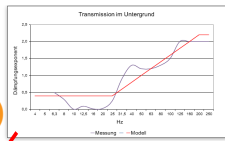
Terz-Frequ.	Emission	Strecken-param.	Massnahme	Sicherheit	Fahrtgeschw.	$K_E V_{eff}$		
8.0	0.0010	2.0000	1.4500	1.42	0.71	0.6700	0.001951	0.000004
10.0	0.0020	2.0000	1.6500	1.42	0.71	0.6700	0.004440	0.000020
12.5	0.0025	2.0000	1.6000	1.42	0.71	0.6700	0.005382	0.000029
16.0	0.0075	2.0000	1.3800	1.42	0.71	0.6700	0.013926	0.000194
20.0	0.0120	2.0000	1.0000	1.42	0.71	0.6700	0.016146	0.000261
25.0	0.0180	2.0000	0.7000	1.42	0.71	0.6700	0.016953	0.000287
31.5	0.0400	2.0000	0.5000	1.42	0.71	0.6700	0.028910	0.000724
40.0	0.0560	2.2000	0.4000	1.42	0.71	0.6700	0.033153	0.001099
50.0	0.0400	2.2000	0.3500	1.42	0.71	0.6700	0.020720	0.000429
63.0	0.0390	2.2000	0.3000	1.42	0.71	0.6700	0.017316	0.000300
80.0	0.0380	2.2000	0.3000	1.42	0.71	0.6700	0.016872	0.000285
100.0	0.0270	2.2000	0.2500	1.42	0.71	0.6700	0.009990	0.000100
125.0	0.0100	2.2000	0.2500	1.42	0.71	0.6700	0.003700	0.000014
160.0	0.0060	2.2000	0.2500	1.42	0.71	0.6700	0.002220	0.000005
200.0	0.0040	2.2000	0.3000	1.42	0.71	0.6700	0.001776	0.000003
250.0	0.0030	2.2000	0.3000	1.42	0.71	0.6700	0.001332	0.000002
							0.003755	
							0.061278	

© R. Flesch u. Austrian Standards plus GmbH

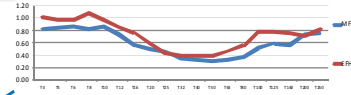
www.as-plus.at/trainings

22

6. Prognose (5)



Sekundärschallberechnung nach ONR 199005



OBJEKT	STB
Abstand [m]	15

Terz-Frequ.	Ausbreitungsfunktion		
8.0	-0.40	0.0015	0.0000
10.0	0.00	0.0044	0.0000
12.5	-0.20	0.0047	0.0000
16.0	-0.10	0.0131	0.0002
20.0	-0.10	0.0152	0.0002
25.0	-0.30	0.0140	0.0002
31.5	-1.00	0.0144	0.0002
40.0	-1.30	0.0146	0.0002
50.0	-1.20	0.0097	0.0001
63.0	-1.20	0.0081	0.0001
80.0	-1.30	0.0075	0.0001
100.0	-1.50	0.0039	0.0000
125.0	-2.00	0.0011	0.0000
160.0	-2.00	0.0006	0.0000
200.0	-2.00	0.0005	0.0000
250.0	-2.00	0.0004	0.0000

TS-Bauwerk			
MFH	STB		
0.8500	2.2000	0.0029	0.0000
0.8900	4.8000	0.0188	0.0004
0.7600	8.9000	0.0317	0.0010
0.5900	8.5601	0.0660	0.0044
0.5300	8.2813	0.0665	0.0044
0.4900	8.7840	0.0604	0.0037
0.3700	8.8947	0.0472	0.0022
0.3600	8.7577	0.0505	0.0025
0.3300	8.8347	0.0284	0.0008
0.3500	5.6630	0.0166	0.0003
0.3900	3.9767	0.0116	0.0001
0.5400	3.9617	0.0083	0.0001
0.6200	4.1581	0.0027	0.0000
0.5800	4.3812	0.0016	0.0000
0.7200	3.5383	0.0014	0.0000
0.7800	3.5678	0.0011	0.0000

Sekundärschall			
L _{1,2}	C	10(L _{1,2} +C)/16	
35.1799	-70.4	0.012832	
51.4829	-63.4	0.184216	
56.0533	-56.7	3.730393	
62.4175	-50.5	15.788109	
61.6453	-44.7	49.491793	
59.5054	-39.4	102.457342	
60.0824	-34.6	353.377468	
55.0907	-30.2	308.365584	
50.4247	-26.2	264.527075	
47.2779	-22.5	300.459979	
44.4276	-19.1	341.001817	
34.8884	-16.1	72.216685	
30.0895	-13.4	46.640289	
28.7953	-10.9	61.593414	
26.4808	-8.6	61.387390	

6. Schwingungsprognose/ Schwingungsgenerator MOSES/ AIT



ERROR: stackunderflow
OFFENDING COMMAND: ~

STACK: