

# BACHELORARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

„Bachelor of Engineering“

im Fach Bauingenieurwesen

## **Entwicklung eines Shake-Tables zur dynamischen Untersuchung von Bauwerksmodellen**

**Development of a shake table for the dynamic analysis of  
building models**

**Meruan Mahmud**

Matrikelnummer:  
Fachbereich:  
Fachrichtung:  
Abgabetermin:

965964  
Bauen + Leben  
Bauingenieurwesen  
11.09.2024

Aufgabensteller und Betreuer: Prof. Dr. Yannick Broschart



Meruan Mahmud

## **Entwicklung eines Shake-Tables zur dynamischen Untersuchung von Bauwerksmodellen**



## **Vorwort**

Diese Bachelorarbeit entstand im Rahmen meines Studiums im Fachbereich Bauingenieurwesen an der Hochschule Trier.

Ich möchte die Gelegenheit nutzen, um all jenen zu danken, die mich während der Anfertigung des Modells und des Schreibens dieser Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Yannick Broschart, der mir bei der Entwicklung des Shake-Tables mit wertvoller Anregung und konstruktivem Feedback zur Seite stand. An zweiter Stelle bedanke ich mich bei Herrn Johannes Thiel und Herrn Markus Reinard, dem Team aus der Zentralwerkstatt Metallbau, welches mich bei der Umsetzung meiner Ideen mit fachlicher Beratung unterstützte und die Metallarbeiten durchführte. Ebenso gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Michael Reichert vom Labor für Elektrotechnik für seine Hilfestellung bei der Entwicklung des Elektromotorkonzepts. Ein herzlicher Dank gilt auch meinen Kommilitonen und Freunden für ihre Unterstützung und Motivation in dieser Zeit.

Besonderer Dank gilt auch meiner Familie, die mir nicht nur während der Erstellung dieser Arbeit, sondern auch während meines gesamten Studiums mit Rat, Tat und viel Geduld zur Seite stand.

Ich hoffe, dass diese Arbeit einen Beitrag zum Verständnis von dynamischen Untersuchungen von Bauwerksmodellen leisten kann und zukünftigen Interessierten als Grundlage dient.

Konz, September 2024



*„Der Weg zur Selbstverwirklichung ist der Weg der inneren Freiheit.“*

- Hermann Hesse (1877-1962), deutsch-schweizerischer Schriftsteller -



# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>iii</b>
<b>Inhalt</b>	<b>vii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>x</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeines	1
1.2 Zielstellung	2
1.3 Methodik	2
<b>2 Baudynamik</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen	3
2.2 Kinematik, Bewegung & Schwingungen	6
2.2.1 Theorie	6
2.2.1.1 Bewegung einer Punktmasse	6
2.2.2 Bewegungsformen	7
2.2.2.1 Ruhe – Statik	7
2.2.2.2 Gleichförmige Bewegung	7
2.2.2.3 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	7
2.2.2.4 Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung	8
2.2.2.5 Periodische Schwingungen	8
2.2.2.6 Harmonische Schwingungen	9
2.3 Baudynamische Berechnung	12
2.3.1 Bewegungsdifferentialgleichung - Einmassenschwinger	12
2.3.2 Mehrmassenschwinger	15
<b>3 Shake-Table</b>	<b>16</b>
3.1 Allgemeines	16
3.2 Anwendung in der Forschung	17
3.2.1 Seismische Forschung	17
3.2.2 Anwendung von Simulationsmodellen	17
3.2.3 Katastrophenvorsorge	18
3.2.4 Maschinenbau, Luft- & Raumfahrt	19
3.3 Entwicklung eines eigenen Shake-Tables	20
3.3.1 Planung	20
3.3.2 Komponenten, Materialien und Aufbau	21

<b>4</b>	<b>Prototypversuch und Messung</b>	<b>23</b>
4.1	Versuchsaufbau und Ablauf	23
4.2	Auswertung des Versuchs	24
4.2.1	Stützenmodell	25
4.2.2	Gebäudemodell – Zweimassenschwinger	25
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>27</b>
5.1	Zusammenfassung	27
5.2	Ausblick	27
<b>Literatur</b>		<b>30</b>
<b>Internetquellen</b>		<b>31</b>



## Kurzfassung

Shake-Tables sind Versuchsmodelle, die verwendet werden, um verschiedene Konstruktionen auf ihr Schwingungsverhalten zu untersuchen. Im Bausektor dienen diese, um Bauten auf Erdbebenbewegungen zu untersuchen. In anderen Ingenieursbereichen werden auch oftmals Maschinen oder einzelne Teile, welche starken Vibrationen widerstehen müssen, getestet. Da die softwarebasierte Berechnung nicht alle Faktoren berücksichtigt, ist das Rütteltischmodell eine äußerst sinnvolle Anwendung. Seit vielen Jahren bedienen sich weltweit Wissenschaftler und Forscher des Nutzens dieser.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die baudynamische Anwendung. Neben den Grundlagen der Baudynamik wird auf die Dynamik als Unterpunkt der Technischen Mechanik eingegangen und die wichtigste Berechnungsgrundlage in Form der Differentialgleichung erläutert. Darüber hinaus werden die verschiedenen Anwendungen in der Wissenschaft dargestellt und auf Grundlage der Theorie wird schließlich ein einfaches Modell eines Shake-Tables konzipiert und entwickelt.

Um die Funktion des Prototyps zu prüfen, wurde ein einfacher Versuch mit verschiedenen Bauwerksmodellen durchgeführt. Die Auswertung zeigt auf, dass der Shake-Table nahezu einwandfrei funktioniert und seine Aufgabe als Vorführmodell erfüllt.

## **Abstract**

Shake tables are test models used to examine various structures for vibrations. In the construction sector, they are used to test buildings for their response to earthquake movements. In other areas of engineering, machines or individual components that need to withstand strong vibrations are often tested. Since software-based calculations do not take all factors into account, the shake table model is an extremely useful tool. Scientists and researchers around the world have been using it for many years.

The present work focuses on the application in structural dynamics. In addition to the basics of structural dynamics, dynamics as a subsection of engineering mechanics are discussed, and the most important basis for calculation - the differential equation - is explained. Furthermore, the various applications in science are presented, and finally, a simple model of a shake table is designed and developed based on the theory.

To test the functionality of the prototype, a simple experiment was conducted using various building models. The evaluation shows that the shake table works almost flawlessly and fulfills its purpose as a demonstration model.



## 1 Einleitung

### 1.1 Allgemeines

Die moderne Welt ist durch ständigen Wandel geprägt. Sämtliche Prozesse und Entwicklungen, ob sie nun natürlichen Ursprungs sind oder auf menschliches Handeln zurückzuführen, unterliegen einer zeitlichen Dimension. Bauwerke sind kontinuierlich dynamischen Einwirkungen ausgesetzt, die ihre Stabilität und Sicherheit beeinflussen können.

Im Bereich der Baudynamik wird daher die Interaktion zwischen Baukonstruktionen und zeitlich veränderlichen Lasten untersucht. Die Berechnung der zeitabhängigen Veränderungen von Bauwerken erfordert eine Erweiterung der statischen Methoden. Lasten wie Erdbeben oder Wind sind nicht als konstante Einwirkungen zu betrachten, sondern verändern sich über die Zeit. Neben der häufig genutzten Finite-Elemente-Methode (FEM) kommen sogenannte Shake-Tables zum Einsatz, um das Verhalten von Konstruktionen unter dynamischen Lasten zu analysieren. Diese Versuchsanlagen stellen eine zentrale Methode dar, um das Verhalten von Baukonstruktionen unter realitätsnahen Bedingungen zu simulieren. Insbesondere in seismisch aktiven Regionen wie Japan werden Shake-Tables seit Jahren eingesetzt, um neue Verfahren zum Schutz von Bauwerken vor seismischen Einwirkungen zu entwickeln und eine erdbebensichere Bauweise zu ermöglichen.

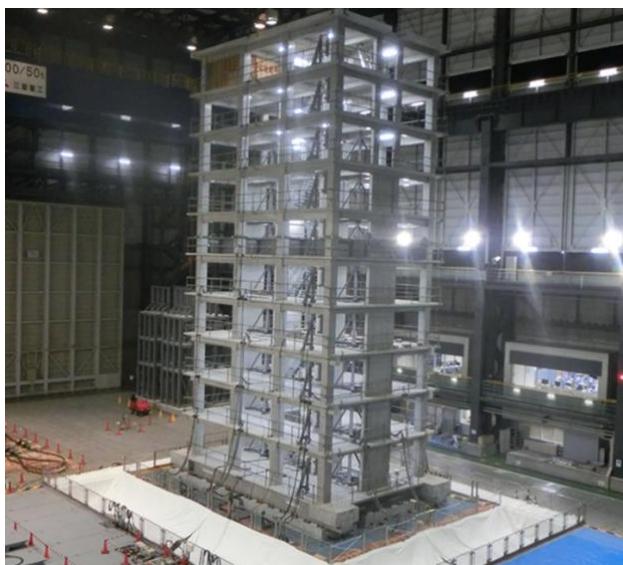


Abb. 1.1: 10-stöckige Stahlbetonkonstruktion auf dem „E-Defense“ Shake Table in Japan (Kobe Convention Bureau, 2024)

Verwendete Quellen: [1], [3]

## 1.2 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Grundlagen der Baudynamik zu erläutern und deren Anwendung auf die Entwicklung eines Shake-Tables zu beschreiben. Der Leser soll ein grundlegendes Verständnis der baudynamischen Berechnung erlangen und das Funktionsprinzip eines Shake-Tables kennenlernen.

## 1.3 Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst die grundlegenden Prinzipien der Baudynamik dargestellt. Sie wird als Teilgebiet der Technischen Mechanik, neben der Festigkeitslehre und der Statik, erläutert. Dabei wird aufgezeigt, welche Arten von Konstruktionen besonders anfällig für bestimmte dynamische Einwirkungen sind und daher einer gesonderten baudynamischen Untersuchung bedürfen.

Auf Basis der Ort-Zeit-Funktion werden die kinematischen Größen abgeleitet und deren Bedeutung für die Baudynamik erklärt. In diesem Zusammenhang werden verschiedene Bewegungsformen von Schwingungen dargestellt. Anschließend wird die zentrale Methode der baudynamischen Berechnung erläutert: die Differentialgleichung, die das Verhalten von Ein- und Mehrmassenschwingern beschreibt. Zudem wird das Phänomen der Eigenfrequenz und dessen Auswirkungen auf Bauwerke eingehend erörtert.

Nachdem die theoretischen Grundlagen gebildet wurden, erfolgt eine detaillierte Darstellung des Shake-Tables. Zunächst wird dessen Einsatz in verschiedenen Forschungsfeldern beschrieben, gefolgt von einer schrittweisen Beschreibung der Entwicklung eines Prototyps, von der Planung bis zur Realisierung des Modells.

Abschließend wird die Funktionsfähigkeit des Shake-Tables in einem praktischen Versuch überprüft. Die Testergebnisse, die auf Messungen und Videoaufzeichnungen basieren, werden dargestellt. Die verschiedenen Testobjekte verdeutlichen die unterschiedlichen Reaktionen von Baukonstruktionen auf verschiedene Schwingungsfrequenzen.

## 2 Baudynamik

### 2.1 Grundlagen

Die Lehre der Dynamik beschreibt die Bewegung und die für diese verantwortlichen Kräfte eines Systems in Abhängigkeit von der Zeit und der Frequenz. Es gibt verschiedene Einteilungen der Dynamik; jedoch für die Baudynamik maßgebend ist die Unterordnung in der Technischen Mechanik. Die drei Segmente der Technischen Mechanik bilden die Statik, die Dynamik und die Festigkeitslehre.

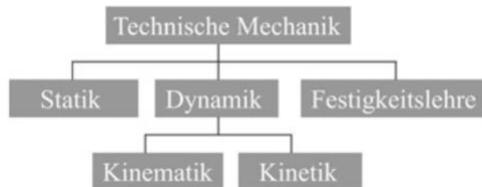


Abb. 2.1: Einteilung der Technischen Mechanik (Proske, 2021)

Die Statik stellt so gesehen einen Sonderfall der Dynamik dar. Ein idealisierter Zustand von ruhenden Körpern und Kräften im Gleichgewicht, wie zum Beispiel eine Nutzlast in einem Bürogebäude in Form von jahrelang stationären Möbeln, ist statisch sinnvoll ansetzbar. Bei der Windlast, die sich aus veränderlichen Böengeschwindigkeitsdrücken ergibt, wird in Berechnungen dennoch vereinfacht eine statische Last angenommen, da diese linearisiert werden kann. Die Dynamik beschreibt, in der Technischen Mechanik untergeordnet, explizit die Kinematik, also die geografische Bahn eines bewegten Körpers, und die Kinetik, also die zurückgelegte Bahn unter Berücksichtigung einwirkender Kräfte.

Im Bauwesen sind vor allem die aus der Trägheitswirkung der Massen resultierenden Bewegungen in Form von Schwingungen maßgeblich, die durch Flieh-, Schwung- und Massenkräfte verursacht werden.

Um diese dynamischen Einwirkungen in statischen Nachweisen einzubringen, nutzt man oftmals eine statische Ersatzkraft, auch „Dynamischer Lasterhöhungsfaktor (DLF)“ oder Schwungfaktor genannt. So kann zum Beispiel eine Verkehrslast einkalkuliert und der Lasterhöhungsfaktor durch verschiedene Maßnahmen, wie beispielsweise eine Geschwindigkeitsbegrenzung, gesteuert werden.

Eine allgemeine Gliederung der Lasten, auf die eine Baukonstruktion dynamisch reagiert, lässt sich wie folgt strukturieren:

- Harmonische Lasten (z.B. Wind, Schnee, Eigengewicht)
- Transiente Lasten (z.B. Erdbeben, Böen, Stoß)
- Impulsanregungen (z.B. Anprall, Explosion)

Starke, energetische Einwirkungen, wie ein Erdbeben hoher Intensität, können nicht mit solchen Lasterhöhungsfaktoren eingerechnet werden und es sind strengere, baudynamische Analysen notwendig. Eine realistische Erfassung der einwirkenden Lasten nach Ausmaß der Stärke und des zeitlichen Verlaufs ist problematisch, ebenso

wie die Aufzeichnung der elastisch-plastischen Formänderungs- und Dämpfungseigenschaften. Daher erstellt man, mit Unterstützung numerischer Verfahren, eine Schwingungsanalyse, welche alle Einflussgrößen mit einbezieht und ein realitätsnahe Ergebnis liefert. Somit kann der Bauingenieur eine rechnerische Bemessung erstellen und ein betriebsfestes Bauwerk errichten. Sanierungen dynamisch labiler Bauten sind schwierig, kostspielig und sollten vermieden werden.

Insbesondere bei folgenden Konstruktionsarten ist es sinnvoll, dynamische Einwirkungen zu berücksichtigen:

- Leichte, schwingungsanfällige Konstruktionen mit geringer Steifigkeit (z.B. Seilstrukturen, temporäre Strukturen),
- Unter dauerndem, regelmäßigem oder unregelmäßigem Einfluss von Schwingungen stehende Konstruktionen (z.B. Kirchtürme, Fußballstadien, Maschinenhallen, Ölplattformen),
- Konstruktionen unter Verkehrslasten (z.B. Brücken).



Abb. 2.2: Abraumförderbrücke

(Proske, 2021)



Abb. 2.3: Schrägkabelbrücke in Brasilien

(Proske, 2021)



Abb. 2.4: Erdölplattform in Brasilien

(Proske, 2021)



Abb. 2.5: Fußballstadion

(Proske, 2021)

Also kann man eine dynamische Berechnung sowohl von der Art der Einwirkung als auch von der Art des Tragwerkes abhängig machen. Im Folgenden ist eine Auflistung verschiedener Bauwerke dargestellt, die eine explizite baudynamische Untersuchung erfordern.

	Nutzungsdauer	Einwirkungen	Eigenlastanteil
Eisenbahnbrücken	Lang	Periodisch (Verkehrslasten)	Mittel bis Hoch
Strassenbrücken (zunehmend)	Lang	Periodisch (Verkehrslasten)	Mittel bis Hoch
Kranbrücken	Mittel		Gering
Hängebrücken	Mittel bis lang		Gering
Seilverspannte Konstruktionen	Mittel		Gering
Fussgängerbrücken	Mittel bis lang		Gering
Förderanlagen	Mittel (teilweise beweglich)		Gering
Seilbahnen	Mittel		Gering
Fliegende Bauten	Kurz		Gering
Glockentürme	Lang	Periodische	Hoch
Schornsteine, Masten, Turmtragwerke	Mittel	Periodisch (Wind)	Mittel
Windkraftanlagen	Mittel	Periodisch (Wind)	Gering bis Mittel
Wehrkörper und Wehrverschlüsse	Lang		Hoch
Rohrleitungen (Dampfstöße)	Kurz bis mittel		Gering
Tragwerke in bewegter See (Ölplattformen)	Mittel	Periodisch (Wellen)	Mittel
Anprallkonstruktionen	Mittel bis lang	Impulseinwirkung	Hoch
Schutzzäume (Bunker)	Lang bis sehr lang	Impulseinwirkung	Hoch
Kerntechnische Anlagen	Mittel bis lang		Hoch
Tragwerke in Erdbebenzonen	Mittel bis lang		Mittel bis Hoch
Stadien	Mittel		Mittel
Ultraleichte Konstruktionen	Kurz		Sehr Gering

Abb. 2.6: Auswahl von Tragwerken mit der Berücksichtigung dynamischer Effekte (Proske, 2021)

Verwendete Quellen: [1], [2], [3]

## 2.2 Kinematik, Bewegung & Schwingungen

### 2.2.1 Theorie

Wie zuvor beschrieben ist die Kinematik ein Bestandteil der Dynamik; sie befasst sich jedoch nicht mit den Kräften, Massen, Impulsen oder der Energie, sondern lediglich mit den physikalischen Größen Zeit, Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung.

Diese stehen in einer Verbindung, die im Folgenden erklärt wird. Außerdem sind diese physikalischen Parameter wichtiger Bestandteil der dynamischen Berechnungen, welche nachfolgend erläutert werden.

Eine Schwingung entsteht durch eine zeitlich wiederkehrende Abweichung einer Kenngröße von einem Grund- oder Ruhewert. Also bei Abweichung von Ort, Geschwindigkeit oder Beschleunigung.

#### 2.2.1.1 Bewegung einer Punktmasse

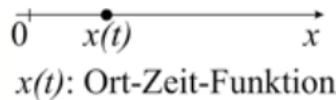


Abb. 2.7: Systemdarstellung der Bewegung einer Punktmasse (Proske, 2021)

Der Ort ist eine Funktion der Zeit (Ort-Zeit-Funktion):

$$x = x(t) \quad (2.1)$$

Die Geschwindigkeit ist die Ableitung des Ortes nach der Zeit, also die Änderung des Ortes über die Zeit:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x}, \quad (2.2)$$

Die Beschleunigung ist die zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit, bzw. die erste Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} \quad (2.3)$$

Durch Integration können Ort und Geschwindigkeit auch aus der Beschleunigung zurückgerechnet werden:

$$a_x = a_x(t) \quad (2.4)$$

$$v_x = \int a_x dt \quad (2.5)$$

$$x = \int \int a_x dt \quad (2.6)$$

Es ist auch möglich mit der Geschwindigkeit als Startwert zu rechnen und so den Ort und die Beschleunigung zu errechnen. Für exakte numerische Berechnungen sind die Startwerte, auch Integrationskonstanten genannt, notwendig, wie zum Beispiel die Initialgeschwindigkeit oder die örtliche Verschiebung eines Startpunkts.

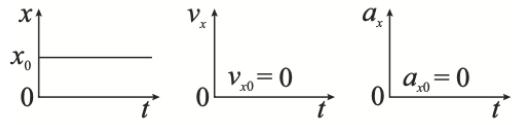
## 2.2.2 Bewegungsformen

Die vorangegangenen aufgeführten Parameter Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung können für jeden funktionalen Zusammenhang bestimmt werden. Folgend werden verschiedene Sonderfälle genannt, welche häufig auftreten oder vereinfacht in statischen Berechnungen genutzt werden.

### 2.2.2.1 Ruhe – Statik

Ein Gleichgewicht der Kräfte, mathematisch mit einem konstanten Ort, welcher nicht zeitabhängig ist und es herrscht ein Ruhezustand – das Bauteil bewegt sich nicht.

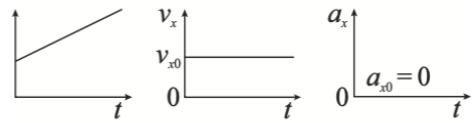
Abb. 2.8: Orts-Zeit-, Geschwindigkeits-Zeit- und Beschleunigungs-Zeit-Funktion der Ruhe (Proske, 2021)



### 2.2.2.2 Gleichförmige Bewegung

Die nächsthöhere Bewegungsform kennzeichnet sich dadurch, dass es keine Geschwindigkeitsänderung gibt – der Ort verändert sich über die Zeit.

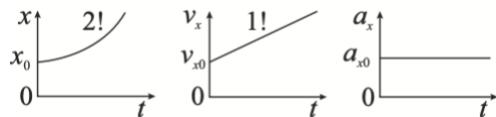
Abb. 2.9: Orts-Zeit-, Geschwindigkeits-Zeit- und Beschleunigungs-Zeit-Funktion der gleichförmigen Bewegung  
(Proske, 2021)



### 2.2.2.3 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Die nächsthöhere Bewegungsform weist keine Beschleunigungsänderung auf – der Ort und die Geschwindigkeit verändern sich über die Zeit. Beide physikalischen Größen folgen hier einem Polynom.

Abb. 2.10: Orts-Zeit-, Geschwindigkeits-Zeit- und Beschleunigungs-Zeit-Funktion der gleichmäßig beschleunigten Bewegung (Proske, 2021)



#### 2.2.2.4 Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung

Diese Bewegungsform ist in der Baudynamik im Vergleich zu den vorher genannten Sonderfällen von größerer Bedeutung. Sie stellt alle gängigen dynamischen Einwirkungen dar, wie zum Beispiel Erdbeben, Windlasten, Lasten aus Wellen, Gehbewegungen und Fahrzeugbewegungen.

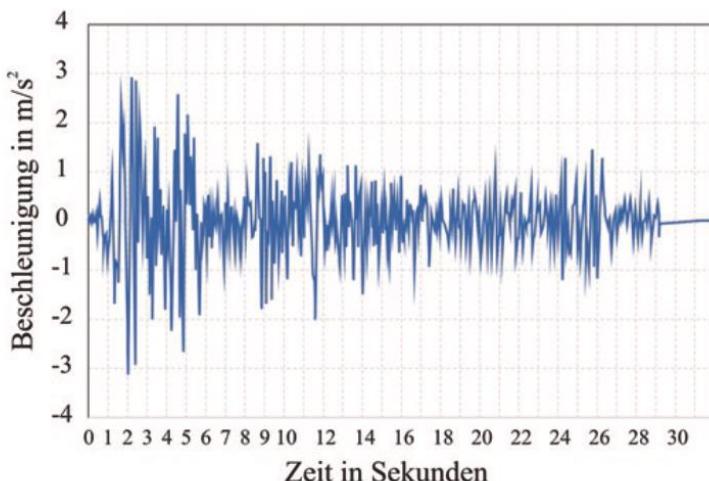


Abb. 2.11: Boden-Beschleunigungs-Zeit-Verlauf beim El Centro Erdbeben 1940 in Kalifornien (Proske, 2021)

Die obige Abbildung 2.11 zeigt einen Beschleunigungs-Zeit-Verlauf für eine Erdoberfläche. Man erkennt sofort, dass es keine Funktion mit regelmäßigen Messgrößen ist. Deutlich erkennbar ist also, dass es sich um eine ungleichmäßig beschleunigte Bewegung handelt.

#### 2.2.2.5 Periodische Schwingungen

Ungleichmäßige Beschleunigungen können aber auch Regelmäßigkeiten aufweisen. „Eine Schwingung  $x(t)$  heißt periodisch, wenn zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$  und einem  $t+nT$  ( $n=1, 2, \dots$ ) die Bedingung  $x(t)=x(t+nT)$  für  $n=1, 2, \dots$  erfüllt ist, wobei die Zeit  $T$  als die Periode der Schwingung bezeichnet wird.“ (Proske, 2021)

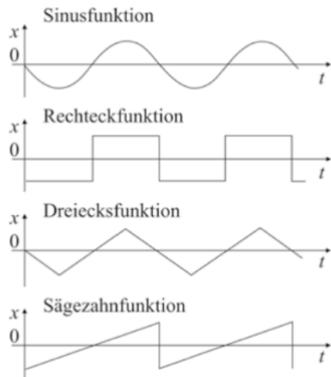


Abb. 2.12: Orts-Zeit-Funktion verschiedener periodischer Bewegungen nach Blacknick und Laubersheimer (Proske, 2021)

### 2.2.2.6 Harmonische Schwingungen

Die harmonische Schwingung nimmt lediglich die Form einer Sinus- bzw. Cosinus-Schwingung an. Eine Projektion einer Kreisbewegung stellt diese periodische Bewegung gut dar. Folgende Grafiken veranschaulichen dies gut.

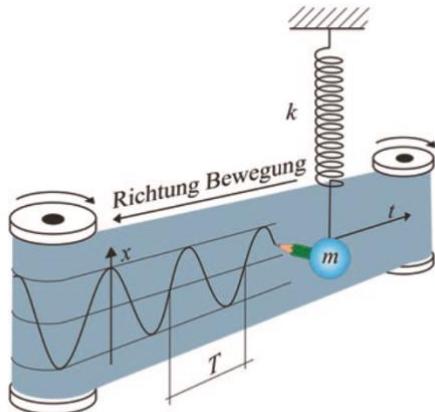


Abb. 2.13: Herleitung der harmonischen Schwingung für ein Federpendel über eine Drehbewegung nach Nagel und Rennhofer (Proske, 2021)

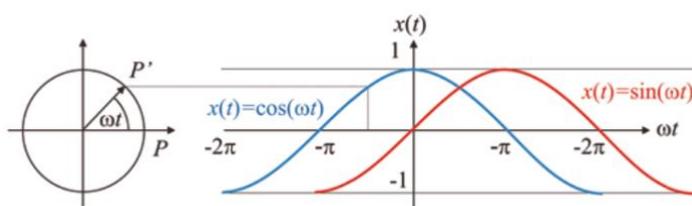


Abb. 2.14: Harmonische Schwingungen im Zeigerdiagramm nach Kolling und Steinhilber (Proske, 2021)

Sie sind außerdem eine Untergruppe der ungleichmäßig beschleunigten Bewegungen und mit der Summe der harmonischen Schwingungen lassen sich fast alle ungleichmäßigen Schwingungen abbilden.

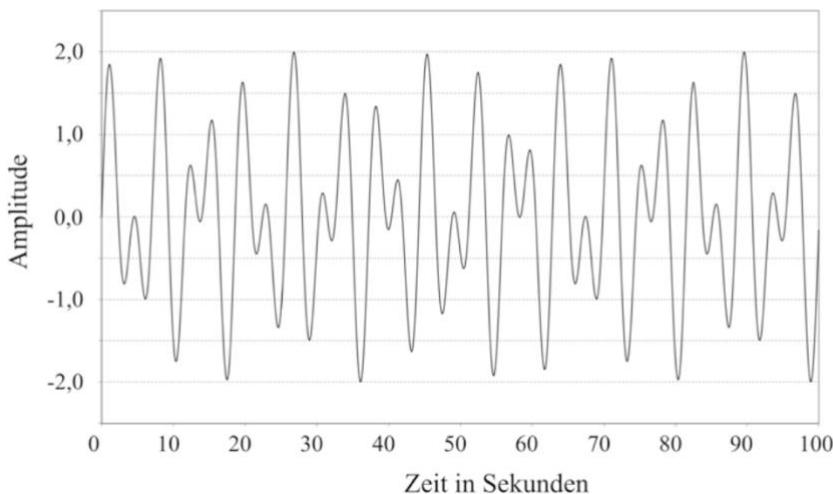


Abb. 2.15: Beispiel einer Überlagerung ( $x_{01} = 1, \omega_1 = 1, x_{02} = 1, \omega_2 = 1,7$ ; wobei  $x_m$  die Amplitude und  $\omega$  die Frequenz ist) (Proske, 2021)

Für die Transformation von harmonischen Schwingungen legt man zunächst den Funktionstyp fest, also Sinus oder Cosinus. Um die Schwingung dann zu beschreiben, fehlen dann noch:

- Amplitude,
- Frequenz,
- Phasenwinkel.

Verzichtet man auf den Phasenwinkel, kann man die Amplitude und die Frequenz in ein Amplitude-Frequenz-Spektrum übertragen.

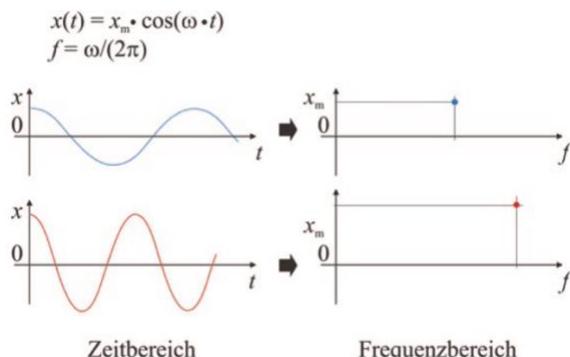


Abb. 2.16: Überführung einer harmonischen Schwingung aus dem Zeit- (links) in den Frequenzbereich (rechts) (Proske, 2021)

In Abb. 2.16 sind zwei Kosinus-Funktionen (links) in einem Amplitude-Frequenz-Spektrum abgebildet. Auf der rechten Seite werden die farbigen Punkte mit Hilfslinien aus dem Zeit- in den Frequenzbereich überführt.

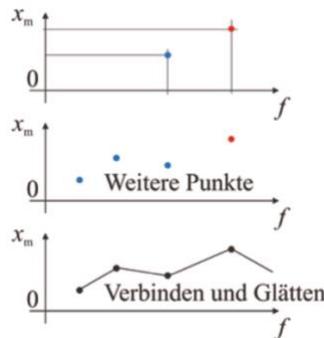


Abb. 2.17: Erstellung eines Spektrums (Proske, 2021)

Abb. 2.17 zeigt die Erstellung eines Spektrums mit mehreren, harmonischen Schwingungen. Die Punkte werden verbunden und an den Stellen, an denen Werte fehlen, geglättet. Anwendungsbeispiele wären Erdbebenspektren (Beispiel Abb. 2.18) oder Windspektren. Dies wird auch angewandt, um die geglätteten Auslegungsspektren in den verschiedenen Baunormen zu erstellen.

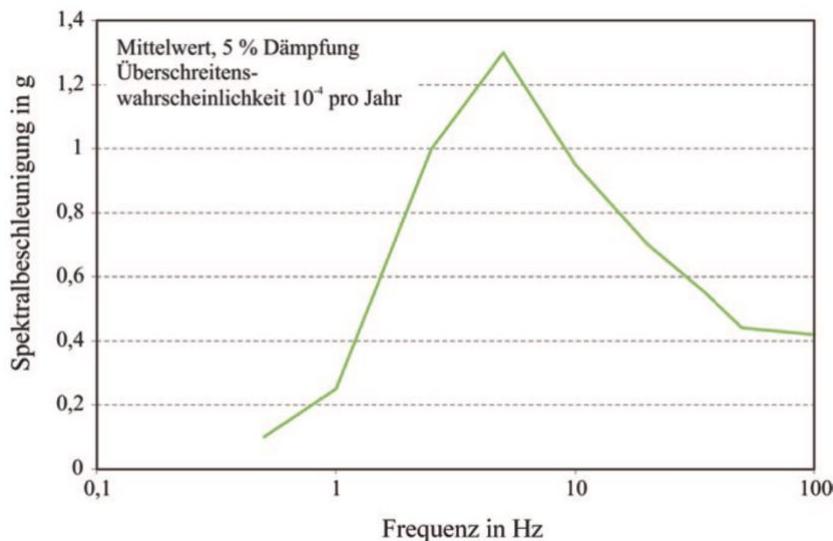


Abb. 2.18: Beispiel eines Erdbeben-Bodenantwortspektrums (Oberfläche) für vertikale Beschleunigungen mit Angaben zur Dämpfung und zur Überschreitungswahrscheinlichkeit pro Jahr (Proske, 2021)

Verwendete Quellen: [1]

## 2.3 Baudynamische Berechnung

### 2.3.1 Bewegungsdifferentialgleichung - Einmassenschwinger

Das mathematische Werkzeug, mit dem man die räumliche und zeitliche Entwicklung des Systems ermitteln kann, ist die Bewegungsdifferentialgleichung. Sie stellt eine inhomogene, lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung, mit konstanten Koeffizienten dar. Hier werden nun zusätzlich, zu den aus dem vorherigen Kapitel erläuterten Parametern Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung, die Faktoren der Steifigkeit, der Dämpfung und der Masse mit einbezogen. Die Gleichung lässt sich mit dem einfachen Prinzip des Einmassenschwingers, welcher ein sehr nützliches Modell in der baudynamischen Anwendung darstellt, einfach erklären.

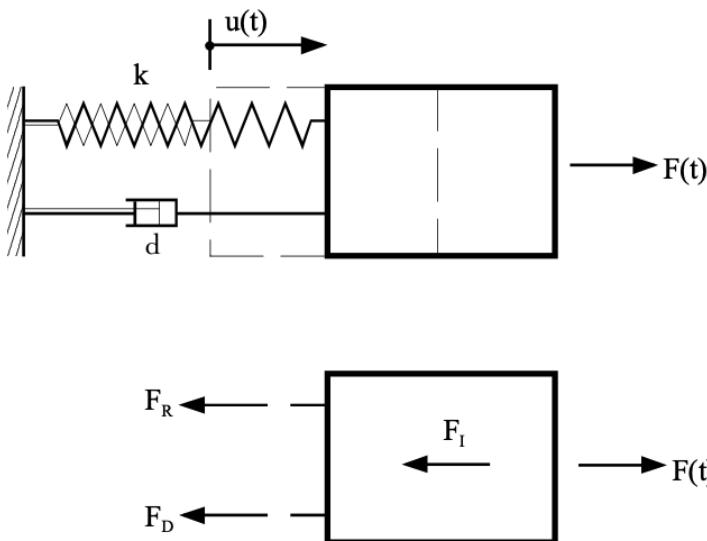


Abb. 2.19: Einmassenschwinger und freigeschnittene Masse (Meskouris, Hinzen, Butenweg & Mistler, 2011)

Abbildung 2.19 zeigt den Einmassenschwinger, bei dem sich die Masse  $m$  unter der Einwirkung der zeitabhängigen Last  $F(t)$  um den Betrag  $u(t)$  verschiebt. Das Prinzip von d'Alembert wird bei Schwingungsproblemen häufig benutzt, um die Trägheitskraft zu beschreiben. So ergibt sich dann die Trägheitskraft  $F_I$  aus dem Produkt von Masse und Beschleunigung.

$$F_I = m \cdot \ddot{x}(t) \quad (2.7)$$

Freischneiden der Masse und Formulierung des Kräftegleichgewichts in horizontaler Richtung ergibt dann die Gleichung:

$$F_I + F_D + F_R = F \quad (2.8)$$

mit der Trägheitskraft  $F_I$ , der Dämpfungskraft  $F_D$  und der Rückstellkraft  $F_R$ , die mit der äußeren Last in Gleichgewicht stehen. Die Rückstellkraft ergibt sich aus dem Produkt der Federsteifigkeit  $k$  in kN/m und der Verschiebung  $x$  in m.

$$F_R = k \cdot x \quad (2.9)$$

Der einfach linear-viskose Dämpfungsansatz setzt die Dämpfungskraft proportional zur 1. Potenz der Geschwindigkeit an, daraus folgt das Produkt aus der Dämpfungskonstante  $d$  in kNs/m und der Geschwindigkeit  $\dot{x}$  in m/s.

$$F_D = d \cdot \dot{x} \quad (2.10)$$

Folglich erhält man die Bewegungsdifferentialgleichung des Einmassenschwingers in dieser Form:

$$m \cdot \ddot{x} + d \cdot \dot{x} + k \cdot x = F(t) \quad (2.11)$$

Zur mathematischen Berechnung dieser Gleichung, bedient man sich an verschiedenen Verfahren wie dem Euler-Ansatz oder der Laplace-Transformation.

Dynamik	Mathematisch	Lösung
<b>Einmassenschwinger</b>		
$F(t) = m \cdot \ddot{x} + d \cdot \dot{x} + k \cdot x$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <span>Zeitabhängige Kraft</span> <span>Massen Beschleunigung</span> <span>Dämpfung</span> <span>Steifigkeit</span> <span>Verschiebung</span> </div>	Inhomogene lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten	
Freie ungedämpfte Schwingung $0 = m \cdot \ddot{x} + k \cdot x$ Freie gedämpfte Schwingung $0 = m \cdot \ddot{x} + d \cdot \dot{x} + k \cdot x$	Homogene lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten	Euler-Ansatz
Erzwungene ungedämpfte Schwingung $F(t) = m \cdot \ddot{x} + k \cdot x$ Erzwungene gedämpfte Schwingung $F(t) = m \cdot \ddot{x} + d \cdot \dot{x} + k \cdot x$	Inhomogene lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten  Inhomogene lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten	Summe der homogenen und speziellen Lösungen

## Verteilte Massen: Umrechnung in Modale Massen

Abb. 2.20: Darstellung der Differentialgleichung in verschiedenen Fällen (Proske, 2021)

Je nachdem, welche Art von Einwirkung ein System anregt und welche Eigenschaften vorliegen, können verschiedene Fälle von Schwingungen entstehen. In Abbildung 2.20 sind diese aufgelistet. Man unterscheidet zwischen freier und erzwungener

Schwingung und dann noch einmal untergeordnet in ungedämpfter und gedämpfter. Die freie Schwingung tritt bei einmaliger Auslenkung des Systems auf, danach schwingt dieses in seiner Eigenfrequenz weiter. Die Gleichung der Eigenfrequenz lässt sich herleiten aus der Differentialgleichung der harmonischen Schwingung. Folglich lautet diese dann:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{mit: } \omega = \text{Eigenkreisfrequenz} = \sqrt{\frac{k}{m}}) \quad (2.12)$$

Diese Eigenfrequenz stellt sich nach der kurzen, impulsartigen Einwirkung ein, nachdem die Konstruktion aus seinem Gleichgewichtszustand gebracht wurde. Gemessen wird diese Art von Frequenz in Herz, also der Anzahl der Schwingungen pro Sekunde. Nicht zu verwechseln mit der Eigenkreisfrequenz, welche dasselbe physikalische Ereignis beschreibt, jedoch die Kreisbewegung eines schwingenden Systems zählt und wie die Eigenfrequenz in der Einheit 1/s (= Hz) angegeben wird.

Im Falle der erzwungenen Schwingung, wird der Körper kontinuierlich angeregt, wie zum Beispiel bei einem langanhaltenden Erdbeben. Die im Objekt resultierende Schwingung ist dann nicht unbedingt gleich der Eigenfrequenz, sondern die der äußeren Kraft. Stimmt die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz überein, reagiert das System heftig, man spricht dann von Resonanz. Der Schwinger wäre dann energieerhaltend und in diesem Zustand versucht er die Energie jeder Schwingung zu speichern, was zu großen Schäden am Bauwerk bis hin zum Einsturz führen kann. Ein gutes Beispiel dafür ist der Einsturz der Tacoma-Bridge in Washington (Abb. 2.21), welche sich im Jahr 1940, nach nur 4 Monaten Betriebszeit, in Folge von Windeinflüssen aufgeschaukelt hat und schließlich eingestürzt ist.

Der Faktor der Dämpfung berücksichtigt das Verhalten der Amplitude nach der Anregung. Besteht im System eine Dämpfungskomponente, so kann die Amplitude bei erzwungener Schwingung nicht unendlich groß werden und bei freier Schwingung nimmt die Amplitude mit der Zeit ab, zum Beispiel durch den Luftwiderstand. Ein ungedämpftes System würde theoretisch unendlich weiterschwingen.



Abb. 2.21: Einsturz der Tacoma-Bridge in Folge dynamischer Windeinflüsse, in Washington, 1940 (AdSimuTec GmbH, 2024)

### 2.3.2 Mehrmassenschwinger

Um nun komplexere Schwingungsbewegungen von mehreren Massen abzubilden, nutzt man das Modell des Mehrmassenschwingers. Bei einem Mehrmassensystem, bei dem mehrere Federn, Dämpfer und Massen miteinander verbunden sind, entsteht eine gekoppelte Bewegung. Außerdem haben die verschiedenen Teile der Konstruktion auch verschiedene Eigenfrequenzen.

Grundlegend basiert dieses Modell auf dem des Einmassenschwingers, die Gleichung ist ähnlich, nur werden aus Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung Vektoren und aus Steifigkeit, Dämpfung und Masse Matrizen. In Abbildung 2.22 sind Vektoren und Matrizen fett gedruckt.

Statik	Mathematisch	Dynamik	Mathematisch
<b>Einmassenschwinger</b>			
$F = k \cdot x$ Statische oder quasistatische Kraft Steifigkeit	Algebraische Gleichung	$F(t) = m \cdot \ddot{x} + d \cdot \dot{x} + k \cdot x$ Zeitabhängige Kraft Masse Beschleunigung Dämpfung Steifigkeit Geschwindigkeit Verschiebung	Inhomogene lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten
<b>Mehrkörperproblem</b>			
$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}$ Statische oder quasistatische Kraft Steifigkeit	Algebraische Gleichung	$\mathbf{F}(t) = \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{D} \cdot \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}$ Zeitabhängige Kraft Masse Beschleunigung Dämpfung Steifigkeit Geschwindigkeit Verschiebung	System inhomogener linearer Differentialgleichungen zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten

Abb. 2.22: Übergang vom Einmassenschwinger zum Mehrmassenschwinger (Proske, 2021)

Mathematische Lösungsverfahren für das Mehrmassensystem sind beispielsweise die Vektoriteration oder das Rayleigh-Verfahren. Genau wie beim Einmassenschwinger gibt es auch hier freie oder erzwungene und gedämpfte oder ungedämpfte Schwingungen. In der Praxis ist es auch möglich ein Mehrmassensystem sehr stark zu vereinfachen. Besteht beispielsweise eine punktuell hohe Dämpfungskapazität wie bei einer Konstruktion mit Schwingungsdämpfer, so lässt sich das Schwingungsproblem vielfach auf einen Zweimassenschwinger reduzieren.

### 3 Shake-Table

#### 3.1 Allgemeines

Die seismische Reaktion einer Gebäudestruktur hängt von ihren dynamischen Eigenschaften sowie den Eigenschaften der Bodenbewegung ab. Heutzutage können die dynamischen Eigenschaften von Strukturen einfach mit Computersoftware berechnet werden. Es gibt jedoch verschiedene Faktoren, welche bei Berechnungen häufig vernachlässigt werden, wie zum Beispiel die Boden-Bauwerk-Interaktion. Die experimentelle Untersuchung von Bauwerken oder Böschungen aus Boden oder Fels mit Hilfe eines Shake-Tables bietet einen tieferen Einblick und die Möglichkeit Bauwerke gegen äußere Einwirkung zu sichern.

Ein Erdbebensimulator, auch Shake-Table genannt, ist ein Gerät, auf dem man maßstabsgerechte Modelle mit simulierter Bodenbewegung anregen kann. Auch eine Nachbildung realer, aufgezeichneter Erdbebenzeitverläufe ist möglich. Moderne Simulatoren haben eine rechteckige Platte, welche in bis zu 6 Freiheitsgraden bewegt werden kann. Die Universität Tokio legte 1893 den ersten Grundbaustein mit einem Modell, welches auf einem einfachen Radmechanismus basierte. Heutzutage erstreckt sich die Größe der Rütteltische von kleinen, portablen bis hin zu großformatigen Modellen, auf denen echte Bauwerke platziert werden können.



Abb. 3.1: Shake-Table NTUA (Wikipedia,2024)

Der Ablauf ist jedoch gleich. Das Testobjekt wird auf der Platte montiert und je nach Bedarf bis zum Versagen erschüttert. Mit Hilfe von Videoaufnahmen und Schwingungsmessungen durch Sensoren kann man das dynamische Verhalten erfassen. Shake-Table werden überwiegend in der seismischen Forschung eingesetzt, um echte Boden-Gebäude-Interaktionen zu simulieren und Bauwerke auf diese Beanspruchungen zu testen. Das Modell findet aber auch in anderen Bereichen Verwendung. Kleinformatige Tische werden auch genutzt, um Fahrzeuge und ihre Komponenten zu testen, welche hohen Vibrationsanforderungen und Normen entsprechen müssen. Auch Tests nach Luftfahrt-, Militär- und Elektronikstandards werden durchgeführt. Außerdem dient der Shake-Table oftmals auch in der Architektur oder im Bauingenieurwesen zu Bildungszwecken. Er ist ein hilfreiches Werkzeug, um bei praktischen Versuchen die Reaktion von Bauwerksmodellen auf Erdbeben aufzuzeigen.

Verwendete Quellen: [2], [5], [7], [8], [10], [11], [12], [13], [15], [16]

## 3.2 Anwendung in der Forschung

### 3.2.1 Seismische Forschung

In diesem Bereich der Forschung untersucht man die Interaktion zwischen einem Bauwerksmodell und der Bodenbewegung. Gebäude, Brücken, Dämme und andere Strukturen werden hier auf Stabilität, Tragverhalten und Belastbarkeit bei Erdbeben getestet. Der Versuch hilft dabei Schwachstellen zu finden und die Konstruktionen zu verbessern. Außerdem erlangen Forscher durch den Einsatz verschiedener Baustoffe oder Konstruktionsmethoden bessere Kenntnisse über ihre Anwendbarkeit in Erdbebenregionen.



Abb. 3.2: Projekt der Forscher der Texas A&M University am größten Shake-Table der Welt in Japan (Texas A&M University, 2024)

Abbildung 3.2 zeigt das Projekt eines Forscherteams der Texas A&M University am größten Shake-Table der Welt, der im sogenannten E-Defense Forschungszentrum, in Japan steht. Das Team, unter der Führung von Dr. Maria Koliou, untersucht die Beschädigung an Holzrahmengebäuden, die durch Erdbeben entstehen. In Zusammenarbeit mit den japanischen Forschern, unter der Leitung von Prof. Takuya Nagae, liefern die Versuche neue Einblicke und Verbesserungsmöglichkeiten für Bau- und Sanierungsvorhaben in Risikogebieten.

### 3.2.2 Anwendung von Simulationsmodellen

Numerische Modelle aus softwaregestützten Simulationen sind ein wichtiger Bestandteil der seismischen Forschung. Die Anwendung praktischer Versuche kann Faktoren berücksichtigen, die in der computergestützten Berechnung fehlen, und die Gegenüberstellung dieser Ergebnisse liefert genauere Resultate.

### 3.2.3 Katastrophenvorsorge

In Regionen, die für Erdbeben anfällig sind, entwickelt man mit Hilfe von Versuchen am Shake-Table neue Sicherheitsstandards und Bauvorschriften. Fluchtwiege, Krankenhäuser und viele andere Dinge müssen im Falle eines Erdbebens einwandfrei funktionieren und standhalten. Außerdem entwickeln Forscher immer wieder neue Schutzmaßnahmen, wie zum Beispiel Dämpfungssysteme, Stoßdämpfer oder Schwingungisolatoren, um die dynamische Leistung der Gebäude zu verbessern.



Abb. 3.3: Einblick in den Nachbau eines Krankenhauses (ardalpha, 2024)

In Folge auf das verheerende Erdbeben von Kōbe, 1995 in Japan, starben über 6000 Menschen und es gab über 14.000 Verletzte. 300.000 Menschen wurden obdachlos, 61.000 Gebäude wurden zerstört, 7300 brannten aus und 55.000 wurden beschädigt. Das National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED) in Miki City, Hyogo wurde in Reaktion darauf gegründet. Es beinhaltet den weltgrößten 3D-Shake-Table, so genannt E-Defense (E für Earth). Die Einrichtung dient der Erforschung von Erdbeben und der Verbesserung der Sicherheitsstandards. Abb. 3.3 zeigt einen Einblick in einen Krankenhauskomplex, der auf dem Rütteltisch untersucht wird. Das fünfstöckige Gebäude in Stahlbetonbauweise wurde dynamisch optimiert, einschließlich der Konstruktion und der Einrichtung. Geräte stehen auf Stoßdämpfern und werden teilweise während des simulierten Erdbebens in Betrieb genommen. Zum damaligen Zeitpunkt war es das am besten vor Beben geschützte Krankenhaus der Millionenstadt. Die Forscher entwickelten und testeten mehrere Sicherungsmaßnahmen für den Extremfall, jedoch kamen sie auch an vielen Stellen an die Grenzen des Machbaren. Die Wissenschaftler erkannten, dass es schwer war, die Einrichtung für den Extremfall zu sichern und die Funktionsfähigkeit im Alltag zu gewährleisten.

### 3.2.4 Maschinenbau, Luft- & Raumfahrt

Einsatzbereiche von eher kleinformatigen Rütteltischen sind die Raumfahrt, Luftfahrt oder auch die Fahrzeugtechnik. Hier werden viele Komponenten starken Vibrationstests unterzogen und weiterentwickelt, um die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit der Teile zu gewährleisten. Im Bereich der Militärtechnik werden Ausrüstungen auf ihre Stabilität und Funktionalität geprüft.

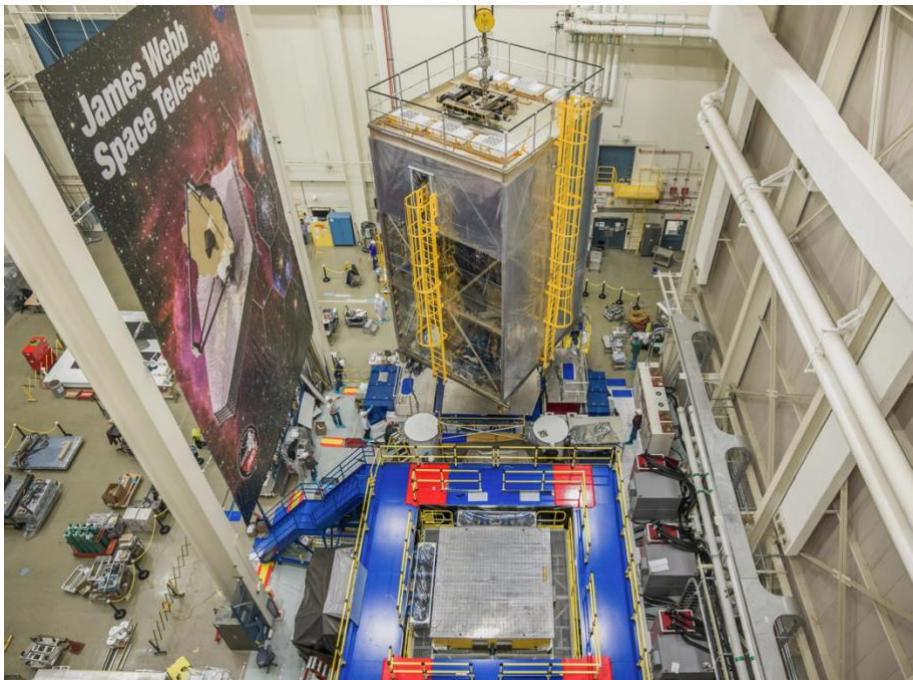


Abb. 3.4: NASA führt Vibrationstests am James Webb Space Teleskop durch (2024, NASA)

Normalerweise würde man mit einem Multi-Milliarden-Dollar-Weltraumteleskop ziemlich vorsichtig umgehen. Das sogenannte James Webb Space Teleskop wurde vor seinem geplanten Einsatz auf Vibrationstischen geprüft, da es über 1,6 Millionen km weit entfernt unmöglich zu reparieren ist. Die Anforderungen an das Teleskop sind nicht gering. Es muss den Raketenstart überstehen und durchquert im Anschluss die Atmosphäre mit 32-facher Schallgeschwindigkeit. Es ist ein Prozess, den jedes Raumfahrzeug und jeder Satellit der NASA seit 1950 durchlaufen hat. Die Versuche werden in Zusammenarbeit mit der Team Corporation in Burlington, Washington, durchgeführt.

*Verwendete Quellen:* [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]

### 3.3 Entwicklung eines eigenen Shake-Tables

#### 3.3.1 Planung

Zur experimentellen Untersuchung von Schwingungen und deren Auswirkungen an verschiedenen Modellen wurde ein Shake-Table entwickelt und gebaut. Die Planung basierte auf bestehenden, kleinformatigen Modellen anderer Universitäten oder auch auf Produkten von Anbietern auf dem freien Markt. In enger Zusammenarbeit mit Prof. Dr.-Ing. Yannick Broschart aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen der Hochschule Trier, entstand die Vision eines Modells, welches mit Hilfe eines Elektroantriebs eine Platte präzise ansteuert und so Bodenbewegungen simulieren kann. Nach mehreren Wochen Planung und Recherche erfolgten dann die ersten Prototypzeichnungen (Abb. 3.6, 3.7 & 3.8).

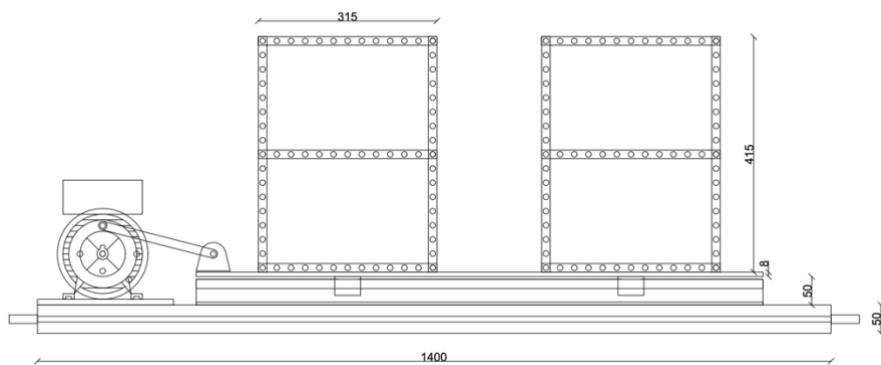


Abb. 3.6: Vorderansicht des Prototypmodells (Angaben in mm)

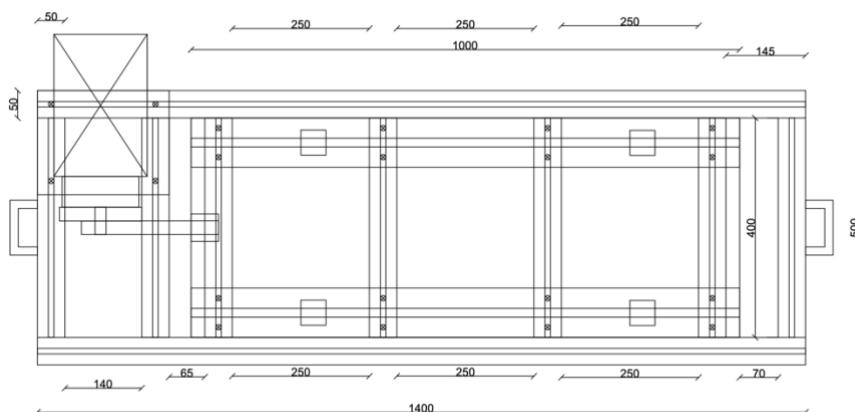


Abb. 3.7: Draufsicht des Prototypmodells (Angaben in mm)

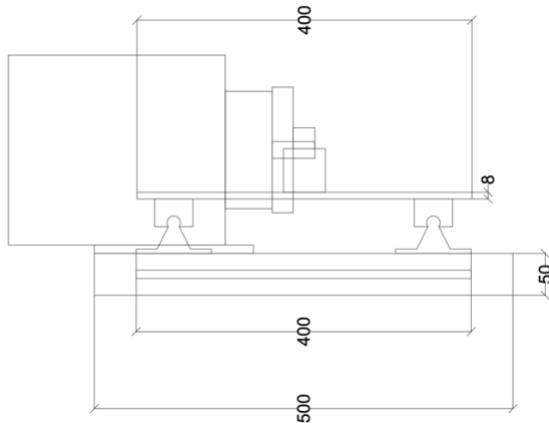


Abb. 3.8: Seitenansicht des Prototypmodells (Angaben in mm)

### 3.3.2 Komponenten, Materialien und Aufbau

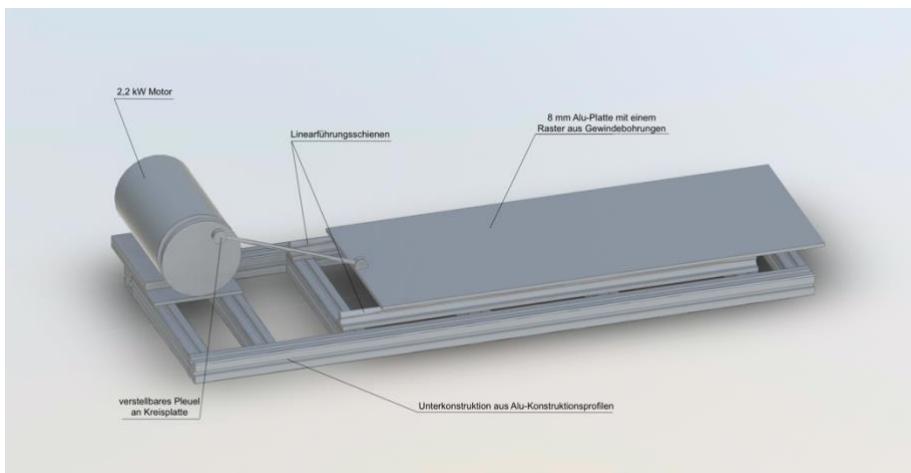


Abb. 3.9: 3D-Modell auf Basis des fertigen Modells

Der Shake-Table besteht aus mehreren wesentlichen Komponenten:

- Unterkonstruktion aus 50 x 50 mm quadratischen Aluminiumprofilen
- Linearführungsschienen aus Aluminium mit kugelgelagerten Gleitböcken
- Aluminiumtischplatte mit einer Dicke von 8 mm, die mit einem Raster aus Gewindebohrungen versehen ist
- 2,2 kW Drehstrommotor (1500 U/min, 4-polig, 3 x 230/400 V)
- Kreisplatte passend gefräst mit regelbarem Pleuelanschluss
- Frequenzumrichter zur präzisen Ansteuerung der Frequenzen (1-Phasen-Eingang/3-Phasen-Ausgang; auf den Zeichnungen nicht aufgeführt)

## Shake-Table

Das Grundgerüst bildet ein Rahmen aus Aluminiumprofilen. Diese Profile werden mit Winkelverbindern verschraubt und bilden so eine stabile Unterkonstruktion. Auf den zwei Linearführungsschienen, die jeweils mit zwei kugelgelagerten Gleitböcken für einen reibungsfreien Lauf ausgestattet sind, wird die Tischplatte montiert. Diese Platte ist mit einem Raster aus Gewindebohrungen versehen, um verschiedene Gebäudemodelle oder Stützen einfach und schnell zu befestigen. Seitlich wurde der Elektromotor auf einer Platte befestigt, die wiederum auf den Aluminiumprofilen verschraubt ist. Der Motor ist also in verschiedenen Positionen ausrichtbar und lässt sich den Gegebenheiten nachträglich einfach anpassen. Die Kreisplatte wird auf der Welle des Motors montiert und verfügt über eine Fräse, mit der es möglich ist, das Pleuel beliebig zu verschieben und zu befestigen, um die Amplitude der Auslenkung steuern zu können. Sowohl an der Kreisplatte als auch an der Tischplatte ist das Pleuel mit Kugellagern gelagert, um die Bewegung reibungsarm übertragen zu können.

Zusätzlich wurden mehrere Bausätze für die Gebäudemodelle angefertigt. Die gekanteten Platten wurden aus einem 1 mm dicken Stahlblech geschnitten und mit Bohrungen versehen. Für die elastischen, reversiblen Stützen wurden aus Federstahlrollen Teilstücke abgeschnitten und gelocht.

In der folgenden Abb. 3.10 ist der fertiggestellte Shake-Table zu sehen. Darauf montiert ist ein zweigeschossiges Gebäudemodell, also ein 2-Massenschwinger und ein Stützenmodell, an dem ein Gewicht in Form von einer Schraube und drei Muttern an der Spitze angebracht ist.

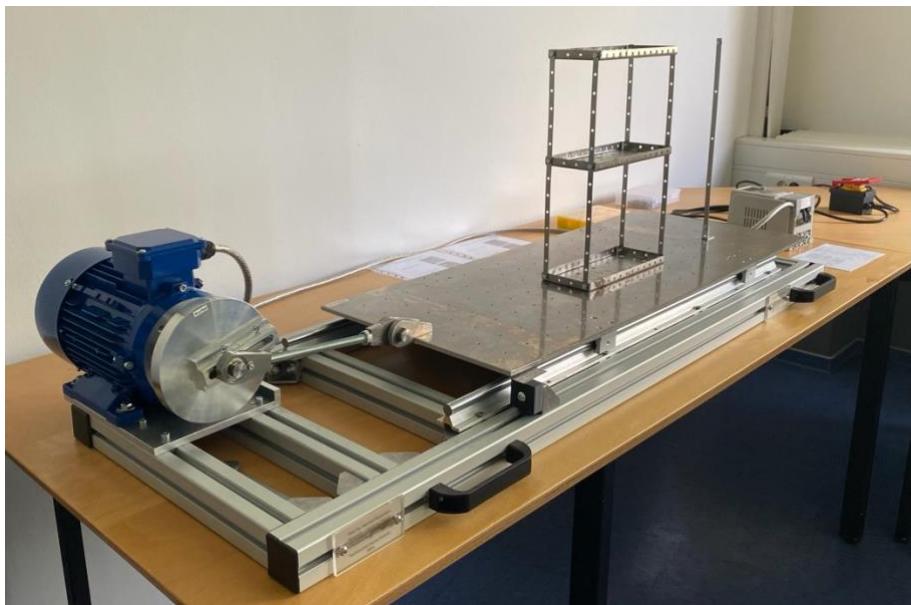


Abb. 3.10: Prototyp mit zweigeschossigem Gebäudemodell und Stützenmodell

## 4 Prototypversuch und Messung

### 4.1 Versuchsaufbau und Ablauf

Für den Versuch wurden im Vordergrund vier elastische Stützen aus Federstahl mit unterschiedlichen Längen auf der Tischplatte montiert. An den oberen Enden wurde eine Masse in Form von Schraube und Muttern angebracht. Die Stützen sollen im Versuch demonstrieren, wie die verschiedenen Längen auf die Schwingungen reagieren und in welchem Bereich die Eigenfrequenzen liegen. Dazu wurde im Hintergrund ein Gebäudemodell über zwei Geschosshöhen installiert. Das Material der Stützen entspricht dem der vier Stützen im Vordergrund. Die Grund-, Mittel- und Deckenplatte sind starr. Die Amplitude der oszillierenden Tischplatte wurde auf etwa 1 cm eingestellt.

Mit Hilfe der iDynamics App und zwei Smartphones wurden die Schwingungen und Beschleunigungen der Tischplatte und der Deckenplatte des Gebäudemodells aufgezeichnet. Die App gibt eine Datei aus, welche die Beschleunigungswerte in  $\text{m/s}^2$  über die Zeit in ms auflistet. Für eine visuelle Darstellung des Versuchs wurde der Ablauf mittels Videoaufzeichnung dokumentiert.

Zu Beginn des Versuchs werden die Aufzeichnungen an beiden Apps im Stillstand gestartet. Anschließend wird der Motor am Frequenzumrichter langsam von 0 Hz auf bis zu 15 Hz hochgefahren.



Abb. 4.1: Versuchsaufbau bestehend aus 4 verschiedenen Stützen und Zweimassenschwinger

## 4.2 Auswertung des Versuchs

Die Abb. 4.1 zeigt die Überlagerung beider Messungen. Dabei zeigen die Bilder auf welche Weise sich die Modelle zu gegebenen Zeitpunkten verhalten haben.

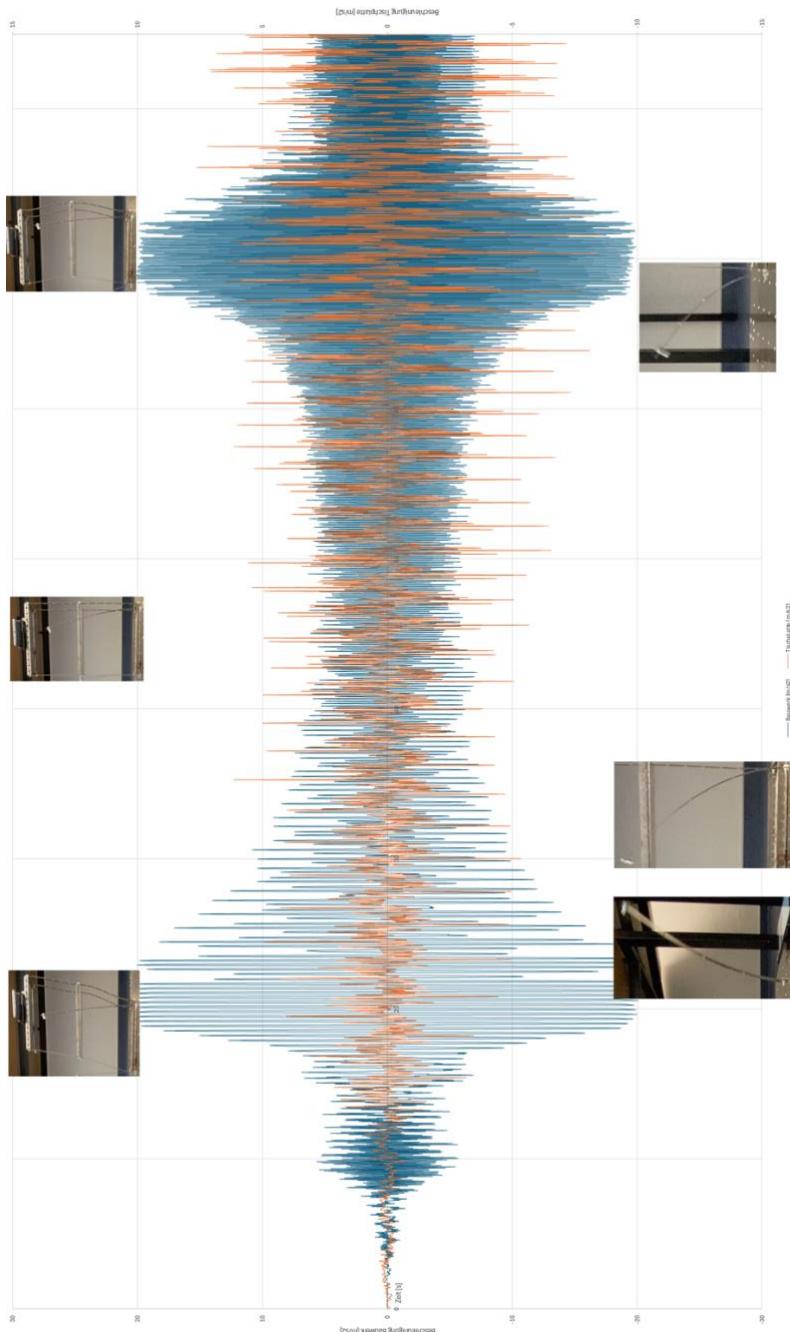


Abb. 4.1: Grafische Auswertung des Versuchs ( x = Zeit in s; y = Beschleunigung in m/s<sup>2</sup> )

#### 4.2.1 Stützenmodell

Visuell konnte man hervorragend erkennen, wie die einzelnen Stützen nacheinander anfingen zu schwingen und sich wieder stabilisierten. Die vier Stützenmodelle erreichten also nacheinander ihre Eigenfrequenzen, jeweils in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Infolgedessen wurden die Schwingungen an den einzelnen Modellen sehr stark und nahmen große Amplituden an. Überstieg die Frequenz den Bereich der Eigenfrequenz, so gelangte die Stütze wieder in den stabilen Zustand. Zuerst begann die längste Stütze zu schwingen, gefolgt von den anderen mit zunehmend kürzerer Länge. In Abb. 4.1 sind unten die einzelnen Stützen ungefähr dem Bereich der Beschleunigung zugeordnet, in dem sie ihre Eigenfrequenz erreichten. Die kürzeste Stütze war jedoch so kurz, dass sie nicht in der Lage war, bei den eingestellten Frequenzen in Schwingung zu geraten.



Abb. 4.2: Schwingungen der Stützenmodelle

#### 4.2.2 Gebäudemodell – Zweimassenschwinger

Das zweigeschossige Gebäudemodell verhielt sich im Gegensatz zu den Stützen anders. Während die Stützen neben ihrem Eigengewicht die Masse nur an der Spitze tragen, verfügt die Gebäudekonstruktion über zwei Massen, die Mittelplatte und die Deckenplatte mit dem Smartphone. Dementsprechend weist der Zweimassenschwinger verschiedene Eigenfrequenzen auf, wie es schon in Kapitel 2.3.2 erläutert wurde. In Abb. 4.1 sind die verschiedenen Verhaltensmuster oberhalb zugeordnet. Hier sieht man durch die Überlagerung der Messungen besonders gut, wie sich das Modell verhält.

Bei ungefähr 30 Sekunden zeigt sich die maximale Schwingung der oberen Masse, was auf eine Resonanzfrequenz in diesem Bereich hinweist. Nach weiterer Erhöhung der Erregerfrequenz stabilisiert sich das Verhalten des Modells und es sind keine signifikanten Schwingungen mehr zu beobachten. Dann beginnt bei etwa 80 Sekunden die mittlere Geschossmasse zu schwingen, was darauf hindeutet, dass in diesem Bereich die zugehörige Eigenfrequenz liegt. Bei weiterer Erhöhung der Motorfrequenz verhielt sich das Modell wieder stabil. Die Resonanzfrequenzbereiche wurden überschritten und das Modell pendelt sich in einem stationären Zustand ein.

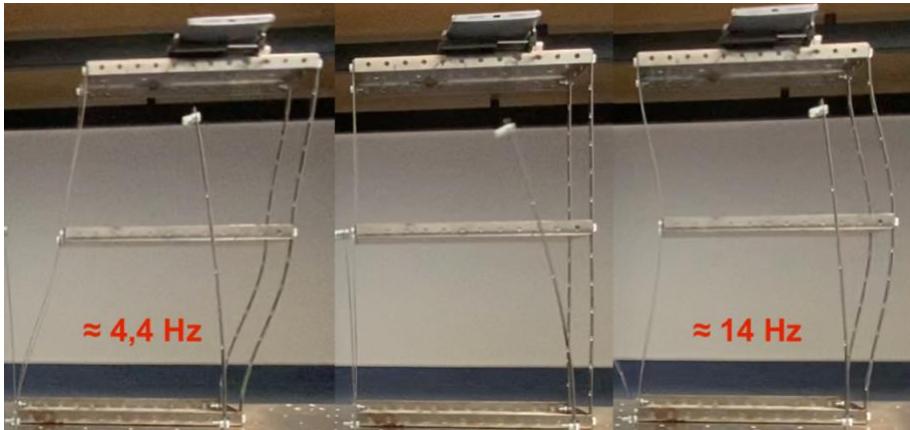


Abb. 4.3: Schwingungen des Zweimassenschwingers

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Längen der Stützen als auch die Massen und die Strukturen der Modelle entscheidend die Schwingungseigenschaften beeinflussen. Längere Stützen neigen dazu, bei niedrigeren Frequenzen zu schwingen, während kürzere bei hohen Frequenzen ihre Eigenfrequenz erreichen. Der rasante Sprung zwischen der minimalen Schwingung und der großen Schwingung bei Erlangen der Eigenfrequenz war deutlich erkennbar. Außerdem wurde erfolgreich dargestellt, wie sich Mehrmassenschwinger verhalten. Die Kopplung verschiedener Massen, welche bei verschiedenen Frequenzen ausgelenkt werden, war gut sichtbar.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Shake-Tables zur Veranschaulichung kleinformatiger Modelle unter seismischer Einwirkung. Das Versuchsmodell baut auf einer Aluminiumkonstruktion auf und wird durch einen 2,2 kW starken Elektromotor, voll regelbar, einachsig beschleunigt. Der Prototyp wurde aufwendig und innovativ entwickelt und fertiggestellt. Er wird künftig als Vorführmodell im Wahlpflichtfach Baudynamik an der Hochschule Trier eingesetzt.

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen der Baudynamik und die damit verbundenen Problemstellungen behandelt. Es wird erklärt, bei welchen Konstruktionen unter welchen Lasten eine dynamische Untersuchung notwendig ist. Als Unterpunkt der Technischen Mechanik wird die Dynamik nochmal unterteilt in Kinematik und Kinetik. Zur Einführung in die Theorie der Kinematik gehören die Faktoren Zeit, Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Nachdem auch noch verschiedene Fälle der Bewegung aufgezählt werden, wie zum Beispiel die ungleichmäßig beschleunigte oder die harmonische Schwingung, wird die Methode der baudynamischen Berechnung vorgestellt. Anhand des Prinzips des Einmassenschwingers und des Mehrmassenschwingers wird die Bewegungsdifferentialgleichung in ihren unterschiedlichen Formen erläutert. Ergänzend wird auf das Phänomen der Eigenfrequenz und deren Auswirkung eingegangen.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Darstellung des Shake-Tables in der Forschung. Es wird gezeigt, wie dieser in der seismischen Forschung zum Einsatz kommt und dass er auch als Gegenüberstellung zum softwarebasierten Simulationsmodell genutzt wird. Außerdem wird auf seine wichtige Bedeutung in der Katastrophenvorsorge eingegangen. Anschließend wird die Nutzung des Modells in anderen Ingenieurbereichen anhand eines Beispiels aufgezeigt. Darauf folgt die Entwicklung des Prototyps, gegliedert in Planung und Aufbau.

Abschließend stellt Kapitel 4 einen Versuch inklusive Aufbau und Ablauf dar. Verschiedene Modelle werden auf dem Tisch installiert und erschüttert. Dabei werden Videos und Messungen von Beschleunigungswerten mithilfe der *iDynamics* App aufgezeichnet und ausgewertet. Der Versuch stellt erfolgreich dar, wie sich die verschiedenen Modelle verhalten und in welchen Bereichen sie ihre Eigenfrequenzen erreichen und im Zustand der Resonanz schwingen. Sowohl das Prinzip des Einmassenschwingers und das des Zweimassenschwingers werden erfolgreich gegenübergestellt.

### 5.2 Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein funktionierendes Modell eines Shake-Tables entwickelt, das hilfreiche Einblicke in die Baudynamik und die Prototypenentwicklung gibt. Die Ergebnisse zeigen, wie theoretische Konzepte praktisch umgesetzt werden können. Es gibt jedoch noch einige Bereiche, die verbessert werden könnten.

## Zusammenfassung und Ausblick

In Zukunft könnte das Modell weiter verfeinert werden, zum Beispiel durch die Entwicklung neuer Gebäudemodelle mit unterschiedlichen Eigenschaften. So könnte man das Verhalten der Strukturen noch genauer untersuchen. Auch wäre es sinnvoll, eine andere Messmethode zu verwenden, die neben der Beschleunigung auch die Frequenz ausgibt, um genauere Daten zu analysieren.

Ein weiteres Problem ist der leicht ruckartige, stockende Lauf des Rütteltisches. Dies könnte durch Anpassungen am Pleuel oder an der Schienenausrichtung verbessert werden. Außerdem gibt es Schwierigkeiten mit Standfestigkeit des Modells. Bei höheren Frequenzen von etwa 15 Hz beginnt das Modell aufgrund der Trägheit der Masse auf dem Grund zu rutschen. Dieses Problem könnte durch eine stabilere, standfestere Unterkonstruktion gelöst werden.

Diese Anpassungen und Verbesserungen könnten dazu beitragen, die Leistung und Genauigkeit des Shake-Tables weiter zu erhöhen und ihn für eine breitere Palette von Anwendungsszenarien nutzbar zu machen.

Per aspera ad astra.

„Durch das Raue zu den Sternen.“

- Lucius Annaeus Seneca (1 v. Chr. - 65 n. Chr.)  
römischer Philosoph, Naturforscher, Politiker und Schriftsteller -

## Literatur

- [1] Proske 2021 Proske, D.: Baudynamik for Beginners, Springer Vieweg Verlag 2021
- [2] Meskouris 2011 Meskouris, K.: Hinzen, K.: Butenweg, C.: Mistler, M.: Bauwerke und Erdbeben, Grundlagen – Anwendung - Beispiele 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, PRAXIS, Vieweg + Teubner Verlag 2011
- [3] Petersen 2017 Petersen, C.: Werkle, H.: Dynamik der Baukonstruktionen, 2. Auflage, Springer Vieweg Verlag 2017
- [4] Albert 2022 Werkle, H.: Rahm, H.: Kemmler, R.: Schneider Bautabellen für Ingenieure, Kapitel 4 C Baudynamik, 25. Auflage, Reguvivs Verlag 2022

## Internetquellen

- [5] ARDalpha 2021 Ein Krankenhaus wird durchgeschüttelt – ARDalpha  
<https://www.ardalpha.de/wissen/natur/naturgewalten/erdbeben-simulator-edefense-plattentektonik-tsunami-erde-100.html>  
(abgerufen am: 25.08.24)
- [6] Gutro R. 2023 NASA Gives the Webb Telescope a Shakedown – NASA  
<https://www.nasa.gov/missions/webb/nasa-gives-the-webb-telescope-a-shakedown/>  
(abgerufen am 25.08.24)
- [7] Kashima Shaking Table Testing Course In: ISEE - UNESCO  
<https://iisee.kenken.go.jp/lna/?mod=view&cid=E1-060-2009>  
<https://iisee.kenken.go.jp/lna/download.php?f=201110073c35b2ca.pdf&n= dynamic test%20s.pdf&cid=E1-060-2009>  
(abgerufen am: 29.08.24)
- [8] Kobe-Convention E-Defense  
<https://kobe-convention.jp/en/planning/technical-visit/e-defense/>  
(abgerufen am: 02.09.24)
- [9] NASA Spinoff 2017 Vibration Tables Shake Up Aerospace, Car Testing  
[https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2017/ip\\_2.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2017/ip_2.html)  
(abgerufen am: 25.08.24)
- [10] Oleson T. 2014 Faking quakes at full scale: Giant shake tables simulate earthquakes to make buildings safer – EARTH magazine  
<https://www.earthmagazine.org/article/faking-quakes-full-scale-giant-shake-tables-simulate-earthquakes-make-buildings-safer/>  
(abgerufen am: 24.08.24)
- [11] Science Japan 2023 E-Defense: Enhanced earthquake resistance technology using full-scale shaking table [Exploring megascience]  
<https://sj.jst.go.jp/stories/2023/s1011-01p.html>  
(abgerufen am: 25.08.24)
- [12] Scoggins R. 2019 Texas A&M researchers use shake-table testing to build better insights for disaster recovery – Texas A&M University Engineering  
<https://engineering.tamu.edu/news/2019/03/Texas-AM-researchers-use-shake-table-testing-to-build-better-insights-for-disaster-recovery.html>  
(abgerufen am: 24.08.24)

## Internetquellen

---

- [13] Simton 2024 Seismic Simulators (Shake Tables)  
<https://simton.co.th/product/seismic-simulators-shake-tables/>  
(abgerufen am 30.08.24)
- [14] Sperber J. v. 2011 Der größte Erdbebensimulator der Welt – Deutschlandfunk  
<https://www.deutschlandfunk.de/der-groesste-erdbebensimulator-der-welt-100.html>  
(abgerufen am: 25.08.24)
- [15] Wikipedia 2024 Earthquake shaking table  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake\\_shaking\\_table](https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_shaking_table)  
(abgerufen am: 23.08.24)
- [16] Wikipedia 2023 Erdbeben von Kobe 1995  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Erdbeben\\_von\\_Köbe\\_1995](https://de.wikipedia.org/wiki/Erdbeben_von_Köbe_1995)  
(abgerufen am 25.08.24)
- [17] Wölfel 2024 Normgerechte Erdbebenqualifizierung von Anlagenteilen und mechanischen sowie elektrischen Komponenten – Erdbebennachweise mittels Erdbebensimulation  
<https://www.woelfel.de/erdbebeningenieurwesen/erdbebenberechnung-simulation.html>  
(abgerufen am: 01.09.24)