

# Modellversuche zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Fundamenten

M. Fritsche

Technische Universität Berlin, Grundbauinstitut

## Einführung

Bei der Gründung von Maschinenfundamenten für Generatoren oder Turbinen muß eine dynamische Berechnung durchgeführt werden. Für diese Berechnungen ist die Ermittlung der Bodenreaktionen notwendig, die durch ein dynamisch belastetes Fundament aktiviert werden und die das dynamische Verhalten der Gründung maßgeblich bestimmen. Je nach dem anzuwendenden Rechenverfahren muß das Schwingungsverhalten in einem vereinfachten Modell abgebildet werden.

Zunächst wird ein starres Fundament auf der Oberfläche eines beliebigen Halbraums betrachtet. Die Masse dieses Fundamentes kann einer Punktmasse zugeordnet werden, die über eine Feder mit einer starren Unterlage verbunden ist. Diese Feder verkörpert die elastischen Eigenschaften des Baugrundes. Die Fähigkeit des Baugrundes, Energie ins Unendliche abzustrahlen wird geometrische Dämpfung genannt und kann mit einem geschwindigkeitsabhängigen Dämpfer modelliert werden. Sie ist im engeren Sinn keine Dämpfung, da die Energie nur abgeführt und nicht in Wärme umgewandelt wird. Die dissipative Materialdämpfung des Bodens kann mit der Einführung eines komplexen Schubmoduls berücksichtigt werden, wird aber aufgrund der gegenüber der geometrischen Dämpfung geringen Größe oft vernachlässigt.

Das dynamische Verhalten eines starren Körpers mit Federn und Dämpfern wird durch die folgende Matrixgleichung des Einmassenschwingers mit 6 Freiheitsgraden beschrieben:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{p}(t) \quad (1)$$

Dabei ist  $\mathbf{M}$  die Massenmatrix,  $\mathbf{K}$  und  $\mathbf{D}$  sind die Matrizen der Federsteifigkeiten und Dämpfungskoeffizienten des Baugrundes und  $\mathbf{u}(t)$  ist der Verschiebungsvektor für einen beliebigen Bezugspunkt des Starrkörpers. Im Falle einer harmonischen Erregung

$$\mathbf{p}(t) = \hat{\mathbf{p}}e^{i\Omega t} \quad (2)$$

$$\mathbf{u}(t) = \hat{\mathbf{u}}e^{i\Omega t} \quad (3)$$

kann die Gleichung (1) mit einem harmonischen Ansatz (3) für die Verschiebung unter Einbeziehung von komplexen Amplituden  $\hat{\mathbf{p}}$ ,  $\hat{\mathbf{u}}$  zeitunabhängig aufgeschrieben werden:

$$\left[ -\Omega^2 \mathbf{M} + (i\Omega \mathbf{D} + \mathbf{K}) \right] \cdot \hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{S}} \cdot \hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{p}} \quad (4)$$

Der in eckigen Klammern gesetzte komplexe Ausdruck der Gleichung (4) kann als dynamische Steifigkeit  $\hat{\mathbf{S}}(\Omega)$  des starren, massebehafteten Fundamentes interpretiert werden und besteht aus einem Trägheitsterm und aus dem durch runde Klammern begrenzten Anteil, der nur die Baugrundreaktionen darstellt und als Impedanz bezeichnet wird.

Die Impedanzen hängen von der Fundamentgeometrie, dem dynamischen Schubmodul  $G_d$ , der Poissonzahl  $\nu$ , der Dichte des Bodens  $\rho$  sowie von der Erregerkreisfrequenz  $\Omega$  ab. Weitere Randbedingungen sind Schichtungen des Bodens und Einbettungen des Fundamentes. Zusammenfassende Darstellungen der theoretischen Impedanzermittlung sowie normierte Impedanzkurven der einzelnen Schwingungsformen für einfache Fälle finden sich z.B. in

Gazetas [3,4], Haupt [4], Studer [10] oder in den Empfehlungen des AK9 [1].

Mit den Impedanzen können z.B. die Schwingungsamplituden des Fundamentes oder die vom Fundament auf den Baugrund übertragene Kraft berechnet werden.

## Möglichkeiten der Ermittlung von Impedanzen

Die Ermittlung der Impedanzen kann analytisch mit Formeln durchgeführt werden oder aber experimentell durch Modellversuche stattfinden.

Bei der analytischen Vorgehensweise müssen zuvor die bodendynamischen Kennwerte ermittelt werden. Dazu werden die Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  und die Kompressionswellengeschwindigkeit  $v_p$  des anstehenden Bodens aus bodendynamischen Versuchen bestimmt. Im Labor kann der Resonant-Column-Test angewendet werden, in situ stehen Messungen mit impulsförmig erzeugten Wellenfeldern an der Oberfläche oder in verschiedenen Tiefen, sowie Messungen mit stationären Oberflächenwellen zur Verfügung. Aus den Wellengeschwindigkeiten können die Poissonzahl  $\nu$  und der dynamische Schubmodul  $G_d$  und damit die Impedanzfunktionen berechnet werden.

Nur bei sehr einfachen Randbedingungen für Fundament und Bodenprofil sind analytische Formeln für die Berechnung der Impedanzfunktionen verfügbar. Mit einiger Erfahrung können für die Federsteifigkeiten mit diesen Modellen noch befriedigende Ergebnisse erzielt werden, die Berechnung der Dämpfungen führt jedoch zu meist nicht akzeptablen Werten. Sollen die fast immer vorhandenen Inhomogenitäten des Bodens für eine zuverlässige Berechnung berücksichtigt werden, muß eine Auswertung des dynamischen Schubmoduls über die Tiefe und eine anschließende numerische Berechnung der Impedanzen erfolgen. Die Erstellung eines solchen Profils ist im Labor wie in situ mit großem Aufwand verbunden.

Eine weitere Möglichkeit ist die direkte Ermittlung der Impedanzen aus Experimenten. Werden bei den Versuchen Modellfundamente anderer Größe verwendet, sind bei der Übertragung der Meßergebnisse auf Fundamente anderer Größe die Regeln der Dimensionsanalyse einzuhalten, s. z.B. Hosdorf [7] und Holzlöhner [6]. Bei geschichteten Böden ist die Übertragung der Meßergebnisse unterschiedlich großer Fundamente aufgrund verschieden großer Spannungsbereiche schwierig. Für die Ermittlung des Einflusses verschiedener Randbedingungen auf das dynamische Verhalten von Fundamenten sind Experimente jedoch unerlässlich.

Die nachfolgend aufgezählten Versuchstypen lassen sich nach der Art der Erregung des Fundamentes unterscheiden:

1. Harmonische Erregung mit einem mechanischen Unwuchterreger.
  - Erregung: quadratisch, große dynamische Kräfte von 20 bis 50 kN möglich
  - Messung der Kraft: nicht direkt möglich
  - Messung der Phase: über Steuerung an der Antriebswelle
  - Ausrüstung: schwer (ab 300 kg), Befestigung ist aufwendig
  - Meßprozedur: sukzessive, bei hohen Frequenzen Umbau der Exzenter nötig
2. Harmonische Erregung mit einem elektrodynamischen Erreger
  - Erregung: induktive translatorische Bewegung einer aufgesetzten Masse
  - Messung der Kraft: mit Beschleunigungsaufnehmer direkt an der bewegten Masse
  - Messung der Phase: Zeitfunktion der Kraft wird vollständig gemessen
  - Ausrüstung: verschiedene Modelle, kleine Modelle tragbar und leicht aufzustellen
  - Meßprozedur: sukzessive, kein Umbau erforderlich

### 3. Impulserregung mit einem Impulshammer

- Erregung: durch Schlag mit dem Impulshammer, bis zu 22 kN
- Messung der Kraft: mit Kraftmeßdose
- Messung der Phase: Zeitfunktion der Kraft wird vollständig gemessen
- Ausrüstung: leicht, tragbar, Hammer mit 5,4 kg
- Meßprozedur: schnell, Anregung verschiedener Frequenzbänder

Bei den mechanischen Erregern kann die Kraftamplitude nur stufenweise über die Lage der Exzenter variiert werden und wird aus Tabellen bestimmt. Durch zwei gegenläufig drehende Wellen heben sich die horizontalen Komponenten auf. Bei schweren Fundamenten muß für ausreichend große Kräfte mit harmonischer Erregung gearbeitet werden.

Bei der Impulserregung wird das Fundament mit einem Schlag angeregt. Als Nachteile sind die geringe maximale Erregerkraft und die schlechte Anregung im tieffrequenten Bereich zu nennen. Vorteilhaft sind die leichte und tragbare Ausrüstung und die außerordentlich schnelle Versuchsdurchführung.

## Experimentelle Meßausrüstung

Zur Durchführung von Impedanzmessungen werden eine Anlage zur Meßdatenerfassung, mehrere Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitsaufnehmer und ein Impulshammer oder ein harmonischer Erreger benötigt. Zur Aufnahme der Fundamentalschwingungen werden zur Erfassung der Schwinggeschwindigkeiten Geophone oder zur Erfassung der Schwingbeschleunigungen Beschleunigungsaufnehmer verwendet. In der nachfolgenden, kurzen Beschreibung sollen die wesentlichen Ausstattungsmerkmale genannt werden, aus denen sich ein Meßdatenerfassungssystem zusammensetzt.

Die Fundamentalschwingungen werden durch die Aufnehmer in elektrische Signale umgewandelt und zum Eingang des Meßverstärkers geleitet, wo sie durch eine regelbare Verstärkung dem eingestellten Meßbereich des Systems angepaßt werden. Die Verstärkung dient einer optimalen Auflösung und sollte in möglichst kleinen Stufen einzustellen sein. Die Eingänge von hochwertigen Verstärkern sind differentiell und galvanisch getrennt, was zu vollkommen potentialgetrennten Meßkanälen führt. Nach der Verstärkung werden die noch analogen Signale in einem Analog/Digital-Wandler (A/D) in digitale Worte umgewandelt. Ist nur ein Wandler vorhanden, werden die einzelnen Kanäle mit einem Meßstellenumschalter auf den A/D-Prozessor geschaltet, wobei ggf. die Schaltzeit berücksichtigt werden sollte. Dieser Analog-Digital-Wandler bestimmt durch seine Summenabtastrate die maximale Auflösung im Zeitbereich und durch seine Speichergröße die Genauigkeit der einzelnen Werte. Hohe Genauigkeiten mit mehr als 12 bit haben längere Wandlerzeiten zur Folge und sind im Bauwesen nicht unbedingt notwendig, s. auch Waller [11].

Eine Meßanlage für die hier vorgestellten Messungen sollte mindestens 8 Meßkanäle besitzen und einzeln schaltbare Verstärkungen bis zum Faktor 100 erlauben. Werden auch Messungen der Wellengeschwindigkeiten durchgeführt oder mehrere verschiedene Geräte angeschlossen, sollten differentiell, galvanisch getrennte Eingänge vorhanden sein. Bei Impulserregungen sollte ein pre/Trigger vorhanden sein, um automatisch mit Vorlauf auslösen zu können.

Für harmonische Erregungen können mechanische Unwuchterreger oder elektrodynamische Erreger verwendet werden, die es in allen Gewichtsklassen gibt. Für die Impulserregung gibt es Impulshammer mit einem Gewicht von etwa 100 g bis 6 kg oder auch Schlageinrichtungen mit Impedanzmeßkopf. Ein Seite des Hammerkopfes besitzt eine Kraftmeßdose, auf die eine auswechselbare Schlagkalotte aufgeschraubt wird, mit der geschlagen wird.

Die maximale Kraft wird durch den Meßbereich der Kraftmeßdose begrenzt. Mit dem Hammer werden 3 bis 4 Schlagkalotten aus verschiedenen Materialien geliefert, mit denen die Impulsdauer und damit die angeregten Frequenzen beeinflußt werden können. Auf der der Kraftmeßdose gegenüberliegenden Seite des Hammerkopfes kann eine Zusatzmasse aufgeschraubt werden, die die Kraftamplitude aufgrund des schwereren Hammerkopfes vergrößert. Das Signal der Kraftmeßdose wird in einem Ladungsverstärker verstärkt und in eine Spannung umgewandelt.

## Versuchsdurchführung und Auswertung

Das Fundament wird erregt und bei einer Auswertung für alle 6 Freiheitsgrade wird mindestens an 3 Stellen die vertikale und an 3 Stellen die horizontale Fundamentalschwingung gemessen. Bei der Ermittlung von Impedanzen wird als Bezugspunkt der Mittelpunkt der Sohlfläche des Fundamentes gewählt. Aus den aufgenommenen Schwingbeschleunigungen oder Schwinggeschwindigkeiten wird der Verschiebungsvektor für diesen Bezugspunkt berechnet.

Bei harmonischer Erregung wird sukzessive jede einzelne Frequenz angeregt und der stationäre Zustand gemessen. Dann werden aus dem Verhältnis zwischen der Kraftamplitude und der Verschiebungsamplitude des Bezugspunktes unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung die Steifigkeit und die Dämpfung berechnet.

Bei Impulserregung genügt theoretisch ein Schlag, mit dem gleichzeitig mehrere Frequenzen angeregt werden. Die Zeitverläufe der Erregung und der Schwingung des Bezugspunktes werden in den Frequenzraum transformiert. Nach Gleichung (4) können dann die Impedanzen berechnet werden. Die frequenzabhängigen Federsteifigkeiten sind die Realteile, die Dämpfungsterme sind die Imaginärteile der komplexen Impedanzmatrix. Nach einer Division der Imaginärteile durch die entsprechende Kreisfrequenz können diese als Dämpfungskoeffizienten bezeichnet werden.

Bei Impulserregungen wird jedoch davon ausgegangen, daß bei jeder Messung zufällige Fehler enthalten sind. Dazu zählen z.B. Ungenauigkeiten beim Schlagen mit dem Hammer (Ort und Winkel) oder zufällige Störungen aus der Umgebung. Bei der Auswertung im Frequenzraum können zufällige Fehler mit den Mitteln der Spektralanalyse entweder aus der Erregung oder aus der Antwort des Systems entfernt werden, wenn genügend viele Messungen durchgeführt werden. Die Durchführung beider Berechnungen führt zu zwei dynamischen Steifigkeiten, die gleichzeitig die Konfidenzintervalle - also die obere und untere Grenze - für zufällige Fehler bilden; s. z.B. Natke [8], Brüel & Kjaer [2].

Die maximale Amplitude der Impulserregung wird durch den Meßbereich des Kraftaufnehmers des Impulshammers begrenzt. Die Amplitude der Kraft wird über die Schlaggeschwindigkeit und auswechselbare Zusatzmassen variiert. Mit Schlagkalotten verschiedener Materialien kann die Impulsdauer und damit der Frequenzinhalt beeinflußt werden. In Bild 1 sind oben die Zeitverläufe von vertikalen Schlägen mit verschiedenen Schlagkalotten und unten die entsprechenden vertikalen Zeitverläufe der Schwingbeschleunigungen des Fundamentes dargestellt. In Bild 1a wurde eine harte, in Bild 1b eine weiche Schlagkalotte verwendet. In Bild 1c wurde mit einer weichen Schlagkalotte und einer Zusatzmasse erregt, was bei zu leichten Fundamenten - wie in diesem Fall - zu Doppelschlägen führen kann, die die Messung unbrauchbar machen. Weiche Schläge haben einen flachen Zeitverlauf, enthalten vergleichsweise niedrige Frequenzen und zeigen einen meist exponentiellen Leistungsabfall mit zunehmender Frequenz. Harte Schläge sind spitz und kurz, enthalten hohe Frequenzen und fallen eher linear mit zunehmender Frequenz ab.

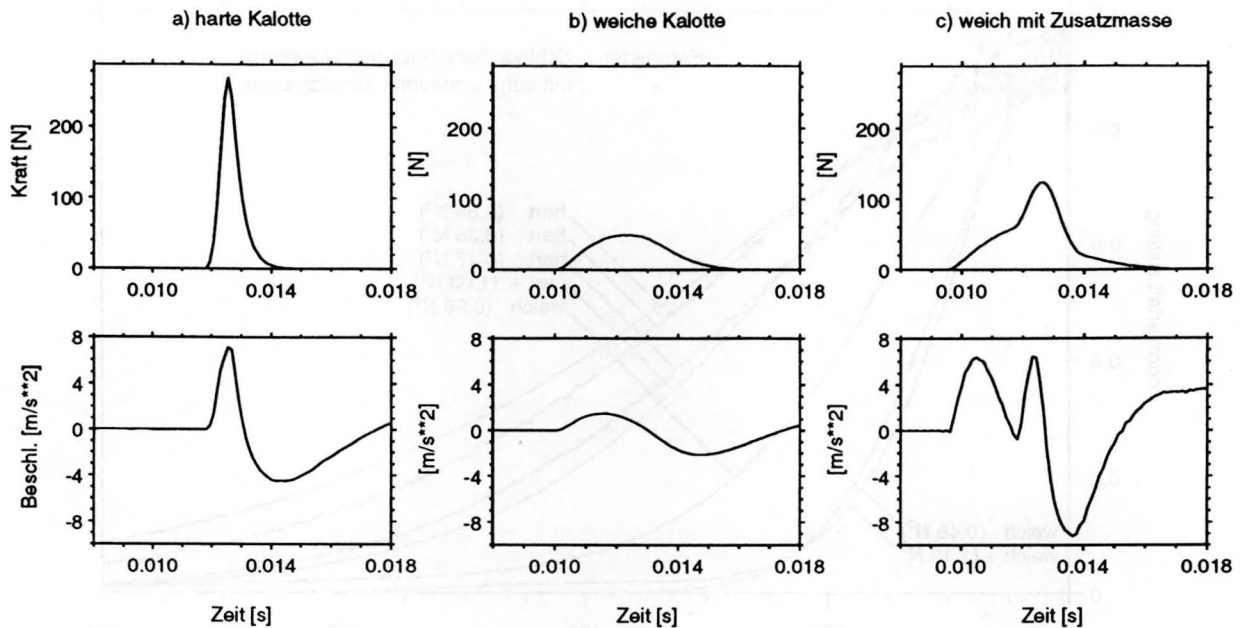


Bild 1 oben: Zeitverläufe von vertikalen Erregungen mit dem Impulshammer und verschiedenen Schlagkalotten und Zusatzmasse  
 unten: Zeitverläufe der entsprechenden vertikalen Fundamentbeschleunigungen

In Bild 2 sind die auf die maximale Leistung normierten Leistungsspektren von Schlägen mit 2 verschiedenen Schlagkalotten mit und ohne Zusatzmasse dargestellt. Das Leistungsspektrum stellt die auf die Frequenz bezogenen leistungsäquivalenten Anteile einer Zeitfunktion dar; als Parameter wurden die Art der Schlagkalotte und die maximale Leistung aufgetragen. Eine höhere maximale Leistung bei gleicher Schlagkalotte entspricht einer höheren Auftreffgeschwindigkeit des Hammerkopfes, also einem stärkeren Schlag. Es läßt sich erkennen, daß mit zunehmender Auftreffgeschwindigkeit bei gleicher Kalotte höhere Frequenzen in den Schlägen enthalten sind. Weiterhin ist der mit zunehmender Frequenz stärkere Leistungsabfall bei Erregung mit der weichen Kalotte zu erkennen. Mit der Zusatzmasse, die im Bild mit einem "+"-Zeichen gekennzeichnet ist, wird die Energie im tiefrequenten Bereich konzentriert und eine größere Kraftamplitude erreicht. Mit dem Hammer können auch horizontale Schläge aufgebracht werden, so daß alle Schwingungsformen angeregt werden können.

## Meßergebnisse

Abschließend werden einige Ergebnisse durchgeführter Impedanzmessungen auf dem Gelände der BAM in Horstwalde an einem Versuchsfundament an der Oberfläche vorgestellt. Die Grundfläche des Fundamentes betrug  $1\text{m}^2$ , die Masse  $1250\text{kg}$ . Im Vorfeld wurden Laufzeitmessungen und Dispersionsmessungen mit Oberflächenwellen durchgeführt, um die tiefenabhängigen dynamischen Bodenkennwerte zu ermitteln. Im Versuchsgelände steht ein Sandboden an mit einer Scherwellengeschwindigkeit, die innerhalb der ersten 3 Meter von 70 bis etwa  $240\text{m/s}$  ansteigt, dann wieder abnimmt und ab 6 m Tiefe bei  $220\text{m/s}$  liegt. Die Poissonzahl ergab sich etwa zu 0,32.

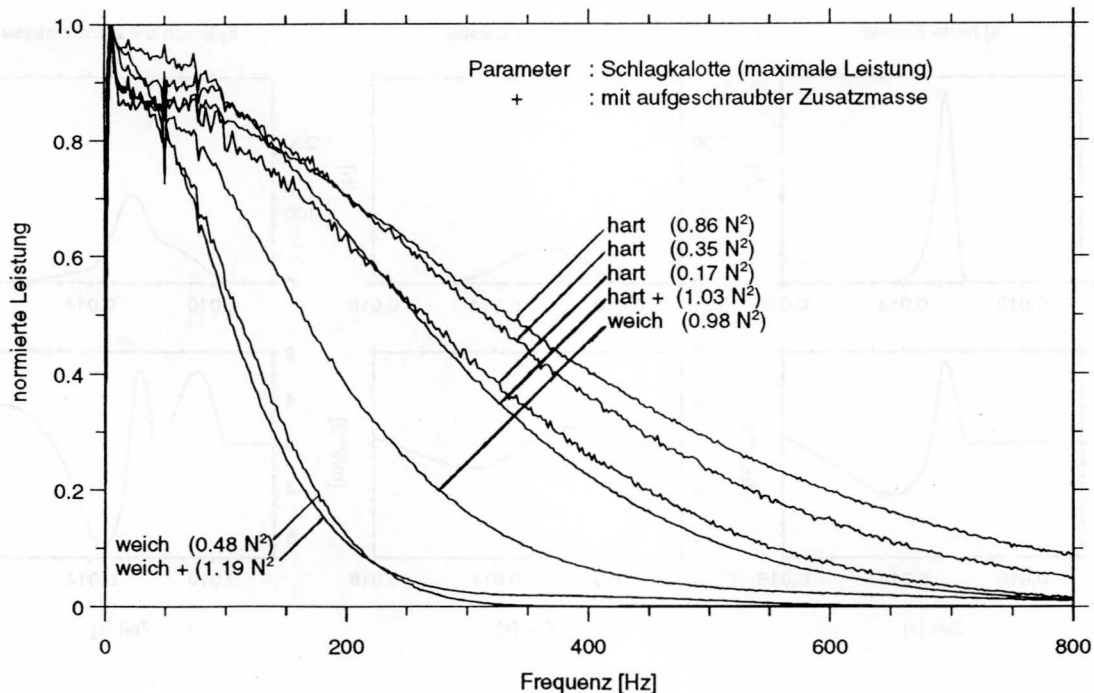


Bild 2 Vergleich der Leistungsspektren der Erregungen mit verschiedenen Schlagkalotten; Normierungsgröße: maximale Leistung in N<sup>2</sup>

Bild 3 zeigt einen Vergleich der aus 3 Meßreihen ermittelten vertikalen Federsteifigkeiten. Die vertikale Eigenfrequenz betrug 45 Hz. Bei der Meßreihe 1 (Mr1) wurde mit einem Impulshammer mit 5,4 kg mit einer weichen Schlagkalotte, bei der Meßreihe 2 (Mr2) mit einer harten Schlagkalotte erregt. Beide Meßreihen setzen sich aus 5 Einzelmessungen zusammen. Bei der Meßreihe 3 (Mr3) wurde mit einem elektrodynamischen Erreger mit 10 kg bewegter Masse harmonisch erregt. Der Erreger wurde in einem Gipsbett aufgestellt.

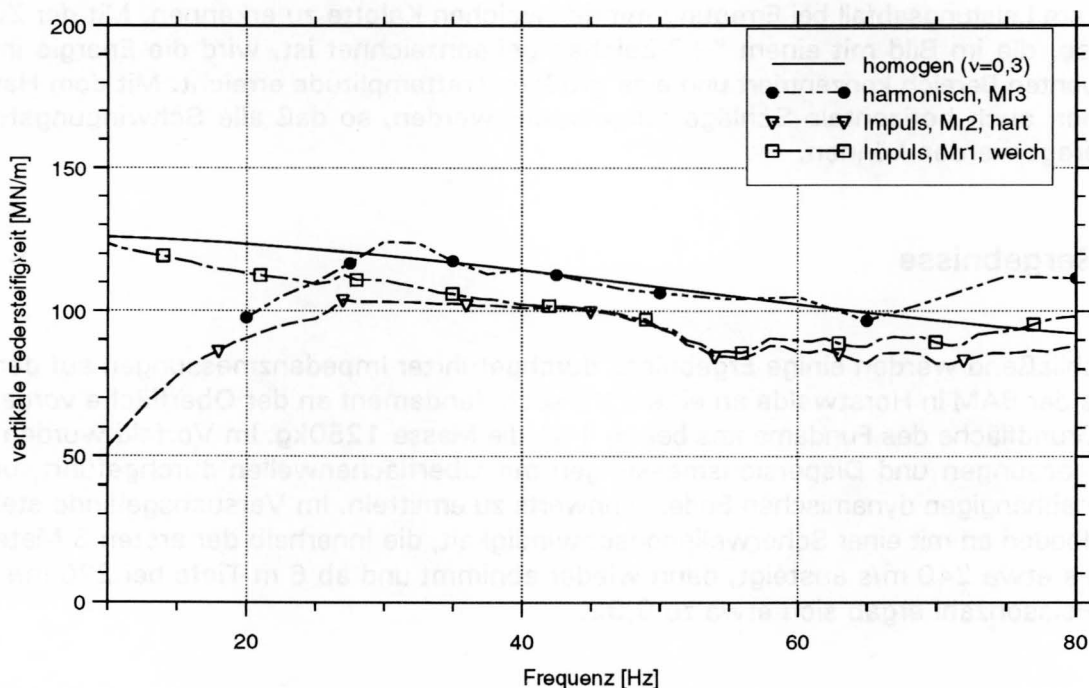


Bild 3 Vertikale Federsteifigkeiten eines Versuchsfundamentes in Horstwalde

Die Meßreihe 1 liefert aufgrund der tieffrequenten Anregung von 10 bis etwa 70 Hz gültige Werte für die Federsteifigkeiten, die Meßreihe 2 ist von etwa 25 bis 100 Hz gültig. Typisch ist der Bereich in der Nähe der Eigenfrequenz bei 45 Hz, in dem beide Erregungen nahezu identische Werte liefern.

Bei der harmonischen Erregung der Meßreihe 3 wurden für die Federsteifigkeiten bei qualitativ gleichem Verlauf bis 90 Hz um etwa 10 % höhere Steifigkeiten berechnet als mit den Impulserregungen; die Erregung mit 10 kg erwies sich als zu gering im niedrigen Frequenzbereich. Durch die Aufstellung im Gipsbett wurden die Erregungen vermutlich etwas gedämpft, was zu höheren Steifigkeiten führt. Bei der Impulserregung können sich jedoch durch die im Gegensatz zur harmonischen Erregung hohen Spitzenkräfte geringfügig kleinere Steifigkeiten ergeben.

In Bild 4 sind die nur mit Impulserregungen ermittelten horizontalen Federsteifigkeiten mit der Meßreihe 4 in x-Richtung und 5 in y-Richtung dargestellt. Die Eigenfrequenz in horizontaler Richtung betrug 22 Hz. Bei den Steifigkeiten ergaben sich für die y-Richtung um 5 bis 10 % geringere Werte als für die x-Richtung, nur im Bereich der Eigenfrequenz sind beide Verläufe identisch. Schon geringe Unregelmäßigkeiten in der Aufstellung und kleine laterale Inhomogenitäten des Bodens können bei der horizontalen Schwingungsform zu diesen Abweichungen führen.

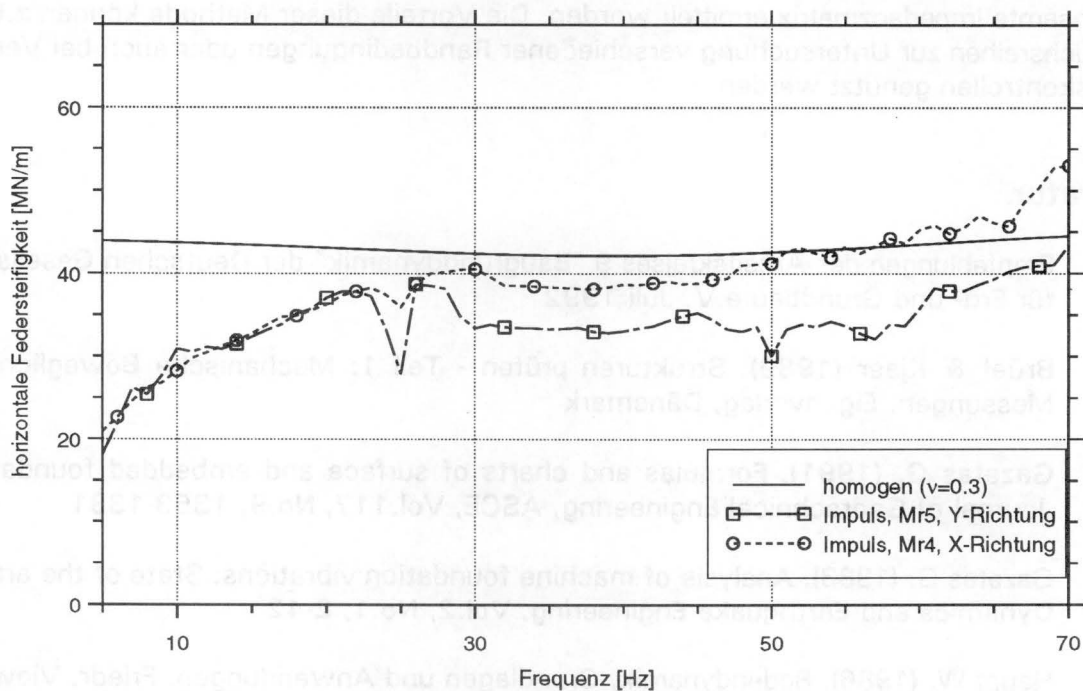


Bild 4 horizontale Federsteifigkeiten eines Versuchsfundamentes in Horstwalde

Unter Berücksichtigung des Verlaufs der Bodensteifigkeiten über die Tiefe können die ausgewerteten Federsteifigkeiten näherungsweise mit Ergebnissen numerischer Berechnungen von Sarfeld [9] für ein quadratisches Fundament auf dem homogenen Halbraum verglichen werden. Dabei wurde mit einer Poissonzahl von 0,30 und mit einer repräsentativen Scherwellengeschwindigkeit von 156 m/s für die vertikale und mit 100 m/s für die horizontale Schwingungsform gerechnet. Die mit diesem vereinfachten Modell berechneten Federsteifigkeiten sind nur Abschätzungen, stimmen jedoch für beide Schwingungsformen gut mit den gemessenen Werten überein.

Die gemessenen Dämpfungen werden nicht dargestellt da keine einfachen Vergleichsrechnungen durchgeführt werden können. Ansonsten müßte das vorliegende Bodenprofil exakt

berücksichtigt werden, was sehr umfangreiche numerische Berechnungen notwendig machte, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

Die Frequenzbereiche, in denen für Impedanzwerte zuverlässige Ergebnisse mit Impulserregungen erzielt werden können, sind von Schlagcharakteristik, Masse des Fundamentes und Schwingungsform abhängig und können mit verschiedenen Funktionen abgeschätzt werden.

## Schlußfolgerungen

Die Gründungen von dynamisch erregten Fundamenten können mit dem Einmassenschwinger mit frequenzabhängigen Federn und Dämpfern - sog. Impedanzwerten - modelliert werden. Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Ermittlung dieser Impedanzwerte aufgezeigt. Bei komplexen Randbedingungen kann auf Experimente an einem Versuchsfundament oder aufwendige Bodenuntersuchungen mit anschließenden numerischen Berechnungen nicht verzichtet werden. Die Erregung des Fundamentes kann harmonisch oder impulsartig aufgebracht werden. Die Versuchsdurchführung mit Impulserregung zeigt sich bei richtiger Anwendung als schnelles und zuverlässiges Verfahren, das durch den Verzicht auf Schwingererregung auch kostengünstig ist. In diesem Bericht wurden beispielhaft die translatorischen Federsteifigkeiten gezeigt. Bei Anregung aller Schwingungsformen kann jedoch die gesamte Impedanzmatrix ermittelt werden. Die Vorteile dieser Methode können z.B. bei Versuchsreihen zur Untersuchung verschiedener Randbedingungen oder auch bei Verdichtungskontrollen genutzt werden.

## Literatur

- [1] Empfehlungen des Arbeitskreises 9 "Baugrunddynamik" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Juli 1992
- [2] Brüel & Kjaer (1989). Strukturen prüfen - Teil 1: Mechanische Beweglichkeitsmessungen. Eigenverlag, Dänemark
- [3] Gazetas G. (1991). Formulas and charts of surface and embedded foundations. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.9, 1363-1381
- [4] Gazetas G. (1983). Analysis of machine foundation vibrations: State of the art. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.2, No.1, 2-42
- [5] Haupt W. (1986). Bodendynamik, Grundlagen und Anwendungen. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig
- [6] Holzlöhner U. (1977). Setzungen von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn. BAM-Bericht Nr.48
- [7] Hossdorf H. (1971). Modellstatik. Bauverlag - Wiesbaden und Berlin
- [8] Natke H.G. (1988). Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden:
- [9] Sarfeld W. (1991). Numerische Verfahren zur Boden-Bauwerk-Interaktion. Veröffentlichung des Grundbauinstituts der TU-Berlin, Heft 22



- [10] Studer J. und Ziegler A. (1986). Bodendynamik, Grundlagen, Kennziffern, Probleme. Springer-Verlag, Berlin
- [11] Waller H. und Schmidt R. (1989). Schwingungslehre für Ingenieure - Theorie, Simulation, Anwendungen. BI Wissenschaftsverlag Mannheim/Wien/Zürich.

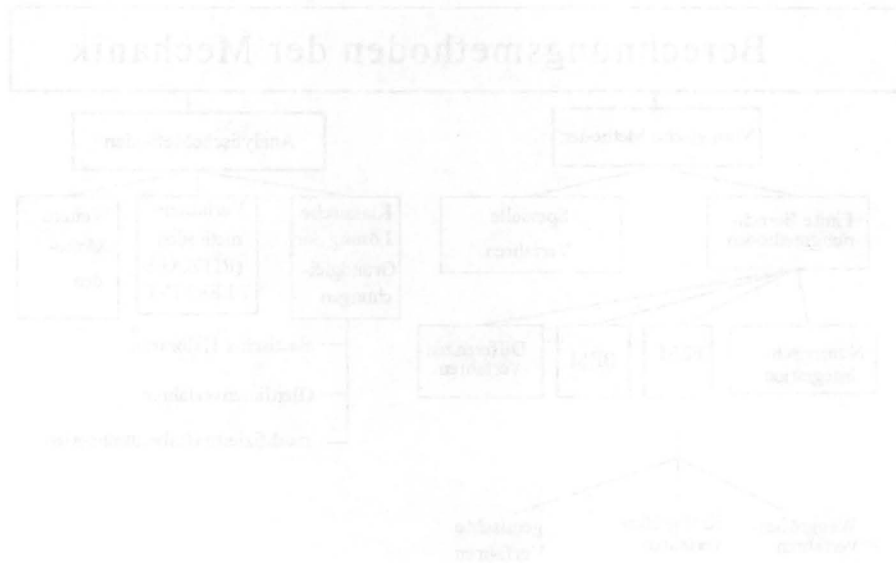


Abb. 1: Rechenverfahren der Mechanik

Das Rechenverfahren, welches die Spannungen und Verformungen im Bodenbereich...

Die Spannungs-Verformungs-Beziehungen zwischen den Bodenpartikeln...

Die Spannungs-Verformungs-Beziehungen zwischen den Bodenpartikeln...

#### Aufgabe der Bodenmechanik

Die Aufgabe der Bodenmechanik besteht darin, die Spannungs-Verformungs-Beziehungen...

Die Bedeutung der Bodenmechanik für die Bautechnik ist unbestritten...

In der Bodenmechanik sind zwei Hauptbereiche zu unterscheiden...