

# **iSEG: imb-dynamik Simulation von Erschütterungen in Gebäuden**

## **iSEG: imb-dynamik Simulation of Vibrations in Buildings**

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

### **Kurzfassung**

imb-dynamik beschreitet mit dem analytischen Modell iSEG seit über 20 Jahren einen Sonderweg der baodynamischen Gebäudemodellierung für Erschütterungsprognosen infolge externer Erschütterungsquellen.

Wir sehen diese Methode als eine Alternative zu numerischen Modellierungen (i.d.R. FEM), da mittels schneller Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen unscharfe Eingangswerte (Streuungen und Bandbreiten) gut beherrscht werden und das baodynamische Verständnis (Interaktion der Bauteile) sehr gefördert wird.

Mit dem iSEG-Modell können in Synergie mit einem soliden baodynamischen Verständnis „alter Schule“ und ca. 20 jähriger Erfahrungen sehr effektiv und punktgenau Erschütterungsprognosen durchgeführt und Maßnahmen äußerst wirtschaftlich ausgelegt werden.

### **Abstract**

imb-dynamik uses the analytic model iSEG for more than 20 years as a special method in dynamic modeling of buildings for vibration forecast.

We see this method as an alternative to numeric models (mostly FEM) because scattering input data can be handled properly via fast sensibility studies and the dynamic understanding (interaction of construction elements) is assisted very well.

In combination with dynamic “old school expertise” and 20 years experience in vibration forecasts the iSEG model is a very effective tool for designing measures of vibration mitigation very economically.

## ----- 1. Teil: Dissertation Breitsamter -----

### 1. Einführung

Eine häufige Baudynamische Standardaufgabe ist die Prognose der Erschütterungen in Gebäuden, die neu an bestehenden Erschütterungsquellen (z.B. Bahnstrecken) gebaut werden. Zur Beurteilung der Situation werden zunächst die Erschütterungen an der GOK gemessen und anschließend für relevante Immissionsorte im Gebäude, z.B. Wohn- und Schlafzimmer, prognostiziert. Dafür sind geeignete Modellierungen erforderlich.

Standardmethoden dafür sind die Finite Elemente Methode (FEM), die Statistical Energy Analysis (SEA) oder die Anwendung „starrer“ Übertragungsfunktionen (ÜF).

Imb-dynamik beschreitet demgegenüber mit dem analytischen Modell iSEG seit über 20 Jahren einen Sonderweg, welcher sich in Relation zu den Standardmethoden folgendermaßen einordnet:

- FEM: Genaue Modellierung des Gesamtgebäudes oder eines größeren Ausschnittes und Berechnung der Schwingungen in Abhängigkeit von Ort und Zeit bzw. Frequenz; Modellierung und Rechenläufe sehr zeitaufwändig; große Fülle von Ergebnisdaten, welche insbesondere für die Belange der Erschütterungsprognose schwer zu handhaben sind
- SEA-Methode: Stark vereinfachte Modellierung des Gesamtgebäudes oder eines größeren Ausschnittes und Berechnung der Schwingungen in grober Abhängigkeit vom Ort ohne Zeit- bzw. Frequenzauflösung. Modellierungsaufwand ist weit geringer, Rechenläufe dauern nur kurz. Jedoch geht durch die Mittelung über alle Frequenzen die Auflösung von Resonanzüberhöhungen bei niedrigen Frequenzen (bis ca. 50 Hz) verloren.
- ÜF-Methode: Multiplikation (meist empirisch ermittelter) ÜF (für Boden-Bauwerk-Interaktion, Decken- und Estrichresonanzen). Schnell und einfach, jedoch Verlust aller Phasenbeziehungen und aller mechanischen Interaktionen.
- iSEG: Beschreitet bzgl. FEM und SEA einen Mittelweg und vereint die Vorteile geringen Modellierungsaufwandes und geringer Rechenzeiten der SEA-Methode mit guter Auflösung der Ergebnisse im Frequenzbereich für den interessierenden Empfangsort.

### 2. Theoretische Grundlagen

Das Modell iSEG geht auf Forschungen am Lehrstuhl für Baumechanik der TUM aus den Jahren 90´er Jahren zurück. Die Zielstellung war dem Zeitgeist zum Trotz die Entwicklung von einfachen (anschaulichen) Ersatzmodellen mit möglichst wenigen Freiheitsgraden als Gegenentwurf zur Numerischen Mechanik. Es zeigte sich, dass sich insbesondere die vertikalen Gebäudeschwingungen sehr gut mit einem solchen Ersatzmodell abbilden lassen.

Das iSEG-Modell verwendet folgende Idealisierungen

- Nur vertikale Bewegungen werden betrachtet.
- Repräsentative Gebäudebereiche werden herausgeschnitten.
- Die primäre Lastabtragung erfolgt über die Stützen/Wände.
- Die vertikalen Bauglieder werden zu massebelegten Dehnstab zusammengefasst
- Alle horizontalen Bauglieder werden nach Eigenformen entwickelt.

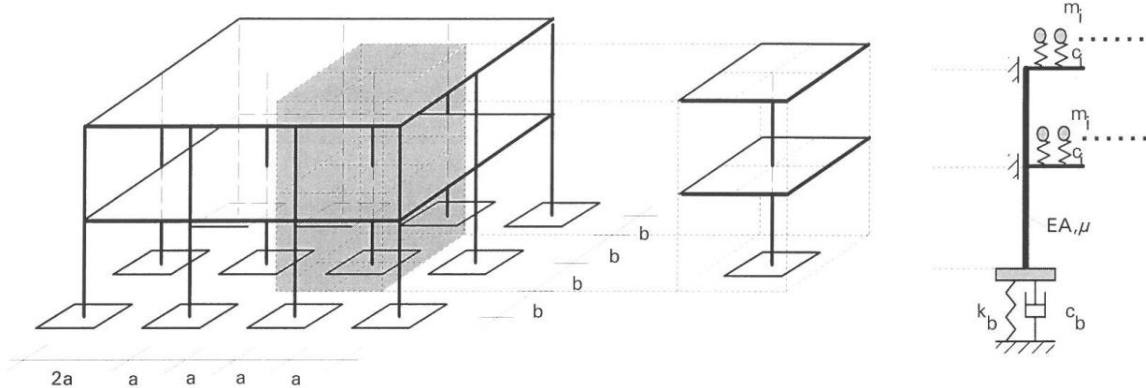


Abb. 1 Repräsentativer Ausschnitt und mechanisches Ersatzmodell

Die Einmassenschwinger stehen für die Schwingungsmoden der Deckenfelder. Insgesamt werden alle Deckenfelder durch sog. Ersatzschwinger abgebildet.

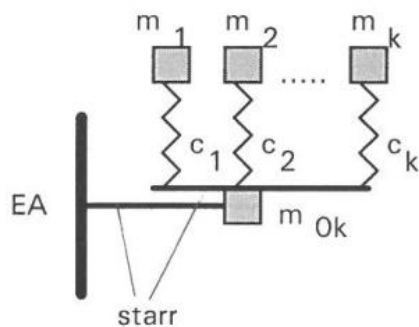


Abb. 2 Ersatzschwinger für Geschoßdecken

Im Gegensatz zur klassischen Eigenformmethode ist die Normierung dieser Massen nicht frei, sondern unterliegt der Bedingung der korrekten Rückwirkung unter Fußpunktanregung auf die Auflager.

Der abgebildete Ersatzschwinger berücksichtigt  $k$  Eigenformen. Würden alle (unendlich vielen) Eigenformen abgebildet, so wäre in den Einzelmassen  $m_i$  die gesamte Deckenmasse enthalten und die Restmasse  $m_{0k}$  würde verschwinden.

Ersatzschwingerkennwerte für den einfachsten Fall einer einachsigen gespannten, gelenkig gelagerten Decke (Biegesteifigkeit  $EI$ , Massenbelegung  $\mu$ , Stützweite  $L$ ) unter gleichphasiger Fußpunktanregung:

	Relevante Eigenformen (Index $i$ ) $\psi_i = \sin\left(\frac{(2i-1) \cdot \pi \cdot x}{L}\right)$
	Eigenkreisfrequenzen $\omega_i = \left(\frac{(2i-1) \cdot \pi}{L}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}}$
Schwingerkennwerte bei $k$ berücksichtigten Eigenformen	
Ersatzschwingermasse	$m_i = \frac{4\mu L}{(2i-1)^2 \cdot \pi^2}$
Restmasse	$m_{0k} = \frac{\mu L}{2} - \sum_{i=1}^k m_i$
Ersatzschwingerfeder	$c_i = \omega_i^2 \cdot m_i$
..Amplitudenbeiwert	$\alpha_i = \frac{4}{(2i-1)\pi}$

#### Gleichung 1 exemplarische Ersatzschwingerkennwerte

Die Einmassenschwinger antworten mit einer generalisierten Schwingungsamplitude, die mittels Multiplikation mit dem Amplitudenbeiwert  $\alpha_i$  in die maximale Schwingungsamplitude umgerechnet werden kann.

Entsprechende Ersatzschwingerkennwerte wurden für zahlreiche Standardfälle ermittelt (1-achsige eingespannte Decken, 2-achsige gelenkig gelagerte bzw. eingespannte Decken, punktgestützte Flachdecken usw., jeweils für gleichphasige und gegenphasige Anregung). Schwimmende Estriche können als zusätzliche Einmassenschwinger im Massenverhältnis zur Deckenplatte an jede Deckeneigenform angehängt werden.

Nach dem Baukastenprinzip kann damit ein Ausschnittmodell über die gesamte Gebäudehöhe aufgebaut und an beliebigen Stellen elastische Lagerungen (EL) eingebaut werden.

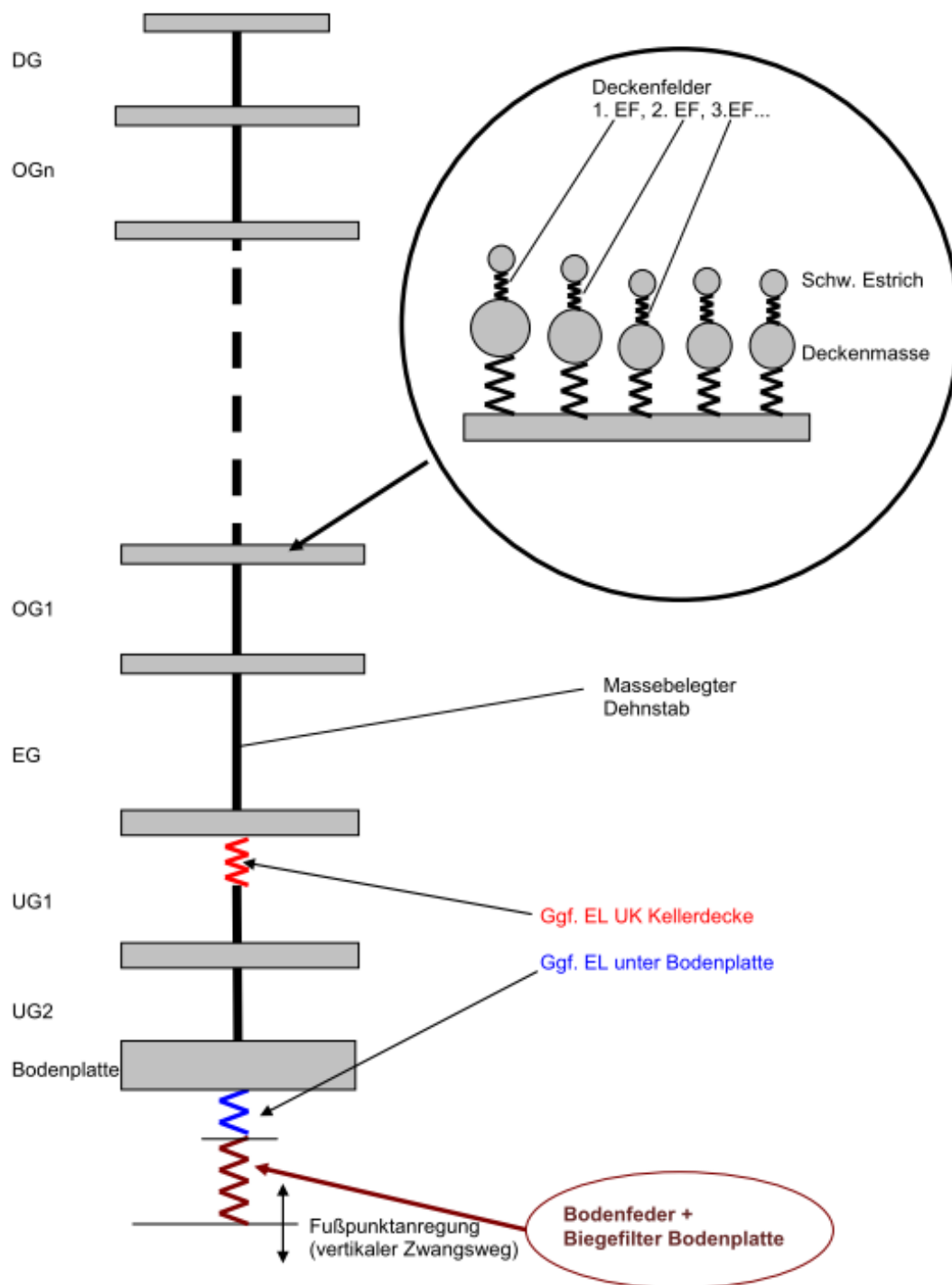


Abb. 3 Aufbau des iSEG-Modells

## 2. Mathematische Umsetzung des Mechanischen Ersatzmodells

Prinzipiell könnte das mechanische Ersatzmodell als kleines FE-Modell (mit einem handelsüblichen FE-Programm) realisiert werden und würde dann den entsprechenden Einschränkungen (z.B. Festlegung auf viskose Dämpfung) unterliegen.

Da es sich jedoch um eine baumartig verzweigte Modellstruktur handelt ist hier einer mathematischen Formulierung mittels der Impedanzmethode der Vorzug zu geben. Dabei wird mittels komplexen Steifigkeiten zudem eine realitätsnahe hysteretische Dämpfungscharakteristik abgebildet.

Dazu wird das System im eingeschwungenen Zustand betrachtet.

Für alle Elemente (Massen, Federn, Dämpfer, Stäbe) werden Impedanzen bzw. dynamische Steifigkeiten ermittelt. Diese werden, ausgehend von den anregungsabgewandten Modellen (Estrichmassen) verschaltet (Parallel und Reihenschaltungen) und so zunächst die resultierende dynamische Steifigkeit der Deckenfelder ermittelt.

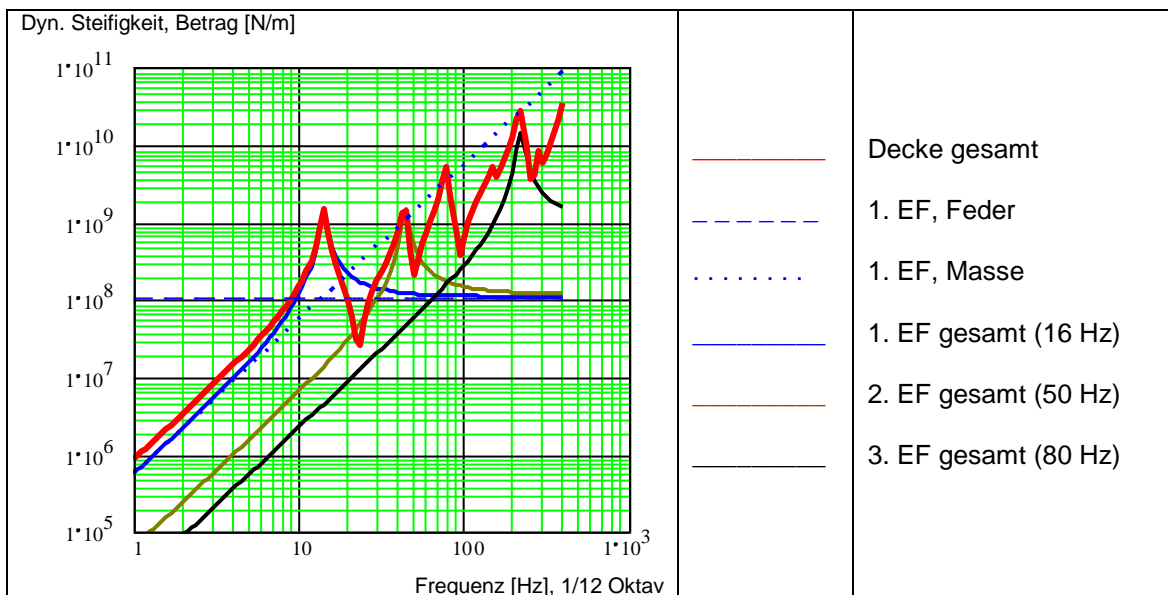


Abb. 4 dyn. Steifigkeiten (Einzelemente, Geschossdecke ohne schwimmendem Estrich)

Schließlich wird ausgehend vom obersten OG abwärts bis zum untersten UG eine Gesamtsteifigkeit am Fußpunkt aufgebaut.

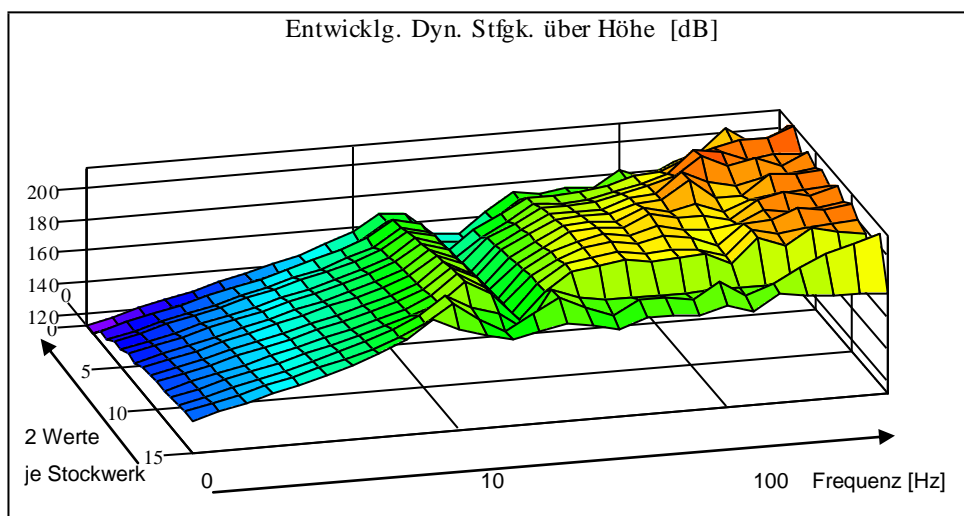


Abb. 5 dynamische Steifigkeiten im iSEG-Modell (Wohngebäude mit einheitlichen 7 OGs)

Diese Berechnung erfolgt parallel für den gesamten Frequenzvektor (Auflösung meist Terzen, aber auch z.B. 1/12-Oktavraster oder Schmalband möglich).

Am Fußpunkt wird die z.B. gemessene Freifeldanregung (meist in Form von Terzspektren, ggf. auch in Form eines FFT-transformierten Zeitverlaufes) aufgebracht und dann der Impedanzbaum rückwärts gerechnet. Damit entfällt die Lösung von Gleichungssystemen und die damit verbundene Numerik.

Die Beiträge der einzelnen Einmassenschwinger = Eigenformen werden zu einer Resultierenden superponiert und abschließend KB-Werte sowie mittels einer Näherungsformel (Schallabstrahlung) Sekundärluftschallsummenpegel (SL-Pegel) in den Zimmern berechnet.

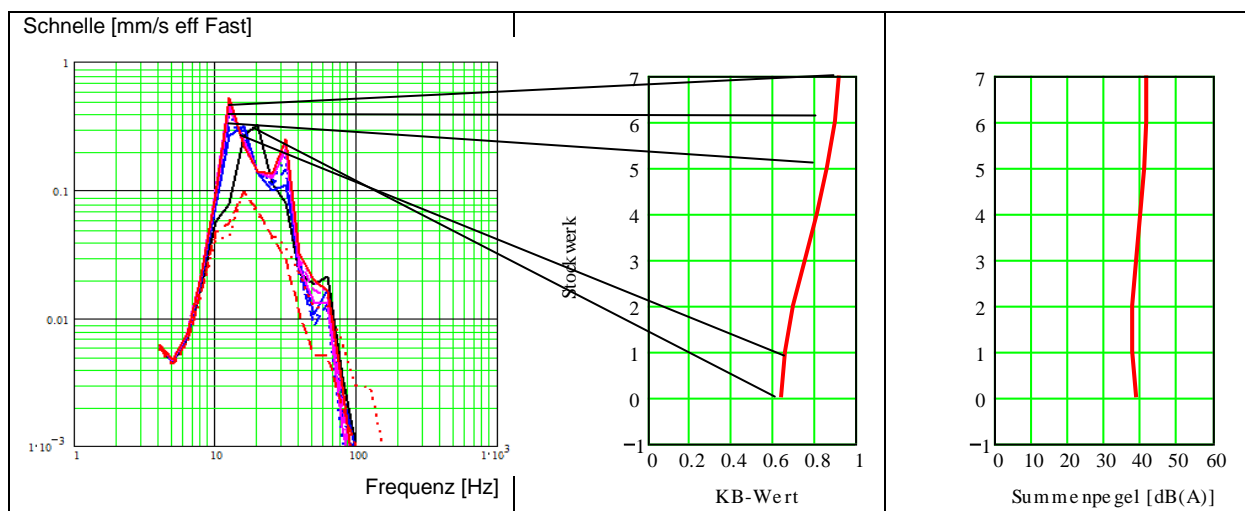


Abb. 6 Ergebnisse des iSEG-Modells: spektrale Schwingschnelle, KB-Werte und SL-Pegel

Die Genauigkeit der Modellierung ist adäquat zur Genauigkeit der Eingangswerte, die hinsichtlich des Bodens und der Anregung (i.A. eine chaotische Überlagerung zahlreicher einzelner Schwingungsquellen) Unschärfen unterworfen sind.

Der Modellaufbau lässt sich bei Umsetzung mit einem Mathematik-Programm und entsprechender Übung in wenigen Stunden bewerkstelligen. Ein Rechenlauf benötigt dann nur wenige Sekunden, sodass unbegrenzt Parameter variiert und Sensitivitäten studiert werden können – immer noch das beste Mittel gegen unscharfe Eingangswerte.

## ----- 2. Teil: Dissertation Molzberger -----

Im Zeitraum von 2000 bis 2009 entstand am Lehrstuhl für Baumechanik eine Erweiterung der Dissertation von Dr. Breitsamter, die sich erneut mit Fragestellungen zur dynamischen Gebäudemodellierung beschäftigte.

### **4. Motivation**

Die eigentliche Motivation der Arbeit bestand in einer praktischen Aufgabe. In der Planung des AUDI-Forums Ingolstadt wurden die Erschütterungen durch Automobilpressen zu einem sehr späten Zeitpunkt berücksichtigt.

imb-dynamik musste sehr kurzfristig eine Lösung zur Erschütterungsreduktion liefern, ohne dass am Tragwerk des Gebäudes noch Änderungen möglich gewesen wären. Beim Stichwort „dicke Bodenplatte gegen Schwingungen“ wurde der Bauherr hellhörig.

In der Folge wurde die Komplexität der Aufgabe erkannt und es musste mit ingenieurmäßigen Näherungen gearbeitet werden.

Aus dieser Situation entstand der Wunsch, die Wirksamkeit einer biegesteifen Bodenplatte gegen von außen einwirkende Rayleighwellen zuverlässiger berechnen zu können.

### **5. Inhalte der 2. Dissertation zum Thema dynamische Gebäudemodellierung**

Ein Überblick in Kurzform:

#### A) Bauwerk-Boden-Interaktion

- Wellenausbreitung im Baugrund (ITM = integrale Transformationsmethode)
- Kopplung des isotropen elastischen Halbraumes mit einer Fundamentplatte
- Vereinfachung des Bodenmodells zur frequenzabhängigen komplexen Winklerbettung

#### B) Gebäudedynamik

- punktgestützte Flachdecken und mehrfeldrige Deckensysteme
- Übertragung von Schwingungen über Biegewellen in Stützen und Wänden

#### C) Modellverifikation

- Schnittstelle Messung – Modell
- Messergebnisse an Fundamenten und in Gebäuden

Im vorliegenden Tagungsbeitrag konzentrieren wir uns auf den Punkt A. In der Präsentation auf der Baudynamik 2018 werden Messergebnisse und Praxisbeispiel ergänzend herangezogen.

### **6. Grundlagen der Bodenmechanik, ITM**

Faszinierend ist, dass sich gerade die „trockene“ Mathematik, hier sogar in Form tensorieller Formulierungen, physikalisch anschaulich interpretieren lässt:



Das gekoppelte partielle Differentialgleichungssystem der Lameschen Gleichung lässt sich mit Hilfe des Satzes von Helmholtz zerlegen in

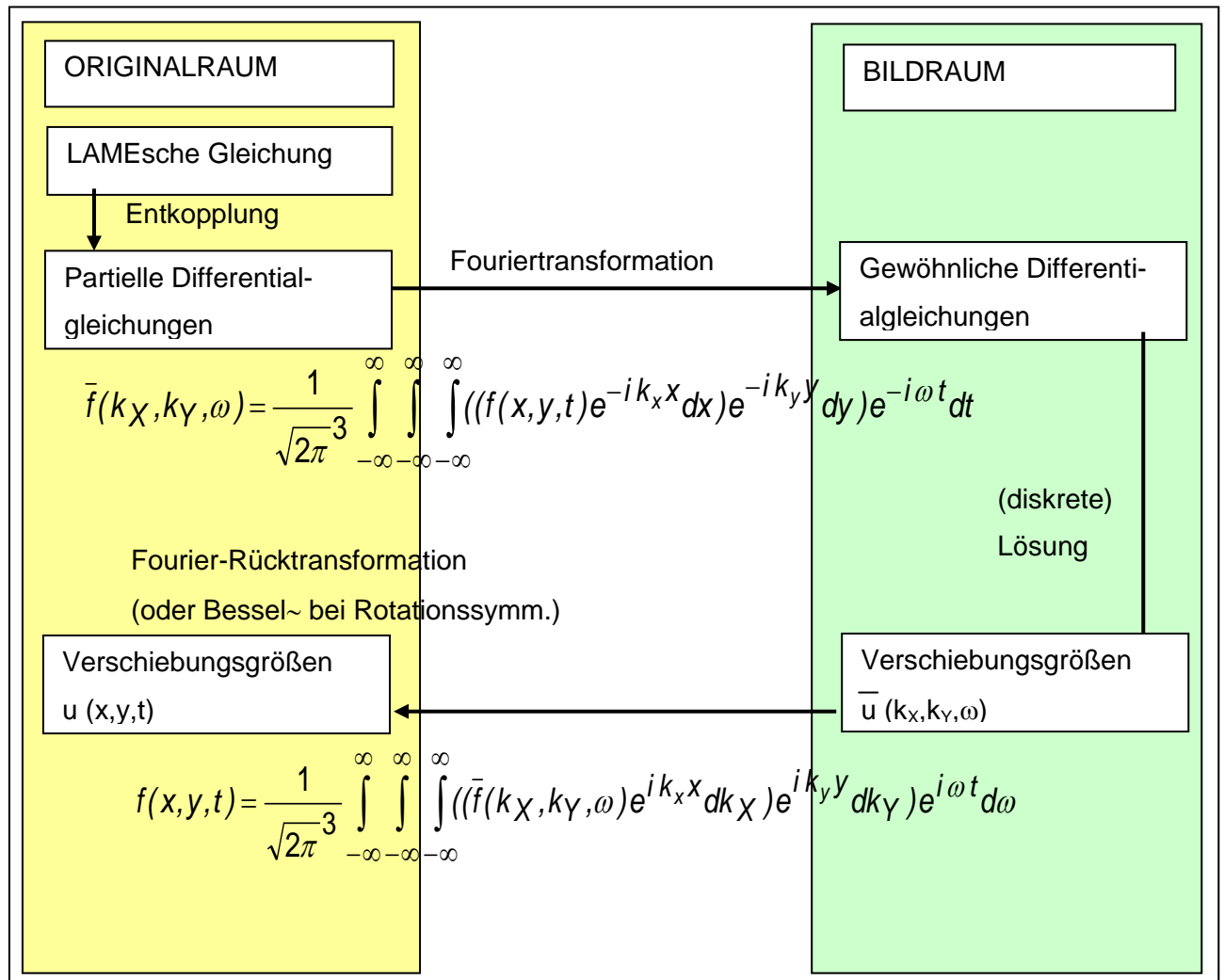
- einen wirbelfreien Anteil – Gradient des Skalarfeldes  $\Phi$
- und einen quellfreien Anteil – Rotation des Vektorfeldes  $\Psi_k$

Diese beiden Anteile sind einfacher verständlich auch bekannt als Kompressionswelle (Dilatationswelle, P-Welle) und Scherwelle (S-Welle) mit den Wellengeschwindigkeiten

$$c_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{und} \quad c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

Gleichung 2 aus /2/

In der integralen Transformationsmethode (ITM) wird im Frequenzraum mit Wellenzahlen  $k_x$  und  $k_y$  in den beiden horizontalen Raumrichtungen gerechnet (3-fach transformierter Raum; nur die z-Richtung bleibt untransformiert).



Gleichung 3 aus /2/

Es werden die vorliegenden Randbedingungen, ferner auch die Spannungs-Dehnungsbeziehungen des Kontinuums angewendet und in der gewünschten Tiefe (z.B.  $z=0$  an der Oberfläche) wird für eine wählbare (ebenfalls transformierte) Lastfunktion die Bodenantwort ermittelt.

Superposition von Lastfunktionen ermöglicht die Ermittlung der Halbraumantwort auf beliebige vorgegebene Verformungsfiguren, z.B. das Nachrechnen der bekannten Impedanzen für starre Fundamente (siehe z.B. Gazetas, Studer, Betonkalender 1988)

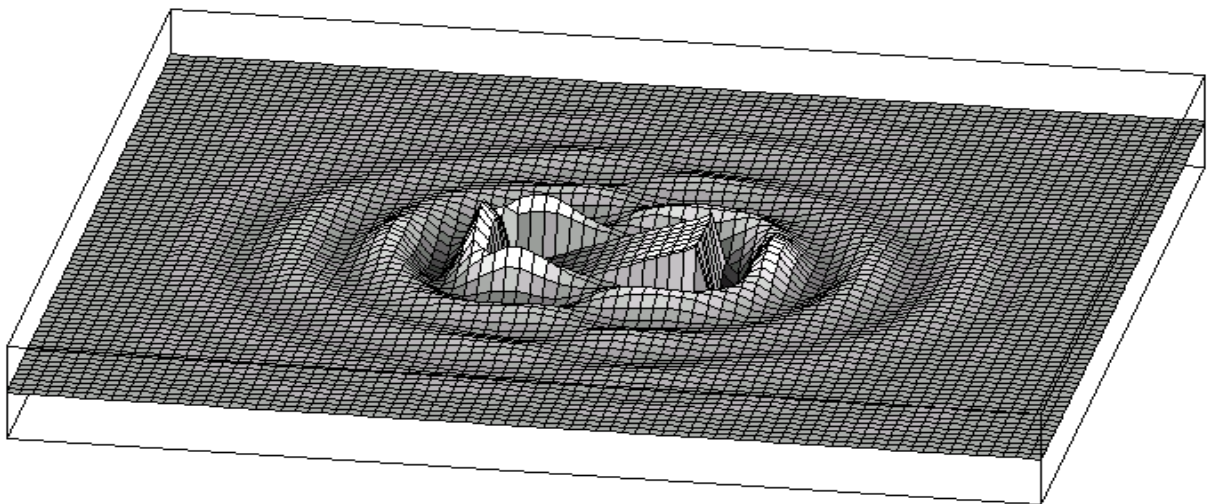


Abb. 7, Kippbewegung eines starren Fundamentes

### 7. Antwort des Halbraumes auf ausgerundete Verformungen

Die bekannten Ansätze für starre Fundamente waren für wellenförmige Bewegungen nicht direkt anwendbar und mussten erweitert werden:

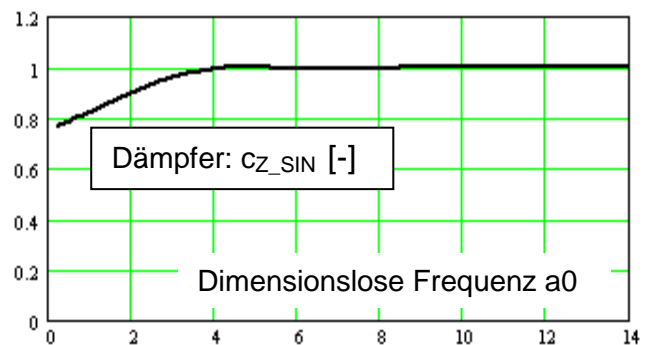
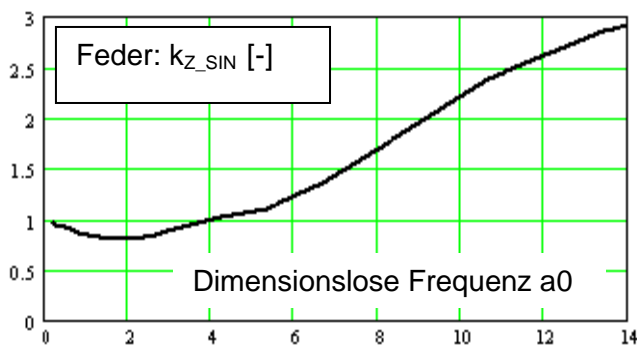
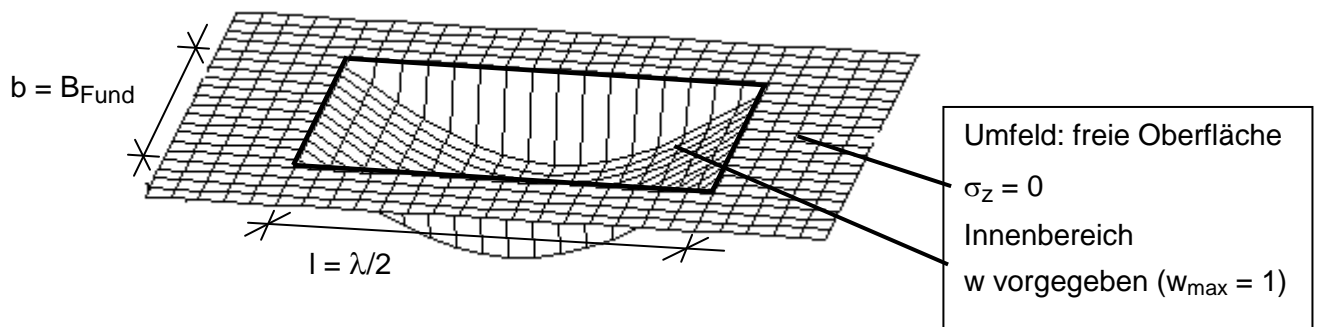


Abb. 8, dimensionslose Beiwerte für Feder- und Dämpferanteil

Die dynamische Steifigkeit modifiziert sich damit bei Halbsinusform in Richtung I zu:

$$C_{dynZ\_SIN} = A1 \frac{Gr}{1-\nu} \left[ k_{Z\_SIN} FF + A2 i a_0 c_{Z\_SIN} \right]$$

mit  $a_0 = \frac{\Omega r}{c_S}$ ,  $r = \sqrt{\frac{bI}{\pi}}$  und  $FF = \frac{\sqrt[3]{bI^2}}{\sqrt{bI}}$  (=Formfaktor) sowie  $A1 = 2$  und  $A2 = 1,1$

Gleichung 4

Diese Berechnungen wurden ebenso für eine 2-achsige Verformungsfigur durchgeführt.

Eine komplexe Bettung lässt sich durch Division durch 0,64 (Integral der angesetzten Halbsinus-Ansatzfunktion) errechnen.

### 8. Kopplung einer Fundamentplatte mit dem elastischen Halbraum

Es wurde eigens eine Platte mit „höherwertigen“ Ansatzfunktionen nach der Methode der Finiten Elemente programmiert und mit der Nachgiebigkeitsmatrix des homogenen elastischen Halbraumes gekoppelt:

Plattenmodell

äquivalentes Balkenmodell

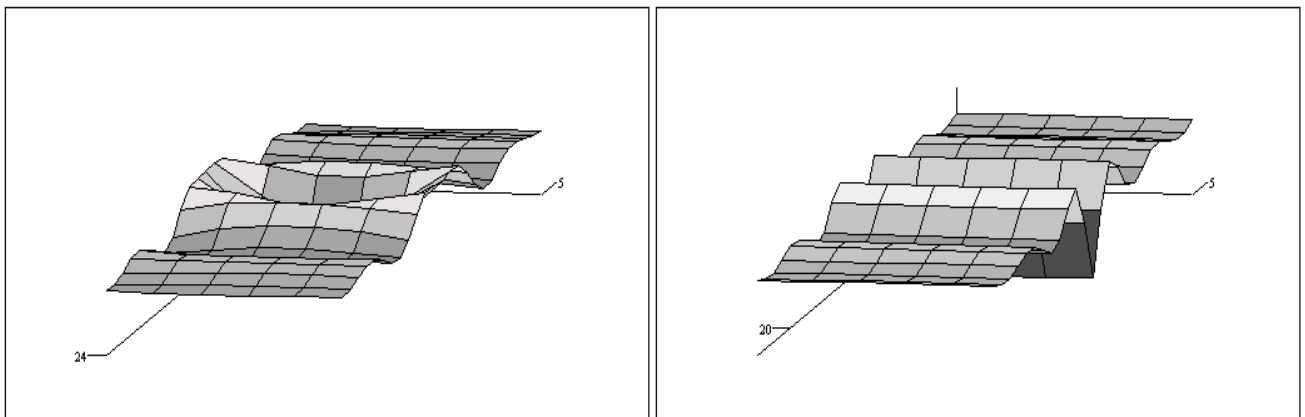


Abb. 9, Kopplung mit 3-D Halbraum unter Kraftanregung

### 9. Näherungslösungen

Es wurde eine stufenweise Näherung erarbeitet:

- FE-Platte
  - FE-Balken
  - Timoshenkobalken
  - Übergang vom Halbraum auf die nachiterierte frequenzabhängige Winklerbettung
- Letztere wird anhand der komplexen Wellenzahlen eines gebetteten Balkens unter Kraftanregung vorstellungsmäßig erläutert:

Reelle Bettung (z.B. Statik)	Komplexe Bettung („Ersatzboden“)
„Scharfe Nullstelle“ = Resonanz	Hohe Dämpfung, „verschmiertes“ Verhalten ohne ausgeprägte Kick-Off-Frequenz
Zu höheren Frequenzen hin springt die Wellenzahl auf Abstrahlung (z.B. allein Realteil bei Wellenzahl $ik_{xx}$ )	Bei höheren Frequenzen überwiegend Abstrahlung (z.B. wachsender Realteil bei Wellenzahl $ik_{xx}$ )
<p>Reelle Bettung</p>	<p>Komplexe Bettung</p>

Abb 10 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  $90^\circ$  verdrehter Wellenzahlen beschreibt damit die Wellenlänge ( $ik_{xx}$  ist damit imaginär).

Mit dieser Methode lässt sich in Abhängigkeit der Frequenz die komplexe dynamische Bettung ermitteln (Aufbringen einer wellenförmigen Kraftanregung auf die Halbraumoberfläche, „messen“ der Vertikalamplitude an der Oberfläche, Nachiterieren der sich einstellenden Wellenlänge)

### 10. Vergleich der dynamischen Bettung 3D und 2D

Die folgenden vorliegenden Bodenlösungen wurden verglichen:

1. Lösung für starre Kreisfundamente, „verformungsäquivalent“ mod. zur Wellenfigur /5/

2. Halbraum 3-D, in Richtung der Wellen sinusförmig ausgerundet, /2/
3. Halbraum 3-D, in beiden horiz. Richtungen sinusförmig ausgerundet, /2/
4. Halbraum 2-D, Lösung für den ebenen Zustand, im Folgenden „2-D“ genannt, /6/

Bei Variante 2 und 3 spielen die seitlichen Abstrahlungsmöglichkeiten und damit die Breite des Modells eine Rolle, die sich i.d.R. entweder aus der Gebäudebreite (z.B. frequenzunabhängig die Breite eines Gebäuderiegels senkrecht zur Bahnlinie) oder aus dem mitwirkenden Bodenplattenanteil einer Stützenreihe ergibt (frequenzabhängig).

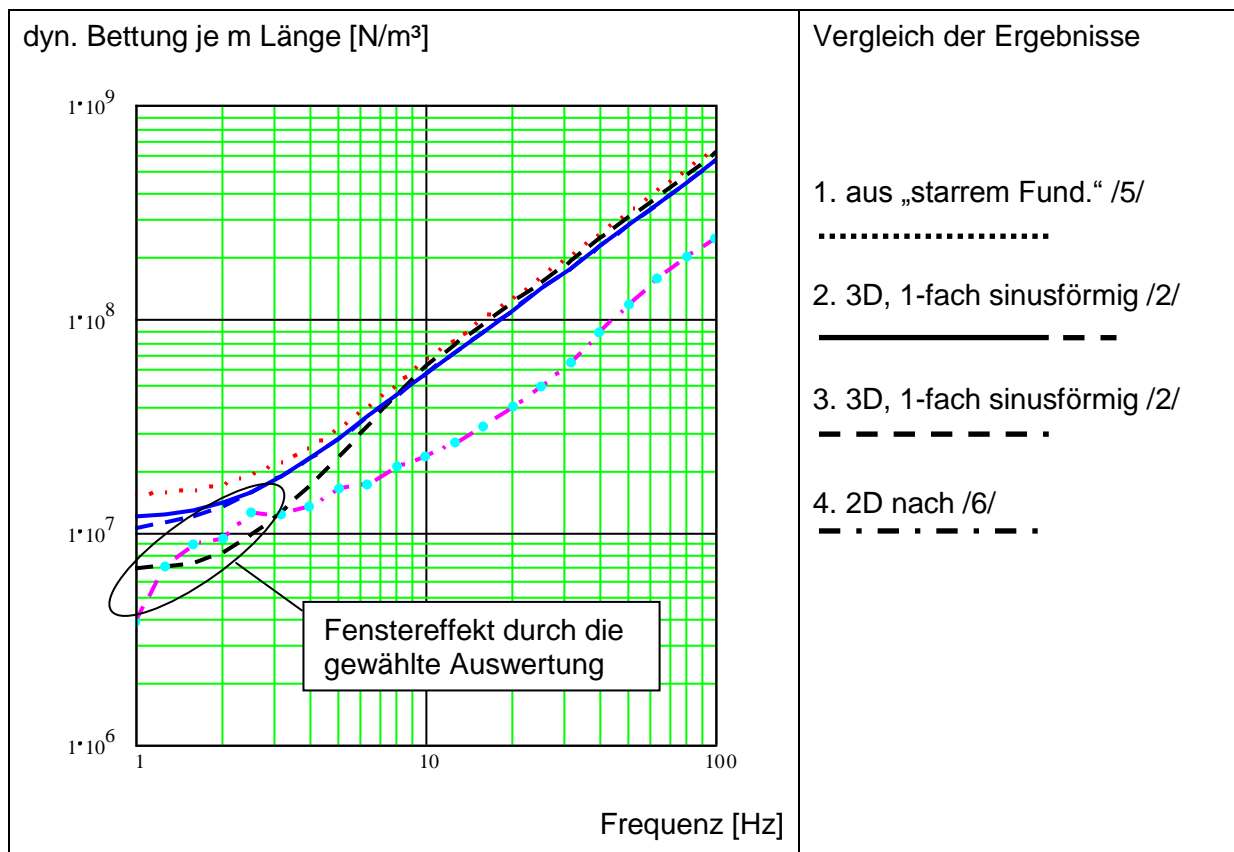


Abb 11, Beispiel 16 m breites Gebäude,  $c_s = 300 \text{ m/s}$

### Interpretation

- Im quasistatischen Bereich großer Einfluss der „ausgerundeten Form“ der Lastfunktion (Welle in /2/ anstelle einer „eckigen“ Verformungsmulde bei /5/), die den Boden infolge einer „fehlenden“ Lastkonzentration an den „scharfkantigen“ Rändern deutlich weicher macht.
- Im dynamischen Bereich (unter Kraftanregung wellenabstrahlend, überwiegend imaginäre Bettungsziffer) durch Abstrahlungsmöglichkeit in 2 horizontalen Raumrichtungen anstelle 1 Richtung bei der 3-D Lösung etwa um Faktor 2 höhere Werte.

In der Praxis wird eine Bodenplatte häufig von einer ebenen Wellenfront bestrichen. In diesem Fall liegen die Lösungen 2 und 4 wohl am nächsten an der Wahrheit. Geht es um die Interaktion einer einzelnen Stütze auf (dünner) Bodenplatte, also um eine punktförmige Kontaktstelle wird die Wellenabstrahlung (der Relativbewegung Gebäude zu Boden) halbkugelförmig erfolgen, was Lösung 3 entspricht.

Die vereinfachten Bodenlösungen wurden für den Anwendungsfall einer in Wellenlaufrichtung „langen“ Gründung in das Gebäudemodell iSEG übernommen – in Kombination mit einem Timoshenkobalken, der Biege- und Schubsteifigkeit der Bodenplatte und der Fassade des Gebäudes enthält (2006 vorgestellt auf der Baudynamiktagung in Kassel).

Ergebnis ist die Erschütterungsreduktion durch die Längssteifigkeiten an beliebigen Stellen des Gebäudes inkl. der Bauwerk-Boden-Interaktion.

#### **11. Fazit**

Mit der vorgestellten Methode konnten bereits elastische Lagerungen genauer angepasst und in ihrem Umfang deutlich reduziert werden, als dies in zahlreichen Vorgutachten der Fall war.

Ein wesentlicher Anteil der Erschütterungsreduktion kommt aus der Kombination einer elastischen Lagerung mit einer dicken Bodenplatte, teils sogar allein aus der Platte. Bei sehr hohen Gebäuden ist die Wirksamkeit der elastischen Elemente allein von untergeordneter Bedeutung und muss stets im Gesamtzusammenhang mit den vorhandenen Steifigkeiten (ferner: Massen) berechnet werden.

Eine Erschütterungsprognose mit starren Übertragungsfunktionen weicht in vielen Fällen so weit von der Realität ab, dass bereits ein (geübter) Blick auf die Immissionspektren allein zu einer deutlich genaueren Prognose führt.

- [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