

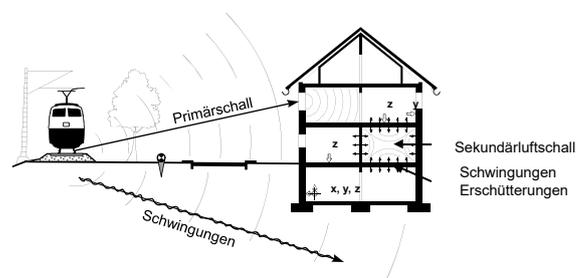
Grundlagen Erschütterungen und Sekundärer Luftschall

Gerhard Müller

Technische Universität München
Lehrstuhl für Baumechanik

Schwingungen – Erschütterungen – Sekundärluftschall

- Es vibriert!
- Es brummt im Gebäude!
- Ich kann mit dem Gerät nicht arbeiten!



Von der Belastung...

- Erdbeben
- Explosionen, Anprall
- Wind
- Fußgänger, bewegte Fahrzeuge
- Maschinen
- Haustechnik

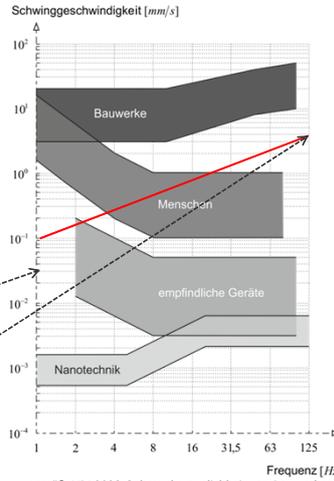
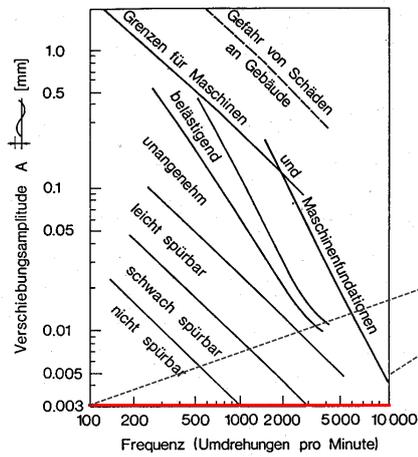
zur Wirkung

- Standsicherheit bei einmaliger Last
- Ermüdung
- menschliches Wohlbefinden
- störungsfreier Betrieb sensibler Geräte

Übersicht

- Schwingungen - Erschütterungen – Sekundärluftschall
- Anforderungen
- Prognose
- Maßnahmen zum Schwingungs- und Erschütterungsschutz
- Vorgehen bei der Planung des Schwingungs- und Erschütterungsschutzes
- Zusammenfassung

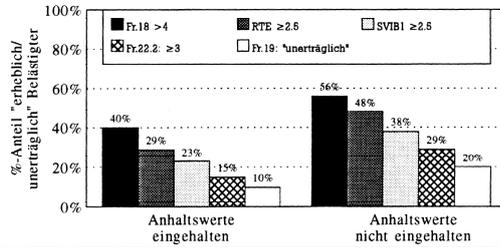
Anforderungen



gemäß: VDI 2038 Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen - Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik, Blatt 2: Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung (2013)

Anforderungen - Menschliche Wahrnehmung

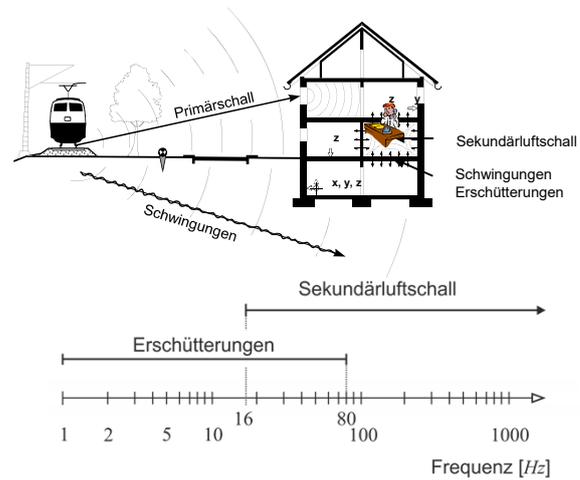
Prozentanteile Belästigter bezogen auf die Anhaltswerte der DIN 4150 / Tag



	Anhaltswerte eingehalten	Anhaltswerte nicht eingehalten
Fr. 18	78/195 (40%)	121/216 (56%)
RTE	57/195 (29%)	103/216 (48%)
SVIB1	44/195 (23%)	82/216 (38%)
Fr. 22.2	30/195 (15%)	62/216 (29%)
Fr. 19	20/195 (10%)	44/216 (20%)

Zeichart K, et al.: Erschütterungen durch Eisenbahnverkehr und ihre Wirkungen auf Anwohner. Teil I: Zum Zusammenwirken von Erschütterungs- und Geräuschbelastung. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 41, 43-51, (1994)

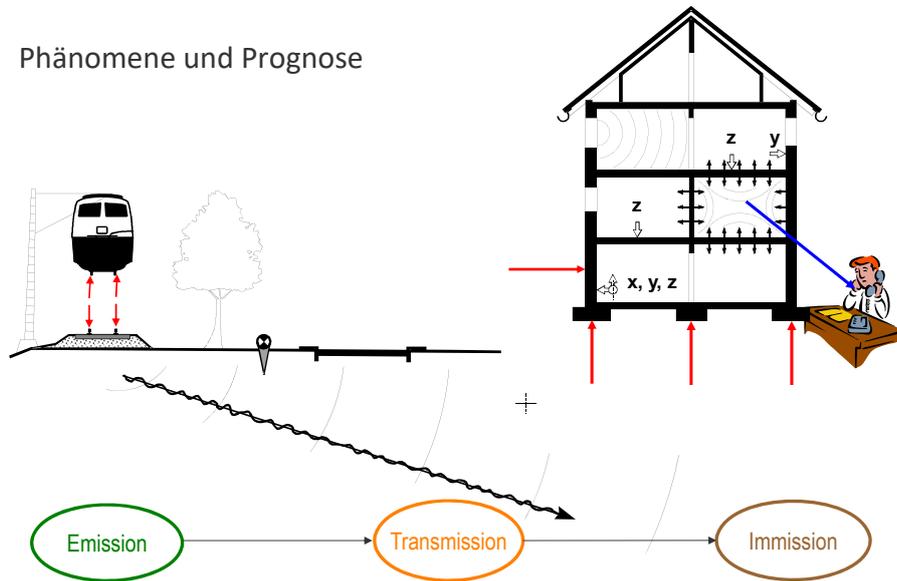
Schwingungen – Erschütterungen – Sekundärluftschall



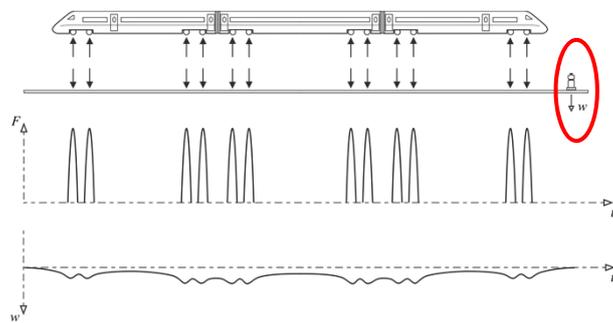
Übersicht

- Schwingungen - Erschütterungen – Sekundärluftschall
- Anforderungen
- **Prognose**
- **Maßnahmen zum Schwingungs- und Erschütterungsschutz**
- Vorgehen bei der Planung des Schwingungs- und Erschütterungsschutzes
- Zusammenfassung

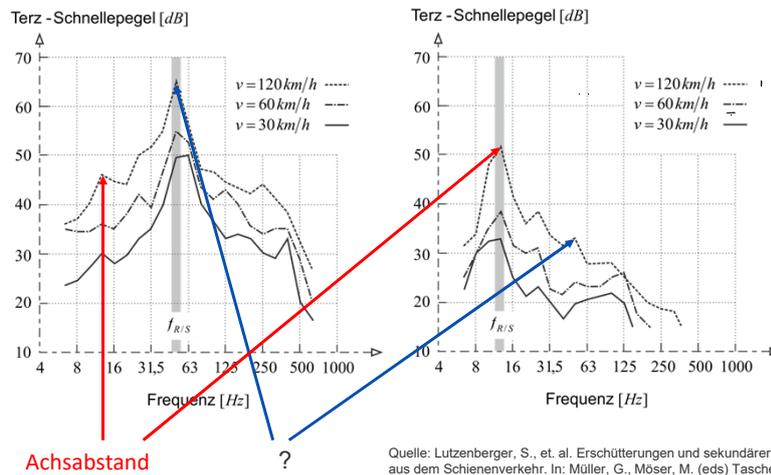
Phänomene und Prognose



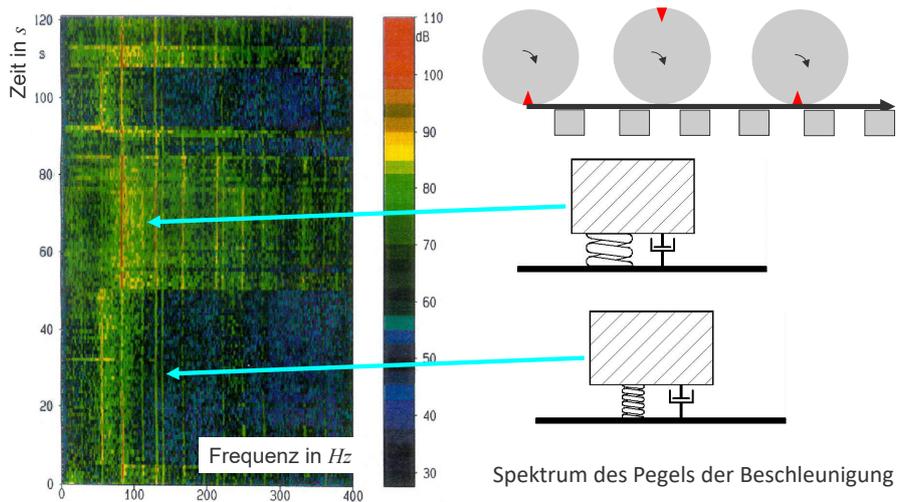
Anregung aus dem bewegten „statischen“ Lastbild



Meßergebnisse im ruhenden Koordinatensystem

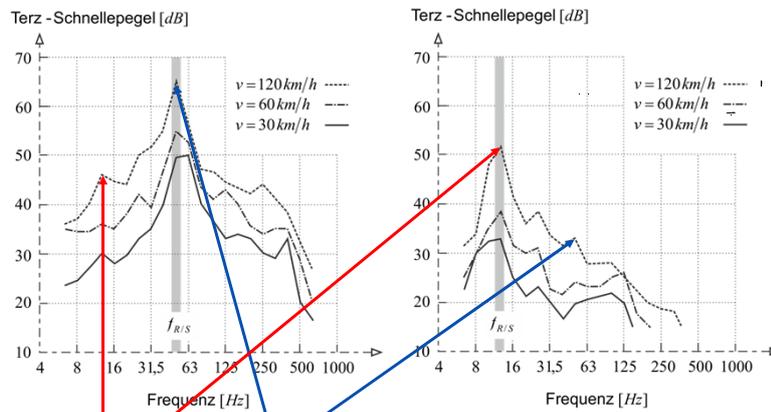


Anregung aus Rauigkeit/Unrundheit und parametrische Anregung



Quelle: Müller-BBM

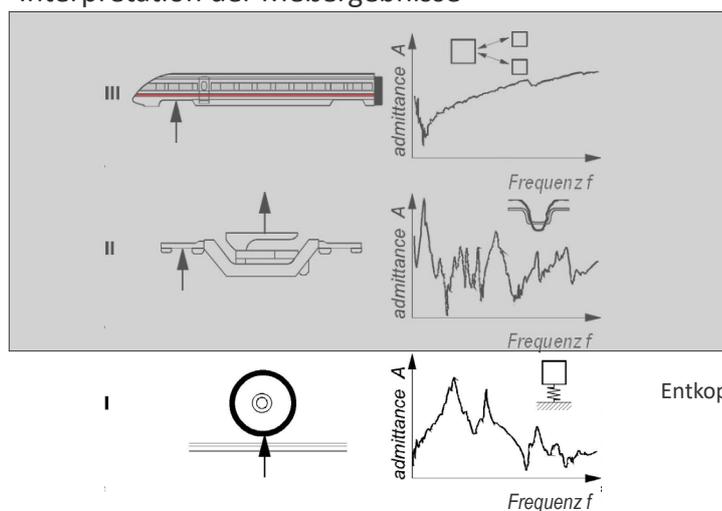
Meßergebnisse im ruhenden Koordinatensystem



Achsabstand - Schwellenfach - Radunrundheit - Schienenrauigkeit

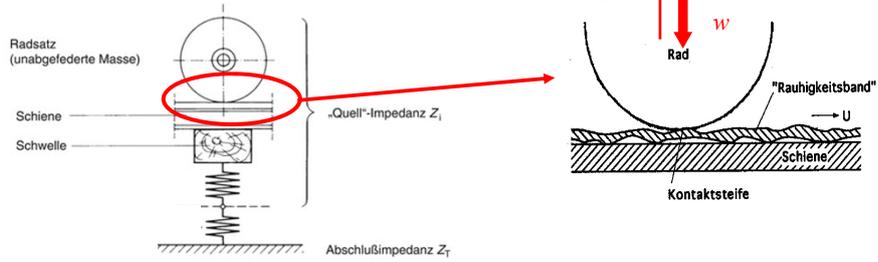
Quelle: Lutzenberger, S., et. al. Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr. In: Müller, G., Moser, M. (eds) Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer Nachschlage Wissen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, (2015)

Interpretation der Meßergebnisse

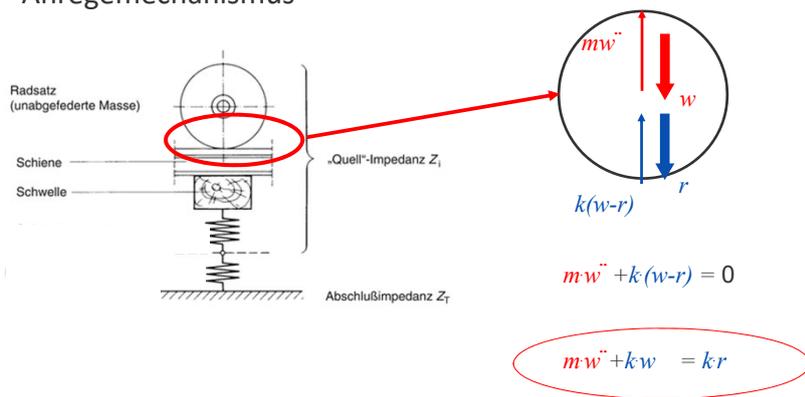


Entkoppelte Betrachtung

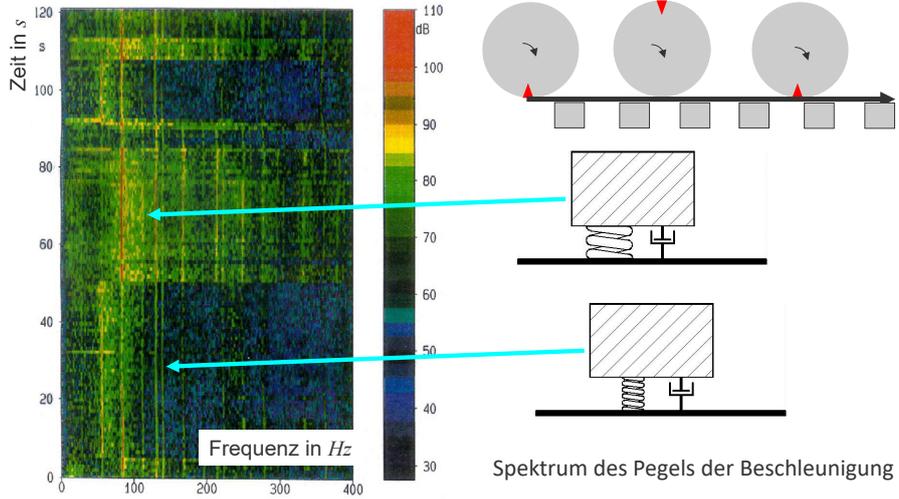
Anregemechanismus



Anregemechanismus

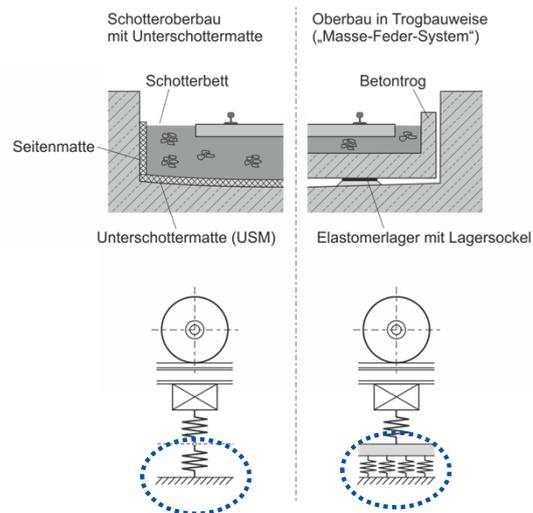


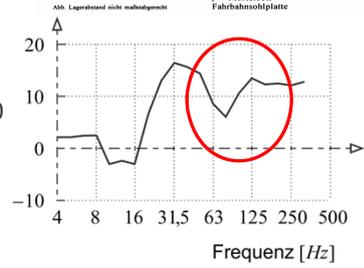
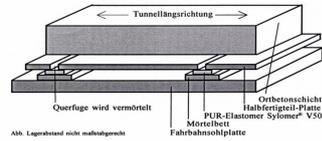
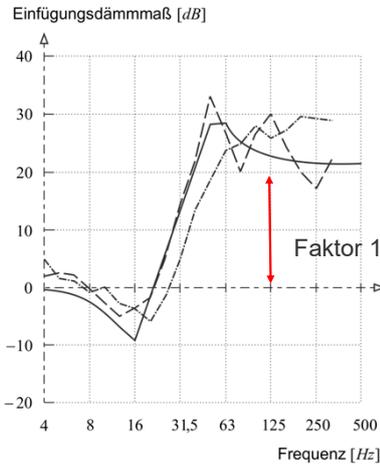
Anregung aus Rauigkeit/Unrundheit und parametrische Anregung



Quelle: Müller-BBM

Maßnahmen und Modelle

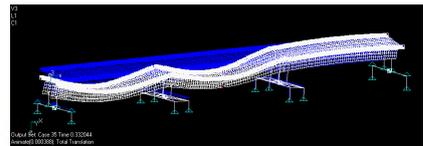
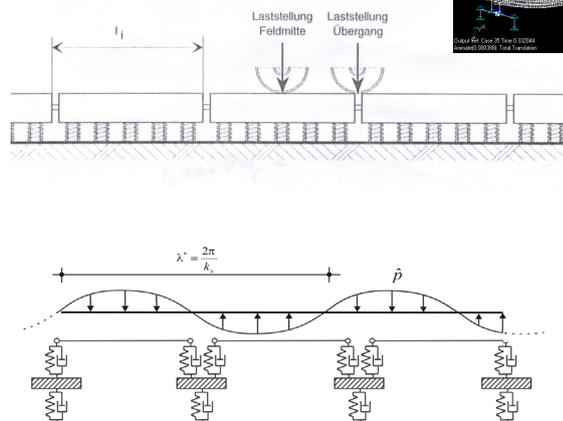




- Rechenwert
- - - gemessener Mittelwert (Fahrrichtung NORD)
- · - - gemessener Mittelwert (Fahrrichtung SÜD)

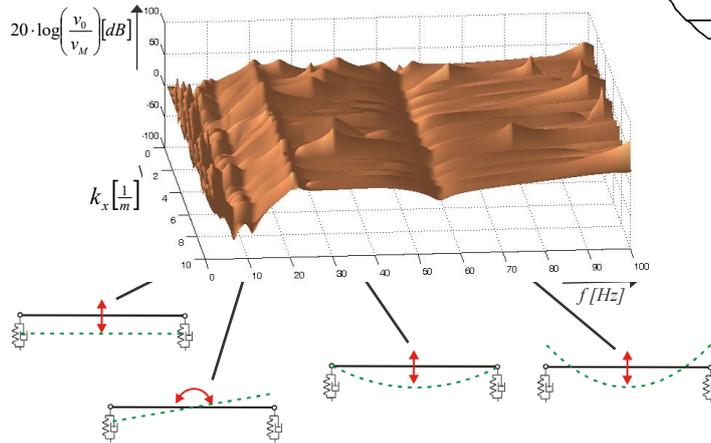
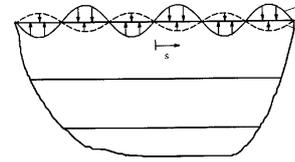
Quelle: Lutzenberger, S., et. al. Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr. In: Müller, G., Möser, M. (eds) Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer Nachschlage Wissen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. (2015)

Masse-Feder System

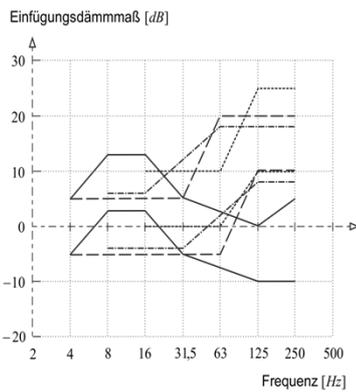


Quelle: Lutzenberger, S., Müller, G.: Theoretical assessment of vibrations in the vicinity of maglev-lines and proposals for their abatement

Einfügedämmmaß für eine Maßnahme am Fahrweg einer Magnetschwebbahn

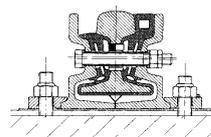
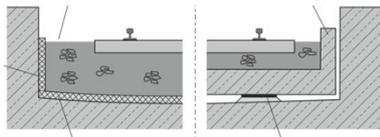


Quelle: Lutzenberger, S., Müller, G.: Theoretical assessment of vibrations in the vicinity of maglev-lines and proposals for their abatement



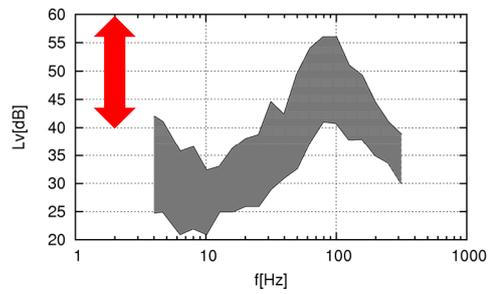
- } Bereich Bodenverbesserung
- - - } Bereich elastische Schwellenlager
- · · } Bereich Unterschottermatten
- · · } Bereich elastisch gelagerte Fahrbahnen

Quelle: Renvib II (1997), Phase 1- State of the art review, Task 5: Mitigation measures for surface rails, Müller BBM 34441/3 for ERR1 Utrecht.



Quelle: Lenz, Schwingungisolierende Rillenschienenlagerung bei Stadtbahnanlagen, Verkehr und Technik 52(6) 266-271

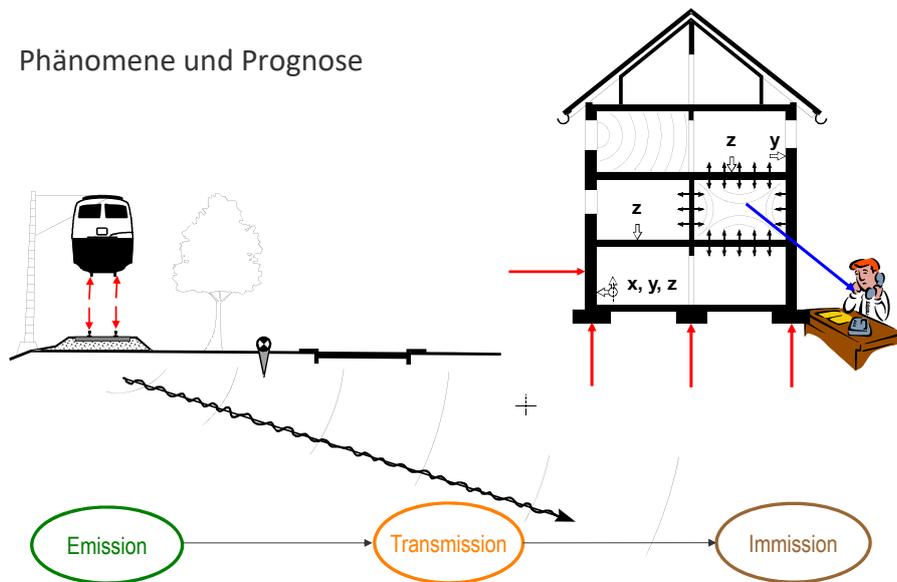
Streuung bei eisenbahninduzierten Anregungen



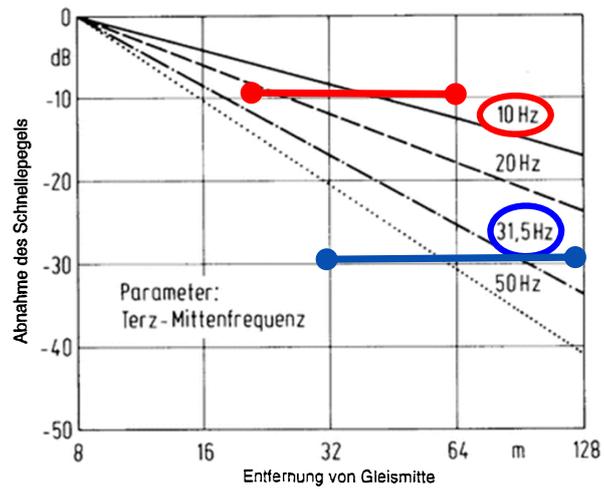
Einfluss des jeweiligen Fahrzeugs

Quelle: Müller-BBM

Phänomene und Prognose



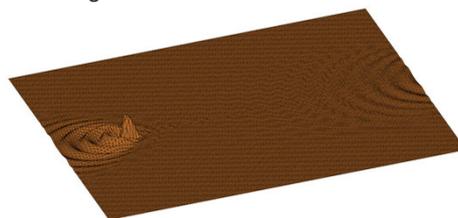
Schwingungsausbreitung im Boden



Quellen: Kurze, U.J.: Erschütterungen von Eisenbahnen. In: Fortschritte der Akustik, Tagungsband „FASE/DAGA '82“, S. 329–332. Göttingen (1982)
 ARGE „Arbeitsgemeinschaft Schwingungsausbreitung“ – Müller-BBM, IGI Niedermeyer, LGA Bayern (1980/81) Schwingungsausbreitung an Schienenverkehrswegen. Hauptstudie 1, Juli 1980 und Hauptstudie 2, Juli 1981, im Auftrag des Bundesbahn-Zentralamtes München (1980/81)

Wellenausbreitung im Boden, Prognose

- Analytische Lösungen
- Finite-Elemente Berechnung
- Rand-Elemente Berechnung
- Messungen, Erfahrungswerte



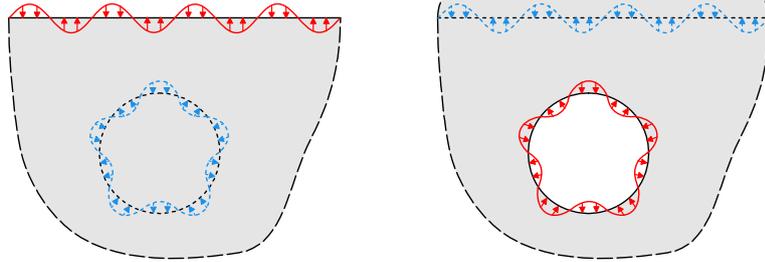
Quelle: Dissertation in Vorbereitung T. Hicks



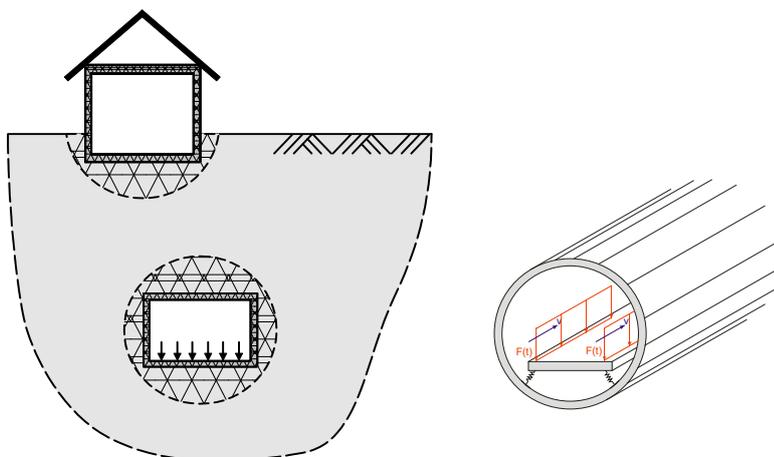
Division of Railway Engineering, Department of Civil Engineering, TUM

Wellenausbreitung im Boden, Prognose

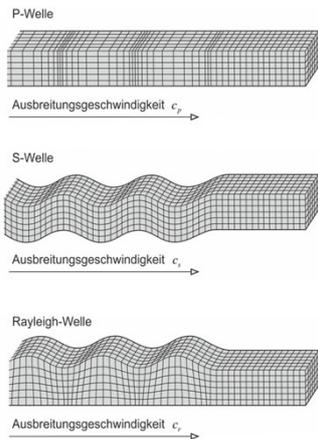
- Analytische/halbanalytische Lösungen



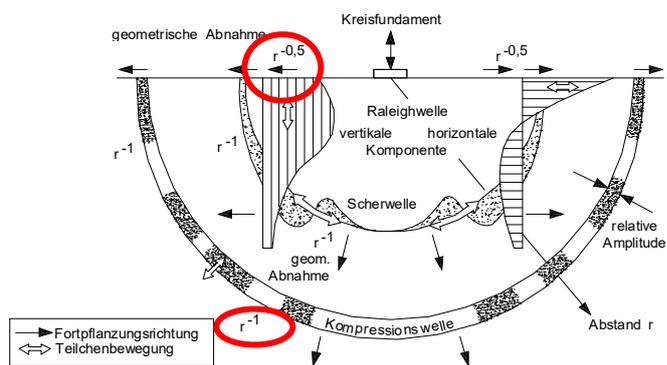
Wellenausbreitung im Boden, Prognose



Wellenausbreitung im Boden, Wellenmix aus P-, S- und Oberflächenwellen

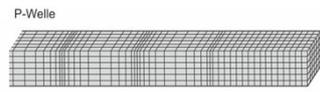


Wellenausbreitung im Boden „Wellenmix“

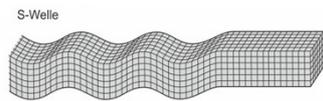


Quelle: Haupt, W. Hrsg.: Bodendynamik. Grundlagen und Anwendung. Vieweg, Braunschweig (1986)

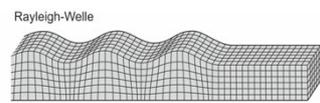
Wellenausbreitung im Boden, Wellenmix aus P-, S- und Oberflächenwellen



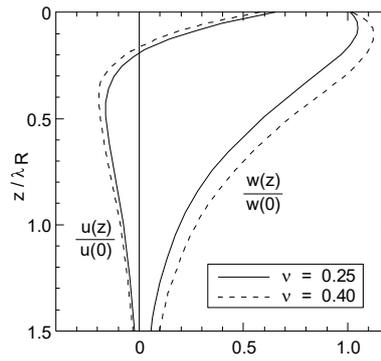
Ausbreitungsgeschwindigkeit c_p



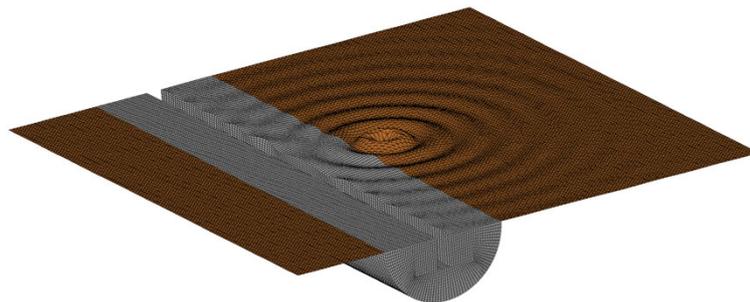
Ausbreitungsgeschwindigkeit c_s



Ausbreitungsgeschwindigkeit c_r



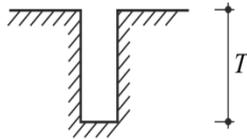
Halbraum mit Schlitz – 2.5D



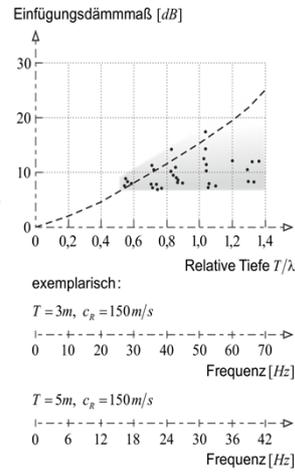
Quelle: Dissertation in Vorbereitung T. Hicks

Deformation (02.05.2017) Displacement (real) of Time step 0.088148

Wellenausbreitung im Boden, Maßnahmen

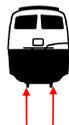
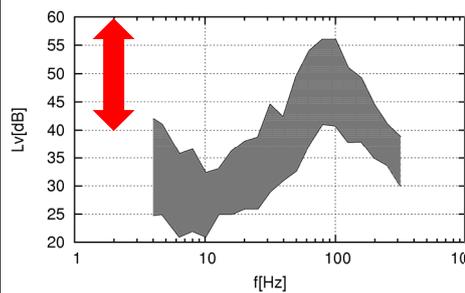


-- Dolling
 • Messergebnis

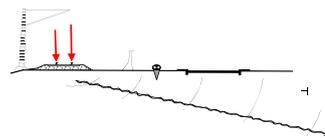
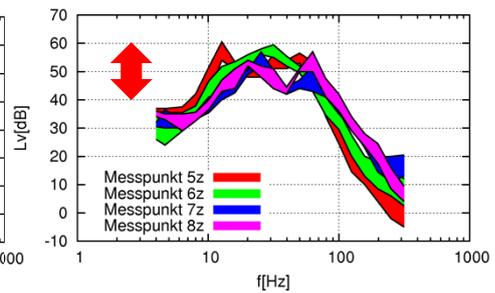


Quelle: Massarsch, K. R.: „Maßnahmen zur passiven Isolierung Baugrunderschütterungen“, Wave (1994), Berg-Verlag Bochum

Streuung bezüglich des Orts



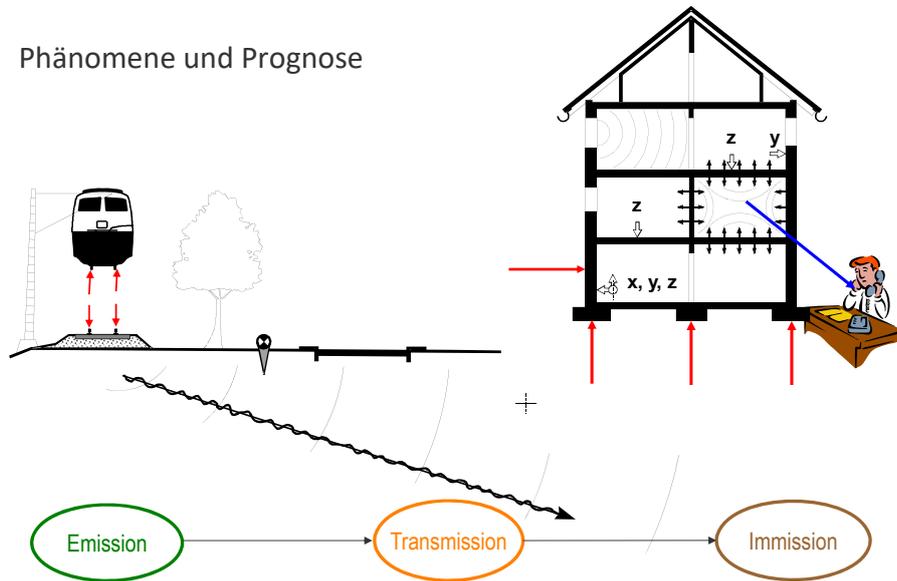
Einfluss des jeweiligen Fahrzeugs



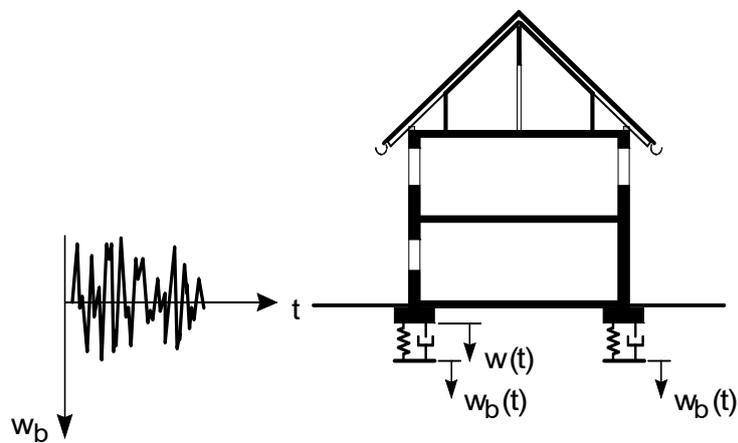
Einfluss des Übertragungswegs

Quelle: Müller-BBM

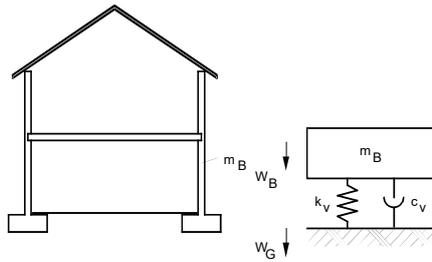
Phänomene und Prognose



Erschütterungseinleitung in Gebäude



Erschütterungseinleitung in Gebäude



$$Z_{Gründung} = \frac{k_v}{i(2\pi f)} + c_v$$

$$Z_{Gebäude} = m_G \cdot i(2\pi f)$$

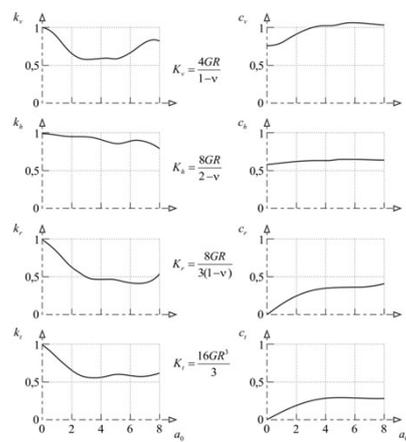
$$F = Z_{Gründung} \cdot i(2\pi f) \cdot (-w_G + w_B)$$

$$F = -Z_{Gebäude} \cdot i(2\pi f) \cdot w_B$$

$$Z_{Gründung} \cdot (-w_G + w_B) = -Z_{Gebäude} \cdot w_B$$

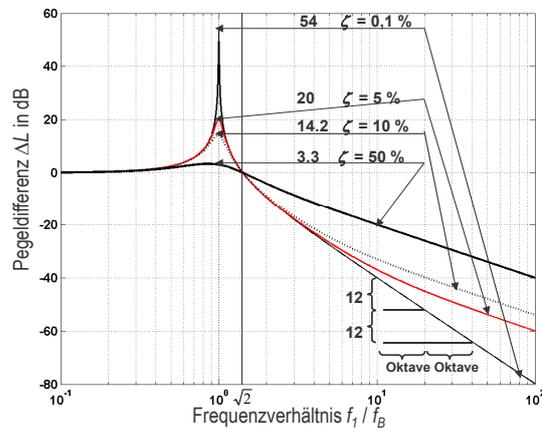
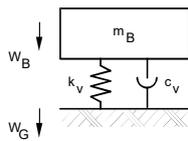
$$w_B = \frac{Z_{Gründung}}{Z_{Gründung} + Z_{Gebäude}} \cdot w_G$$

Erschütterungseinleitung, Baugrundimpedanzen

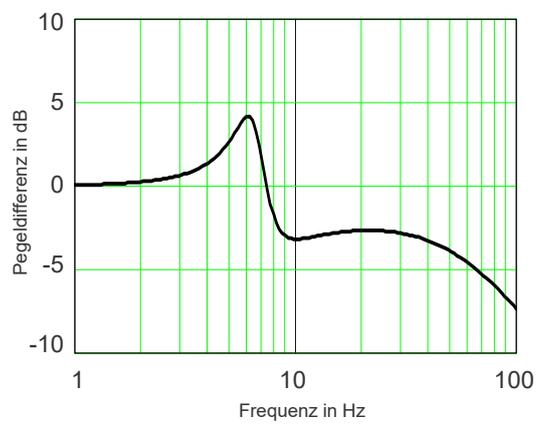
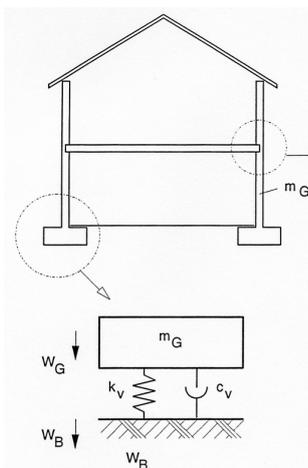


Quelle: Gazetas, G. Foundation Vibrations. In: Fang, H.Y. (eds) Foundation Engineering Handbook. Springer, Boston, MA. (1991)

Erschütterungseinleitung in Gebäude

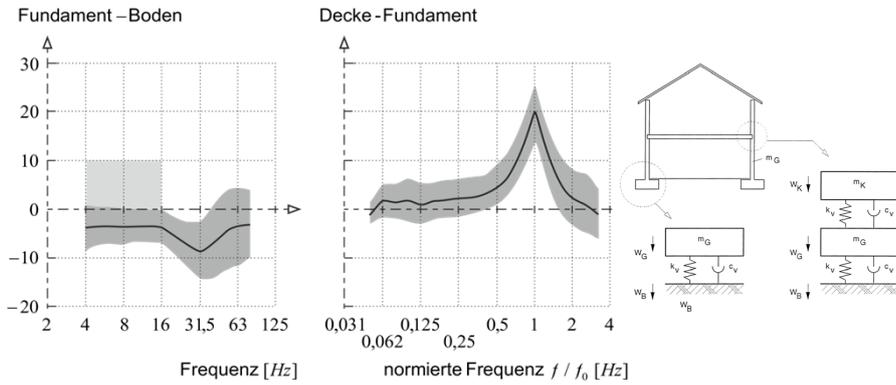


Erschütterungseinleitung Einfluss der Impedanz an der Ankopplung



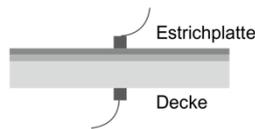
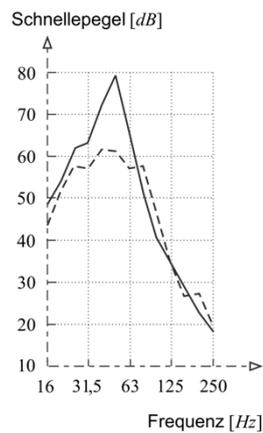
Erschütterungseinleitung Einfluss der Impedanz an der Ankopplung

Terz - Schnellepegeldifferenz [dB]



Quelle: Lutzenberger, S., et. al. Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr. In: Müller, G., Möser, M. (eds) Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer Nachschlage Wissen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, (2015)

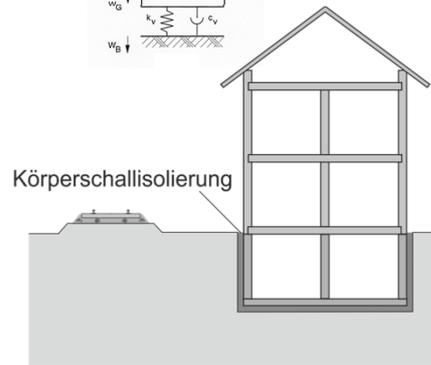
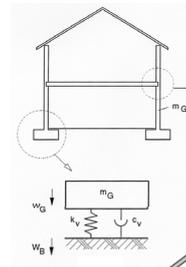
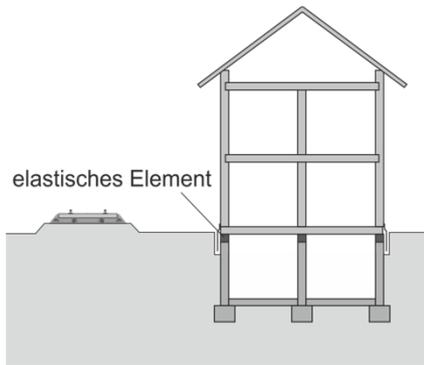
Einfluss von Einbauten



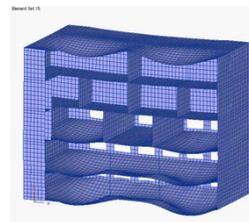
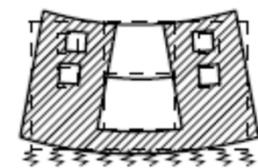
- Messpunkt 1:
Estrichplatte, $KB = 0,49$
- Messpunkt 2:
Unter der Decke, $KB = 0,1$

Quelle: Müller-BBM

Erschütterungseinleitung, Maßnahmen

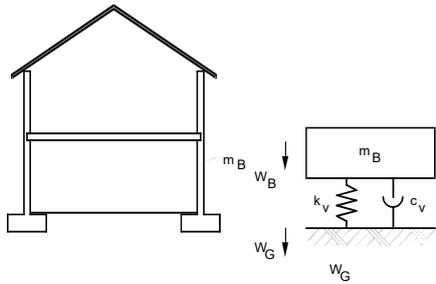


Erschütterungseinleitung, Maßnahmen



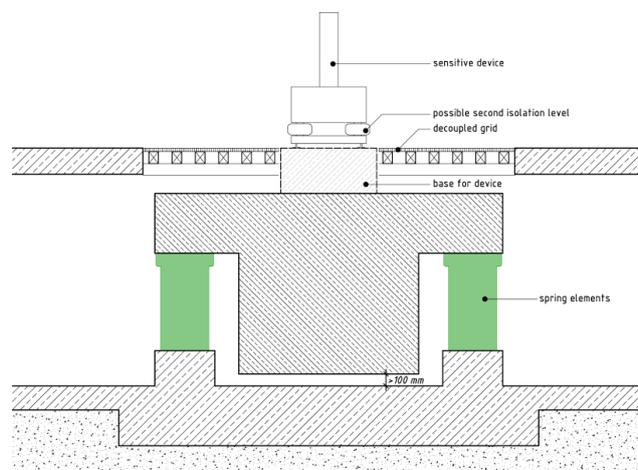
Quelle: VDI 2038 Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen - Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik, Blatt 2: Schwingungen und Erschütterungen - Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung (2013)

Erschütterungseinleitung, elastische Lagerung

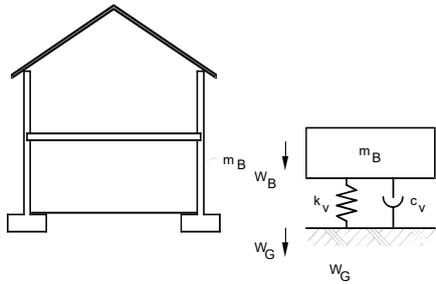


$$w_B = \frac{Z_{Gründung}}{Z_{Gründung} + Z_{Gebäude}} \cdot w_G$$

Erschütterungseinleitung, elastische Lagerung

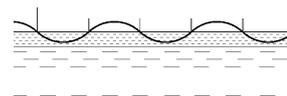
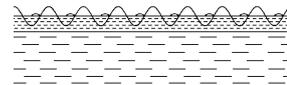


Erschütterungseinleitung, Erhöhung der Steifigkeit



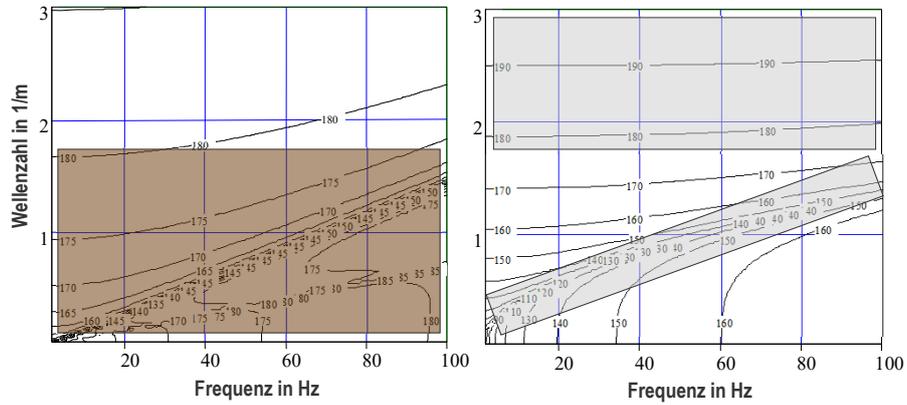
$$w_B = \frac{Z_{\text{Gründung}}}{Z_{\text{Gründung}} + Z_{\text{Gebäude}}} \cdot w_G$$

Beispiel, Systemversteifung



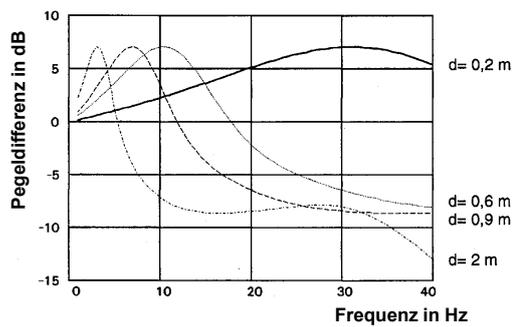
Quelle: Müller-BBM

Beispiel, Wellenimpedanzen Boden/Platte



Quelle: Müller-BBM

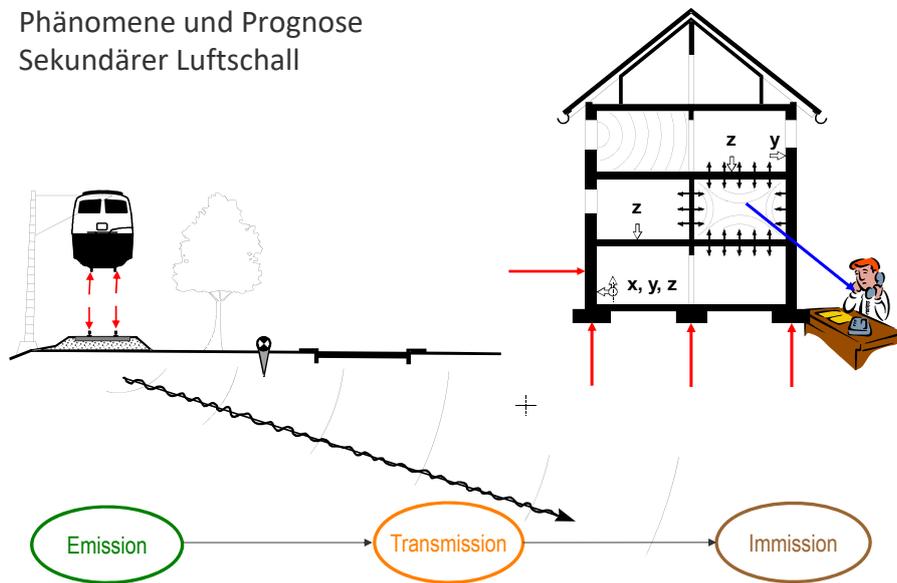
Beispiel, Systemversteifung



Rechnerische Pegeldifferenz infolge einer aufliegenden Stahlbeton-Bodenplatte ($G = 150 \text{ MN/m}^2$)

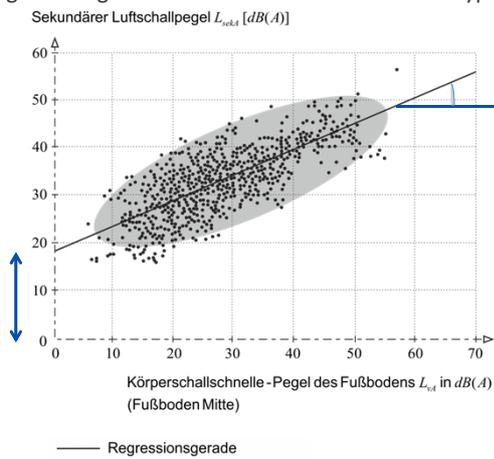
Quelle: Müller-BBM

Phänomene und Prognose Sekundärer Luftschall



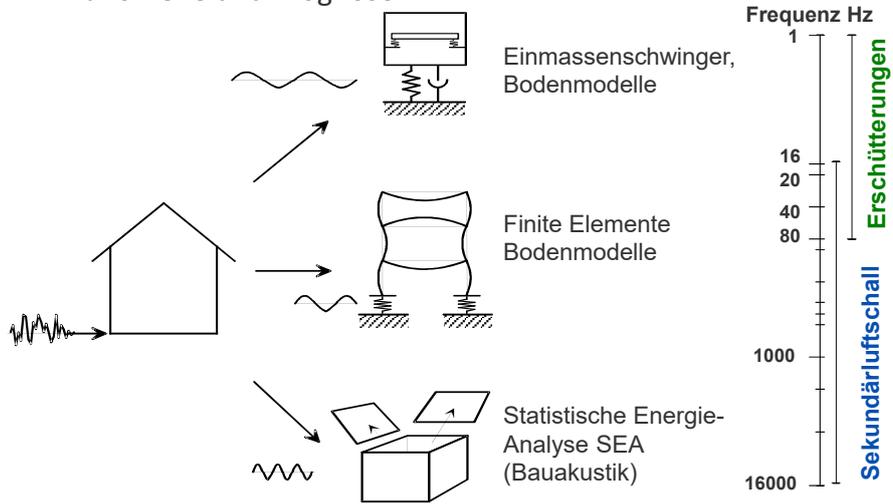
Sekundärer Luftschall – Prognose über Einzahlwerte für definierte Anregungen

Regressionsgeraden für unterschiedliche Deckentypen und Zuggattungen

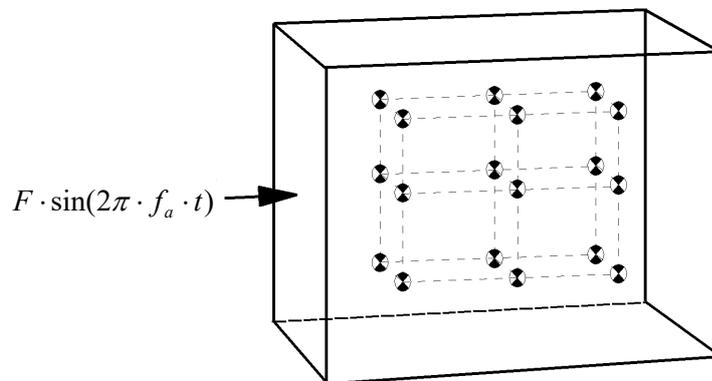


Quelle: Said, A.; Grütz, H.-P.; Garburg, R.: Ermittlung des sekundären Luftschall aus dem Schienenverkehr, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 53 (2006, Seiten 12 – 18)

Phänomene und Prognose

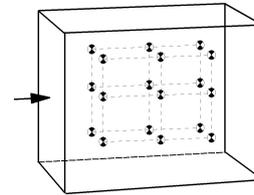
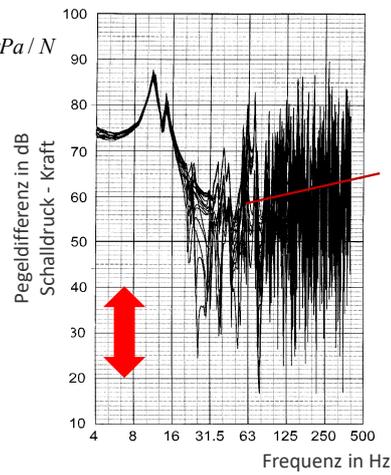


Strukturen mit hoher modaler Dichte



Zugehörige Übertragungsfunktion – robuste Betrachtung

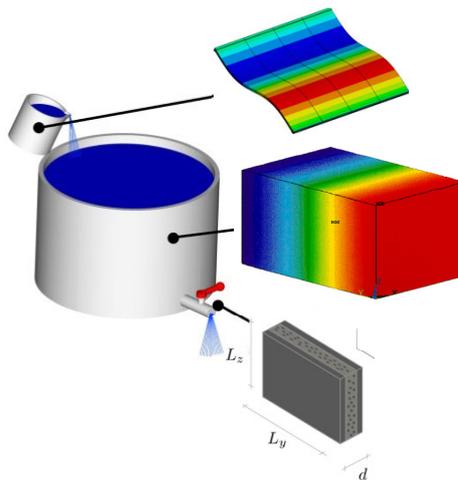
$$20 \lg \frac{|P|}{|F|} \quad \text{re } 20 \mu\text{Pa} / \text{N}$$



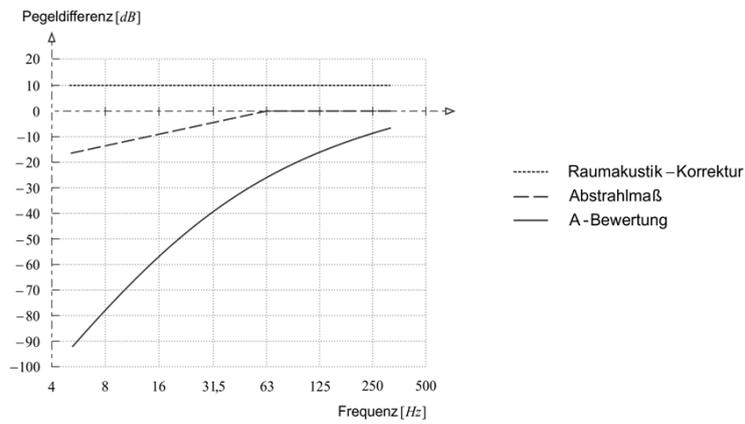
SEA

$$L_p = L_w - 10 \log \frac{\bar{A}}{4m^2} \quad [dB]$$

Statistische Energieanalyse - Gleichgewicht

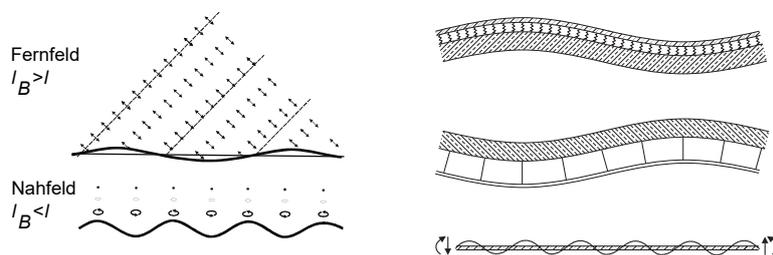


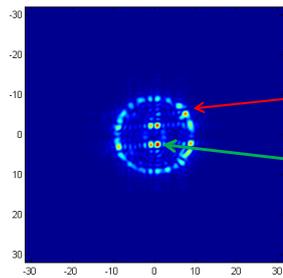
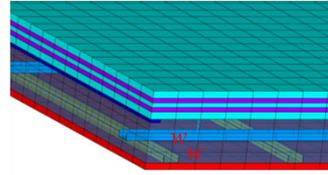
Sekundärer Luftschall – übliche Ansätze zur Abstrahlung und Raumakustik



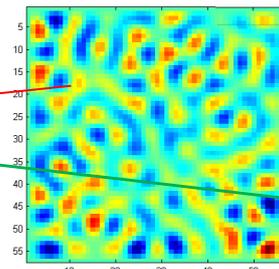
$$L_p [dB \text{ re } 2 \cdot 10^{-5} Pa] = L_v [dB \text{ re } 5 \cdot 10^{-8} m/s] + 10 \lg \left[\frac{4S}{A} \right] + 10 \lg \sigma_s$$

Abstrahlung bei Auflagen

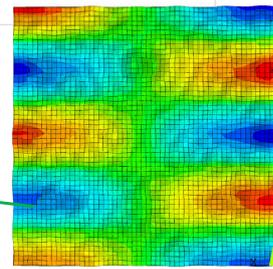




Wellenzahlspektrum

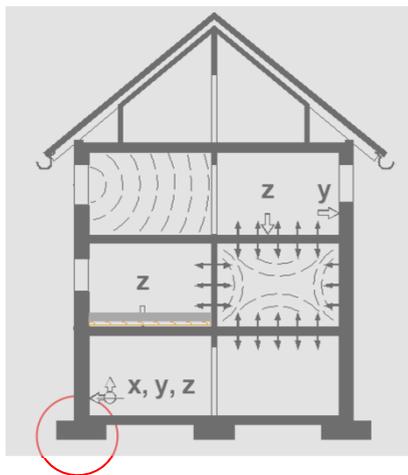


Oberflächenschnelle

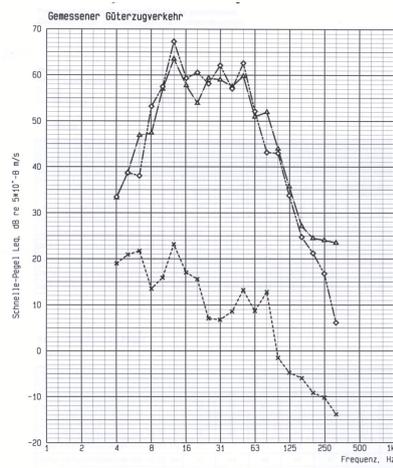


Schallfeld im Hohlraum

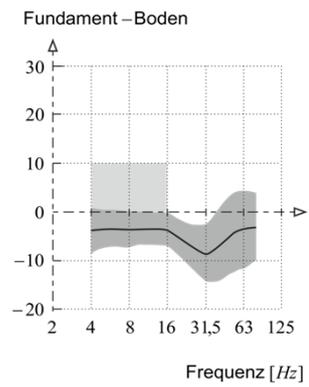
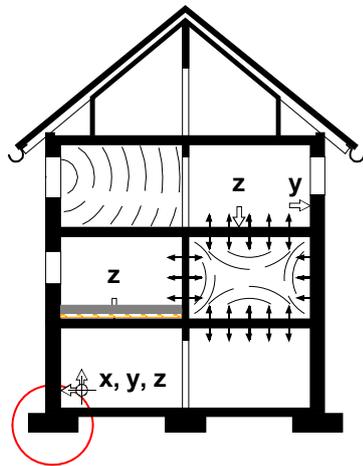
Übliche Prognose in der Baupraxis



Quelle: Müller-BBM

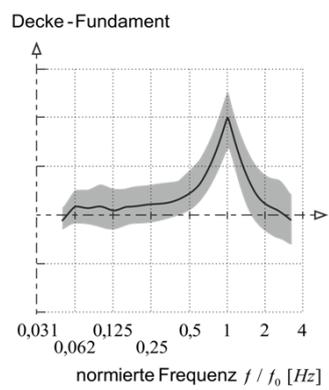
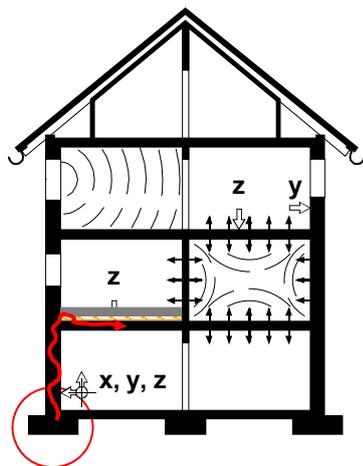


Übliche Prognose in der Baupraxis



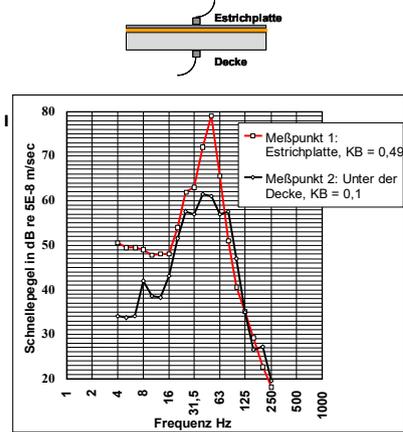
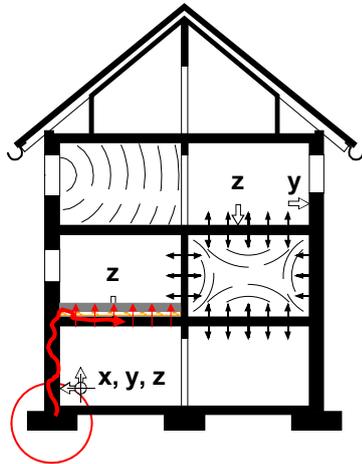
Quelle: Müller-BBM

Übliche Prognose in der Baupraxis



Quelle: Müller-BBM

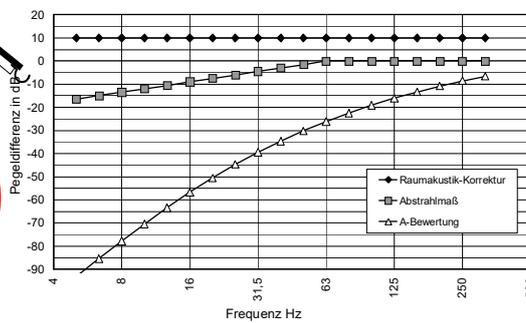
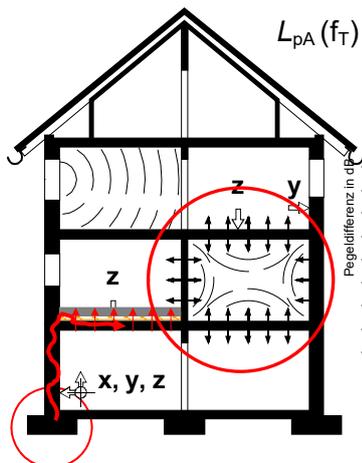
Übliche Prognose in der Baupraxis



Quelle: Müller-BBM

Übliche Prognose in der Baupraxis

$$L_{pA}(f_T) = L_{VA}(f_T) + 10 \log 4 S/A(f_T) + 10 \log \sigma(f_T)$$



Quelle: Müller-BBM

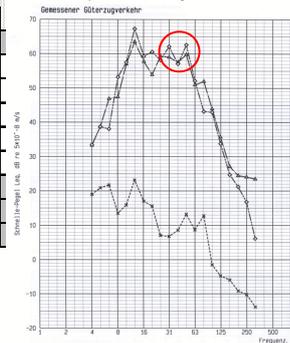
Ergebnisse der Prognose

Sekundärluftschall-Pegel in dB(A)

	Estricheigenfrequenzen [Hz]			
	ohne	40	50	63
Decke mit Eigenfrequenzen von 8-10 Hz	40	41	45	42
Decke mit Eigenfrequenzen von 10-12 Hz	40	41	45	43
Decke mit Eigenfrequenzen von 12-16 Hz	41	42	45	43
Decke mit Eigenfrequenzen von 16-20 Hz	41	42	47	44
Decke mit Eigenfrequenzen von 20-25 Hz	42	43	48	45
Decke mit Eigenfrequenzen von 25-30 Hz	46	46	49	47
Decke mit Eigenfrequenzen von 30-40 Hz	48	49	51	49
Decke mit Eigenfrequenzen von 40-50 Hz	56	56	58	56
Decke mit Eigenfrequenzen von 50-63 Hz	57	57	59	58

Maximalpegel

49 dB(A)



Quelle: Müller-BBM

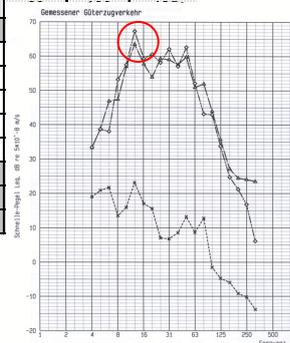
Ergebnisse der Prognose

KB-Werte

	Estricheigenfrequenzen [Hz]			
	ohne	40	50	63
Decke mit Eigenfrequenzen von 8-10 Hz	0,26	0,26	0,27	0,26
Decke mit Eigenfrequenzen von 10-12 Hz	0,63	0,63	0,64	0,63
Decke mit Eigenfrequenzen von 12-16 Hz	0,65	0,66	0,66	0,65
Decke mit Eigenfrequenzen von 16-20 Hz	0,41	0,41	0,42	0,41
Decke mit Eigenfrequenzen von 20-25 Hz	0,40	0,40	0,41	0,40
Decke mit Eigenfrequenzen von 25-30 Hz	0,44	0,45	0,46	0,44
Decke mit Eigenfrequenzen von 30-40 Hz	0,43	0,45	0,45	0,43
Decke mit Eigenfrequenzen von 40-50 Hz	0,44	0,47	0,52	0,44
Decke mit Eigenfrequenzen von 50-63 Hz	0,41	0,42	0,50	0,42

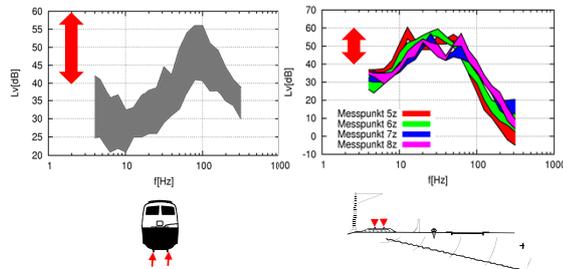
Maximalwert

0,66



Quelle: Müller-BBM

Einwirkung vs. Widerstand bei Gebrauchstauglichkeitsbetrachtungen

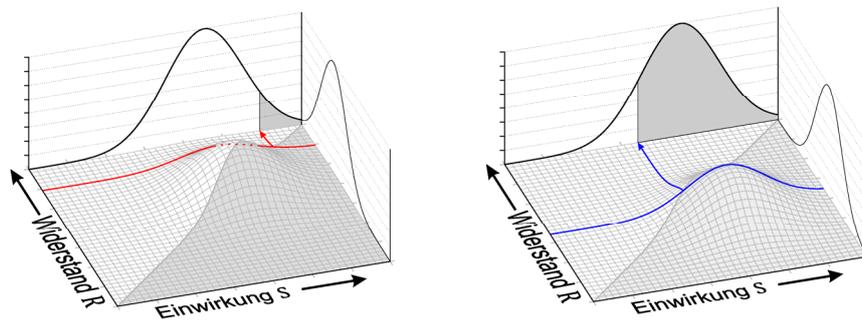


Emission

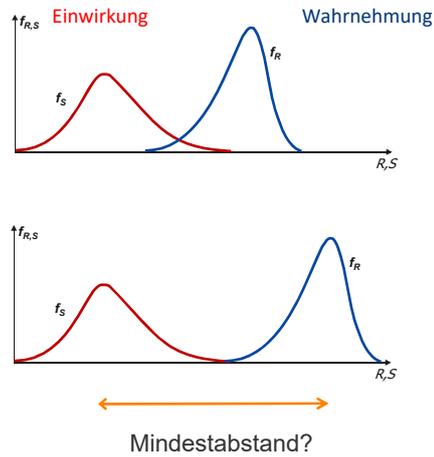
Transmission

Immission

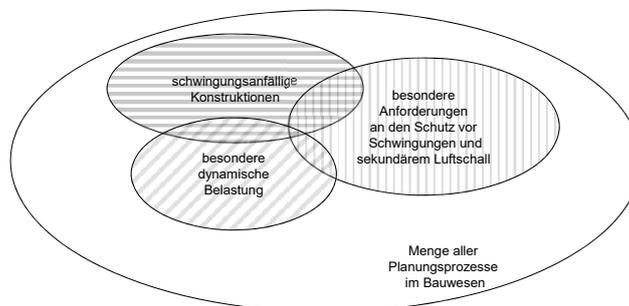
Einwirkung vs. Widerstand bei Gebrauchstauglichkeitsbetrachtungen



Einwirkung vs. Widerstand bei Gebrauchstauglichkeitsbetrachtungen

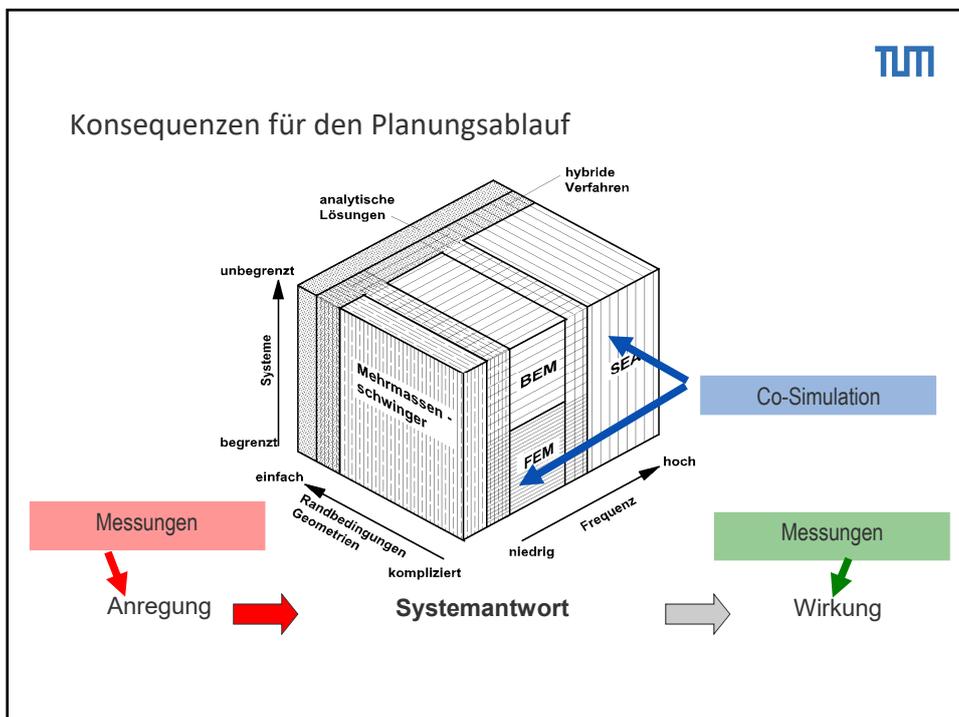
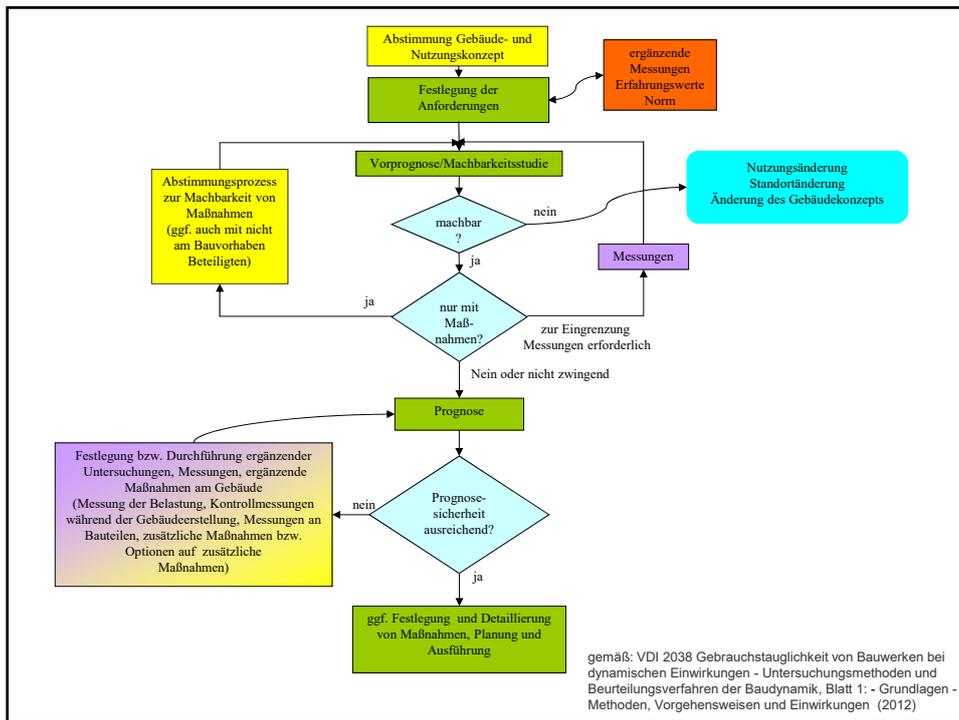


Wann ist eine bauldynamische Betrachtung erforderlich?



Quelle: VDI 2038 Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen - Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik, Blatt 1: - Grundlagen - Methoden, Vorgehensweisen und Einwirkungen
Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung (2012)

Gerhard Müller | Seminar Erschütterungsschutz, Frankfurt, 27.02.2024



Zusammenfassung

- Verständnis für den Anregemechanismus
- Abstraktion analytischer Lösungen einbeziehen
- Der Aufgabenstellung angepasste Modellbildung
- Ergänzende Messungen zur Beschreibung der Anregung/Übertragung/Wirkung
- Prognoseunschärfen berücksichtigen