

Praktikable Methoden zur Berechnung der Filterwirkung steifer Bodenplatten und biege- und schubsteifer Gebäude

Dr.-Ing H. Molzberger, imb-dynamik GmbH Herrsching
Co-Autor Dr.-Ing. N. Breitsamter, imb-dynamik GmbH

Kurzfassung

imb-dynamik beschreitet seit 25 Jahren einen Sonderweg der baodynamischen Gebäudemodellierung für Erschütterungsprognosen. Das Gebäudemodell iSEG basiert auf analytischen Lösungen im Gegensatz zur weitverbreiteten numerischen Simulation mit Finiten Elementen.

Das ursprünglich als Vertikalmodell konzipierte Modell wurde im Rahmen einer Dissertation 2009 um die Horizontalrichtung (Wellenlaufrichtung) erweitert.

Die Bodenbauwerkinteraktion lässt sich in einen Anteil der Vertikaldynamik und einen der Biegesteifigkeit geschuldeten „Horizontal-Anteil“ aufsplitten.

Es wird im Folgenden gezeigt, dass sich die Wirkung beider Anteile separat berechnen lässt. Damit kann die Wirkung des „Biegewellenfilters“ einem spektralen Prognoseergebnis in guter Näherung einfach aufmultipliziert werden.

Diese Separationsmöglichkeit vereinfacht die Nutzung des Gebäudemodells und verbessert die Möglichkeit, schnelle Parameterstudien durchzuführen, immens.

Abstract

For more than 25 years imb-dynamik uses an extraordinary analytical calculation model for vibration forecasts instead of usual numerical Finite-Elements-Modelling.

The originally only vertical designed model was expanded by the horizontal direction in soil-wave-propagation in a dissertation 2009.

The Soil-Structure-Interaction can be splitted into the vertical dynamic interaction and the effects of bending stiffness in horizontal direction. It is shown in the present investigation, that the impact of both effects can be calculated separately in a good approximation.

Thus the effect of a stiff foundation plate or building-structure can simply be added to a prognosis spectrum. This possibility simplifies the handling of the calculation model and increases the possibilities of fast parameter-studies significantly.

1. Einführung

imb-dynamik beschreitet seit 25 Jahren einen Sonderweg der baulastdynamischen Gebäudemodellierung für Erschütterungsprognosen. Das Gebäudemodell iSEG basiert auf analytischen Lösungen im Gegensatz zur weitverbreiteten numerischen Simulation mit Finiten Elementen. Für die analytisch basierte Gebäudemodellierung werden die Decken nach Eigenformen entwickelt, wodurch sich eine immense Reduktion der Anzahl an Freiheitsgraden ergibt. Die Stützen und Wände werden i.A. stockwerksweise „lumped mass“ berechnet. Die Zahl der FHG reduziert sich damit insgesamt auf wenige hundert. Mit dem Modell iSEG (imb-Simulation von Erschütterungen in Gebäuden) können daher sehr schnell Parameterstudien durchgeführt werden, was aufgrund der oft sehr unscharfen Eingangsparameter ein großer Vorteil ist.

2009 wurde das ursprünglich als reines Vertikalschwingungsmodell konzipierte Modell für den Gründungsbereich im Rahmen einer Dissertation um die horizontale Raumrichtung (in Wellenlaufrichtung) erweitert. Durch diese neue Komplexität reduzierte sich der Überblick und verschlechterte sich die Handhabung und Variabilität in der Prognose.

Inhalt des vorliegenden Beitrages:

- Es wird zunächst vorgestellt, wie sich der sog. „Biegefilter“, der sich
 - durch eine steife Bodenplatte,
 - eine in Horizontalrichtung steife Gebäudebauweise
 - oder steife Fassadenscheibenseparat berechnen lässt. Es werden die Abweichungen vom Gesamtmodell für verschiedene (extreme) Parametersätze untersucht und bewertet.
- Weiterhin werden die theoretischen Grundlagen zum Einbezug dieser Längssteifigkeiten bzgl. Biege- und Schubnachgiebigkeit sowie die Überführung dieser in eine gemeinsame, wellenzahlabhängige Steifigkeit gegeben.
- Zuletzt wird ein neuartiger Ansatz für die Berechnung des Biegefilters der Bodenplatte angerissen und mit Messwerten und mit theoretischen Betrachtungen hinterlegt.

Dieser Ansatz widerspricht den unserer Kenntnis nach momentan gängigen Untersuchungsverfahren (inkl. der zuvor erläuterten Vorgehensweise).

2. Überblick über die Thematik aus praktischer Sicht

Die Boden-Bauwerksinteraktion kann vereinfachend als ein Faktor oder etwas differenzierter als frequenzabhängiger Faktor verstanden werden, um welchen sich Schwingungen vom „Messwert auf der grünen Wiese“ bis auf das Fundament des fertiggestellten Gebäudes verringern.

Die Abnahme gründet sich u.E. auf folgende Einflüsse:

- A) Aushub der Baugrube, Beugung der Wellen von der Oberfläche in die Tiefe, von dort aus wiederum in die Waagrechte (Baugrubensohle) inkl. der beteiligten Schichteffekte eines i.A. nicht homogenen Baugrundes.
- B) Biegesteifigkeit eines (langgestreckten) Gebäudes, das sich ähnlich einem (langen) Schiff in Wellen der Wellenbewegung aufgrund seiner Steifigkeit widersetzt.
- C) „Klassische“ vertikale Bodenbauwerksinteraktion: Der in vertikaler Hauptrichtung anregende Bodenwiderstand steht gegen die Widerstände des Gebäudes (v.a. Massen inkl. Resonanzen und „Antiresonanzen“, d.h. Peaks und Senken im Widerstandsfrequenzgang).
- D) Reflexion beim Systemübergang Boden / Boden inkl. Bodenplatte, weiterhin Veränderung des längswellenleitenden Mediums, das nach der gleiszugewandten¹ Fassade aus Boden inkl. Bodenplatte besteht.

Die bodenmechanischen Einflüsse A werden am sinnvollsten messtechnisch quantifiziert. Berechnungen sind zwar möglich und müssen ggf. vorab durchgeführt werden, die Unsicherheit ist jedoch schon aufgrund der unbekanntenen Eingangswerte („statisches“ Bodengutachten, mangelnde Berechnungsmöglichkeiten) groß.

Die Thematik B (Biegesteifigkeit) wird auf den folgenden Seiten behandelt.

Die klassische vertikale Interaktion C ist im von uns verwendeten Modell iSEG bereits enthalten, siehe z.B. imb-dynamik Beitrag zur Baudynamik 2018 [7]

Die Ansätze und Ausblicke D werden am Ende des Beitrages gegeben.

3. Längssteifigkeit eines Gebäudes

Die Längssteifigkeit von Gebäuden in Wellenlaufrichtung setzt sich häufig aus mindestens zwei Anteilen zusammen:

Tabelle 1: Typische Eigenschaften der beteiligten Nachgiebigkeiten

	Bodenplatte	Gebäude (Wände und Fassaden)
Biegesteifigkeit	Gering bei langen Wellenlängen	Hoch ; Wände und Decken bilden Profile mit Steg und Flansch.
Schubsteifigkeit	Hoch bei dickeren Flachgründungen	Gering aufgrund dünnwandiger Querschnitte, Türdurchbrüche, Öffnungen

Die typischen Eigenschaften von Bodenplatte und Gebäude verhalten sich also „über Kreuz“.

¹ Zuanregung als häufige Anregungsquelle angesetzt

Gedankenansätze zur Verschaltung der Biege- und Schubsteifigkeiten:

- Es addieren sich prinzipiell die Einzelsteifigkeiten von Bodenplatte und Gebäude
- Die Bodenplatte ist i.A. in der Wirkung limitiert durch geringe Biegesteifigkeit
- Das Gebäude (Wände, Fassaden) ist i.A. limitiert durch geringe Schubsteifigkeit
- Die limitierenden Steifigkeiten gleichen sich nicht wechselseitig aus. Bestimmend für die Wirkung sind je Bauteil die limitierenden Steifigkeiten.

Die Steifigkeiten sind innerhalb jedes Bauteils ähnlich einer Federreihenschaltung mit serieller Verschaltung.

Die wellenförmigen Verformungsfiguren von Biege- und Schubverformung ähneln sich optisch, obwohl sich die Differentialgleichungen unterscheiden (4. Ordnung / 2. Ordnung). Für jede Frequenz ergibt sich über den anregenden Boden eine bestimmte Wellenlänge (Abschnitt 6), beschrieben durch eine Wellenzahl.

Für jede Wellenzahl wird über das Gleichsetzen des Verformungsstiches (Maximalamplitude) eine Ersatzbiegesteifigkeit EI^* als Ersatz für die Schubsteifigkeit GA ermittelt. Dies gilt für alle betrachteten Bauteile. Hier z.B. die Bodenplatte und Wandscheiben im Gebäude (inkl. der beteiligten Decken):

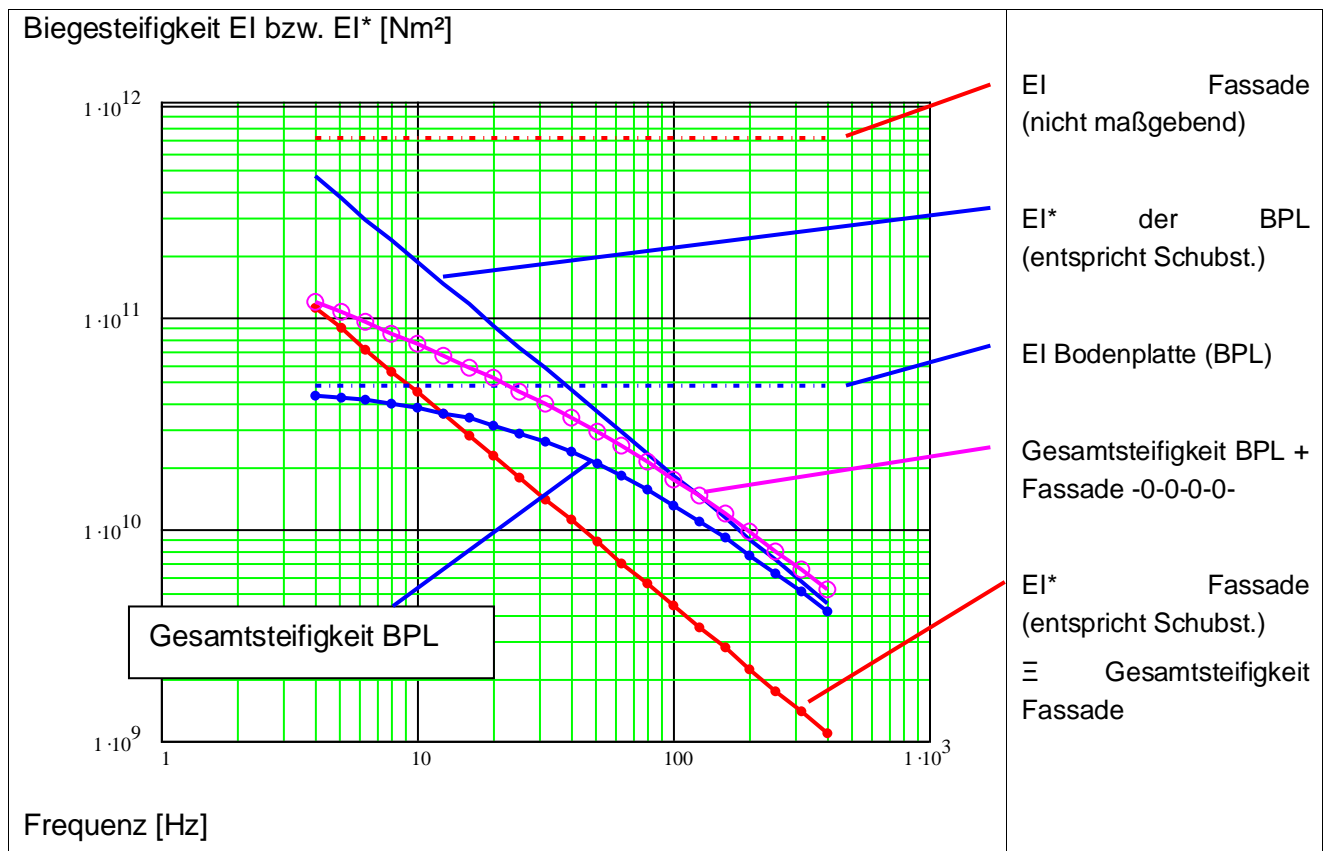


Bild 1: exempl. frequenzabhängige Steifigkeitsverläufe Bodenplatte (BPL) und Fassade

Ermittlung der Ersatzbiegesteifigkeit $EI_{ers} = EI^*$:

Gl. (1)
$$EI_{ers_{itz}} := \frac{5}{384} \cdot 12 \cdot GA \cdot L_{itz}$$

L = Halbwellenlänge ($N/2$)

GA = zu überführende Schubsteifigkeit

itz = Frequenzindex

Gl. (2)
$$EI_{ges_{itz}} := \frac{1}{\frac{1}{EI} + \frac{1}{EI_{ers}}}$$

Durch serielle Verschaltung (2) wird jeweils die Bauteil-Gesamtsteifigkeit EI_{ges} von Bodenplatte und z.B. Fassade gewonnen. Beide addieren sich zu einem Gesamtwiderstand, der dem anregenden Boden entgegenwirkt.

4. Bodenplattenfilter: Gebäudeseitige Schnittstelle

Ziel war die separate Berechnung eines Bodenfilters als „additiver Baustein“:

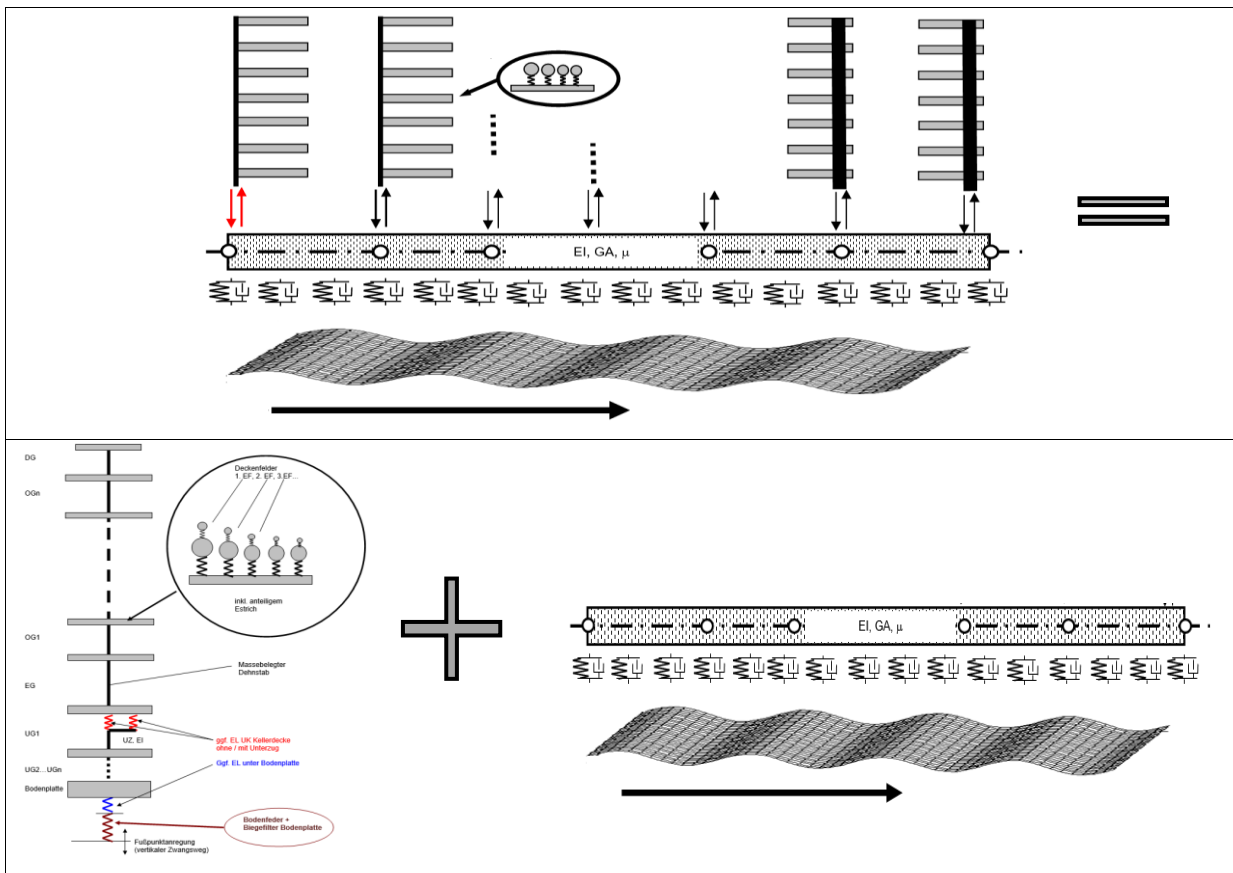


Bild 2: Gesamtmodell (oben) als Addition zweier Einzelmodelle vertikal + horizontal (unten)

Forderung: Der Bodenplattenfilter soll einfach auf ein spektrales Prognoseergebnis des Vertikalmodells aufaddiert (in dB) oder multipliziert (in skalaren Größen) werden.

Problematik / Befürchtungen:

- Sowohl das Prognosemodell (Vertikalmodell), als auch die ausgekoppelte Bodenplatte enthalten theoretisch die Bodenplattenmasse. Es war zu klären, in welchem Modell die Masse enthalten ist, damit sie nicht doppelt gerechnet wird. Statisch soll das Gewicht stimmen.
- Biegeeigenschwingungen der Bodenplatte werden durch sich ankoppelnde Massen des Gebäudes – z.B. eines massiven Kellers – beeinflusst und tendenziell in der Frequenz verringert.
- Diese Massenanteile sind als Trägheiten zur Biegesteifigkeit (Federcharakteristik) 180° phasenverschoben und können die Steifigkeit reduzieren, im Extremfall sich gegenseitig aufheben (= Resonanzfall)

Alle Einflüsse, die sich aus den beiden entkoppelten Modellen ergeben, die auf einer gegenseitigen Beeinflussung von Vertikal- und Horizontalmodell beruhen, können prinzipiell nicht korrekt erfasst werden und verfälschen das Ergebnis.

5. Ergebnisse

5.1 Parameterstudien

Es wurden Parameterstudien vorgenommen für folgende Fälle:

Tabelle 2: Eingabewerte der 4 verglichenen Modelle (8 Varianten)

Parameter	Wert 1	Wert 2
Elastische Lagerung (EL) ja / nein	Mit EL	Ohne EL
Gebäudelänge z.B. Riegel längs / quer	6 Felder mit je 8 m	2 Felder mit je 8 m
Bodensteifigkeit: Rayleigh- wellengeschwindigkeit	170 m/s	340 m/s

Zusätzlich lassen sich einfache Parameter variieren, z.B. die Stockwerksanzahl (für das Impedanzverhältnis Bodenplatte – Gebäude) und die Decken- und Estricheigenfrequenzen.

Da die Gründung von Stockwerksanzahl (Pressung) und Bodenverhältnissen abhängt, ist es wenig sinnvoll, unrealistische Parametersätze durchzuspielen. Durch die Wahl realistischer Eingangswerte wird die Notwendigkeit weiterer Variationen deutlich verringert.

5.2 Schnittstelle der Trennung Horizontal- und Vertikalmodell

Die Fundamentmasse spielt prinzipiell in beiden Modellen eine Rolle. Es gibt keine perfekte Entscheidung, auf welcher Seite die Masse enthalten sein sollte. Daher wurden beide Fälle programmiert, mit eindeutigem Ergebnis:

- Die Bodenplattenmasse „gehört“ in das Horizontalmodell.

Im Horizontalmodell mögliches Eigenverhalten (Biegeresonanz- und Antiresonanzstellen in $/2/$) werden so abgedeckt. Die starre – i.A. nicht resonanzwillige Fundamentmasse im Vertikalmodell

- a) spielt gegenüber der schwingenden (!) Gesamtimpedanz des Gebäudes nur eine geringe Rolle
- b) würde – da es sich um eine alleinige Trägheit handelt – besonders bei hohen Frequenzen Einfluss haben. Zu höheren Frequenzen hin löst sich jedoch das Mitwirken einer starren Fundamentmasse durch immer kürzere Wellenlängen zunehmend auf.

5.3 Berechnungsergebnisse im Frequenzraum

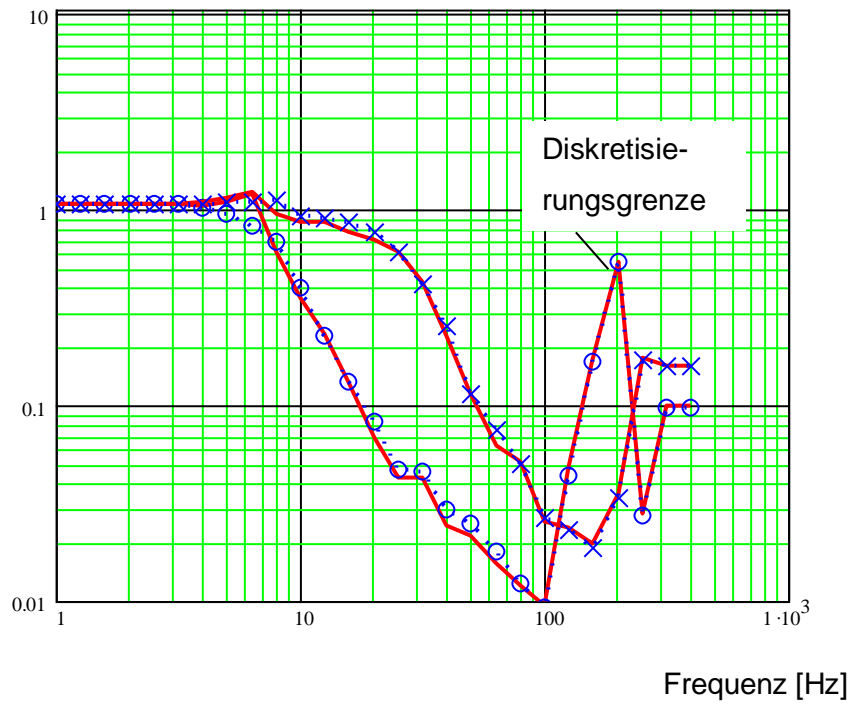
Vergleich von

- Kompletmodell mit vertikaler Boden-Bauwerks-Interaktion (= BBI) und Längsbiegesteifigkeit sowie Eigenverhalten
- Einzelmodellen, d.h. Vertikalmodell mit vertikaler BBI und Horizontalmodell als „Bodenplattenfilter“ (Längsbiegesteifigkeiten, Eigenverhalten)

für die o.g. 4 Modelle bzw. „Grobparametersätze“:

5.3.1 Langes Gebäude, ohne elast. Lagerung (EL)

Filterwirkung Gründung [-]



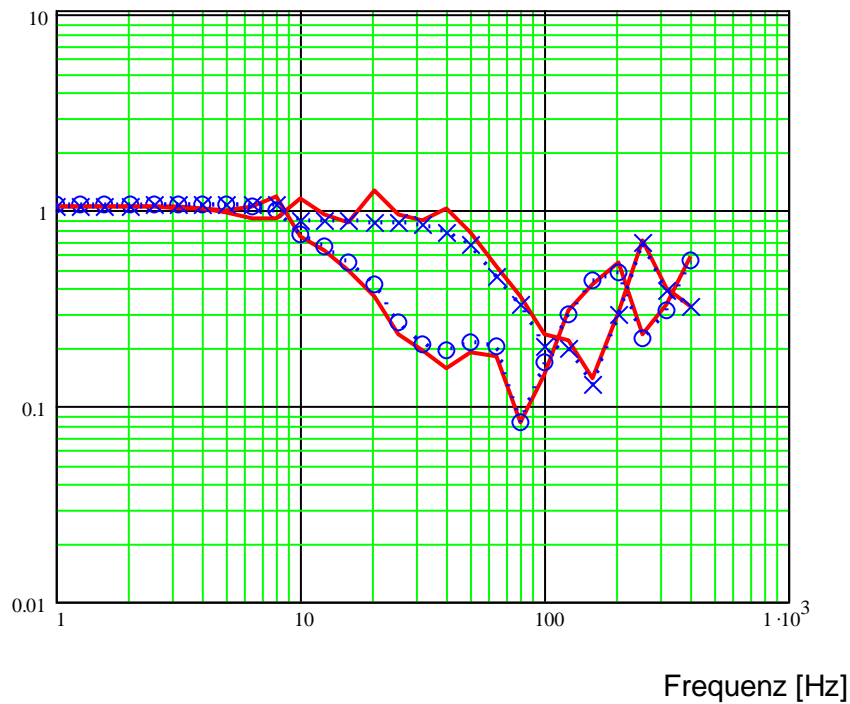
steifer Boden
 x-x-x Einzelmodelle
 ----- Gesamtmodell

weicher Boden
 o-o-o Einzelmodelle
 ----- Gesamtmodell

Abb. 3

5.3.2 Kurzes Gebäude, ohne EL

Filterwirkung Gründung [-]



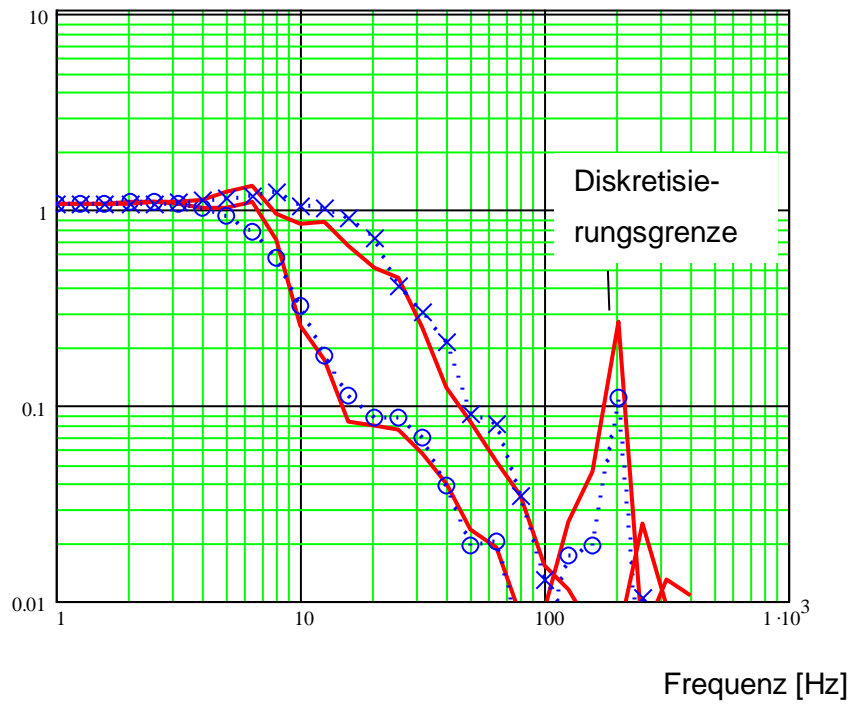
steifer Boden
 x-x-x Einzelmodelle
 ----- Gesamtmodell

weicher Boden
 o-o-o Einzelmodelle
 ----- Gesamtmodell

Abb. 4

5.3.3 Langes Gebäude, mit EL

Filterwirkung Gründung [-]



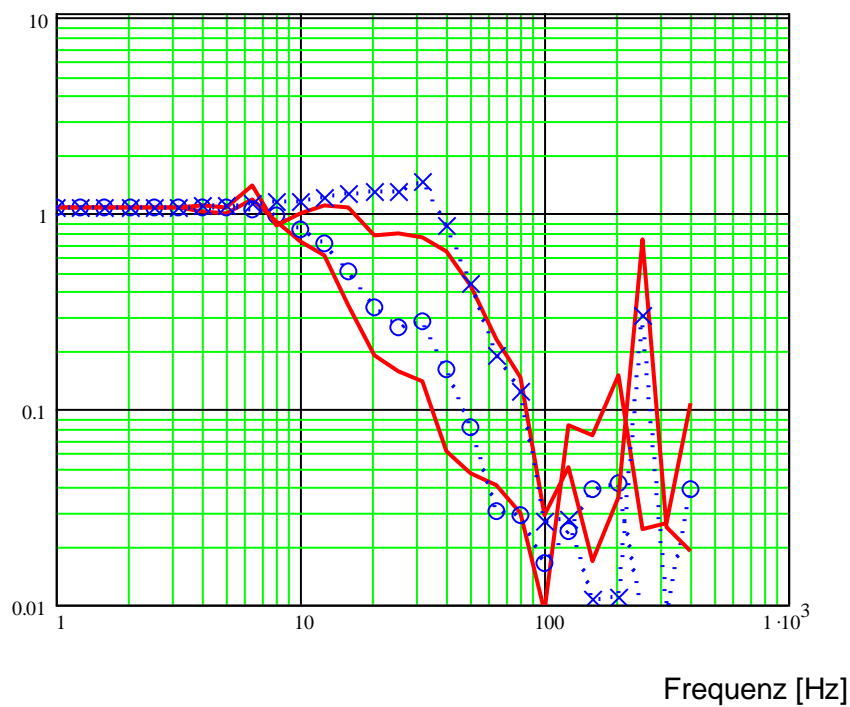
steifer Boden
 x-x-x Einzelmodelle
 ----- Gesamtmodell

weicher Boden
 o-o-o Einzelmodelle
 ----- Gesamtmodell

Abb. 5

5.3.4 Kurzes Gebäude, mit EL

Filterwirkung Gründung [-]



steifer Boden
 x-x-x Einzelmodelle
 ----- Gesamtmodell

weicher Boden
 o-o-o Einzelmodelle
 ----- Gesamtmodell

Abb. 6

5.4 Diskussion, Beurteilung

Vorweg: Generelle Unzulänglichkeiten der verwendeten Modelle, siehe /2/, heben sich bei einem Vergleich gleicher Modellmodule auf. Hier geht es um eine vergleichende Betrachtung.

Wichtig ist weiterhin der Punkt, wie die für den Vergleich herangezogene Filterwirkung errechnet wird: Aus der Erschütterungsreduktion der Stützen 2 bis n. Die Bodenplattenwirksamkeit ist an der ersten Gebäudestütze (bahnseitige Fassade) am niedrigsten und wird in den o.g. Beispielen weggelassen.

Dafür befindet sich an diesem Punkt in der Praxis zumeist eine UG Außenwand, die zu einer gewissen Ausmittelung der einfallenden Erschütterungswellen führt und deren Wirkung somit erschütterungsreduzierend ist. Im Fall einer vorgelagerten Bohrpfahlwand kann bei Baugrubenmessungen zudem oft festgestellt werden, dass das Schwingungsniveau direkt hinter der BPF-Wand und damit an eben dieser Stelle deutlich niedriger ist und die Erschütterungen erst nach einigen 10 m hinter der Wand wieder „heraufquellen“.

Diese beiden Effekte führen i.d.R. dazu, dass die bahnseitige Fassade immissionstechnisch nicht maßgebend ist und die geringere Wirkung der Bodenplattensteifigkeit durch die Position der Fassade am äußersten Plattenende vernachlässigt werden kann.

All dies ohne Allgemeingültigkeit. Die Situation ist immer individuell zu beurteilen.

Bewertung der Abweichungen infolge der Modellvereinfachung:

- Prinzipiell liefert die Berechnung mit separatem Biegefilter erstaunlich hohe Übereinstimmung mit dem Gesamtmodell.
- Größere Abweichungen ergeben sich bei separater Berechnung tendenziell
 - bei der Berechnung kürzerer Gebäude
 - bei steiferen Böden (geringer Einfluss)
 - bei Einsatz einer EL, die i.d.R. schlechter gedämpft ist, als der Boden. Eigenverhalten hat damit einen größeren Einfluss.
- Im Normalfall sind die Abweichungen vertretbar – wobei „vertretbar“ hier nicht näher definiert wird. Im Extremfall (kurzes Gebäude, EL) treten Abweichungen bis ca. Faktor 2 in einigen Frequenzen auf. Die separate Berechnung liegt jedoch immer auf sicherer Seite und berechnet den Biegefilter konservativer.

Die Bewertung erfolgt hier vor dem Hintergrund, dass Berechnungen der Boden-Bauwerks-Interaktion prinzipiell mit sehr großen Unsicherheiten behaftet sind.

6. Alternative Berechnungsmethode

6.1 Wellenlängen und Wellengeschwindigkeiten nach [7]

Es wurde eine stufenweise Näherung erarbeitet über die Berechnung mit FE-Platte, FE-Balken, Timoshenkobalken und den Übergang vom elast. homogenen Halbraum auf die nachiterierte frequenzabhängige Winklerbettung.

Letztere wird anhand der komplexen Wellenzahlen eines gebetteten Balkens unter Kraftanregung parallel zum statischen Modell vorstellungsmäßig erläutert:

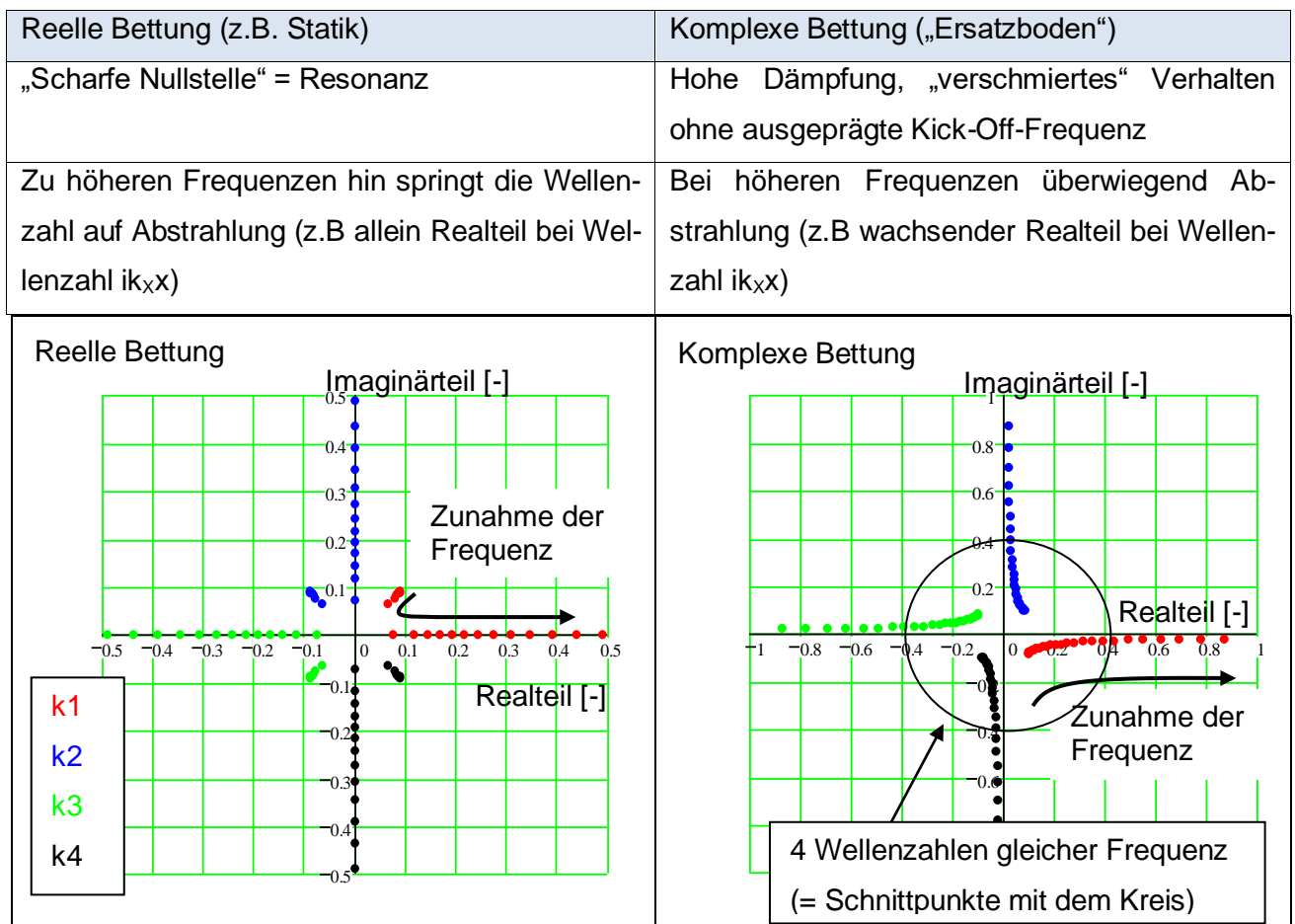


Abb 7 Erläuterung der Wellenzahlen zur Illustration der Vorgehensweise

Nach Anschauung und Sommerfeldscher Abstrahlbedingung gilt:

- Aufgrund einer unmöglichen Zunahme der Amplitude mit wachsender Entfernung kommt nur eine abklingende Lösung in Frage (verbleibend 2 Wellenzahlen mit unterschiedlicher Wellenlaufrichtung, was unerheblich für die Ermittlung der Wellenlänge ist)
- Der größere Realteil zweier beliebiger um 90° verdrehter Wellenzahlen beschreibt damit die Wellenlänge (ik_{xx} ist damit imaginär).

Mit dieser Methode lässt sich in Abhängigkeit der Frequenz die komplexe dynamische Betung und die (frequenzabhängige) Wellenlänge des kombinierten Systems Boden – Gebäude ermitteln.

Es zeigt sich dabei das folgende Verhalten des kombinierten Systems von Bodenplatte und Boden (Parameter aus Beispiel 5.3.1):

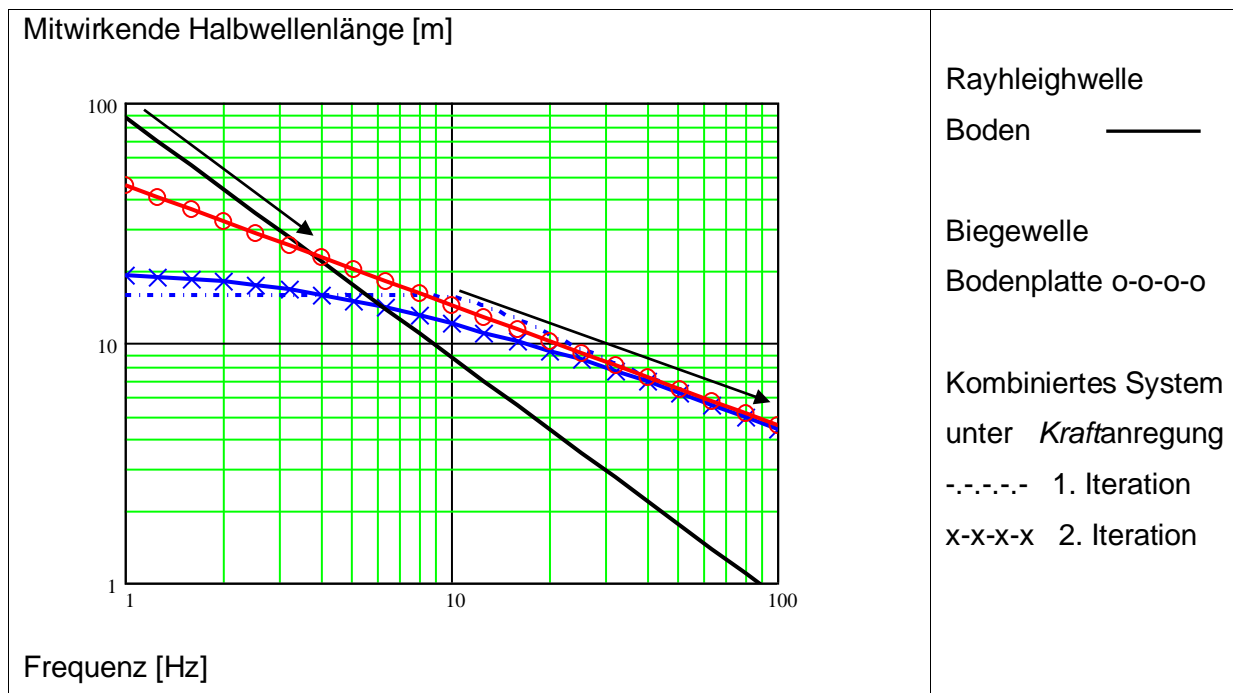


Abb.8: Wellenlängen des anregenden Bodens, der Bodenplatte, des kombinierten Systems

Von der Kraftanregung wird auf das Verhalten unter äußerer Anregung (Fußpunktanregung) geschlossen (s. Pfeile).

Deutlich festzustellen, dass die oft angesetzte Vorstellung einer Welle, die mit gleichbleibender Geschwindigkeit unter einem Gebäude (resp. Bodenplatte) hindurchläuft, zumindest ab einer bestimmten Grenzfrequenz nicht stimmen wird. Das kombinierte System aus Boden und Bodenplatte (ggf. die Längssteifigkeit des aufgehenden Gebäudes gedanklich beinhalten) ergibt für den Fall der äußeren Anregung eine eigene System-Wellengeschwindigkeit, die bei niedrigen Frequenzen der des Bodens gleicht, bei höheren Frequenzen der Wellengeschwindigkeit des kombinierten Systems, die sich immer weiter der Geschwindigkeit (und Wellenlänge) der Bodenplatte angleicht, s. Pfeile.

In der Praxis wurden von uns Erhöhungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit um bis zu Faktor 10 (!) gemessen, s. Beispiele unten.

Ergebnis in der Simulation: Die Wirksamkeit einer dicken Bodenplatte als schwingungsausmittelndes Bauteil fällt vollständig aus: Bei jeder Frequenz ergibt sich genau die Wellenlänge, bei der das Gesamtsystem die eingeleitete Energie „transportieren will“. Es kann keine kürzere Wellenlänge beteiligt sein, bei welcher die Bodenplatte einen Widerstand aktivieren würde. Die eindeutig messbare Schwingungsminderung einer dicken Bodenplatte beruht auf anderen Effekten, wie z.B. der Änderung der Wellenlänge: Eine schnellere Welle bedeutet, dass sich aus Gründen der Energieerhaltung die Amplitude der Welle reduzieren muss. Eine höhere Wellengeschwindigkeit wird durch größere Wellenlängen eine größere Bodentiefe im (theoretisch homogenen elast. Halbraum) aktivieren.

Im o.g. Beispiel „5.3.1 langes Gebäude ohne EL“ zeigt sich die aus der Wellenlängenvergrößerung resultierende Amplitudenreduktion im Vgl. zur obenstehenden Filterwirkung der Bodenplatte wie folgt:

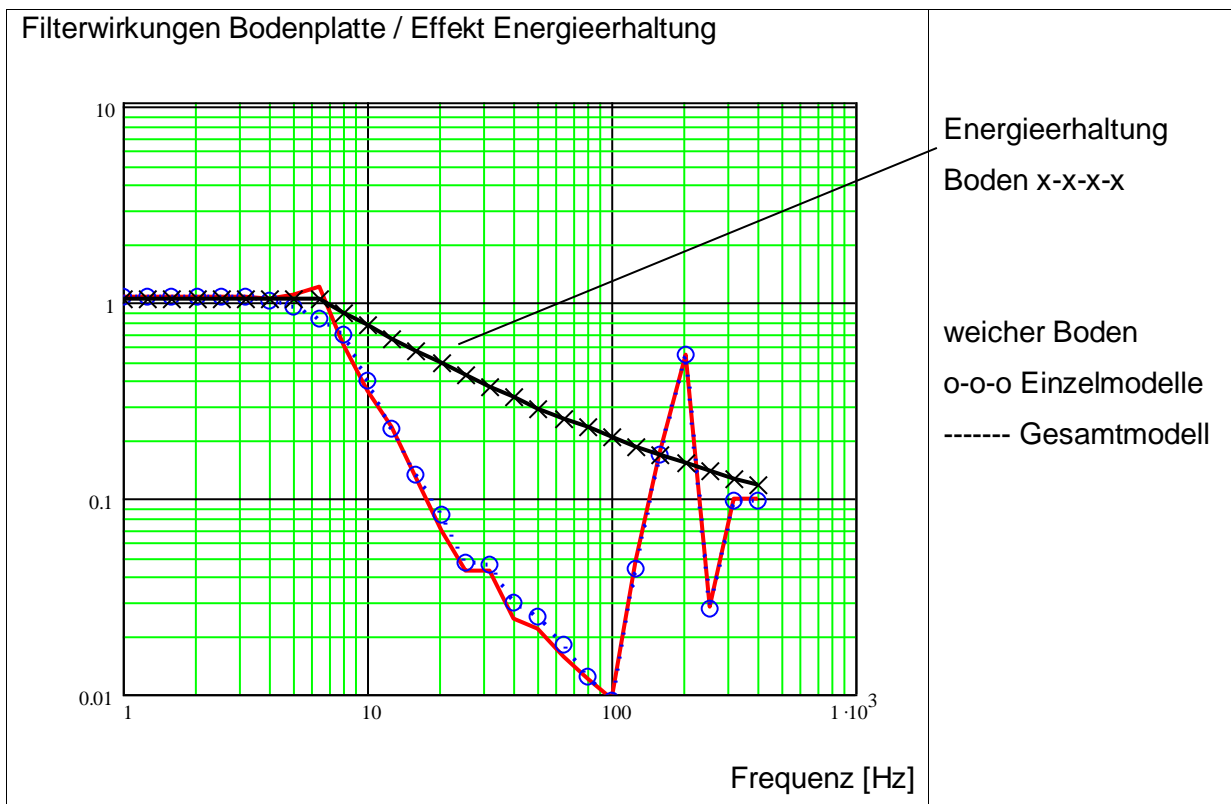


Abb 9: Vgl. der errechneten Filterwirkungen

Trotz drastischer Parameter im Beispiel (1,25 m Bodenplatte auf sehr weichem Boden) ist der Reduktionseffekt relativ gering, auch im Vgl. zum konventionellen Modell.

Weiter zu untersuchen sind daher

- Die elast. Energie der Bodenplatte selbst
- Die Reflexion bei Eintritt der Schwingungen in die Fundamentierung (Veranschaulichung in folgender Abbildung)

6.2 Reflexion

Schwingungsamplitude [Normierung auf 1 = 100%]

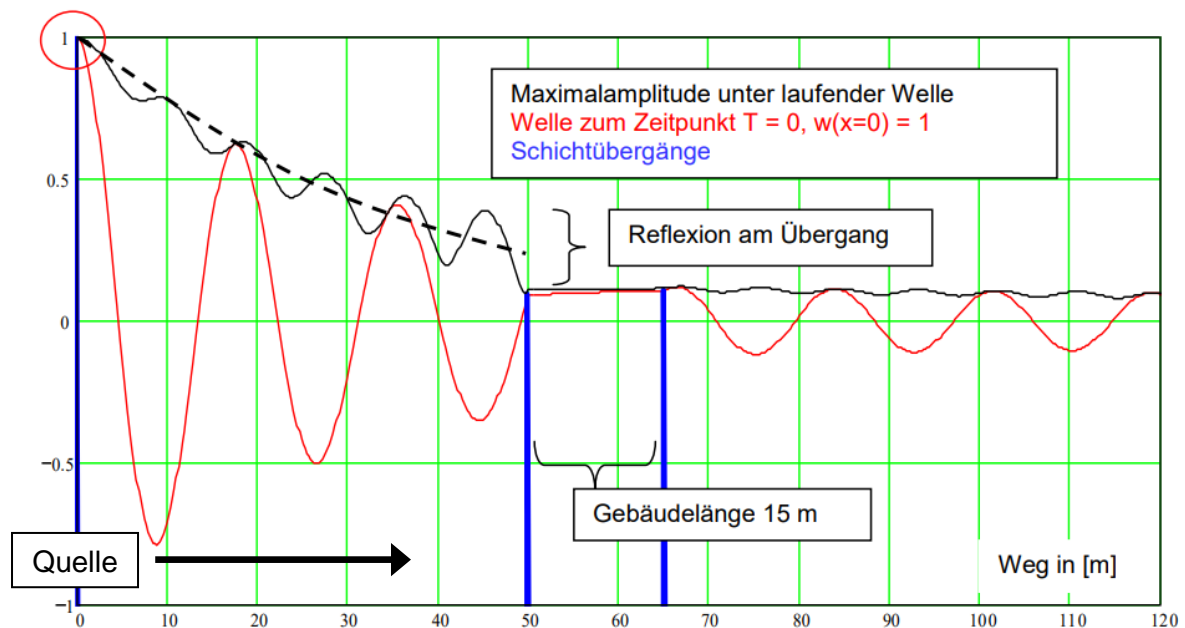


Abb. 10, exempl. Schwingungsübergang mit Amplitudenreduktion und Reflexion

Die Untersuchungen der genannten Effekte und der Versuch, sie in einfache wirkungsgleiche Formeln zu übersetzen, ist noch nicht abgeschlossen. Jedoch wurde bereits in diesem Zusammenhang die „horizontale Deckelung des elast. Halbraumes durch eine aufliegende Bodenplatte“ von analytischer Seite her untersucht:

6.3. Deckelung des elast. Halbraumes

Boden ohne / mit behinderter Horizontalbewegung (Erweiterung von /2/ und /7/), Berechnung mit der Integral-Transformations-Methode (ITM).

Randbedingungen an der Halbraumoberfläche:

- vertikale Normalspannungen an der Oberfläche wie eingegeben (Lastseite)
- horizontale Verschiebungen $u_x(z=0)$ und $u_y(z=0) = 0$

Nach Helmholtz ergeben sich für die im Halbraum möglichen voneinander entkoppelten Wellentypen Kompressions- und Scherwelle 4 partielle Differentialgleichungen. Mittels Integraltransformation (s. unten) werden diese in ein gewöhnliches homogenes Differentialgleichungssystem überführt, auf das sich die o.g. Randbedingungen unter Heranziehen der allg. Verschiebungs- und Verzerrungsbeziehungen des Kontinuums und der Sommerfeldschen Abstrahlbedingung anwenden lassen.

Ergebnis sind die Bestimmungsgleichungssystem ohne / mit „horizontaler Deckelung des Bodens“: (Gl 3)

$$\begin{bmatrix} 2 \cdot \mu \cdot \lambda^2 - \lambda \frac{\omega^2}{c_p^2} & 2i \mu \cdot k_y \cdot \lambda^2 & -2 \cdot 1i \mu \cdot k_x \cdot \lambda^2 \\ -2 \cdot 1i \mu \cdot k_x \cdot \lambda^2 & \mu \cdot k_y \cdot k_x & \mu \cdot (-\lambda^2 - k_x^2) \\ -2 \cdot 1i \mu \cdot k_y \cdot \lambda^2 & \mu \cdot (\lambda^2 + k_y^2) & -\mu \cdot k_y \cdot k_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \cdot \mu \cdot (\lambda_{k_x, k_y}^1)^2 - \lambda \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot ftz}{c_p} \right)^2 & 2 \cdot \mu \cdot 1i \cdot K_{y_{k_x, k_y}} \cdot \lambda_{k_x, k_y}^2 & -2 \cdot \mu \cdot 1i \cdot K_{x_{k_x, k_y}} \cdot \lambda_{k_x, k_y}^2 \\ 1i \cdot K_{x_{k_x, k_y}} & 0 & (\lambda_{k_x, k_y}^2)^2 \\ 1i \cdot K_{y_{k_x, k_y}} & -(\lambda_{k_x, k_y}^2)^2 & 0 \end{bmatrix}$$

mit den Wellenzahlen

$$\text{Gl. (4)} \quad \lambda_{k_x, k_y}^1 := -1i \sqrt{\left(\frac{ftz \cdot 2 \cdot \pi}{c_p} \right)^2 - (K_{x_{k_x, k_y}})^2 - (K_{y_{k_x, k_y}})^2} \quad \text{und}$$

$$\text{Gl. (5)} \quad \lambda_{k_x, k_y}^2 := -1i \sqrt{\left(\frac{ftz \cdot 2 \cdot \pi}{c_s} \right)^2 - (K_{x_{k_x, k_y}})^2 - (K_{y_{k_x, k_y}})^2}$$

ferner mit ω : Eigenkreisfrequenz, c_p : Kompressionswellengeschwindigkeit, λ : E-Modul, μ : Schubmodul, ftz : Frequenz, „1i“ = i (imaginär)

In der ITM finden drei Transformationen statt: Zeit \rightarrow Frequenz, sowie X- und Y-Koordinate \rightarrow Wellenzahlen K_x, K_y

- komplexe Einheitslösungen für Last-Ansatzfunktionen (Gaußsche Glockenkurven)
- Rücktransformation in den Ortsbereich:

$$\text{Gl. (6)} \quad f(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\bar{f}(k_x, k_y, \omega) e^{i k_x x} dk_x) e^{i k_y y} dk_y e^{i \omega t} d\omega$$

- Beobachten der Wellenabstrahlung (Wellenlängen in Abhängigkeit der Frequenz bei festeingestellten Parametern)

Ergebnis:

Unter „horizontal gedeckelter“ Oberfläche erhöht sich die Wellengeschwindigkeit in dem Maß einer Anhebung der von Rayleighwellen- auf Schubwellengeschwindigkeit.

Das Ergebnis ist plausibel. Eine extreme Bodenversteifung des unter einer Bodenplatte „eingesperrten“ Bodens ist nicht errechenbar.

Die nachfolgenden Messwerte stützen die Annahme einer Beeinflussung der Wellengeschwindigkeit / Wellenlänge durch das Gebäude („kombinierte Wellenlänge“).

7. Messwerte aus der Praxis

7.1 Beispiel 1: Starke Flachgründung (2 m dick) auf Sandboden /8/

Messwerte im Erdreich (Messpunkt Abstände 2 x 0,75 m, 1,5 m und 3 m)

- Freifeld nach geringem Aushub: 115 m/s unter Impulsanregung
- Auf Aushubtiefe 230 m/s unter Impulsanregung (265-350 m/s unter Zugsanregung)

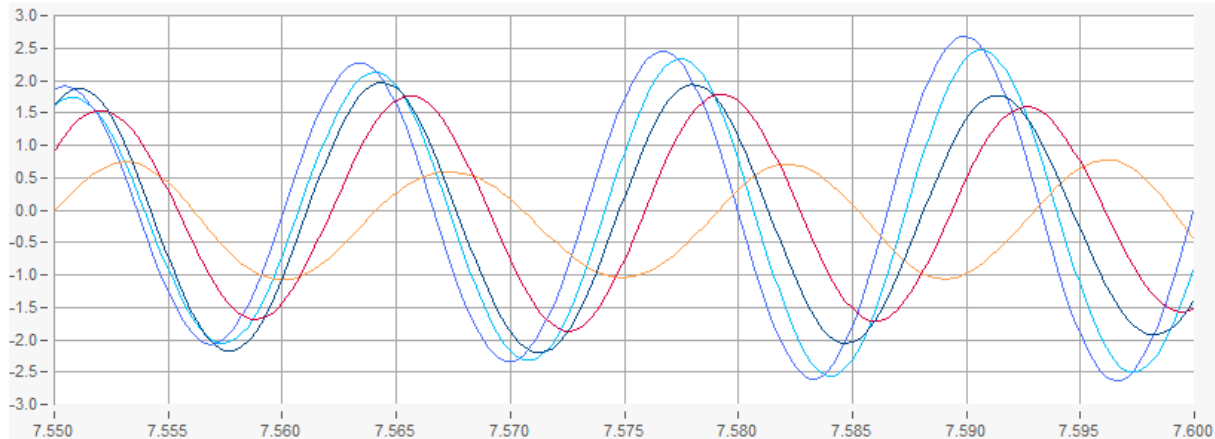


Bild 11 Messung Wellengeschwindigkeit auf der Bodenplatte

- Wellengeschwindigkeit auf der Bodenplatte: 1100 – 1200 m/s
- Gemessen unter Zugsanregung, gefiltert bei einer maßgeb. Einwirkfrequenz von 80 Hz (wegfiltern der Baustelleneerschütterungen)

Vgl. mit dem Rechenergebnis für den konkreten Fall gemäß Dissertations /2/

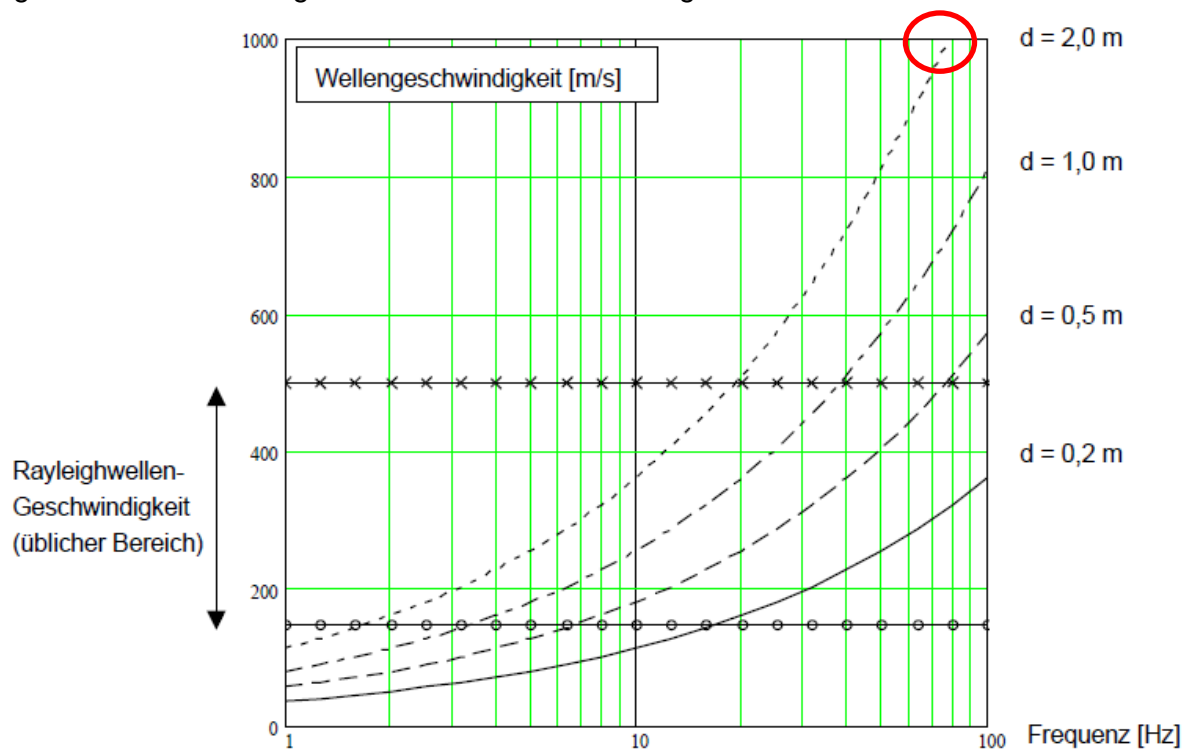


Bild 12 Biege-Wellengeschwindigkeiten in Bodenplatten nach /2/

Nach theoretischer Berechnung ergibt sich für eine "freischwebende" 2 m dicke Bodenplatte aus Beton bei der maßgebenden Frequenz von 80 Hz eine Wellengeschwindigkeit von ca. 1000 m/s. Gemessene Abweichungen nach oben von diesem Wert lassen sich erklären durch einen (dyn.) Gesamt-E-Modul, der höher als $3 \cdot 10^{10}$ liegt (Bewehrung, Zuschlagsstoffe) und durch das asymmetrische Anliegen des Bodens inkl. Sauberkeitsschicht unter der Bodenplatte, wodurch sich die Nulllinie der Platte leicht nach unten verschiebt. Weiterhin verläuft die Bahnlinie nicht ganz rechtwinklig zur Messachse, wodurch sich wohl eine leicht erhöhte Spurgeschwindigkeit ergeben hat.

Fazit: Im gemessenen Beispiel bleibt im Gesamtsystem nicht die Wellengeschwindigkeit des Bodens erhalten, sondern es ergibt sich für hohe Frequenzen die Wellengeschwindigkeit der (dominanten) Bodenplatte.

7.2 Beispiel 2: Hydraulisch gebundene Sohle auf Sandboden /9/

Ohne Abbildungen: Amplitudenreduktion durch eine erdberührte „Bodenplatte“ Es handelt sich um eine zementgebundene Dichtsohle von ca. 1 m Stärke, deren genaue Abmessungen, E-Modul und damit Biegesteifigkeit nicht exakt bekannt sind.

- Gemessen: Spektrale Abnahme der Erschütterungen auf GOK
- Gemessen: Zunahme der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von 105 m/s auf Werte von ca. 200 m/s (unter Ersatzanregung)
- Bei 40-50 Hz gemessen

7.3 Beispiel 3: Dicke Bodenplatte auf weichem Quartär

Es bietet sich hier die Gelegenheit, zwei unterschiedliche Gebäudebereiche zu vergleichen:

- a) Hauptgebäude, Bodenplatte ca. 1,90 m im Mittel zur Reduktion von Presswerkerschütterungen
- b) Nebenbau, Bodenplatte ca. 0,60 m nach statischer Erfordernis

Leider sind auch die Gebäudehöhen und damit die Pressungen auf das Erdreich unterschiedlich. Die Gründungstiefe stimmt annähernd überein.

Dieses Beispiel kann nur für die erschütterungsmindernde Wirkung, nicht jedoch für die Auswertung der Wellengeschwindigkeiten herangezogen werden (Messung 1998). Aus der Gesamterfahrung sehr vieler Messungen im damaligen Umfeld kann geschlossen werden, dass bei maßgebenden Einwirkfrequenzen von 5 Hz und 10 Hz die Wellengeschwindigkeiten praktisch unverändert gegenüber der Freifeldanregung blieben und keine Beeinflussung durch die Gebäude zeigten.

8. Fazit

Die Aufspaltung eines Gebäudemodells in ein leicht zu handhabendes Vertikalmodell und ein ausgekoppeltes Horizontalmodell funktioniert im Prinzip. Die sich ergebenden Abweichungen sind – je nach Parametersatz – sehr klein bis hinnehmbar. Vor dem Hintergrund häufig festgestellter „eigenwilliger“ Ansätze zu dieser Thematik oder gar kompletter Vernachlässigung dieses Teils der Modellbildung, ist das vorgestellte separate Berechnungsverfahren ein vergleichsweise präzises Werkzeug, das durch seine Einfachheit den Überblick erhöhen kann und die Möglichkeit zu umfangreichen Parameterstudien verbessert.

Hiervon unabhängig kann die Modellvorstellung einer unter einem Gebäude hindurchlaufenden Rayleighwelle, die vom Gebäude nicht beeinflusst wird, nicht aufrechterhalten werden. Die vermutete anschauliche wellenausmittelnde Wirkung einer steifen Bodenplatte entfällt somit vollständig.

Infolge der Erhöhung der Bodenwellengeschwindigkeit auf die Geschwindigkeit des kombinierten Systems aus Boden und Bodenplatte (inkl. aller beteiligten Längssteifigkeiten), ergibt sich eine zwingende Reduktion der Amplitude aus Gründen der Energieerhaltung und am Beginn des Systems eine Reflexion, die Energie in Richtung Schwingungsverursacher zurückwirft.

- [1] N. Breitsamter: Ersatzmodelle zur Bestimmung der Schwingungsantwort von Gebäuden unter Anregung durch Bodenerschütterungen, Dissertation TUM, 1996
- [2] H. Molzberger: Vereinfachende dynamische Gebäudemodellierung unter besonderer Berücksichtigung der Bauwerk-Boden-Interaktion, Dissertation TUM, 2009
- [3] VDI-Richtlinie 3837: Erschütterungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen, Spektrales Prognoseverfahren, März 2006
- [4] Haupt Wolfgang, Bodendynamik, Vieweg & Sohn, 1986
- [5] Studer J., Ziegler A., Bodendynamik, Springer 1986
- [6] Müller Gerhard, Ein Verfahren zu Erfassung der Fundament-Boden Wechselwirkung unter Einwirkung periodischer Lasten, Dissertation TUM 1989
- [7] Breitsamter / Molzberger, Tagungsband Baudynamik 2018, iSEG: imb-dynamik Simulation von Erschütterungen in Gebäuden
- [8] imb-dynamik GmbH, B51818-1/2, BV Berlin, Messungen vor und nach Aushub vom 18.11.2019 und 09.11.2020
- [9] imb-dynamik GmbH, B51811-1/2/3/4, div. Messkampagnen auf unterschiedlichen Gründungsniveaus vom 31.05.2017 / 25.08.2017 / 14.05.2018 / 09.11.2018