

# MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

„Master of Engineering“

im Fach Bauingenieurwesen

## **Untersuchung zu dynamischen Berechnungsverfahren von Stahltragwerken nach Eurocode 8 mit der Statik-Software RFEM 6**

**Investigations on dynamic analysis methods of steel structures  
according to Eurocode 8 with the structural analysis software**

**RFEM 6**

**Alexander Heidt**

Matrikelnummer:	979460
Fachbereich:	Bauen + Leben
Fachrichtung:	Bauingenieurwesen
Abgabetermin:	05.02.2025
Aufgabensteller und Betreuer:	Prof. Dr. Yannick Broschart

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter angefertigt habe.

Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche kenntlich gemacht.

- Es ist keine Nutzung von KI-basierten text- oder inhaltgenerierenden Hilfsmitteln erfolgt.
- Die Nutzung von KI-basierten text- oder inhaltgenerierenden Hilfsmitteln wurde von der/ dem Prüfenden ausdrücklich gestattet. Die von der/ dem Prüfenden mit Ausgabe der Arbeit vorgegebenen Anforderungen zur Dokumentation und Kennzeichnung habe ich erhalten und eingehalten. Sofern gefordert, habe ich im Anhang „Nutzung KI-Tools“ die verwendeten KI-basierten text- oder inhaltgenerierenden Hilfsmittel aufgeführt und die Stellen in der Arbeit genannt. Die Richtigkeit übernommener KI-Aussagen und Inhalte habe ich nach bestem Wissen und Gewissen überprüft.

Des Weiteren erkläre ich, dass ich die Arbeit in dieser oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsleistung eingereicht habe.

Ürzig, 05.02.2025

Ort, Datum



Unterschrift



Alexander Heidt

**Untersuchung zu Dynamischen  
Berechnungsverfahren von Stahltragwerken nach  
Eurocode 8 mit der Statik-Software RFEM 6**



# Inhalt

<b>Inhalt</b>	<b>i</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeines	1
1.1.1 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren	2
1.1.2 Multimodales Antwortspektrenverfahren	3
1.1.3 Nichtlineare statische (pushover) Berechnung	3
1.1.4 Dynamische nichtlineare Zeitverlausberechnung	4
1.2 Zielstellung	4
<b>2 Stand der Kenntnis</b>	<b>5</b>
2.1 Baudynamik	5
2.1.1 Grundlagen	5
2.1.2 Begriffe	6
2.1.3 Bewegungsgleichung eines Einmassenschwingers	8
2.1.4 Freie Schwingung	8
2.1.4.1 Ungedämpfte freie Schwingung eines Einmassenschwingers	8
2.1.4.2 Gedämpfte freie Schwingung eines Einmassenschwingers	10
2.1.5 Erzwungene Schwingung	13
2.1.5.1 Ungedämpfte erzwungene Schwingung eines Einmassenschwingers	13
2.1.5.2 Gedämpfte erzwungene Schwingung eines Einmassenschwingers	15
<b>3 Softwarelösungen</b>	<b>18</b>
3.1 DLubal RFEM 6	20
3.1.1 Add-Ons für dynamische Analyse	20
3.1.1.1 Modalanalyse	21
3.1.1.2 Antwortspektrenverfahren	21
3.1.1.3 Zeitverlaufsverfahren	21
3.1.1.4 Pushover-Analyse	22
3.1.1.5 Harmonische Frequenzganganalyse	22
3.1.2 Modellierung des Beispiels 2.1	22
<b>4 Simulation des Stahltragwerks</b>	<b>32</b>
4.1 Der Schütteltisch (Shake Table)	33
4.2 Kalibrierung des Modells	35
4.2.1 Versuch	35
4.2.2 RFEM-Modellierung	41
4.3 Aufbau des Stahltragwerks	54
4.4 Bestimmung der Eigenfrequenz und der Dämpfung	57

4.5	Modellierung des Stahltragwerks	63
4.6	Statische Versuche	66
4.7	Modalanalyse	73
<b>5</b>	<b>Zeitverlaufsanalyse</b>	<b>75</b>
5.1	Versuche	75
5.1.1	Versuchsergebnisse	76
5.2	RFEM	79
5.2.1	Ergebnisse	85
5.2.1.1	Antwort 1	86
5.2.1.2	Antwort 2	89
5.2.1.3	Antwort 3	92
<b>6</b>	<b>Antwortspektrenverfahren</b>	<b>95</b>
6.1	Annahme	95
6.2	Ergebnisse	96
6.2.1	Modalanalyse	96
6.2.2	Antwortspektrenverfahren	96
6.2.2.1	Kontrolle des Ergebnisses	97
<b>7</b>	<b>Pushover-Analyse</b>	<b>100</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>101</b>
8.1	Zusammenfassung	101
8.2	Ausblick	101
<b>Literatur</b>		<b>103</b>
<b>Anhang „Nutzung KI-Tools“</b>		<b>105</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Mit zunehmender Komplexität und der Möglichkeit, Bauwerke immer besser und realitätsnäher abzubilden, werden FEM-Programme immer umfangreicher und komplizierter in der Eingabe. Aufgrund des Klimawandels kommt es häufiger zu außergewöhnlichen Ereignissen wie Starkwind, Überschwemmungen oder Erdbeben, die Bauwerke dynamisch belasten.

Laut [MAUERWERK KALENDER 2023] wird die DIN 4149 durch die DIN EN 1998-1 in Verbindung mit dem Nationalen Anhang DIN EN 1998-1/NA ersetzt. Der Eurocode 8 bietet gegenüber der DIN 4149 zusätzliche Möglichkeiten zur dynamischen Analyse von Tragwerken. Die DIN 4149 stellt lediglich linear-elastische Berechnungsverfahren wie das Vereinfachte Antwortspektrenverfahren und das Multimodale Antwortspektrenverfahren vor. Im Eurocode 8 sind zusätzlich nichtlineare Verfahren wie die statische Pushover-Analyse und die dynamische nichtlineare Zeitverlaufsberechnung enthalten. Eine weitere wesentliche Änderung gegenüber der DIN 4149 ist die vollständige Überarbeitung der Erdbebenkarten.

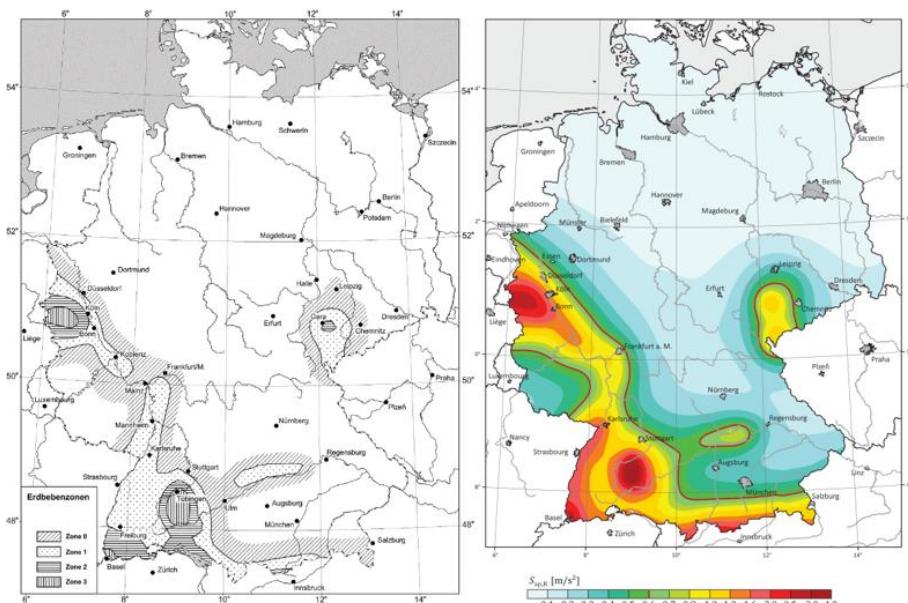


Abb. 1.1: Erdbebenzonen (links) [DIN 4149] und räumliche Verteilung der spekulalen Antwortbeschleunigung (rechts) [DIN EN 1998-1/NA]

Die in Abbildung 1.1 links dargestellte Karte zeigt die Erdbebenzonenkarte nach DIN 4149. Darin sind die Erdbebenzonen 0 bis 3 dargestellt, wobei jede Zone einem Intensitätsintervall entspricht, das von einer einheitlichen Erdbebengefährdung ausgeht. Den Erdbebenzonen ist jeweils ein Bemessungswert der

Bodenbeschleunigung zugeordnet. In Abbildung 1.2 wird die Zuordnung der jeweiligen Bodenbeschleunigungen zu den Erdbebenzonen dargestellt.

Erdbebenzone	Intensitätsintervalle	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung $a_{gR}$ m/s <sup>2</sup>
0	$6 \leq I < 6,5$	–
1	$6,5 \leq I < 7$	0,4
2	$7 \leq I < 7,5$	0,6
3	$7,5 \leq I$	0,8

Abb. 1.2: Zuordnung von Intensitätsintervallen und Bemessungswerten der Bodenbeschleunigung zu den Erdbebenzonen [DIN 4119]

Die in Abbildung 1.1 rechts dargestellte Karte ist im Vergleich zur Erdbebenzonenkarte nach [DIN 4149] zonenfrei und zeigt die räumliche Verteilung der spektralen Antwortbeschleunigung im Plateaubereich  $S_{ap,R}$ . Die zonenfreie Darstellung nach [DIN EN 1998] hat den Vorteil, dass an den Grenzen benachbarter Zonen keine sprunghaften Änderungen der zu berücksichtigenden Erdbebeneinwirkungen mehr auftreten. Die Bezugsspitzenbeschleunigung  $a_{gR}$  kann aus der spektralen Antwortbeschleunigung im Plateaubereich  $S_{ap,R}$  mit dem spektralen Überhöhungsfaktor  $\beta_0 = 2,5$  näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$a_{gR} = \frac{S_{ap,R}}{2,5}$$

### 1.1.1 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren

Das vereinfachte Antwortspektrenverfahren darf angewendet werden, wenn bestimmte Kriterien erfüllt sind. Eines dieser Kriterien ist beispielsweise die Regelmäßigkeit im Grundriss und im Aufriss des Gebäudes. [DIN 4149]

Die Grundlage des vereinfachten Antwortspektrenverfahrens ist ein ebenes Modell, in dem das Tragwerk als ein Einmassenschwinger oder ein Mehrmassenschwinger abgebildet wird. Die Gesamterdbebenkraft wird wie folgt berechnet:

$$F_b = S_d(T_1) * M * \lambda$$

Dabei ist:

$S_d(T_1)$  die Ordinate des Bemessungsspektrums

$T_1$  die Grundschwingzeit des Bauwerks für die Translationsbewegung in der betrachteten Richtung

$M$  die Gesamtmasse des Bauwerks

$\lambda$  ein Korrekturfaktor

Die Verteilung der Gesamterdbebenkraft auf das Tragwerk erfolgen affin zur ersten Eigenform oder vereinfacht linear über die Bauwerkshöhe. Die Einzelkräfte werden jeweils auf die Höhe der Einzelmassen angesetzt. [MAUERWERK KALENDER 2023]

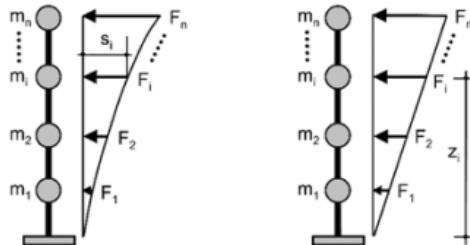


Abb. 1.3: Verteilung der Erdbebenkraft: affin zur ersten Eigenform (links) und  
höhenproportional (rechts) [MAUERWERK KALENDER 2023]

### 1.1.2 Multimodales Antwortspektrenverfahren

Das multimodale Antwortspektrenverfahren ist allgemein anwendbar und kann mit ebenen oder räumlichen Modellen durchgeführt werden. Bei räumlichen Modellen ist die Erdbebeneinwirkung entlang der maßgebenden horizontalen Richtungen der Grundrisskonfiguration und in den zugehörigen orthogonalen Achsen anzusetzen. Dabei sind die wesentlichen Schwingformen in jeder Richtung in der Berechnung zu berücksichtigen. Die Berechnung der Schwingungsformen muss mit einem Berechnungsprogramm mittels einer modalen Analyse erfolgen. [MAUERWERK KALENDER 2023]

### 1.1.3 Nichtlineare statische (pushover) Berechnung

In der [DIN EN 1998] ist die Pushover-Berechnung zugelassen. Dieses Verfahren ist besonders nützlich, um das nichtlineare Verhalten von Strukturen zu untersuchen, insbesondere das plastische Verhalten und die Bildung von Fließgelenken unter Erdbebenlasten. Grundlage dieses Verfahrens ist die Berechnung einer Last-Verformungs-Kurve, der sogenannten Kapazitätskurve, welche die Bauwerkskapazität darstellt. Um diese zu ermitteln, wird ein Gebäude horizontal belastet, wobei die horizontale Last monoton gesteigert und die Vertikallast konstant gehalten wird. Die horizontale Belastung kann nach [DIN EN 1998-1/4.3.3.2] bestimmt werden. Um die Last-Verformungs-Kurve darzustellen, werden die Horizontalkräfte gegenüber der Kontrollverschiebung aufgetragen. Nach [DIN EN 1998] darf als Kontrollpunkt der oberste Punkt eines Gebäudedaches gewählt werden.

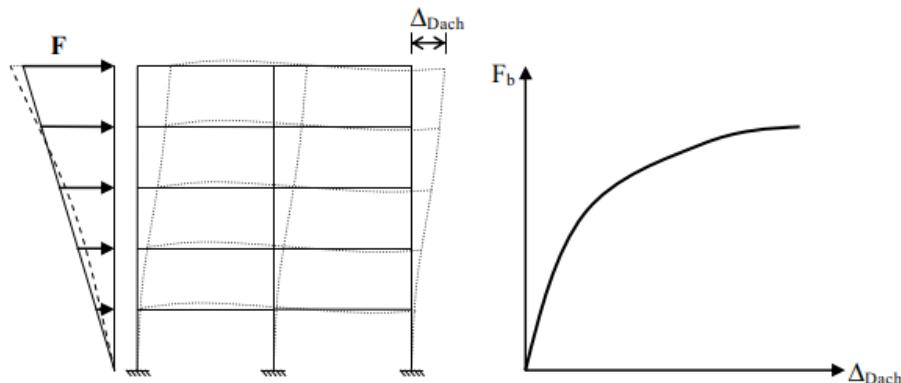


Abb. 1.4: Ermittlung der Last-Verformungskurve (Pushover-Kurve) [Meskouris 2011]

#### 1.1.4 Dynamische nichtlineare Zeitverlaufsberechnung

Wenn eine lineare Berechnung, wie in Abschnitt 1.1.1 beschrieben, nicht ausreicht, wird häufig die Zeitverlaufsberechnung herangezogen. In dieser Methode wird die Reaktion einer Struktur auf eine zeitabhängige äußere Kraft untersucht. Nach [DIN EN 1998] kann diese äußere Belastung entweder künstlich generiert oder auf einer tatsächlich aufgezeichneten Erdbebenbelastung basieren.

## 1.2 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist die Anwendung der Software Dlubal RFEM 6 und der darin enthaltenen Add-Ons: Modalanalyse, Antwortspektrenverfahren, Zeitverlaufsv erfahren und Pushover-Analyse. Mithilfe dieser Module soll eine dynamische Analyse von Einmassenschwingern aus Metall durchgeführt werden. Das Add-On „Harmonische Frequenzanalyse“ ist in RFEM noch nicht freigeschaltet und wird daher nur beschrieben.

## 2 Stand der Kenntnis

### 2.1 Baudynamik

#### 2.1.1 Grundlagen

Die Baudynamik ist ein Bereich des Bauwesens, mit dem sich viele Statiker ungern befassen, da hier die Einwirkungen und Bauwerksreaktionen zeitabhängig sind. Im Gegensatz zur Statik, bei der die Kräfte auf ruhende Strukturen wirken, müssen in der Baudynamik dynamische Effekte berücksichtigt werden.

Was sind dynamische Einwirkungen und welche gibt es? Dynamische Einwirkungen sind Kräfte, die auf Bauwerke wirken und deren Größe und Richtung sich mit der Zeit verändert. Zu den dynamischen Einwirkungen gehören Wind, Erdbeben, Menschen, Maschinen usw. Eine dynamische Einwirkung kann harmonisch sein was ideal ist, jedoch in der Praxis nicht häufig vorkommt. Dabei wird eine Struktur angeregt, die dann mit derselben Amplitude und Periodendauer endlos schwingt. Man spricht hierbei auch von einer ungedämpften harmonischen Schwingung. Häufiger tritt in der Praxis eine periodische Einwirkung auf, wie sie beispielsweise bei einem Fertigungsprozess in der Industrie vorkommt (Abb. 2.1). Ab einem gewissen Zeitpunkt wiederholt sich diese Einwirkung. Es gibt natürlich weitere dynamische Einwirkungen, die hier jedoch nicht weiter behandelt werden.

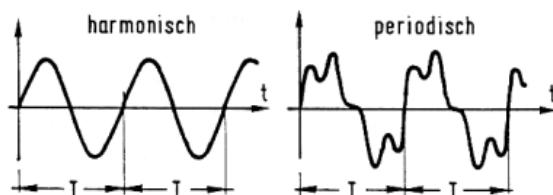


Abb. 2.1: Harmonische Einwirkung (links), periodische Einwirkung (rechts) [Petersen 2018]

Was in der Natur fast immer vorkommt, ist eine transiente Einwirkung (Abb. 2.2). Das kann zum Beispiel ein Erdbeben oder eine Windeinwirkung sein.

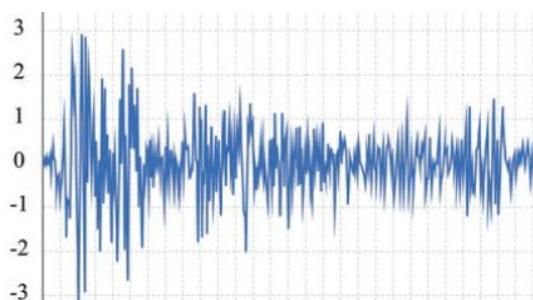


Abb. 2.2: Transiente Einwirkung [Proske 2021]

## 2.1.2 Begriffe

## Amplitude:

Die Amplitude  $A$  einer mechanischen Schwingung, angegeben in der Einheit wie z.B. Meter, bezeichnet die größte Auslenkung der Schwingung aus ihrer Ruhelage. In der Abbildung 2.3 ist die Amplitude mit  $\hat{y}$  angegeben.

## Freie Schwingung:

Eine freie Schwingung tritt auf, wenn ein System nach einer einmaligen Anregung schwingt. Die Schwingung erfolgt in der Eigenfrequenz.

## Erzwungene Schwingung:

Eine erzwungene Schwingung entsteht, wenn ein System durch eine von außen wirkende Kraft angeregt wird. Das System schwingt in der Frequenz der äußeren Anregung.

## Eigenkreisfrequenz

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Mit:

*k* Federkonstante in [kN/m]

*m* Masse in [t]

Die Eigenkreisfrequenz  $\omega$   $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$  ist eine Winkelgeschwindigkeit, die angibt, wie schnell ein System um seinen Gleichgewichtszustand schwingt. Sie beschreibt die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde multipliziert mit  $2\pi$ , also die Geschwindigkeit der Schwingung in Radiant pro Sekunde. Ein anschauliches Beispiel, das diese Frequenz verdeutlicht, ist die Bewegung eines Punktes auf einem Kreis.

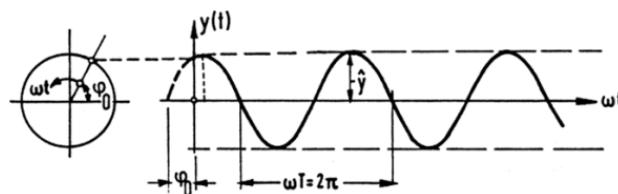


Abb. 2.3: Veranschaulichung zur Eigenkreisfrequenz [Petersen 2018]

### **Eigenfrequenz**

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Wenn eine Struktur angeregt wird, schwingt sie mit ihrer Eigenfrequenz  $f \left[ \frac{1}{s} = s^{-1} = Hz \right]$  weiter. Diese gibt die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde an.

### **Periodendauer:**

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi * \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{2\pi}{\omega}$$

Die Periodendauer  $T [s]$  ist die Zeitdauer eines vollen Schwingungszyklus, nach dem ein ausgezeichnetes Merkmal wiederkehrt (Abb. 2.1).

### **Erregerfrequenz:**

Die Erregerfrequenz ist die Frequenz einer äußeren Kraft, die auf ein System einwirkt und es zu einer erzwungenen Schwingung bringt.

### **Resonanz:**

Wenn die Erregerfrequenz der Eigenfrequenz des Systems entspricht, tritt Resonanz auf. Dadurch entstehen große Amplituden, die zum Versagen des Systems führen können.

### **Modale Masse:**

Die modale Masse beschreibt, wie viel der Gesamtmasse eines Systems zur Schwingung aktiviert wird.

### 2.1.3 Bewegungsgleichung eines Einmassenschwingers

Der Einmassenschwinger ist ein einfaches, schwingungsfähiges Modell zur Darstellung von Schwingungen. Die Bewegungsgleichung beschreibt die Schwingung eines Systems, das aus einer Masse  $m$ , einer Federkonstante  $k$  und einer Dämpfung  $c$  besteht.  $F(t)$  ist die von der Zeit abhängige äußere Einwirkung. [Proske 2021]

$$k * u + c * \dot{u} + m * \ddot{u} = F(t)$$

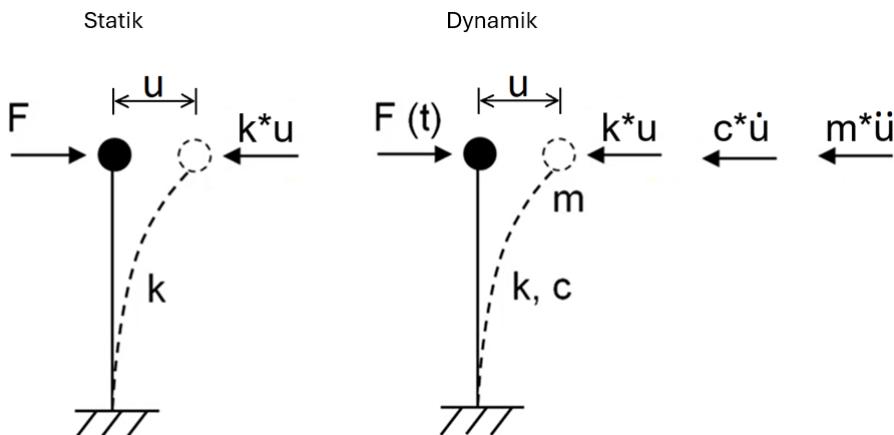


Abb. 2.4: Unterschied Statik (links) und Dynamik (rechts)

Die Abbildung 2.4 zeigt den Unterschied zwischen Statik und Dynamik. In der Statik hängt die Kraft nur von der Verschiebung und der Steifigkeit ab.  $F$  ist die äußere Einwirkung und  $k * u$  ist die Gegenkraft. In der Dynamik hingegen kommen zur statischen Gegenkraft noch die Dämpfungs- und Trägheitskraft hinzu. Zusätzlich wird aus der statischen Kraft  $F$  eine zeitabhängige dynamische Einwirkung  $F(t)$ . Es wird außerdem gezeigt, dass die erste Ableitung der Verschiebung  $u$  die Geschwindigkeit ergibt, während die zweite Ableitung zur Beschleunigung führt. [Proske 2021]

### 2.1.4 Freie Schwingung

#### 2.1.4.1 Ungedämpfte freie Schwingung eines Einmassenschwingers

Lässt man die Dämpfung in der ursprünglichen Differentialgleichung weg und setzt sie gleich Null, spricht man von einer ungedämpften freien Schwingung.

$$k * u + m * \ddot{u} = 0$$

Nun wird diese Gleichung durch die Masse  $m$  geteilt. Man bekommt:

$$\frac{k}{m} * u + \ddot{u} = 0$$

An dieser Stelle wird die Eigenkreisfrequenz  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  eingeführt. Man erhält:

$$\omega^2 * u + \ddot{u} = 0$$

Die allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung für ungedämpfte Schwingungen ist:

$$u(t) = C * \cos(\omega * t) + C_1 * \sin(\omega * t)$$

Hierbei sind  $C$  und  $C_1$  Konstanten, die durch Randbedingungen bestimmt werden.

Beispiel 2.1: Masseloser Träger

Gegeben ist ein HEA 200 aus S235 mit der konzentrierten Masse von  $m = 0,50t$  am freien Ende. Die Anfangsauslenkung beträgt  $A = 0,01m$ . Das Eigengewicht des Trägers soll nicht betrachtet werden.

Es soll der Zeitverlauf der Verschiebung dargestellt werden.

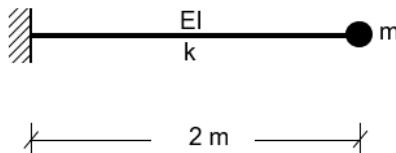


Abb. 2.5: Masseloser Kragträger mit konzentrierter Masse am freien Ende

$$k = \frac{3EI}{l^3} = \frac{3 * 21000 \frac{kN}{cm^2} * 3690 cm^4 * 10^{-4}}{(2m)^3} = 2905,875 \frac{kN}{m}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{2905,875 \frac{kN}{m}}{0,50t}} = 76,23 \frac{rad}{s}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{76,23 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{2\pi} = 12,13 \text{Hz}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{12,13 \text{Hz}} = 0,082 \text{s}$$

Hinweis: Es wird empfohlen, die Einheiten für die Federkonstante und die Masse entsprechend dem Beispiel „Masseloser Kragträger“ zu wählen. Andernfalls könnten unpassende Werte entstehen.

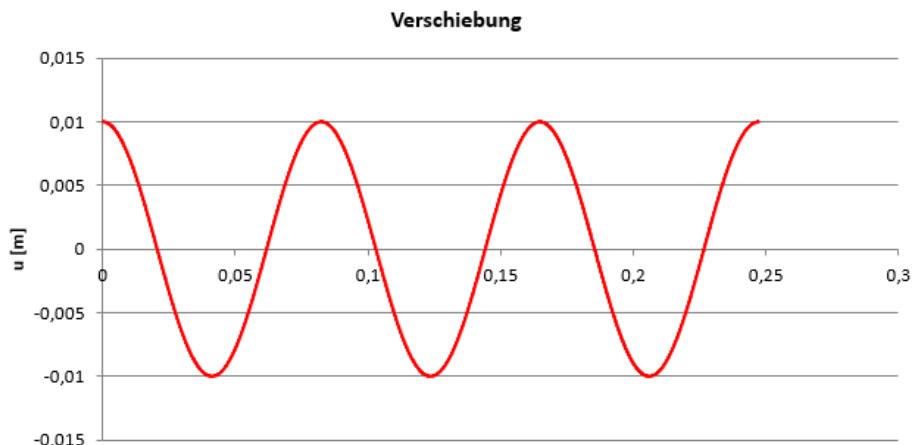


Abb.2.6: Zeitverlauf der Verschiebung eines Einmassenschwingers [Werkle 2017]

In diesem ungedämpften harmonischen Schwingungssystem bleibt die Anfangsauslenkung von  $0,01 \text{m}$  als Amplitude erhalten. Das System schwingt unendlich zwischen den beiden Extrempunkten, ohne dass die Amplitude abnimmt. Theoretisch stellt dies einen idealen Zustand dar, in dem die Amplitude konstant bleibt.

#### 2.1.4.2 Gedämpfte freie Schwingung eines Einmassenschwingers

Die Bewegungsgleichung einer gedämpften freien Schwingung lautet:

$$k * u + c * \dot{u} + m * \ddot{u} = 0$$

Die Lösung:

$$u(t) = e^{-\xi * \omega * t} * (C * \cos(\omega_d * t) + C_1 * \sin(\omega_d * t))$$

Der Ausdruck in der Klammer beschreibt die ungedämpfte harmonische Schwingung mit der gedämpften Eigenkreisfrequenz  $\omega_d = \omega * \sqrt{1 - \xi^2}$  welche kleiner als die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz  $\omega$  ist. Der Term  $e^{-\xi * \omega * t}$  beschreibt die Abnahme der Amplitude aufgrund der Dämpfung. Damit wird das Lehrsche Dämpfungsmaß eingeführt, welches beispielsweise vom Material abhängt. Das Dämpfungsmaß  $\xi$  ist ein dimensionsloser Parameter, der angibt, wie stark ein System gedämpft ist. Die folgende Tabelle 2.1 zeigt typische Werte für Dämpfungsmaße abhängig vom Baustoff.

Baustoff	Dämpfungsmaß $\xi$ [ % ]	
	elastischer Bereich	elasto-plastischer Bereich
Stahlbeton	1–2	7
Spannbeton	0,8	5
Stahl, verschraubt	1	7
Stahl, verschweißt	0,4	4
Holz	1–3	-
Mauerwerk	1–2	7

Tab. 2.1: Typische Werte für Dämpfungsmaße [Schneider Bautabellen 2022]

Die Dämpfung kann in drei Fälle unterteilt werden.

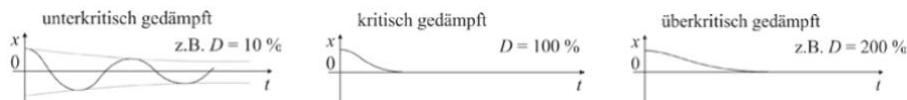


Abb. 2.7: Fall 1: unterkritisch gedämpft (links), Fall 2: kritisch gedämpft (mitte), Fall 3: überkritisch gedämpft (rechts) [Proske 2021]

Fall 1:  $0 < \xi < 1$  beschreibt eine **unkritisch gedämpfte** Schwingung, bei der Amplitude mit der Zeit abnimmt.

Fall 2:  $\xi = 1$  beschreibt eine **kritisch gedämpfte** Schwingung, bei der das System möglichst schnell zur Ruhe kommt, ohne zu schwingen.

Fall 3:  $\xi > 1$  beschreibt eine **überkritisch gedämpfte** Schwingung, bei der das System schneller als in Fall 2 zur Ruhe kommt.

Beispiel 2.2:

Das System und die Randbedingungen vergleiche Beispiel 2.1.

Es soll der Zeitverlauf der Verschiebung dargestellt werden für:

- 1. Ein Dämpfungsmaß  $\xi = 1\%$
- 2. Ein Dämpfungsmaß  $\xi = 7\%$

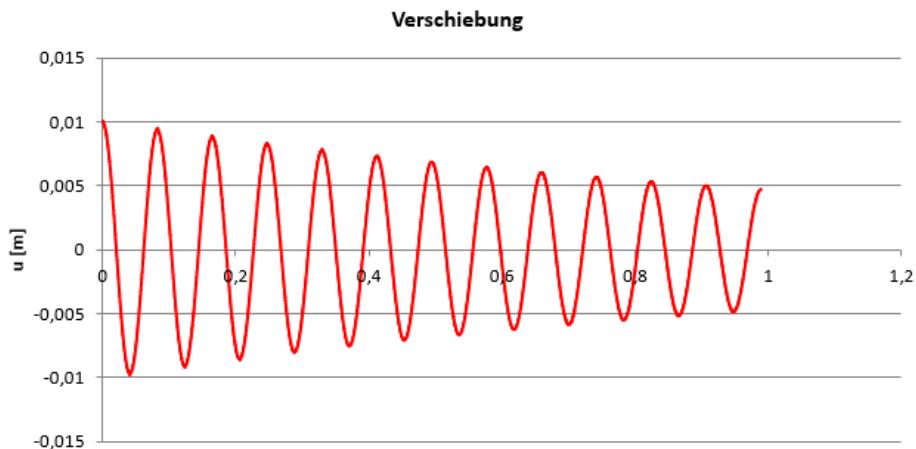


Abb.2.8: Schwingung mir 1% Dämpfung [Werkle 2017]

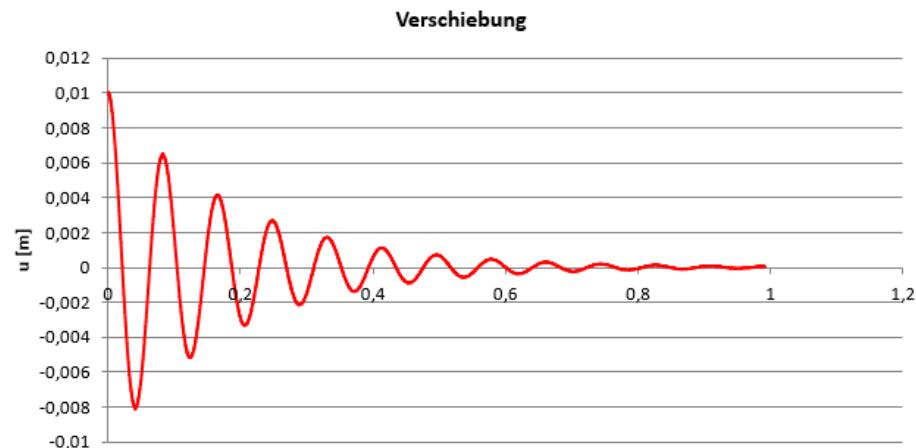


Abb. 2.9: Schwingung mit 7% Dämpfung [Werkle 2017]

Bei einer Dämpfung von 1.0% klingt die Schwingung nur langsam ab. Die Amplitude nimmt allmählich ab, bleibt aber über längere Zeit deutlich erhalten. Nach einer Zeitdauer von ungefähr einer Sekunde oder nach 12 Schwingungen beträgt die Amplitude noch etwa 5mm.

In der Abbildung 2.9 ist die Dämpfung wesentlich höher. Die Amplitude der Schwingung reduziert sich schneller, was zu einem schnelleren Abklingen führt. Bereits nach kürzerer Zeit ist die Auslenkung deutlich kleiner.

Bei einer Dämpfung von 7 % wird außerdem deutlich, dass die Amplitude exponentiell abnimmt. Wenn die Extrempunkte der Schwingungskurve miteinander verbunden werden, ergibt sich eine e-Funktion, die im Allgemeinen dem Ausdruck  $e^{-\xi*\omega*t}$  entspricht.

## 2.1.5 Erzwungene Schwingung

[Proske 2021] beschreibt den Übergang von einer freien zu einer erzwungenen Schwingung gut. In diesem Fall ist die Differentialgleichung nicht mehr gleich Null, sondern gleich einer äußeren, zeitabhängigen Kraft  $F(t)$ . Diese Kraftfunktion ist flexibel und hängt von der jeweiligen Einwirkung ab.

### 2.1.5.1 Ungedämpfte erzwungene Schwingung eines Einmassenschwingers

Im Folgenden wird eine harmonische Krafteinwirkung betrachtet. Die Bewegungsgleichung für einen ungedämpften Einmassenschwinger unter dem Einfluss einer harmonischen Anregung lautet:

$$k * u + m * \ddot{u} = F(t) = F_0 * \sin(\Omega * t)$$

Hierbei sind:

- $F_0$ : die Amplitude der äußeren Kraft
- $\Omega$ : die Erregerkreisfrequenz

Auf eine detaillierte Lösung der Differentialgleichung wird hier verzichtet, und stattdessen wird direkt die Gesamtlösung gezeigt.

Die Gesamtlösung lautet:

$$u(t) = C * \cos(\omega * t) + C_1 * \sin(\omega * t) + \frac{F_0}{m * (\omega^2 - \Omega^2)} * \sin(\Omega * t)$$

An dieser Stelle wird ein weiterer sehr wichtiger Begriff eingeführt: das Abstimmungsverhältnis  $\eta$ .

Das Abstimmungsverhältnis wird wie folgt berechnet:

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega}$$

Ein Wert von  $\eta = 1,0$  bedeutet, dass sich das System in Resonanz befindet, was in der Baudynamik problematisch ist. Das bedeutet, dass die Eigenfrequenz des Systems der Erregerfrequenz entspricht. Um Resonanz zu vermeiden, sollte  $\omega$  so gewählt werden, dass der Bereich  $0,8 * \omega < \Omega < 1,2 * \omega$  nicht erreicht wird. [Schneider Bautabellen 2022]

Beispiel 2.3:

Das System und die Randbedingungen vergleiche Beispiel 2.1.

Es soll der Zeitverlauf der Verschiebung für ein Abstimmungsverhältnis  $\eta = 1,0$  dargestellt werden.

Eigenkreisfrequenz:  $\omega = 76,23 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Erregerkreisfrequenz:  $\Omega = 76,23 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Abstimmungsverhältnis:  $\eta = \frac{76,23 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{76,23 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 1,0$  (Resonanz)

Äußere Kraft:  $F_0 = 1,0 \text{kN}$

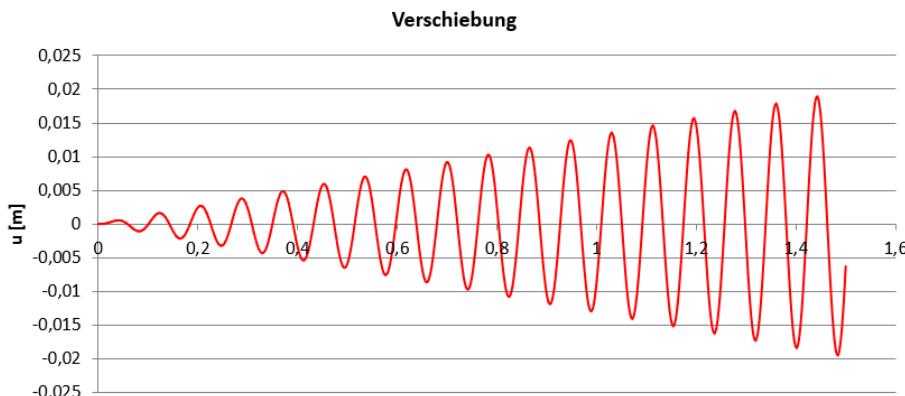


Abb. 2.10: Resonanz [Werkle 2017]

In der Abbildung 2.10 wird eine Schwingung eines Systems bei Resonanz dargestellt. In diesem Zustand erreicht die Amplitude der Schwingung mit der Zeit theoretisch unendliche Werte. Dies ist ein kritischer Zustand, da er zu strukturellen Schäden führen kann.

### 2.1.5.2 Gedämpfte erzwungene Schwingung eines Einmassenschwingers

Nun ist man an dem Punkt, an dem die Bewegungsgleichung eines Einmassenschwingers vollständig vorliegt, wie im Abschnitt 2.1.3 gezeigt. Diese lautet:

$$k * u + c * \dot{u} + m * \ddot{u} = F(t) = F_0 * \sin(\Omega * t)$$

Wie man erkennen kann, wird die Lösung immer komplizierter. Daher hier nur die Lösung:

$$u(t) = C * e^{-\xi * \omega * t} * \cos(\omega_d * t) + C_1 * e^{-\xi * \omega * t} * \sin(\omega_d * t) + \frac{F_0}{\sqrt{k - m * \Omega^2)^2 + (c * \Omega)^2}} * \sin(\Omega * t)$$

Beispiel 2.3:

Das System und die Randbedingungen vergleiche Beispiel 2.1.

Gegeben:

Kraft:  $F_0 = 10,0 \text{ kN}$

Erregerkreisfrequenz:  $\Omega = 65,97 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Dämpfung:  $\xi = 5,0\%$

Es soll der Zeitverlauf der Verschiebung dargestellt werden.

Setzt man die gegebenen Werte in  $F(t)$ , erhält man den Verlauf einer harmonischen, periodische Krafteinleitung. (Abbildung 2.11)

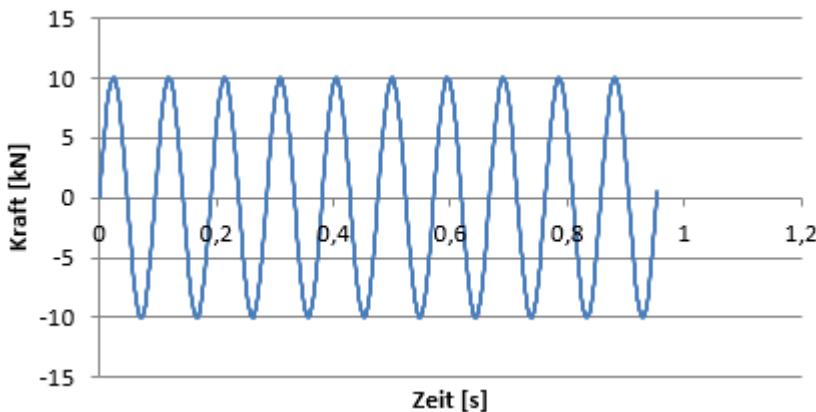


Abb. 2.11: Harmonische, periodische Krafteinleitung [Werkle 2017]

Es ist deutlich zu sehen, dass 4,25 Schwingungen in ungefähr 0,4 Sekunden stattfinden, was einer Frequenz von  $f \approx 10,5 \text{ Hz}$  entspricht.

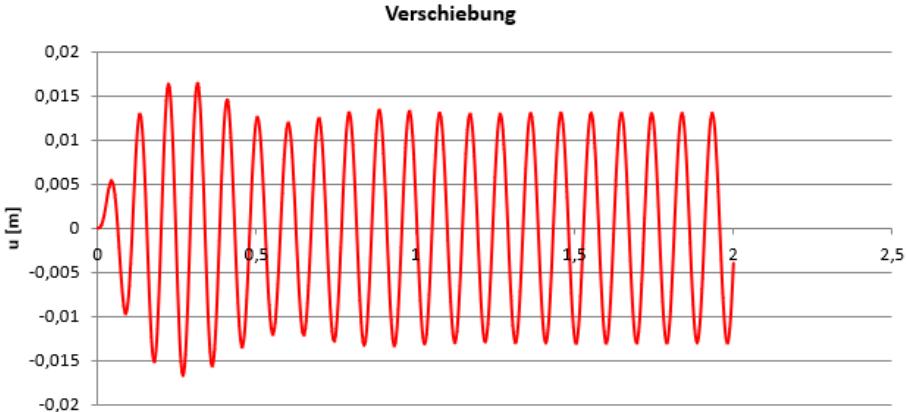


Abb. 2.12: Gedämpfte, erzwungene Schwingung eines Einmassenschwingers [Werkle 2017]

Die Abbildung 2.12 zeigt den Zeitverlauf der Verschiebung. Es ist deutlich zu erkennen, dass das System nicht von Beginn an harmonisch schwingt. Der Einmassenschwinger benötigt eine gewisse Zeit, um auf die Anregung zu reagieren, was hier etwa 1,5 Sekunde dauert. Dieser Zeitraum wird als Einschwingvorgang bezeichnet. Weiter folgt der Verlauf einer harmonischen Schwingung. Zudem lässt sich gut nachvollziehen, dass in 0,5 Sekunden ungefähr 5,25 Schwingungen stattfinden, was der Erregerfrequenz entspricht.

Noch ein wichtiger Faktor ist der dynamische Vergrößerungsfaktor  $V$ , der wie folgt berechnet wird:

$$V = \frac{u_0}{u_{stat}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4 * \xi^2 * \eta^2}}$$

Dabei bei sind:

- $u_0$ : die Amplitude der erzwungenen Schwingung
- $u_{stat} = \frac{F_0}{k}$ : die statische Auslenkung

Multipliziert man die statische Last  $F_0$  mit  $V$ , erhält man eine dynamische Ersatzlast. Diese kann beispielsweise zur Durchführung eines Querschnittsnachweises verwendet werden.

$$\eta = \frac{65,97 \frac{rad}{s}}{76,23 \frac{rad}{s}} = 0,87 \quad (\text{Abstimmungsverhältnis})$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{(1 - 0,87^2)^2 + 4 * 0,05^2 * 0,87^2}} = 3,87 \quad (\text{Dynamischer Vergrößerungsfaktor})$$

$$F_{dyn} = 3,87 * 10kN = 38,7kN \quad (\text{Dynamische Ersatzlast})$$

$$M_{y,dyn} = 38,7kN * 2,0m = 77,4kNm$$

$$\sigma_{y,dyn} = \frac{77,4kNm * 100}{389cm^3} = 19,9 \frac{kN}{cm^2} \leq 23,5 \frac{kN}{cm^2} \quad (\eta = 0,85)$$

$$M_{y,stat} = 10kN * 2,0m = 20kNm$$

$$\sigma_{y,stat} = \frac{20kNm*100}{389cm^3} = 5,1 \frac{kN}{cm^2} \leq 23,5 \frac{kN}{cm^2} \quad (\eta = 0,23)$$

Diese Vergleichsrechnung verdeutlicht, wie sich das Abstimmungsverhältnis  $\eta$  und der dynamische Vergrößerungsfaktor  $V$  auf die Spannungen im Querschnitt auswirken. Bei einer statischen Last von  $10kN$  beträgt die Ausnutzung nur 23%. Wird jedoch dieselbe Last als dynamische Last aufgebracht, steigt die Ausnutzung erheblich auf 85%. Würde das Abstimmungsverhältnis  $\eta = 1,0$  betragen, bei unveränderter Dämpfung, würde der Vergrößerungsfaktor auf 10 steigen, und der Querschnitt könnte dieser Belastung nicht standhalten.

	Statisch	Dynamisch
<b>Last <math>F</math></b>	$10 kN$	$38,7 kN$
<b>Biegemoment <math>M_y</math></b>	$20 kNm$	$77,4 kNm$
<b>Spannung <math>\sigma_y</math></b>	$5,1 \frac{kN}{cm^2}$	$19,9 \frac{kN}{cm^2}$
<b>Ausnutzung</b>	0,23	0,85

Tab. 2.2: Vergleich: Statische und dynamische Einwirkung

### 3 Softwarelösungen

Dynamische Berechnungsverfahren sind wesentliche Werkzeuge in der Ingenieurwissenschaft, um die Reaktionen von Strukturen auf zeitabhängige Lasten wie Wind oder Erdbeben zu analysieren. Mit Hilfe von spezieller Software kann das Verhalten von komplexeren Bauwerken unter dynamischer Belastung simuliert und bewertet werden. Für weniger komplexe Fälle, wie z.B. Einmassenschwinger, bieten auch einfachere Anwendungen eine praktikable Lösung. So wurde in den vorherigen Abschnitten von [Werkle 2017] entwickelte Exceltabellen verwendet, um dynamische Belastung eines Einmassenschwingers zu simulieren.

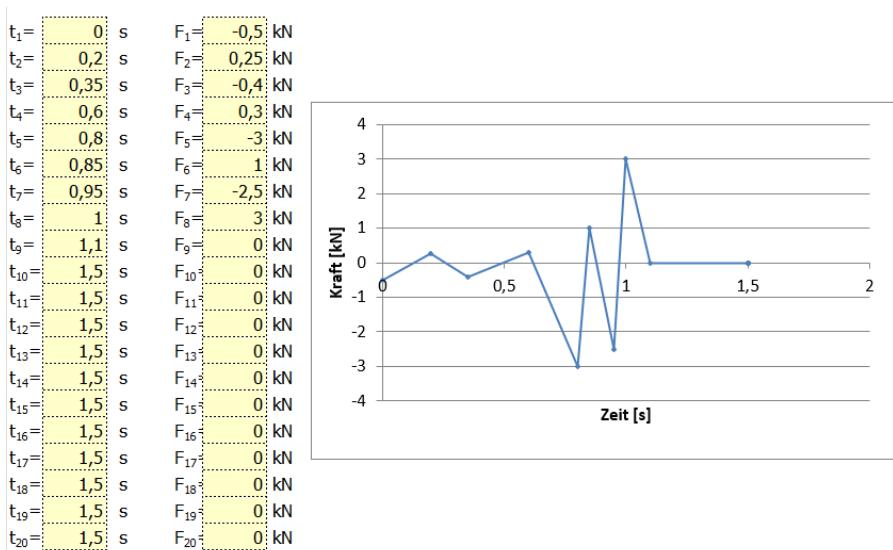


Abb. 3.1: Kraftverlauf  $F(t)$  [Werkle 2017]

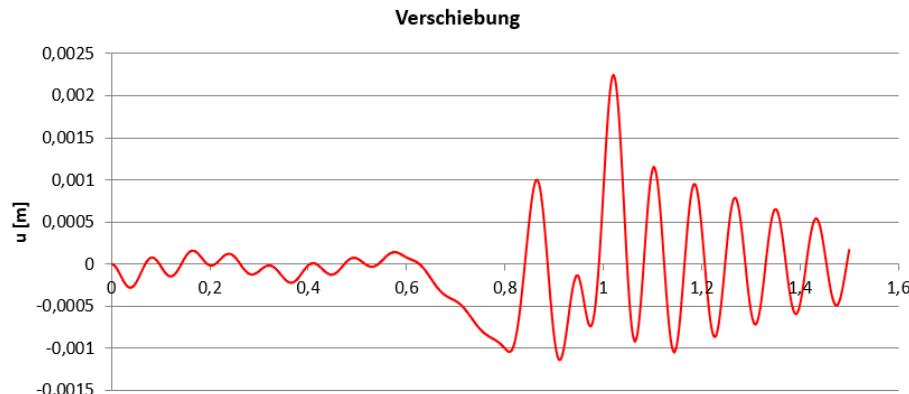


Abb. 3.2: Antwort auf den Kraftverlauf in Abb. 3.1 [Werkle 2017]

Auch von [Werkle 2017] entwickelte Exceltabelle kann dafür genutzt werden, um verschiedene zeitabhängige Kraftverläufe zu erzeugen und die resultierende Schwingungsantwort des Systems zu berechnen. In Abbildung 3.1 ist ein Kraftverlauf  $F(t)$  dargestellt, während Abbildung 3.2 die Antwort des Einmassenschwingers zeigt.

Die Software FRILO bietet dynamische Berechnungsverfahren an, mit denen beispielsweise im FRILO-Gebäudemodell ganze Bauwerke modelliert und erdbebensicher dimensioniert werden können. Die Ermittlung der Erdbebenlasten erfolgt hier nach dem vereinfachten Antwortspektrenverfahren. Ein typischer Anwendungsfall für FRILO in der Erdbebenberechnung wäre ein mehrstöckiges Wohngebäude in einer erdbebengefährdeten Zone. Der Ingenieur verwendet FRILO, um die seismischen Lasten zu berechnen und zu überprüfen, ob das Gebäude die Anforderungen des Eurocode 8 erfüllt. [Handbuch GEO 2024]

Eine geeignete Software für die Analyse komplexer Strukturen ist Dlubal RFEM 6. Mit diesem Programm können verschiedene dynamische Analysen durchgeführt werden, darunter Modalanalysen, das Antwortspektrenverfahren, Zeitverlaufsverfahren und Pushover-Analysen.

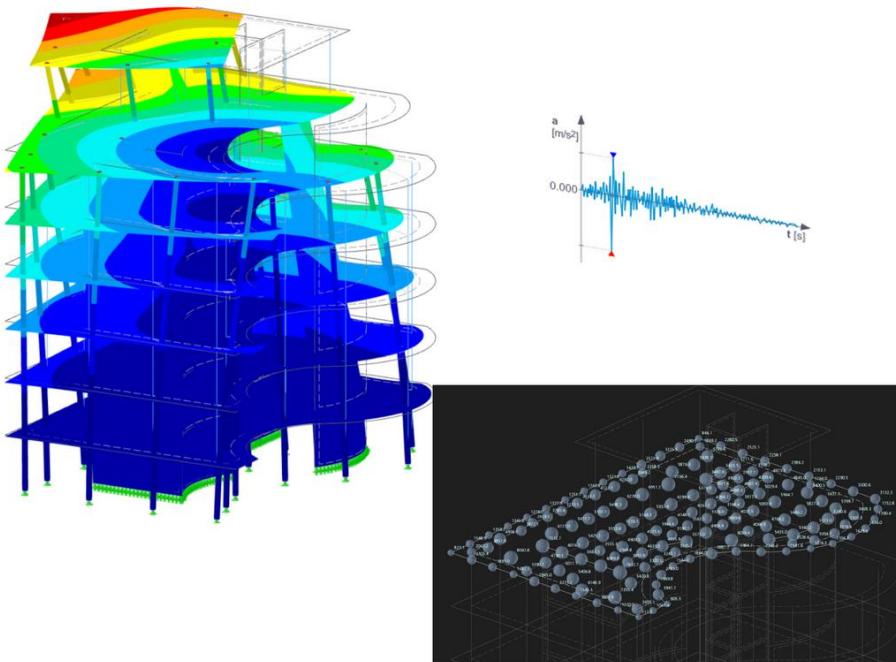


Abb. 3.3: Dynamische Analyse in RFEM 6 [Dlubal 2024]

## 3.1 Dlubal RFEM 6

### 3.1.1 Add-Ons für dynamische Analyse

Damit die genannten Add-Ons in RFEM verwendet werden können, müssen sie zunächst im Register **Add-Ons** in den Modell-Basisangaben aktiviert werden. Im Register **Normen I** kann zudem die Norm ausgewählt werden, die für die dynamische Analyse angewendet werden soll. [Dlubal 2024]

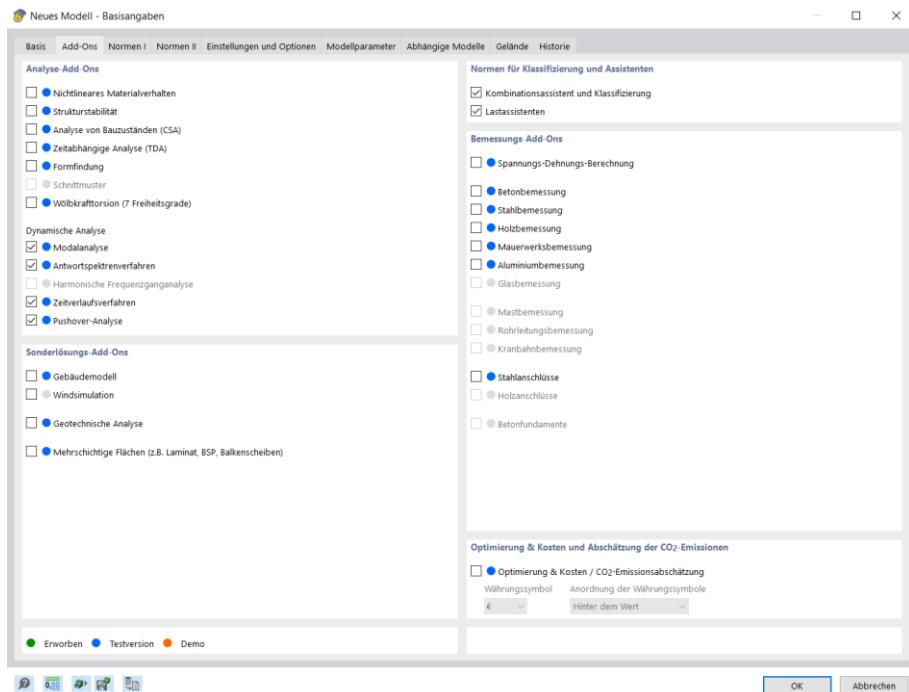


Abb. 3.4: Auswahl der Add-Ons

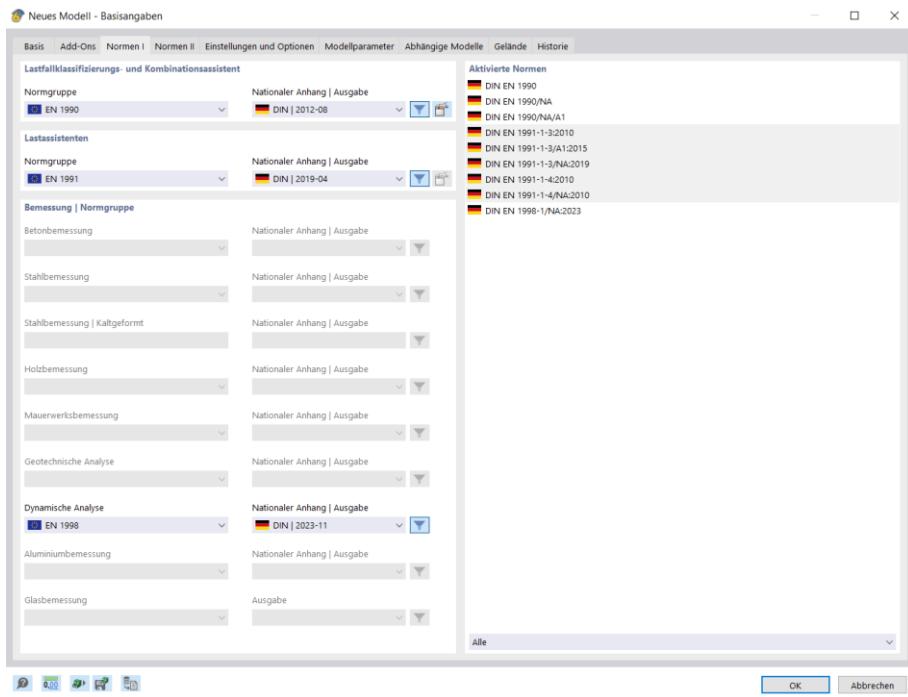


Abb. 3.5: Auswahl der Norm

### 3.1.1.1 Modalanalyse

Das Add-On Modalanalyse bildet die Grundlage für alle weiteren dynamischen Add-Ons in RFEM. Daher muss es aktiviert werden. Mit diesem Add-On wird das dynamische Verhalten eines Modells analysiert, indem die Eigenfrequenzen und die modalen Massen des Systems bestimmt werden. [Dlubal 2024]

### 3.1.1.2 Antwortspektrenverfahren

Das Add-On Antwortspektrenverfahren baut auf der Modalanalyse auf. Es erweitert diese um die Möglichkeit, eine Erdbebenanalyse nach dem multimodalen Antwortspektrenverfahren gemäß Eurocode 8 durchzuführen. Mit diesem Verfahren können die Auswirkungen von Erdbebenlasten auf Tragwerke ermittelt werden. [Dlubal 2024]

### 3.1.1.3 Zeitverlaufsverfahren

Das Add-On Zeitverlaufsverfahren ermöglicht die dynamische Analyse von Tragwerken unter zeitabhängigen äußeren Einwirkungen. Dazu zählen

maschineninduzierte Schwingungen, Stoßkräfte, Explosionen oder Erdbebenlasten. Verschiedene Erregerfunktionen können dabei entweder tabellarisch eingegeben oder als Zeitfunktion definiert werden, um realitätsnahe Belastungen abzubilden. [Dlubal 2024]

### **3.1.1.4 Pushover-Analyse**

Das Add-On Pushover-Analyse dient der Untersuchung des Verformungsverhaltens von Gebäuden unter Erdbebeneinwirkung. Es ermöglicht eine Beurteilung der Auswirkungen eines Erdbebens auf das Modell sowie der zu erwartenden Verformungen oder Schäden. Im Rahmen der Analyse wird die Pushover-Kurve ermittelt, die das nichtlineare statische Verhalten des Gebäudes berücksichtigt. Diese Kurve veranschaulicht die Fähigkeit des Modells, seitliche Lasten aufzunehmen und ihnen standzuhalten. [Dlubal 2024]

### **3.1.1.5 Harmonische Frequenzganganalyse**

Das Add-On Harmonische Frequenzganganalyse befindet sich in Entwicklung. Ziel dieses Tools ist es, die stationäre Systemantwort, also den eingeschwungenen Zustand, für periodisch angeregte Modelle zu ermitteln. [Dlubal 2024]

## **3.1.2 Modellierung des Beispiels 2.1**

Im Abschnitt 2.1.4.1 wurde anhand eines Beispiels die Ermittlung der Eigenfrequenz eines Einmassenschwingers erläutert. Nun soll das gleiche System in RFEM modelliert und die Eigenfrequenz mit dem Add-On Modalanalyse berechnet werden, um sie anschließend mit dem Ergebnis der Handrechnung zu vergleichen. Dabei werden die wesentlichen Eingabeschritte gezeigt.

### **Schritt 1: Modell-Basisangaben**

Um die dynamische Analyse durchführen zu können, müssen in den Modell-Basisangaben bestimmte Einstellungen aktiviert werden:

- Basis → Modelltyp: Auswahl 2D | XZ | Spannung in Ebene. Diese Einstellung ist ausreichend, da die Masse in diesem Beispiel nur in der Z-Richtung wirkt.
- Add-Ons → Dynamische Analyse: Auswahl Modalanalyse

Die restlichen Auswahlmöglichkeiten sind für dieses Beispiel nicht erforderlich.

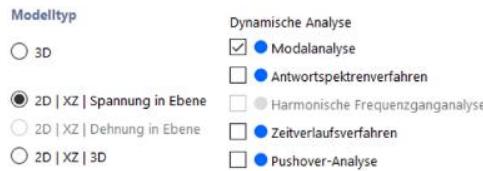


Abb. 3.6: Modell-Basisangaben, Basis → Modelltyp (links), Add-Ons → Dynamische Analyse (rechts)

## Schritt 2: Material und Querschnitt

Nachdem die Basis-Modellangaben mit „OK“ bestätigt wurden, kann die Modellierung beginnen. Zunächst sollten das Material und der Querschnitt festgelegt werden. Dies lässt sich am besten über den Navigator im linken Bildschirmbereich erledigen.

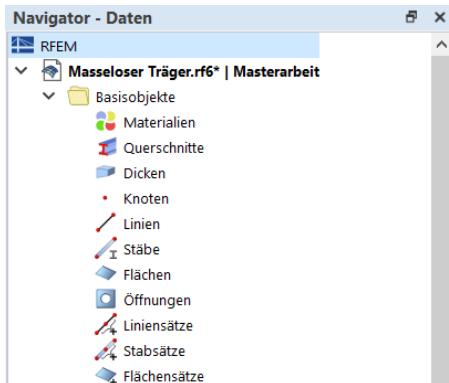


Abb. 3.7: Navigator

Mit einem Doppelklick lassen sich die Materialien öffnen, woraufhin ein neues Fenster erscheint. Das Material kann über die Materialbibliothek  importiert werden. In der Materialbibliothek lässt sich ein Material am einfachsten über die Suchfunktion finden. Hier wird „S235“ eingegeben und mit „OK“ bestätigt.

## Softwarelösungen

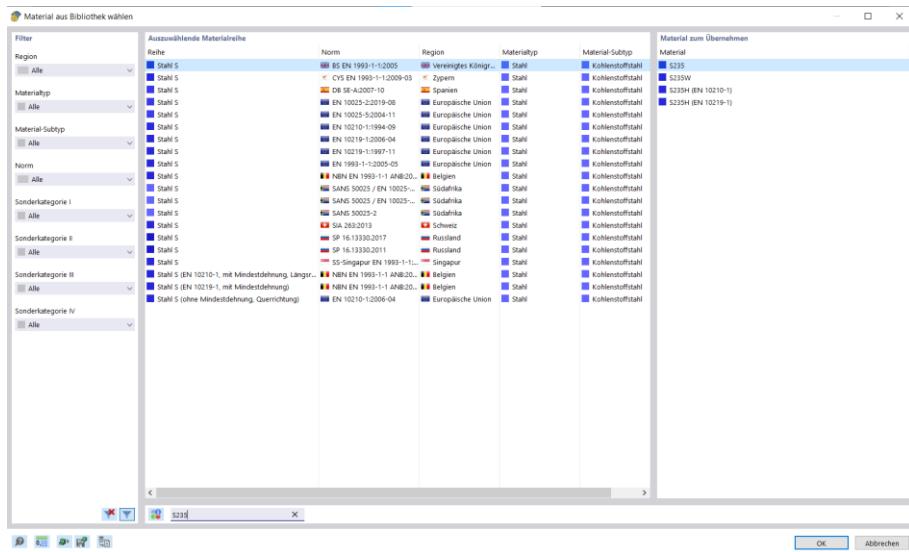


Abb. 3.8: Materialbibliothek

Das Fenster „Neues Material“ kann nun mit „OK“ geschlossen werden. Anschließend können die Querschnitte im Navigator ebenfalls per Doppelklick geöffnet werden. Auch hier wird die Bibliothek auf die gleiche Weise geöffnet, um einen genormten I-Träger auszuwählen. In der Suchleiste wird „HEA 200“ eingegeben und mit „OK“ bestätigt.

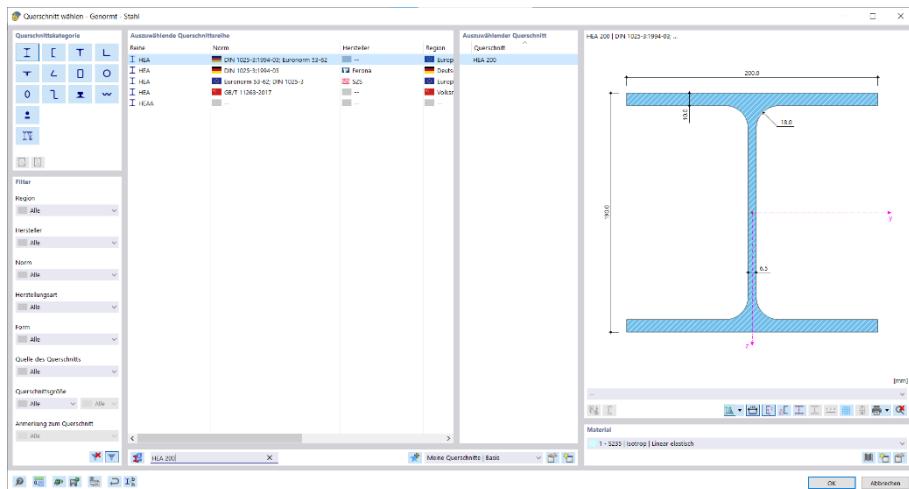


Abb. 3.9: Querschnittsbibliothek

### Schritt 3: Neuer Stab und Lagerung

Nun sind Material und Querschnitt festgelegt, und der Kragarm kann modelliert werden. Zunächst wird ein neuer Einzelstab definiert und anschließend ein dreiwertiges Auflager, also eine Einspannung. Über das Symbol „Neuer Einzelstab “ kann der HEA 200 ausgewählt werden, und mit dem Symbol „Knotenlager “ wird das Auflager definiert. Die folgende Abbildung zeigt das fertige Modell.

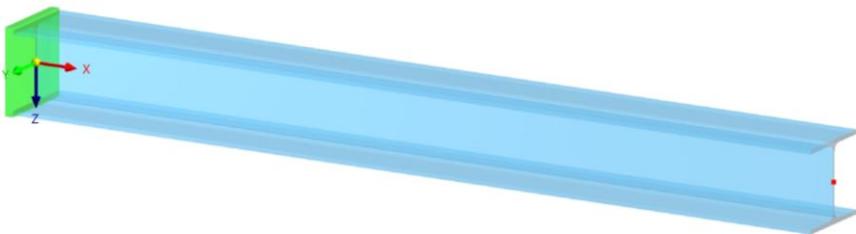


Abb. 3.10: Das fertige Modell

### Schritt 4: Masse und Lastfälle

Mit einem Klick auf das Symbol „Neue Knotenlast “ öffnet sich ein neues Fenster. Hier wird die Masse  $M = 0,50t$  definiert. Dafür muss die Lastart auf „Masse“ geändert werden, und unter „Parameter“ wird der gewünschte Wert eingesetzt.

## Softwarelösungen

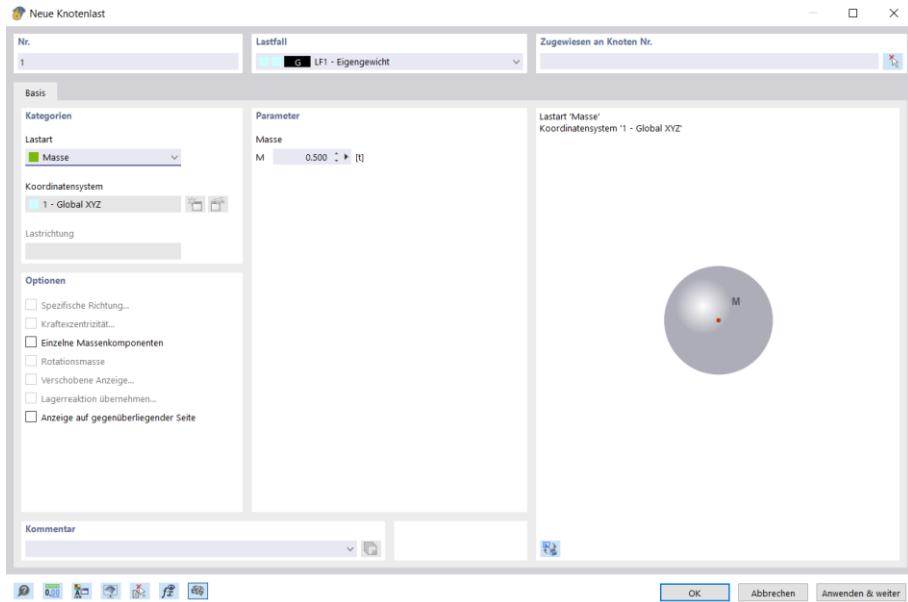


Abb. 3.11: Neue Knotenlast

Nach dem Bestätigen mit „OK“ muss die Last an der richtigen Stelle angesetzt werden. Dafür wird der Knoten am freien Ende des Kragträgers angeklickt und das Fenster „Zuordnung der Knoten“ mit „OK“ geschlossen. Als Nächstes soll der Kragträger als Drahtmodell dargestellt werden, um später das Ergebnis besser zu erkennen. Dazu muss dieses Symbol so oft angeklickt werden, bis die gewünschte Darstellung angezeigt wird.

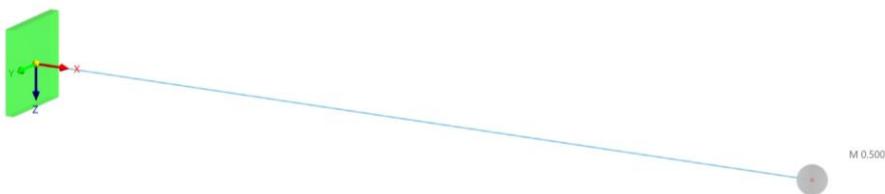


Abb. 3.12: Drahtmodell mit der Masse am freien Ende

Nun kommt der letzte Schritt, bevor das System berechnet werden kann. Für die Durchführung einer Modalanalyse muss diese unter den Lastfällen aktiviert werden. Dazu gelangt man entweder über das Anklicken des Symbols „Aktiven Lastfall bearbeiten“ in der Symbolleiste oder über den Navigator: Lastfälle und Kombinationen → Lastfälle → Rechtsklick → Bearbeiten.

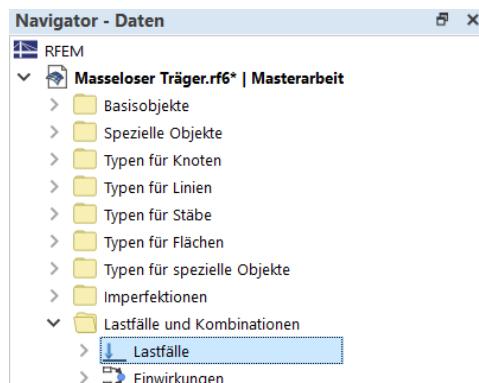


Abb. 3.13: Navigator → Lastfälle

Das Fenster Lastfälle und Kombinationen ist geöffnet. Im Register Lastfälle wird in der Liste im linken Bereich bereits ein Lastfall mit dem Namen „Eigengewicht“ angezeigt. Dieser muss zunächst bearbeitet werden. Dazu ist im Abschnitt Basis die Einstellung „Statikanalyse“ von „SA1 – 1. Ordnung“ auf „SA2 – 2. Ordnung (P-Δ) | Picard | 100 | 1“ umzustellen. Zusätzlich sollten die Statikanalyse-Einstellungen überprüft werden, um sicherzustellen, dass bei der späteren Berechnung keine Fehlermeldungen auftreten. Das Symbol „Statikanalyse-Einstellungen bearbeiten“ muss dafür angeklickt werden. Die erforderlichen Einstellungen sind in Abbildung 3.14 gezeigt

## Softwarelösungen

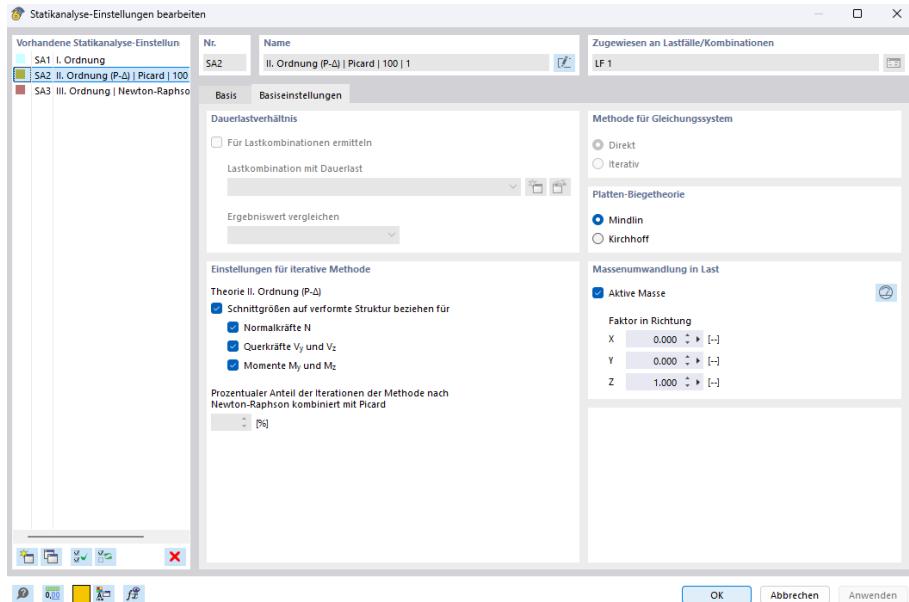


Abb. 3.14: Statikanalyse-Einstellungen

Da das Eigengewicht des Trägers in diesem Fall nicht berücksichtigt werden soll, muss es im Lastfall 1 (LF1) deaktiviert werden. Dazu muss das Häkchen bei „Aktives Eigengewicht“ entfernt werden



Abb. 3.15: Deaktivierung des Eigengewichts

Anschließend wird mit dem Symbol „Neuen Lastfall erzeugen“ ein neuer Lastfall erstellt und mit dem Namen „Modalanalyse“ versehen. Es ist wichtig, die Modalanalyse-Einstellungen zu überprüfen. Dafür klickt man auf das Symbol „Modalanalyse-Einstellungen bearbeiten“. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die erforderlichen Einstellungen.

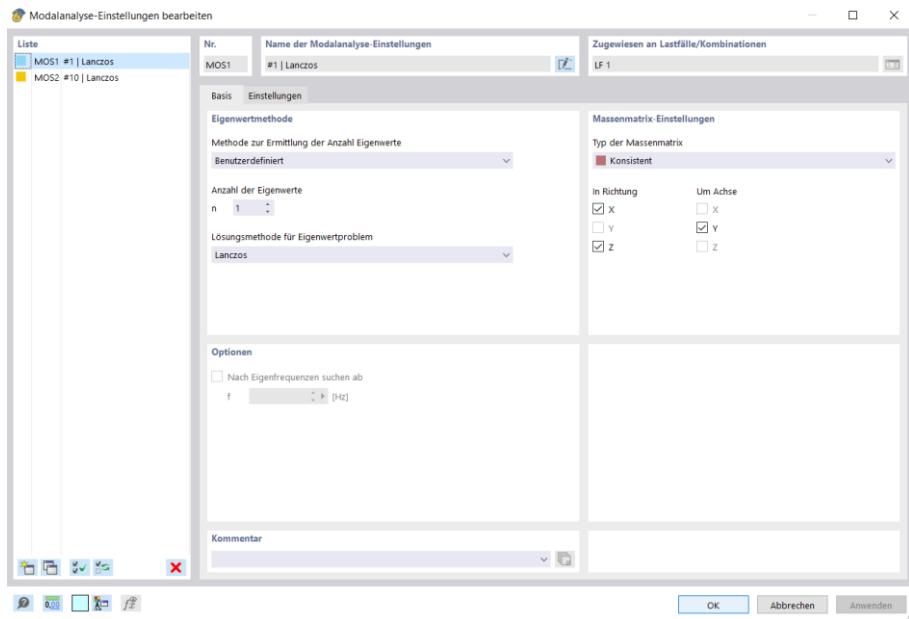


Abb. 3.16: Modalanalyse-Einstellungen

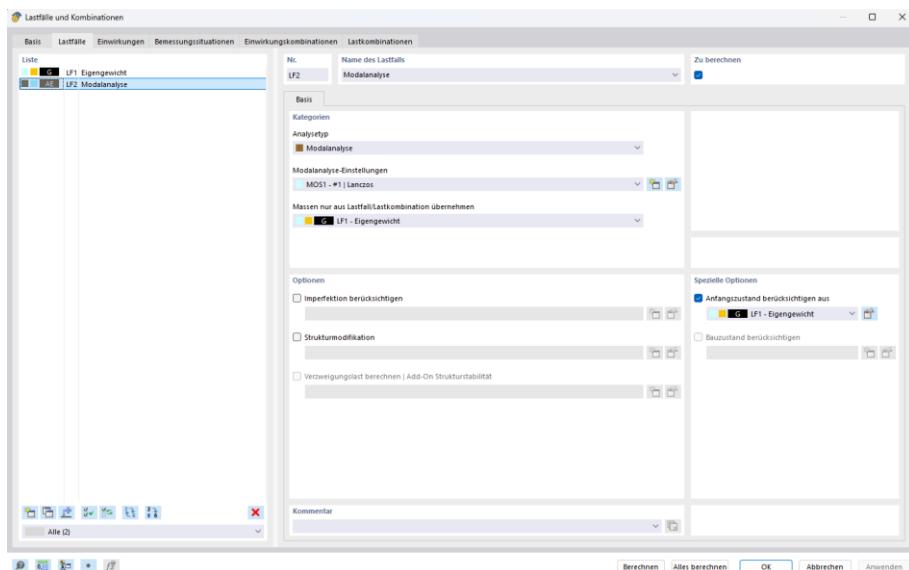


Abb. 3.17: Lastfälle und Kombinationen

### Schritt 5: Berechnen und Ergebnisse

Die Berechnung kann nun mit einem Klick auf „Alles berechnen “ gestartet werden. Die Ergebnisse werden in der Tabelle im unteren Bereich angezeigt, einschließlich der Eigenfrequenz  $f$  und der Periodendauer  $T$ .

Eigenfrequenz $f$ [Hz]	Eigenperiode $T$ [s]
11.747	0.085

Abb. 3.18: Ergebnisse

Vergleicht man die Ergebnisse aus RFEM mit denen aus Beispiel 2.1, lassen sich kleine Abweichungen sowohl bei der Eigenfrequenz als auch bei der Periodendauer feststellen.

	RFEM	Beispiel 2.1
Eigenfrequenz $f$	11,747 Hz	12,13 Hz
Periodendauer $T$	0,085 s	0,082 Hz

Tab. 3.1: Vergleich: RFEM und Beispiel 2.1

Diese Abweichung ist marginal und könnte vernachlässigt werden. Ziel ist es jedoch, das System so genau wie möglich abzubilden und die Ursachen der Abweichung zu verstehen.

In der Handrechnung wurde nur die Biegesteifigkeit berücksichtigt und der Einfluss der Schubsteifigkeit vernachlässigt. In RFEM kann dies ebenfalls entsprechend eingestellt werden. Um den Einfluss der Schubsteifigkeit auszuschließen, muss der Querschnitt in RFEM bearbeitet werden. Unter den Optionen kann die Schubsteifigkeit deaktiviert werden.

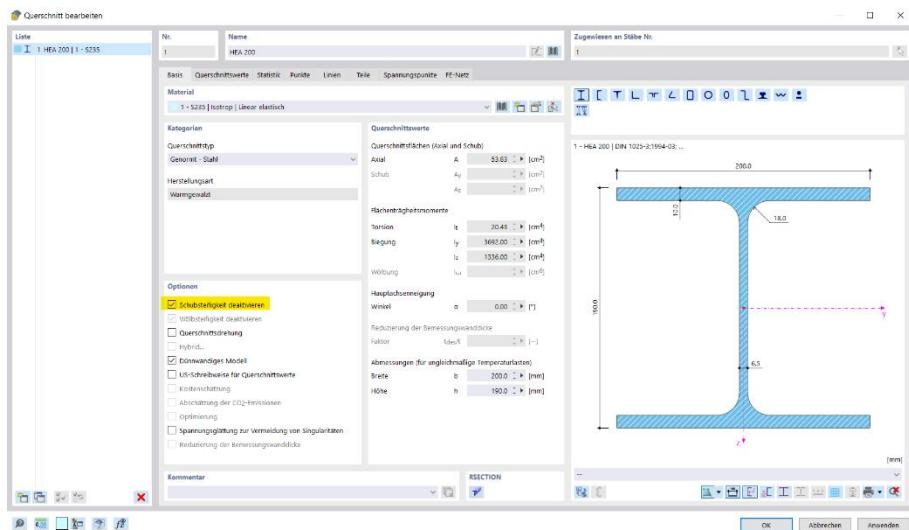


Abb. 3.19: Deaktivierung der Schubsteifigkeit

Die Berechnung soll nun wiederholt werden. Es ergeben sich folgende Ergebnisse.

Eigenfrequenz f [Hz]	Eigenperiode T [s]
12.136	0.082

Abb. 3.20: Ergebnisse nach der Deaktivierung der Schubsteifigkeit

	RFEM	Beispiel 2.1
<b>Eigenfrequenz f</b>	12,136 Hz	12,13 Hz
<b>Periodendauer T</b>	0,082 s	0,082 Hz

Tab. 3.2: Vergleich nach der Deaktivierung der Schubsteifigkeit

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ergebnisse der Handrechnung mit denen von RFEM übereinstimmen. Natürlich war die erste Berechnung in RFEM nicht falsch, sondern genauer, da alle Einflussgrößen berücksichtigt wurden. Die Anpassung diente dazu, um die Eingabe allgemein zu bewerten. In Zukunft wird die Schubsteifigkeit standardmäßig berücksichtigt.

## 4      Simulation des Stahltragwerks

Das Stahltragwerk besteht aus vier eingespannten Stützen, die am Kopf biegesteif mit einer Stahl-Geschossdecke verbunden sind (Abbildung 4.1). Ziel ist es, dieses Tragwerk in RFEM zu modellieren und dynamisch zu analysieren. Zusätzlich wird das Tragwerk auf einem Shake Table untersucht, auf dem sowohl die Erregerfrequenz als auch die Antwortbeschleunigung aufgezeichnet werden können. Abschließend werden die Ergebnisse der Simulation und des Versuchs miteinander verglichen.

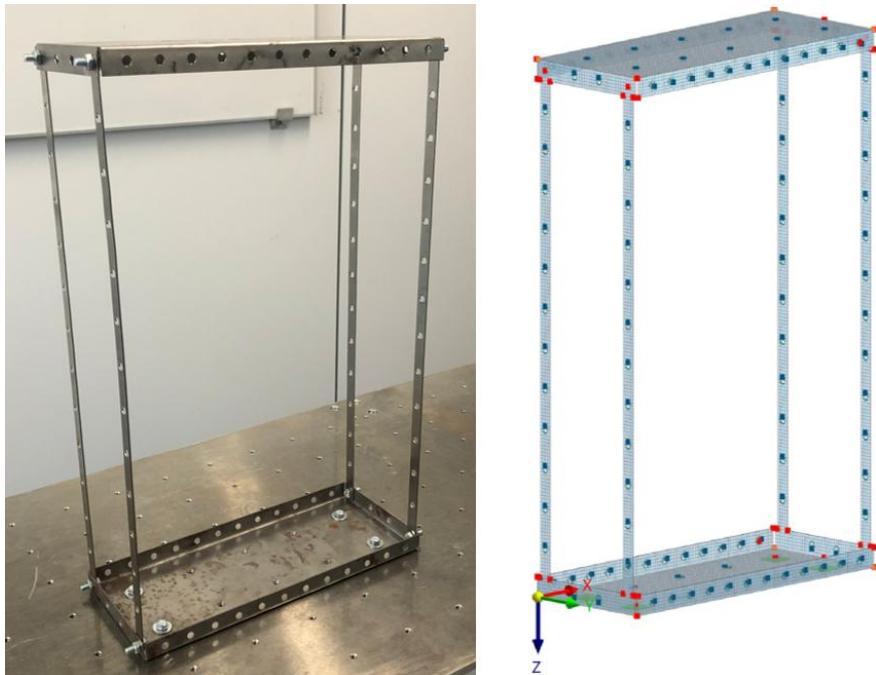


Abb. 4.1: Stahltragwerk auf dem Shake Table (links) RFEM-Modell (rechts)

#### 4.1 Der Schütteltisch (Shake Table)

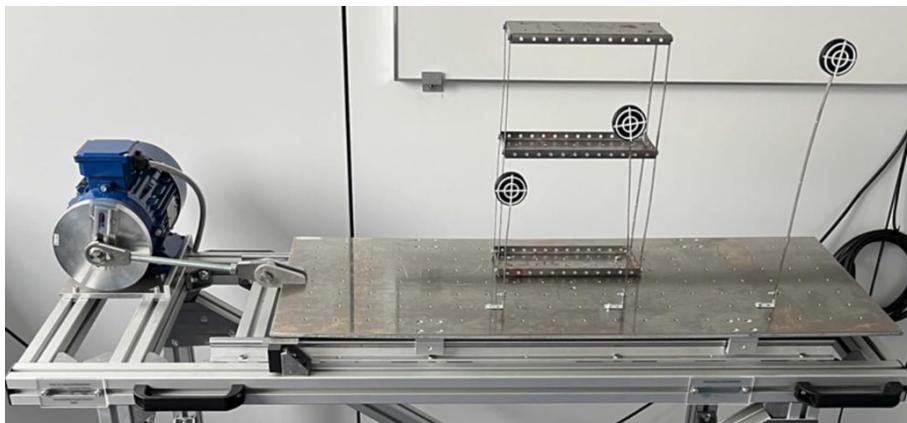


Abb. 4.2: Shake Table

Die Abbildung 4.2 zeigt einen Shake Table, der zur Simulation horizontaler Schwingungen dient. Ziel ist es, das Verhalten von Modellen unter dynamischen Belastungen zu untersuchen. Links im Bild befindet sich ein Elektromotor, der die Metallplattform horizontal bewegt. Die Verbindung zwischen Motor und Plattform erfolgt über einen Pleuel, der am Motor exzentrisch angeschlossen ist. Dadurch wird die horizontale Bewegung der Plattform ermöglicht. Die Drehzahl des Motors ist stufenlos einstellbar, sodass unterschiedliche Erregerfrequenzen erzeugt werden können. Der Schütteltisch simuliert im Wesentlichen eine horizontale Auflagerverschiebung.

Dieser Shake Table steht den Studierenden der Hochschule Trier zur Verfügung, die das Wahlpflichtmodul „Baudynamik“ belegen. Er bietet die Möglichkeit, Dämpfer für Modelle zu entwickeln und diese direkt auf dem Shake Table zu testen. Die folgenden Abbildungen zeigen Studierende bei der Analyse ihrer Modelle.

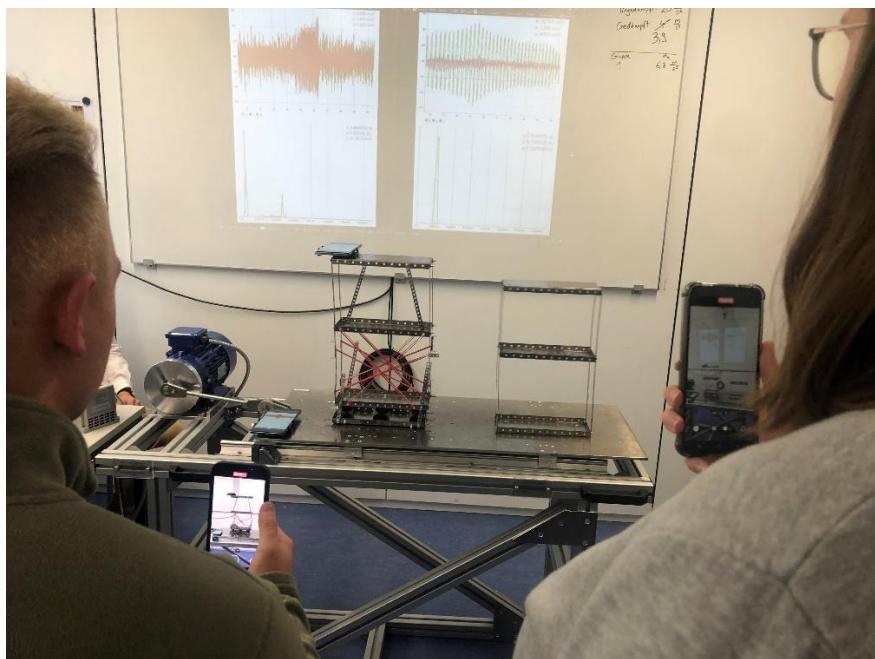


Abb. 4.3: Untersuchung eines gedämpften Modells auf dem Shake Table (1)

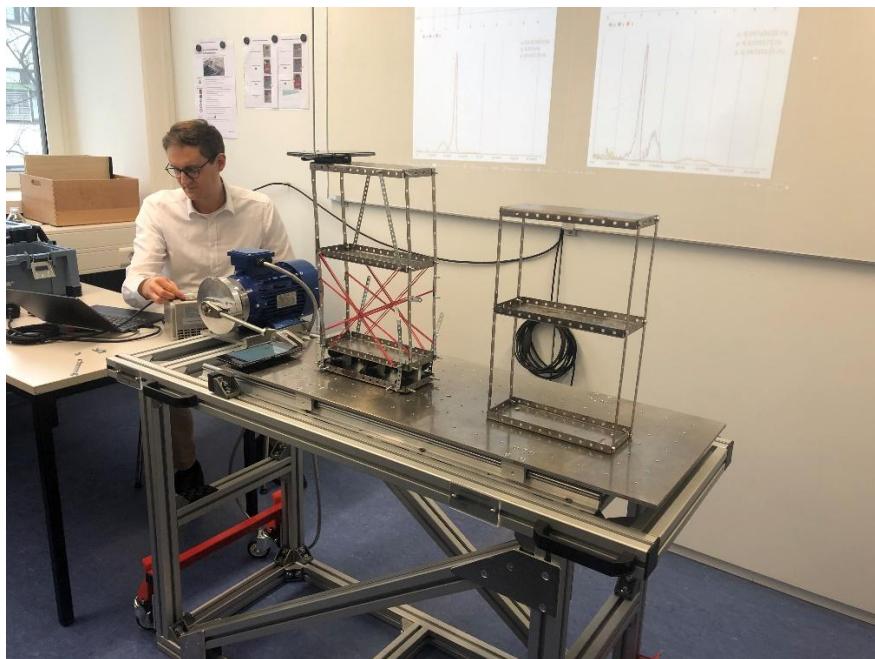


Abb. 4.4: Untersuchung eines gedämpften Modells auf dem Shake Table (2)

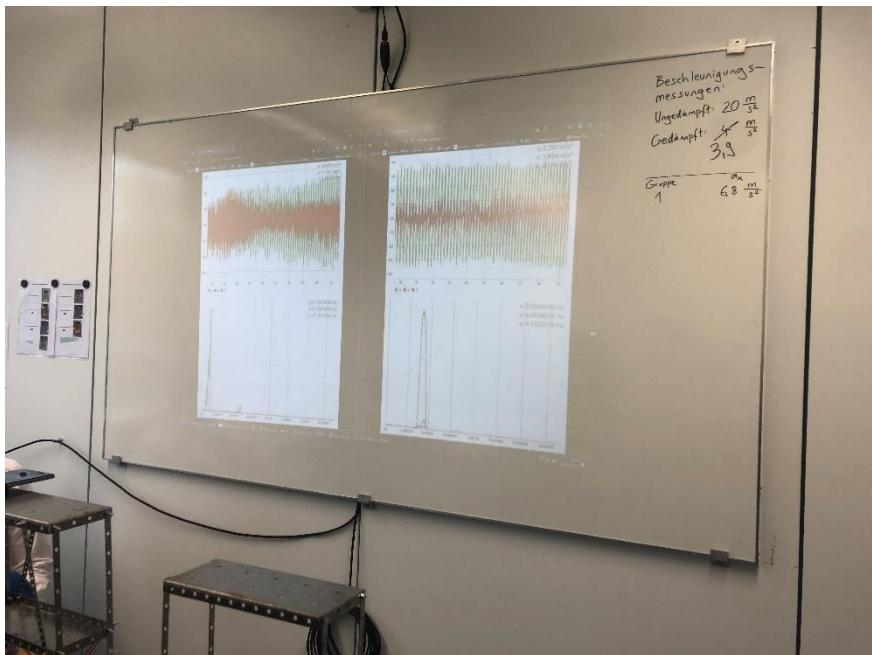


Abb. 4.5: Aufzeichnung der Erregerfrequenz und der Eigenfrequenz

Die Simulation kann zudem aufgezeichnet werden. Hierfür wird die von der RPTU Kaiserslautern-Landau entwickelte App „iDynamics“ verwendet. Abbildung 4.3 zeigt zwei Smartphones, die sowohl die Erreger- als auch die Antwortbeschleunigung aufzeichnen. Diese Daten können anschließend in RFEM übertragen werden, um das System besser abzubilden.

## 4.2 Kalibrierung des Modells

Bevor das Stahltragwerk in RFEM modelliert wird, wird zunächst ein Versuch durchgeführt, der zur Kalibrierung des Modells dient.

### 4.2.1 Versuch



Abb. 4.6: Bestandteile

In Abbildung 4.6 sind die Bestandteile dargestellt, die für den Versuch erforderlich sind. Zusätzlich werden ein Laser, eine Schraubzwinge und ein Gliedermaßstab verwendet. Vor dem Aufbau des Versuchs erfolgt eine exakte Vermessung des Blechs sowie der Last, die am freien Ende angebracht wird. Dies wird in den nachfolgenden Abbildungen veranschaulicht.



Abb. 4.7: Masse Einzellast

Die Masse der Einzellast beträgt  $100\text{g}$ , was einer Gewichtskraft von  $1,0\text{N}$  entspricht.

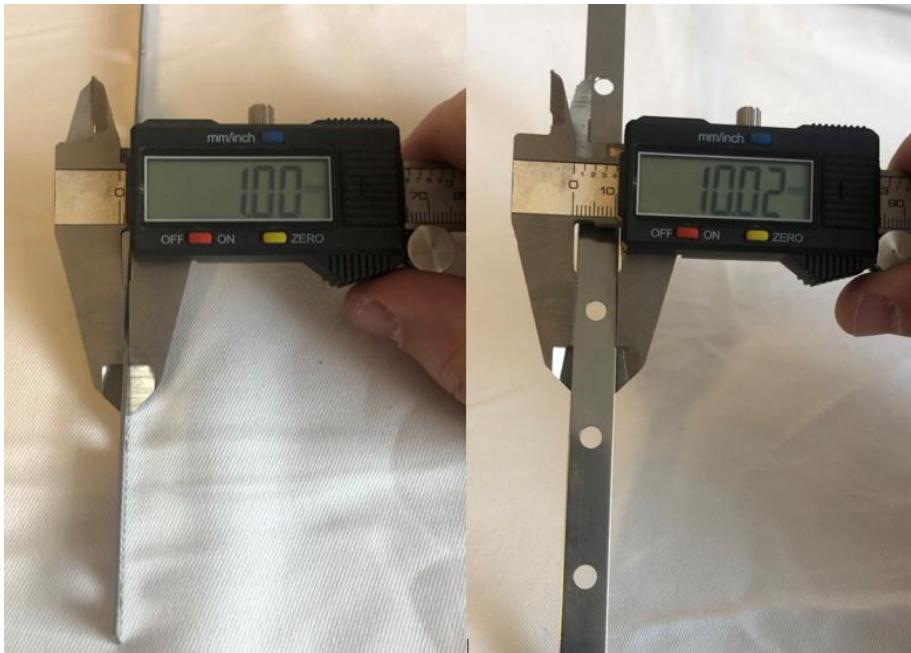


Abb. 4.8: Querschnittsabmessungen

Der Querschnitt hat die Abmessung  $10,0 \times 1,0 \text{ mm}$ .

Die Bohrungen im Blech müssen ebenfalls präzise vermessen werden, um die Querschnittsschwächung korrekt berücksichtigen zu können.



Abb. 4.9: Abstand der Bohrungen (links), Durchmesser der Bohrung (rechts)

Der Abstand der Bohrungen von Rand zu Rand beträgt  $25 \text{ mm}$ , und der Durchmesser der Bohrungen beträgt  $5 \text{ mm}$ . Daraus ergibt sich ein Achsabstand zwischen den Bohrungen von  $30 \text{ mm}$ .



Abb. 4.10: Abstand der letzten Bohrung zum Rand

In Abbildung 4.10 ist der Abstand der letzten Bohrung dargestellt. Dadurch kann die Anordnung der Bohrungen in der Modellierung exakt abgebildet werden.



Abb. 4.11: Länge Blech (Kragarm)

Nachdem alle relevanten Maße ermittelt wurden, kann mit dem Aufbau des Versuchs begonnen werden.

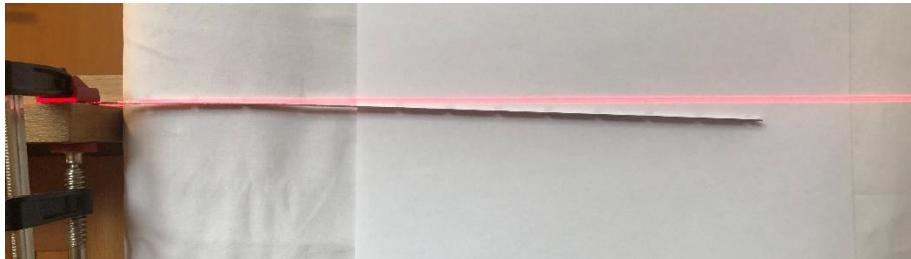


Abb. 4.12: Aufgebauter Versuch

Die Abbildung 4.12 zeigt den aufgebauten Versuch. Das Blech ist mit einer Schraubzwinge an der Tischkante fixiert und der Laser wird verwendet, um die Auslenkung des Blechs zu bestimmen.

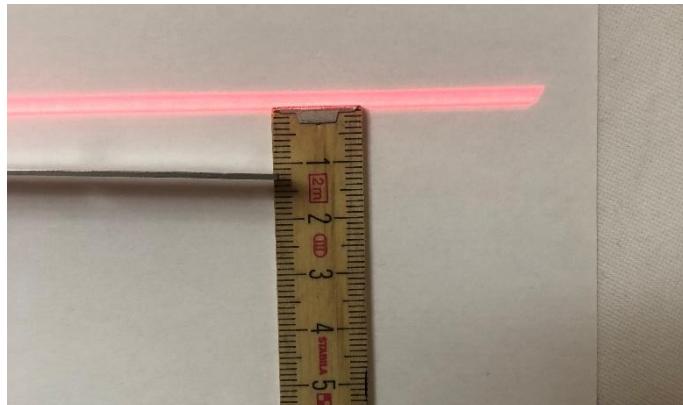


Abb. 4.13: Auslenkung unter Eigengewicht

Die Auslenkung unter Eigengewicht liegt ungefähr bei 13mm.

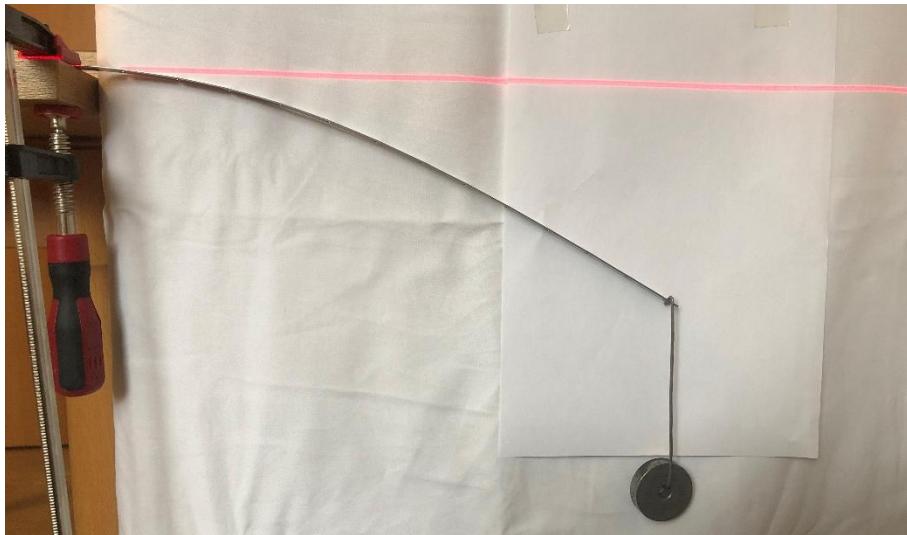


Abb. 4.14: Aufgebauter Versuch mit der Masse am freien Ende

Die Abbildung 4.14 zeigt den aufgebauten Versuch, bei dem zusätzlich eine Masse am freien Ende des Blechs angebracht wurde.



Abb. 4.15: Auslenkung unter Einfluss der Masse am freien Ende

Die Auslenkung unter Einfluss der Masse am freien Ende und des Eigengewichts liegt zwischen 139mm und 140mm.

#### 4.2.2 RFEM-Modellierung

Die exakten Abmessungen des Blechs (Länge, Breite, Dicke) sowie die Position und Größe der Bohrungen wurden aufgenommen. Das Modellieren kann nun beginnen, wobei die wesentlichen Eingabeschritte mit Hilfe von Screenshots erläutert werden.

##### Schritt 1: Neues Modell

Nach dem Öffnen von RFEM soll ein neues Modell angelegt werden. Dazu klickt man auf Datei → Neu.



Abb. 4.16: Neues Modell

Es öffnet sich ein Fenster mit der Bezeichnung „Neues Modell – Basisangaben“. Hier wird der Modellname „Kalibrierung“ eingegeben und unter Modelltyp „3D“ ausgewählt. Anschließend wird die Eingabe mit „OK“ bestätigt.



Abb. 4.17: Neues Modell

## Schritt 2: Arbeitsebene anpassen

Um die Modellierung zu erleichtern, ist es vorteilhaft, die Arbeitsebene anzupassen. Durch einen Klick auf das Symbol „Einstellungen der Arbeitsebene, Raster/Fang, Objektfang, Hilfslinien“ in der Symbolleiste wird ein neues Fenster geöffnet. In diesem Fenster befindet sich links unten ein weiteres Symbol „00.0“, mit dem die Einheit geändert werden kann.

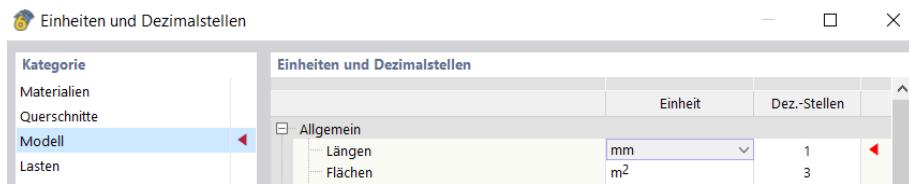


Abb. 4.18: Längeneinheit ändern

Die Abbildung 4.19 zeigt die erforderliche Eingabe.

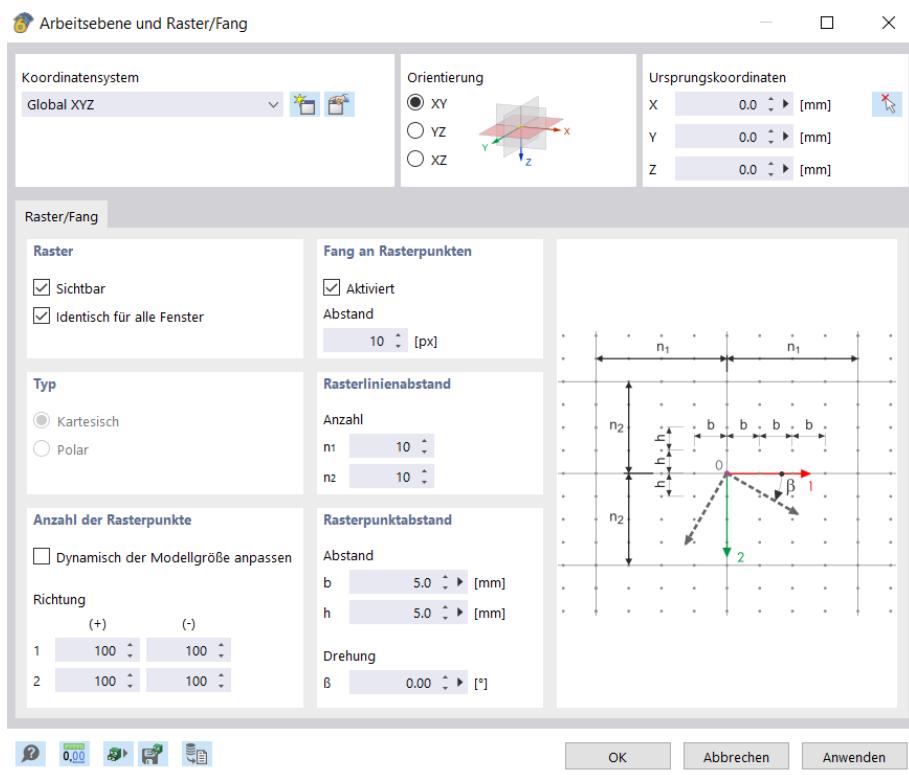


Abb. 4.19: Einstellung der Arbeitsebene

### Schritt 3: Materialien und Dicken

Als Nächstes wird das Material sowie die Blechdicke definiert. Dies kann über den Navigator im linken Bildschirmbereich erfolgen. Das Material wird, wie bereits zuvor beschrieben, festgelegt. Durch einen Rechtsklick auf „Dicken“ und anschließend auf „Neue Dicke“ öffnet sich ein Fenster, in dem die Blechdicke bestimmt werden kann.

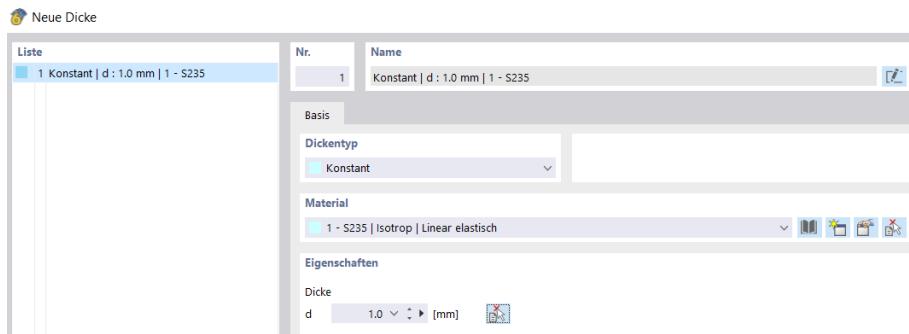


Abb. 4.20: Neue Dicke

### Schritt 4: Blech, Bohrungen, Auflager

Um das Blech zu definieren, ist das Symbol „Fläche mittels Linienextrusion einfügen“ anzuklicken. Es öffnet sich ein neues Fenster, das direkt mit „OK“ bestätigt werden kann. Nach der Bestätigung erscheint ein weiteres Fenster.

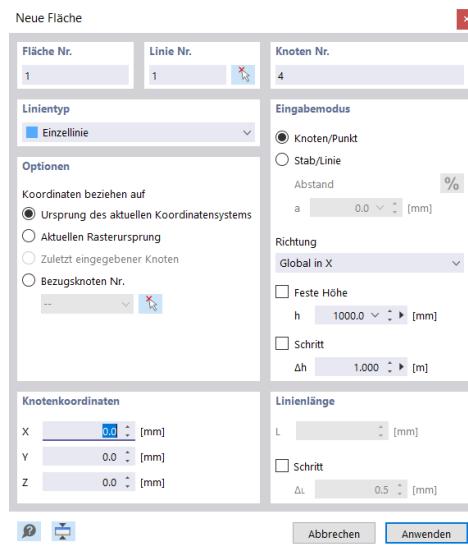


Abb. 4.21: Definition der Fläche

Da die Arbeitsebene parallel zur XY-Ebene ausgerichtet ist, muss die Richtung unter der Option „Eingabemodus“ von „Global in Z“ auf „Global in X“ umgestellt werden. Die Fläche kann entweder durch Eingabe der Knotenkoordinaten oder mithilfe der Maus erstellt werden, indem die Rasterpunkte angeklickt werden. In diesem Fall wird die Fläche mit der Maus eingegeben.

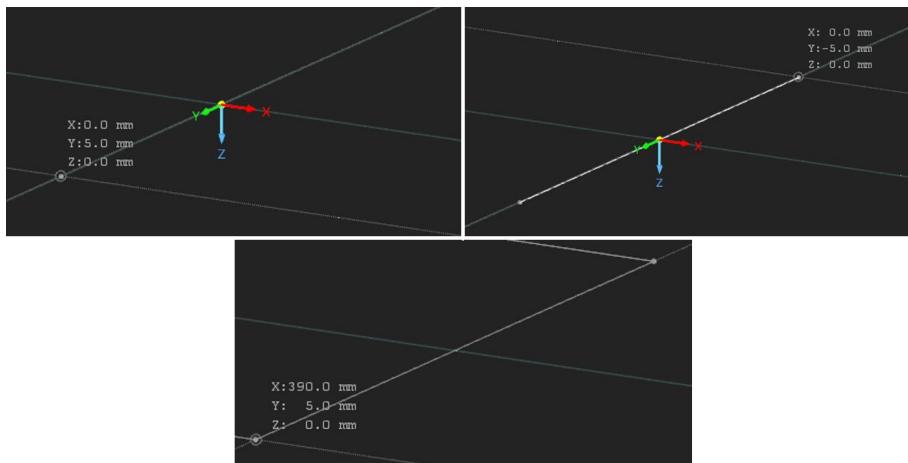


Abb. 4.22: Eingabeschritte für die Fläche

Nachdem die Fläche eingegeben ist, wird die Eingabe mit der „ESC-Taste“ beendet.

Die Blechabmessungen sind jetzt definiert, nun fehlen noch die Bohrungen. Dafür muss zunächst ein Kreis gezeichnet werden, der der Bohrung entspricht. Um den Kreis an der richtigen Stelle zeichnen zu können, muss zuerst ein Knoten an die entsprechende Position gesetzt werden. Dazu wählt man einen Eckknoten am freien Ende des Blechs aus und kopiert ihn an die Stelle, an der die erste Bohrung platziert werden soll. Mit dem Symbol „Selektierte Objekte verschieben/kopieren“ kann der ausgewählte Knoten kopiert werden. Abbildung 4.23 zeigt die notwendige Eingabe.

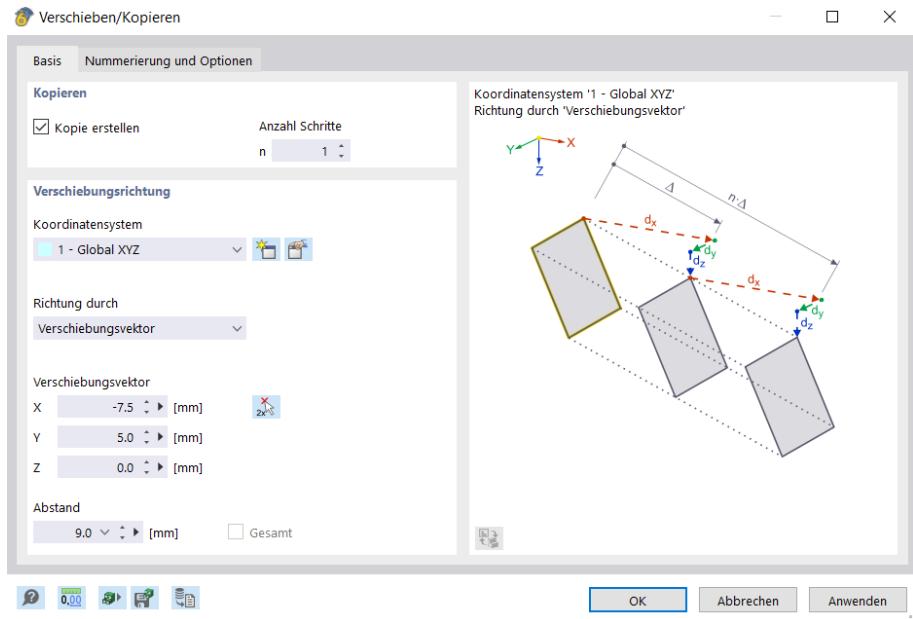


Abb. 4.23: Knoten kopieren

Nachdem der Knoten platziert wurde, muss das Symbol „Neue Linie“ angeklickt werden, woraufhin sich ein neues Fenster öffnet. Dort wird unter der Option „Linientyp“ der „Kreis“ ausgewählt.

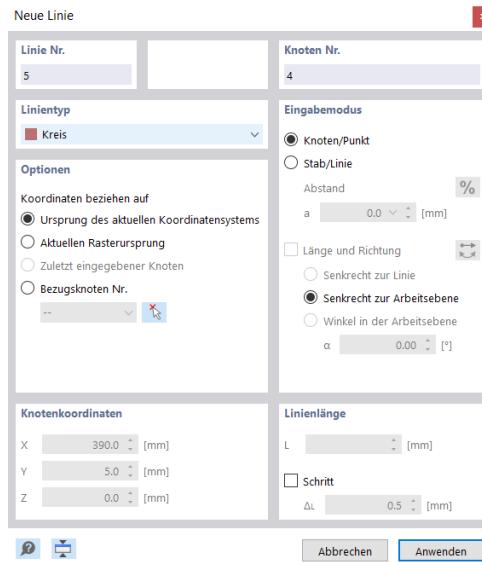


Abb. 4.24: Neue Linie

## Simulation des Stahltragwerks

Jetzt wird der zuvor platzierte Knoten angeklickt, woraufhin ein neues Fenster aufgeht. Dort kann der Radius des Kreises eingegeben werden. Die Eingabe wird mit „OK“ bestätigt und mit der „ESC-Taste“ abgeschlossen.

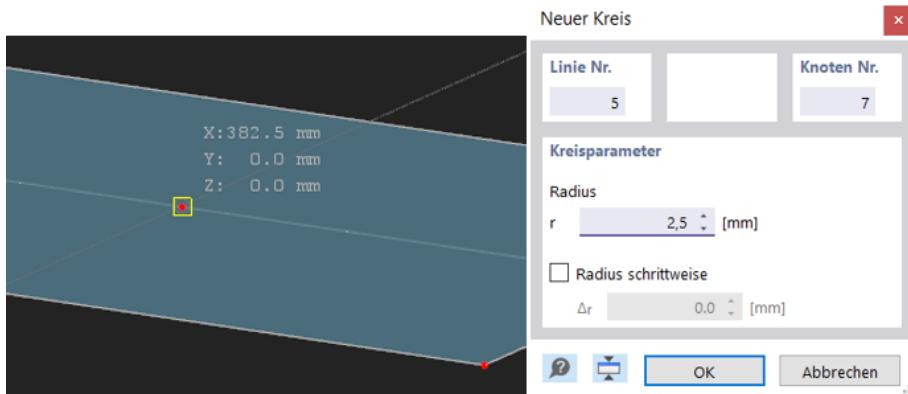


Abb. 4.25: Lage des Kreises (links), Eingabe Radius (rechts)

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Ergebnis der letzten Eingabe.

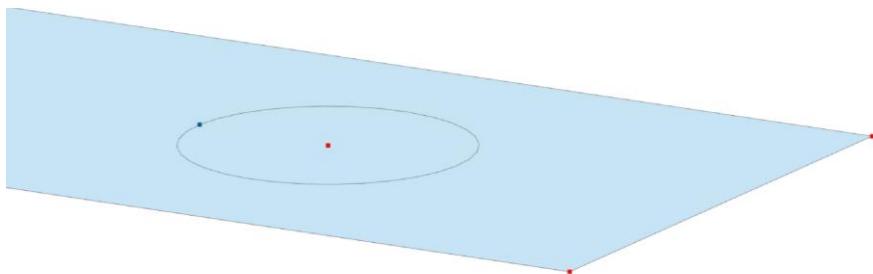


Abb. 4.24: Platziert Kreis

Im Navigator auf der linken Seite muss nun „Öffnungen“ mit einem Doppelklick geöffnet werden. Anschließend wird im oberen rechten Bereich des Fensters das Symbol „Begrenzungslinie in Grafik wählen“ angeklickt. Nun kann der Kreis ausgewählt werden. Die Auswahl wird einmal mit „OK“ bestätigt und im nächsten Schritt ebenfalls mit „OK“ abgeschlossen.

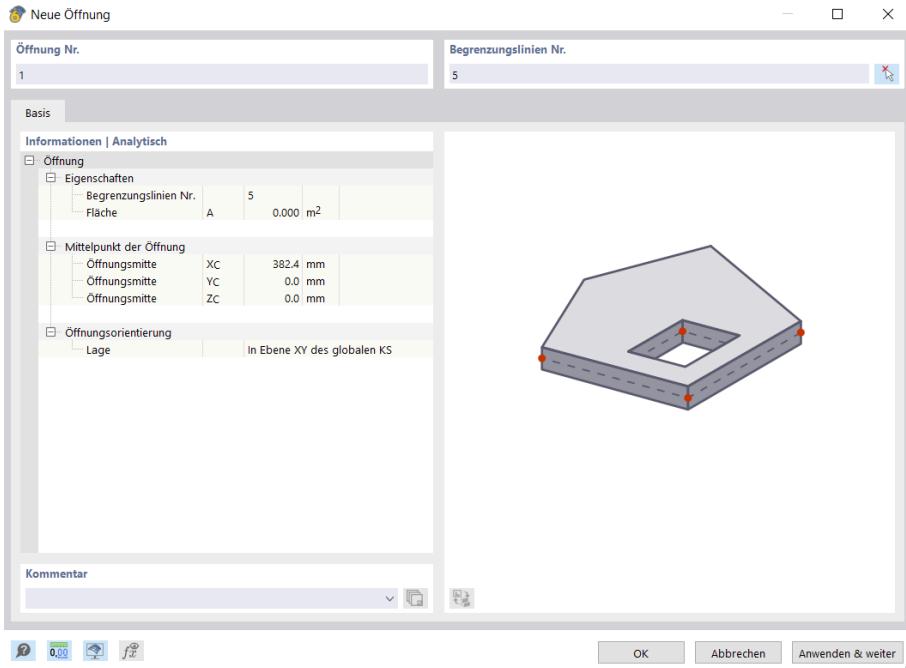


Abb. 4.27: Neue Öffnung

Im Navigator unter „Öffnungen“ ist die erstellte Bohrung sichtbar. Diese wird jetzt einmal angeklickt und über das Symbol „Selektierte Objekte verschieben/kopieren“ zwölfmal kopiert.

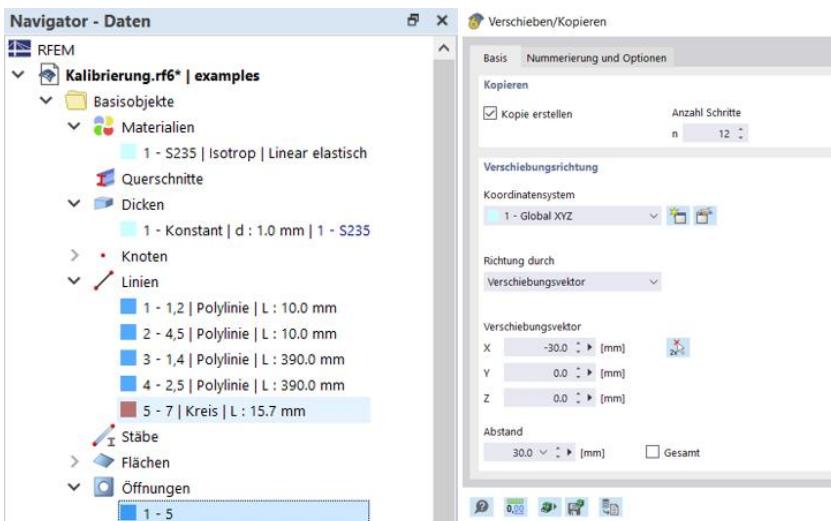


Abb. 4.28: Kopieren der Bohrung

## Simulation des Stahltragwerks

Nun kann das Linienlager angeordnet werden. Zuerst wird die Linie ausgewählt, an der das Auflager positioniert werden soll, und anschließen das Symbol „Linienlager zuweisen“ angeklickt. Im neuen Fenster wird das starre Linienlager ausgewählt und mit „OK“ bestätigt.

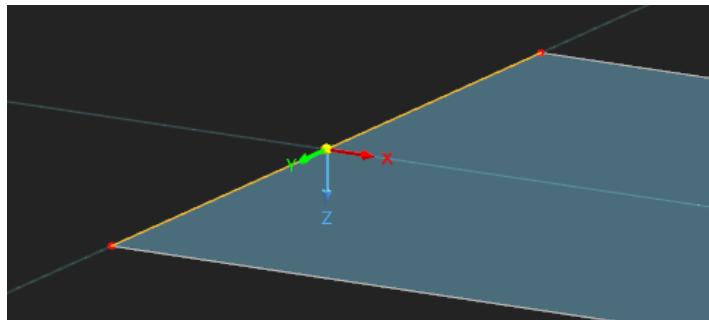


Abb. 4.29: Auswahl der Linie

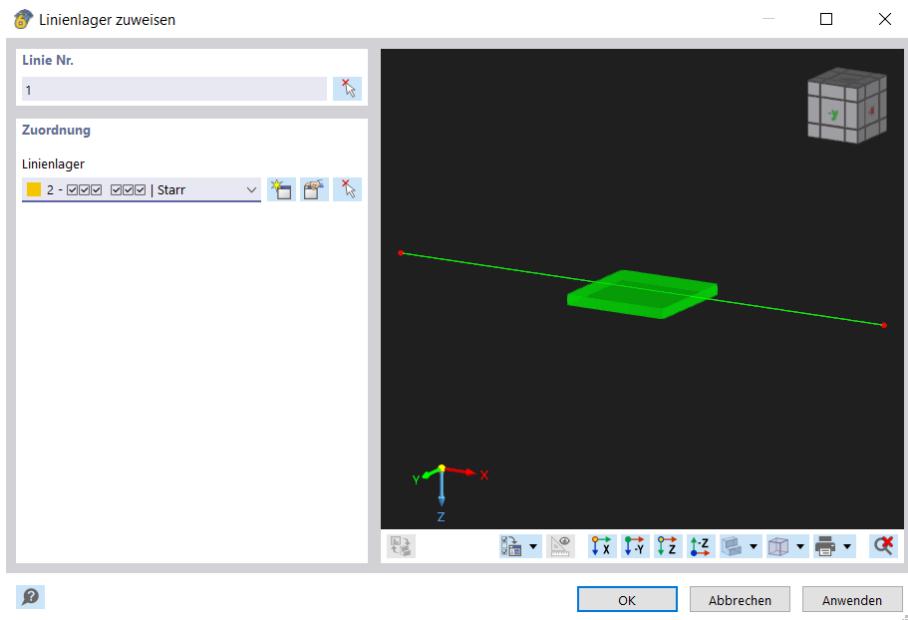


Abb. 4.30: Auswahl des Linienlagers

Bevor das System belastet werden kann, muss ein weiterer Knoten an der Stelle definiert werden, an der die Last angreift, und zwar am freien Rand

Um dies zu tun, klickt man auf den Pfeil neben dem Symbol „Neuer Knoten “ und wählt die Option „Zwischen zwei Knoten“ aus. Es erscheint ein Fenster, in dem abgefragt wird, zwischen welchen Knoten der neue Knoten gesetzt werden soll. Man klickt die beiden Knoten am freien Rand an und wählt anschließend „Anwenden“. Die Eingabe wird mit der „ESC-Taste“ beendet.

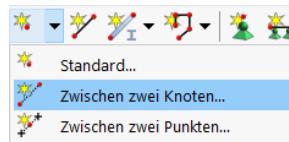


Abb. 4.31: Auswahl: Zwischen zwei Knoten

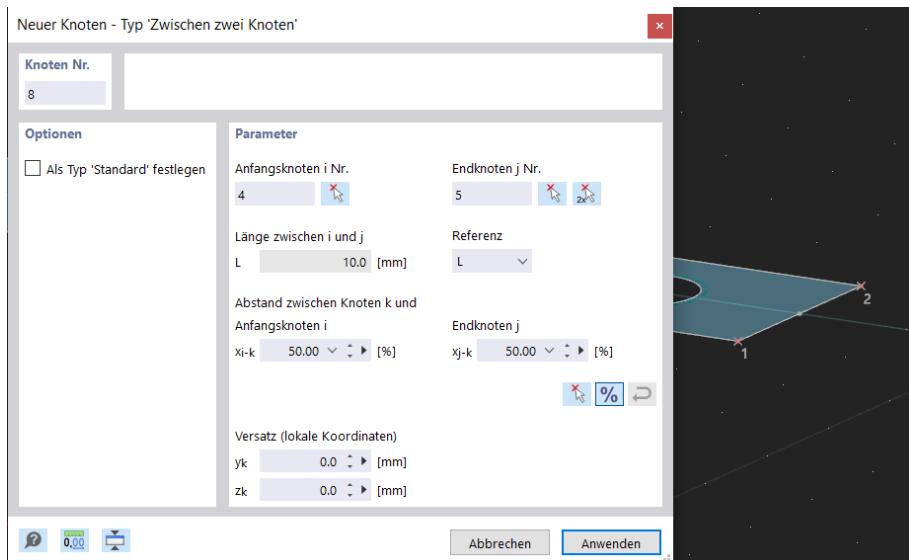


Abb. 4.32: Definition der zwei Knoten

Die folgenden Abbildungen zeigen das vollständige Modell.



Abb. 4.33: Isometrie

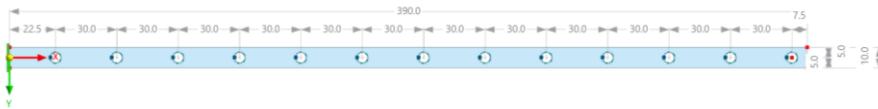


Abb. 4.34: Draufsicht

## Schritt 5: Lastfälle und Belastung

In „Lastfälle und Kombinationen“ sollen zunächst im Register „Bemessungssituationen“ unter „Liste“ die vom Programm automatisch erstellten Bemessungssituationen entfernt werden, um die Berechnungsdauer zu reduzieren. Dazu werden alle Bemessungssituationen ausgewählt und anschließend auf das Symbol „Ausgewählte Bemessungssituation(en) löschen “ geklickt.

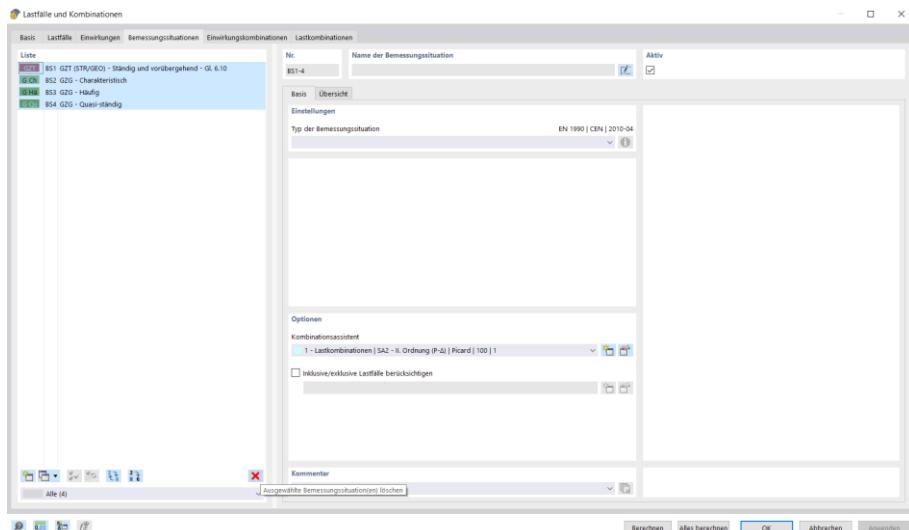


Abb. 4.35: Löschen der Bemessungssituationen

Im Register Lastfälle wird der vorhandene Lastfall „LF1 Eigengewicht“ mit einem Klick auf das Symbol „Ausgewählte Lastfälle kopieren “ dupliziert und anschließen in „Eigengewicht mit Belastung“ umbenannt. Das Fenster wird nun mit „OK“ geschlossen.

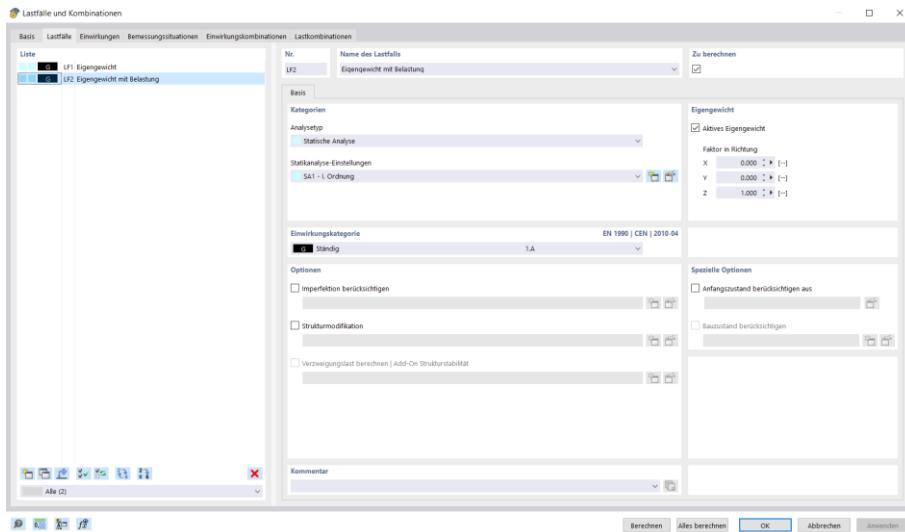


Abb. 4.36: Lastfall: Eigengewicht mit Belastung

Mit einem Klick auf das Symbol „Neue Knotenlast“ kann die Last definiert werden, die am freien Rand wirkt. Unter Parameter wird die Kraft  $1,0\text{N}$  eingegeben und mit „OK“ bestätigt. Anschließen soll der zuvor definierte Knoten ausgewählt werden und die Eingabe erneut mit „OK“ beendet werden.

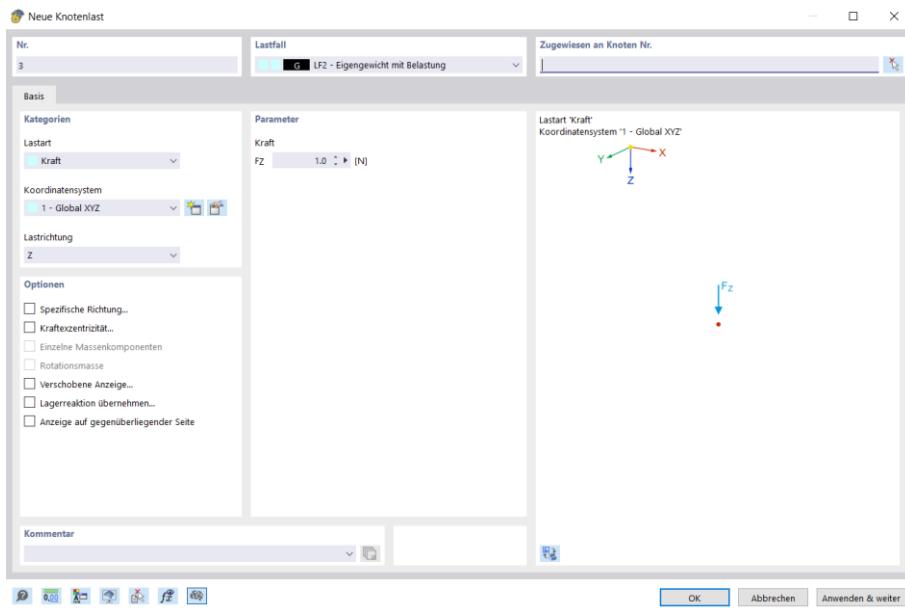


Abb. 4.37: Eingabe der Knotenlast

## Schritt 6: FE-Netz-Einstellungen

Bevor die Berechnung durchgeführt wird, muss das FE-Netz angepasst werden. Die folgenden Abbildungen zeigen, welche Schritte dafür erforderlich sind.

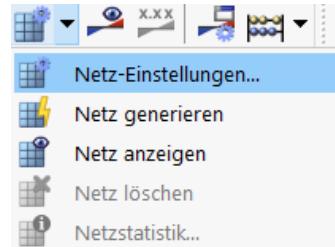


Abb. 4.38: FE-Netz-Einstellungen

In den Netz-Einstellungen, im Register „Allgemein“ unter der Option „Allgemeine Einstellungen“, muss die „Angestrebte Länge der finiten Elemente“ angepasst werden. Hier wird eine Länge von 2,5mm eingetragen, und mit „OK und anwenden“ wird die Netzgenerierung gestartet. Falls das FE-Netz nicht angezeigt wird, muss auf das Symbol „Netz anzeigen“ geklickt werden (siehe Abbildung 4.38).

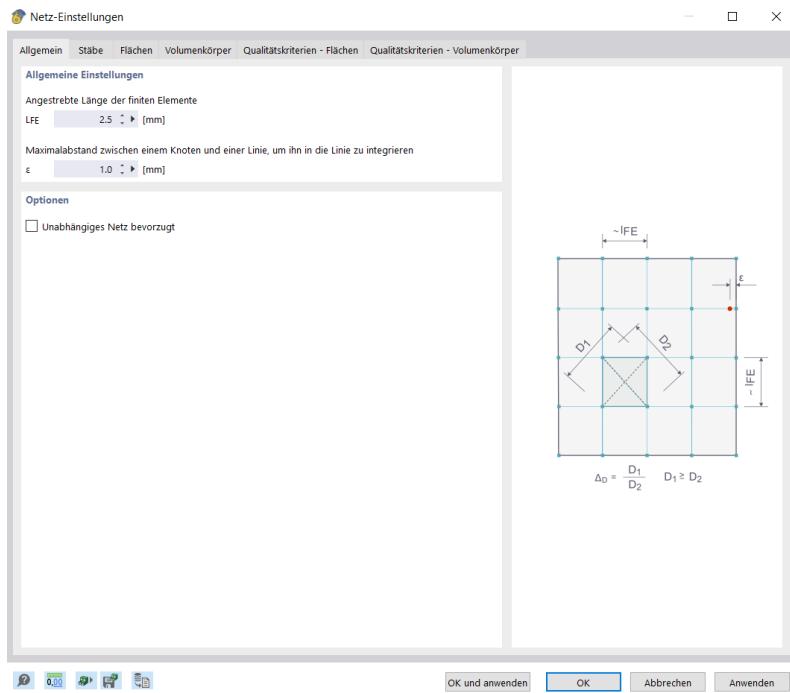


Abb. 4.39: FE-Netz-Einstellungen

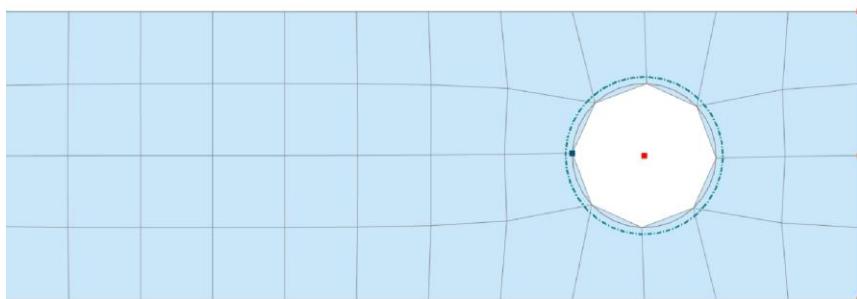


Abb. 4.40: Generiertes FE-Netz

#### Schritt 7: Berechnung und Vergleich der Ergebnisse

Die Berechnung kann jetzt gestartet werden. Folgenden Abbildungen zeigen die Durchbiegungen unter Eigengewicht und unter der Einzellast.

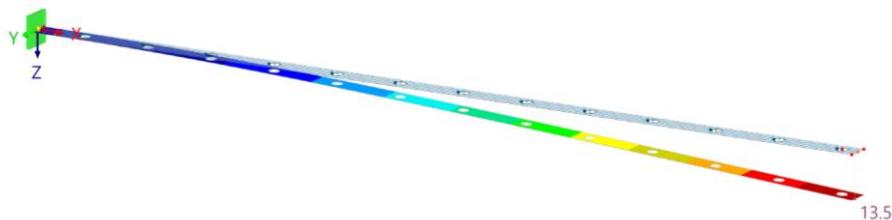


Abb. 4.41: Durchbiegung unter Eigengewicht



Abb. 4.42: Durchbiegung unter Einzellast

Die Tabelle 4.1 zeigt einen Vergleich der Durchbiegungen, die sowohl im Versuch als auch mithilfe der Software RFEM berechnet wurden. Dabei hat die Länge der finiten Elemente einen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse. **Kürzere Elemente** führen zu **größeren Durchbiegungen**, da sie die Struktur feiner abbilden, während **längere Elemente** zu **kleineren Durchbiegungen** führen.

Die in der Tabelle 4.1 gezeigten Werte basieren auf einer Länge von **2,5mm**.

Lastfall	Versuch	RFEM
Durchbiegung unter Eigenlast	13mm	13,5mm
Durchbiegung unter Einzellast	139mm	139,5mm

Tab. 4.1: Vergleich der Durchbiegungen: Versuch und RFEM

Dieser Vergleich zeigt, dass die Wahl der FE-Länge entscheidend für die Genauigkeit der Ergebnisse ist. Mit einer FE-Länge von **2,5mm** werden Ergebnisse erzielt, die sehr gut mit den Messwerten aus dem Versuch übereinstimmen.

#### 4.3 Aufbau des Stahltragwerks

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte zur Erstellung des Stahltragwerks mithilfe von Bildern dargestellt.



Abb. 4.43: Stahl-Boden, Stützen und Stahl-Geschossdecke



Abb. 4.44: Angeschraubter Stahl-Boden



Abb. 4.45: Stahl-Boden mit angeschraubten Stützen



Abb. 4.46 Stahltragwerk

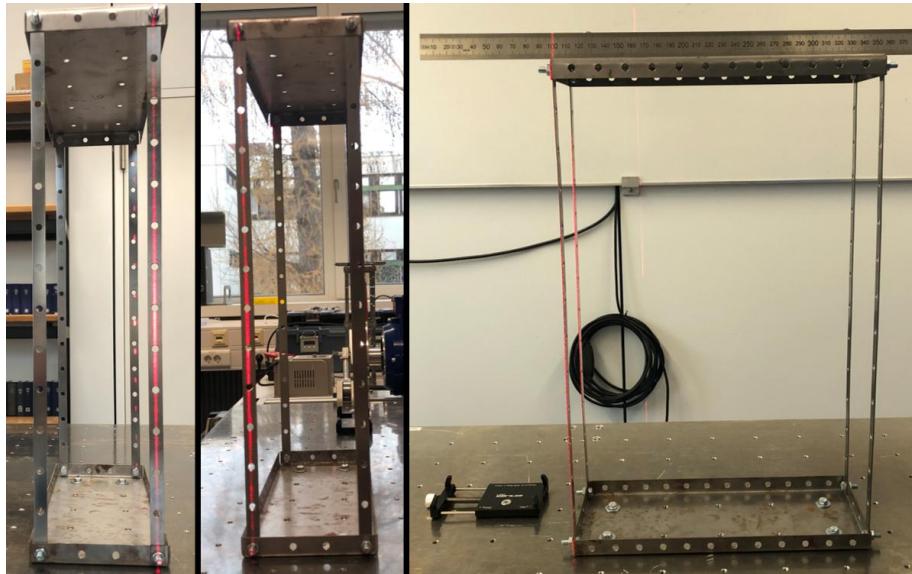


Abbildung 4.47: Ausrichtung des Tragwerks

Die Abbildung 4.47 zeigt, wie das Tragwerk mithilfe eines Lasers in alle Richtungen ausgerichtet wird. Damit ist das Stahltragwerk vollständig aufgebaut.

#### **4.4 Bestimmung der Eigenfrequenz und der Dämpfung**

Zur Messung der Eigenfrequenz des Stahltragwerks wird ein Smartphone in Kombination mit der App iDynamics verwendet. Zunächst erfolgt die Gewichtsmessung des Smartphones zusammen mit der Montagevorrichtung mithilfe einer Waage, um die Gesamtmasse zu bestimmen.



Abb. 4.48: Gewichtsmessung des Smartphones mit der Montagevorrichtung

Anschließend wird das Smartphone mit der Montagevorrichtung sicher an der Stahl-Geschoßdecke befestigt.



Abb. 4.49: Befestigung des Smartphones

Sobald die App gestartet ist, beginnt die Aufzeichnung der Messdaten. Das System wird daraufhin ausgelenkt und losgelassen, sodass freie Schwingungen entstehen. Während das System schwingt, zeichnet das Smartphone die Schwingungsbewegung auf. Nach ausreichender Schwingungsdauer wird die Bewegung gestoppt und die Aufzeichnung beendet. Die aufgezeichneten Daten können nun in Excel exportiert und ausgewertet werden.

Die App zeichnet die Zeit und die Beschleunigung auf. In der folgenden Abbildung ist die Schwingung des Stahltragwerks über einen Zeitraum von 4 Sekunden dargestellt.

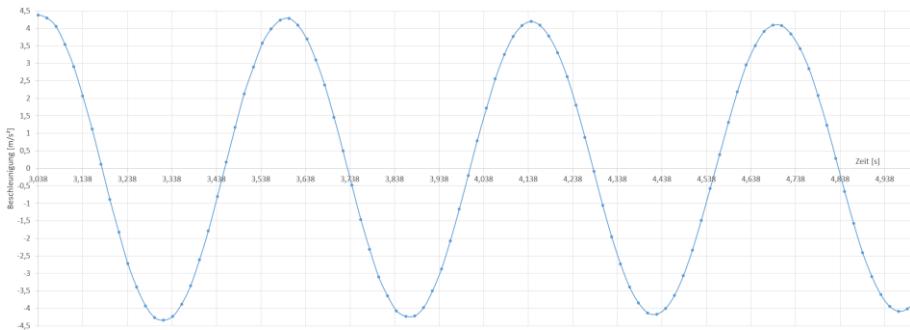


Abb. 4.50: Schwingung des Stahltragwerks

Aus den aufgezeichneten Schwingungen können die Eigenfrequenz und die Dämpfung des Systems bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Eigenfrequenz wird mit Hilfe von Excel ein Diagramm erstellt, wie in Abbildung 4.50 zu sehen. Die Zeit einer oder mehrerer Perioden wird abgelesen, und die Anzahl der Perioden wird durch die gemessene Periodendauer geteilt, um die Eigenfrequenz zu berechnen. In diesem Fall wurde die Eigenfrequenz vier Mal bestimmt, und der Mittelwert dieser Werte wurde anschließend gebildet.

Die Dämpfung des Systems lässt sich ermitteln, indem man beobachtet, wie die Schwingungsamplitude mit der Zeit abnimmt. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Dämpfung ist das logarithmische Dekrement. Dabei wird die Reduzierung der Schwingungsamplitude zwischen zwei aufeinanderfolgenden Höchstwerten betrachtet. Wenn die Amplitude nach jeder Schwingung etwas kleiner wird, kann mit dieser Methode die Dämpfung des Systems berechnet werden. Hier wurde die Dämpfung ebenfalls vier Mal bestimmt und anschließend der Mittelwert gebildet.

#### Eigenfrequenz:

Step	Time [s]	Periodenanzahl
344	6,900	3
426	8,549	

Tab. 4.2 Frequenzberechnung 1

$$f_1 = \frac{3}{8,549 - 6,900} = 1,819 \text{ Hz}$$

Step	Time [s]	Periodenanzahl
289	5,794	5
426	8,549	

Tab. 4.3 Frequenzberechnung 2

$$f_2 = \frac{5}{8,549 - 5,794} = 1,815 \text{ Hz}$$

Step	Time [s]	Periodenanzahl
207	4,144	8
426	8,549	

Tab. 4.4 Frequenzberechnung 3

$$f_3 = \frac{8}{8,549 - 4,144} = 1,816 \text{ Hz}$$

Step	Time [s]	Periodenanzahl
152	3,038	10
426	8,549	

Tab. 4.5 Frequenzberechnung 4

$$f_4 = \frac{10}{8,549 - 3,038} = 1,815 \text{ Hz}$$

Mittelwert:  $f = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4}{4} = 1,816 \text{ Hz}$

**Dämpfung:**

Dämpfung:  $\xi = \frac{\delta}{2*\pi}$

Logarithmische Dekrement:  $\delta = \frac{1}{n} * \ln \left( \frac{u_i}{u_{i+n}} \right)$

Amplitudenanzahl:  $n$

Schwingungsamplitude (hier Beschleunigung)  $u_i$

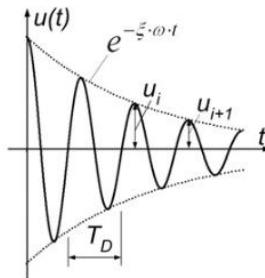


Abb. 4.51: Darstellung der Dämpfung [Schneider Bautabellen 2022]

Step	Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	Amplitudenanzahl
344	3,794312	4
426	3,56961	

Tab. 4.6 Dämpfungsberechnung 1

$$\delta = \frac{1}{4} * \ln \left( \frac{3,797312}{3,56961} \right) = 0,01526$$

$$\xi_1 = \frac{0,01526}{2 * \pi} = 0,002429$$

Step	Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	Amplitudenanzahl
289	3,93756	6
426	3,56961	

Tab. 4.7 Dämpfungsberechnung 2

$$\delta = \frac{1}{6} * \ln \left( \frac{3,93756}{3,56961} \right) = 0,01635$$

$$\xi_2 = \frac{0,01635}{2 * \pi} = 0,002602$$

Step	Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	Amplitudenanzahl
207	4,199984	9
426	3,56961	

Tab. 4.8 Dämpfungsberechnung 3

$$\delta = \frac{1}{9} * \ln \left( \frac{4,199984}{3,56961} \right) = 0,01807$$

$$\xi_3 = \frac{0,01807}{2 * \pi} = 0,002876$$

Step	Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	Amplitudenanzahl
152	4,213375	11
426	3,56961	

Tab. 4.9 Dämpfungsberechnung 4

$$\delta = \frac{1}{11} * \ln \left( \frac{4,213375}{3,56961} \right) = 0,01848$$

$$\xi_4 = \frac{0,01848}{2 * \pi} = 0,002941$$

Mittelwert:  $\xi = \frac{\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4}{4} = 0,002712$  (0,2712%)

Eigenfrequenz:  $f = 1,816\text{Hz}$

Periodendauer:  $T = 0,551\text{s}$

Dämpfung:  $\xi = 0,002712$  (0,2712%)

Nachdem die Eigenfrequenz und die Dämpfung des Stahltragwerks ermittelt wurden, kann das System in RFEM modelliert werden. Mit Hilfe des Add-Ons „Modalanalyse“ wird die Eigenfrequenz des Systems berechnet. Anschließend werden die Versuchsergebnisse und die simulierten Ergebnisse miteinander verglichen.

## 4.5 Modellierung des Stahltragwerks

Da die wesentlichen Schritte bereits in den Abschnitten 3.1.2 und 4.2.2 gezeigt wurden, wird die Modellierung des Stahltragwerks an dieser Stelle nicht so ausführlich erläutert. Lediglich die Einstellungen für die dynamische Analyse und die Lastfälle werden mithilfe von Screenshots dargestellt.

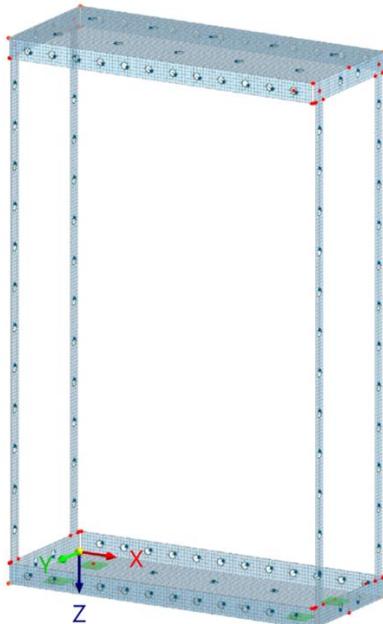


Abb. 4.52: Das fertige Modell des Stahltragwerks

### Eingaben der Smartphonelast:

Die Fläche der Stahl-Geschoßdecke des Modells beträgt:

$$A = 103\text{mm} * 252\text{mm} = 25956\text{mm}^2 = 0,025956\text{m}^2$$

Das Eigengewicht des Smartphones einschließlich der Montagevorrichtung beträgt:

$$G = 343\text{g}$$

Die Masse wird gleichmäßig als Flächenlast auf die Stahl-Geschoßdecke verteilt:

$$g = \frac{343\text{g}}{0,025956\text{m}^2} = 13214,67 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$$

Das Symbol „Neue Flächenlast“  muss angeklickt werden.

## Simulation des Stahltragwerks

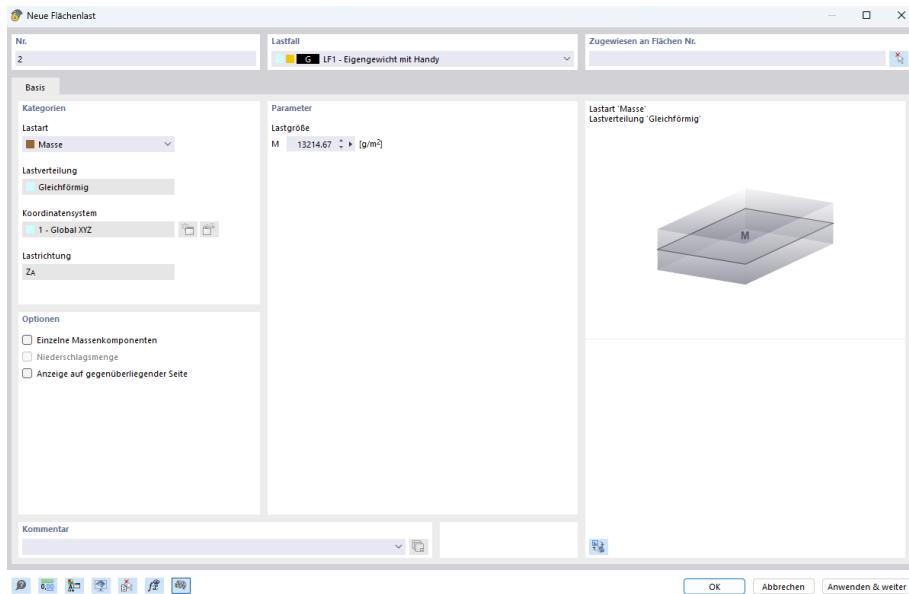


Abb. 4.53: Eingabe der neuen Flächenlast

### Lastfälle:

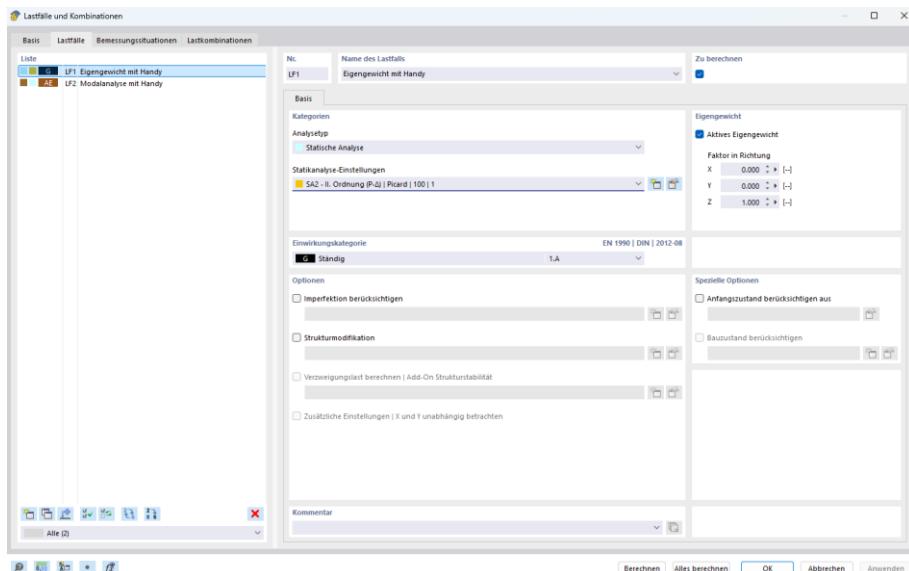


Abb. 4.54: Lastfall Eigengewicht mit Handy

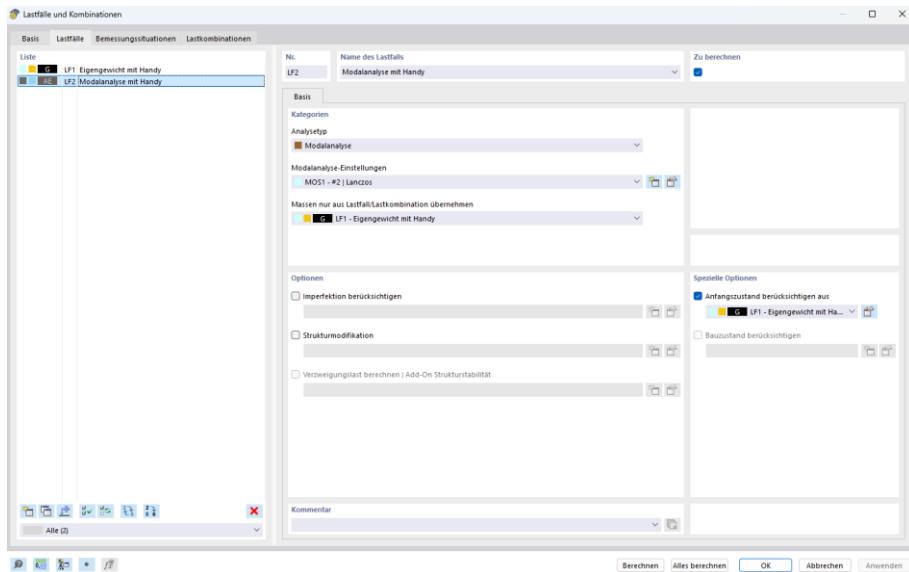


Abb. 4.55: Lastfall Modalanalyse mit Handy

### Ergebnis:

	Versuch	RFEM
Eigenfrequenz [Hz]	1,816	1,991
Periodendauer [s]	0,551	0,502

Tab. 4.10: Vergleich der ersten Modalanalyse

Nach der Durchführung der ersten Modalanalyse in RFEM wurde die Eigenfrequenz des Stahltragwerks berechnet, und es konnte eine geringfügige Abweichung von der experimentell ermittelten Frequenz festgestellt werden.

Um die experimentell ermittelte Eigenfrequenz in RFEM abzubilden, werden weitere statische Versuche durchgeführt und ebenfalls in RFEM nachgestellt und verglichen.

## 4.6      **Statische Versuche**

Das Stahltragwerk wird mit Hilfe eines Kraftmessers an der Stahl-Geschossdecke horizontal verschoben. Dabei werden die aufgebrachte Kraft und die resultierende Auslenkung gemessen. Diese Werte dienen als Grundlage für die Kalibrierung der RFEM-Simulation. Folgende Kräfte werden aufgebracht:

- 0,5 N
- 0,8 N
- 1,0 N
- 2,0 N
- 10,0 N

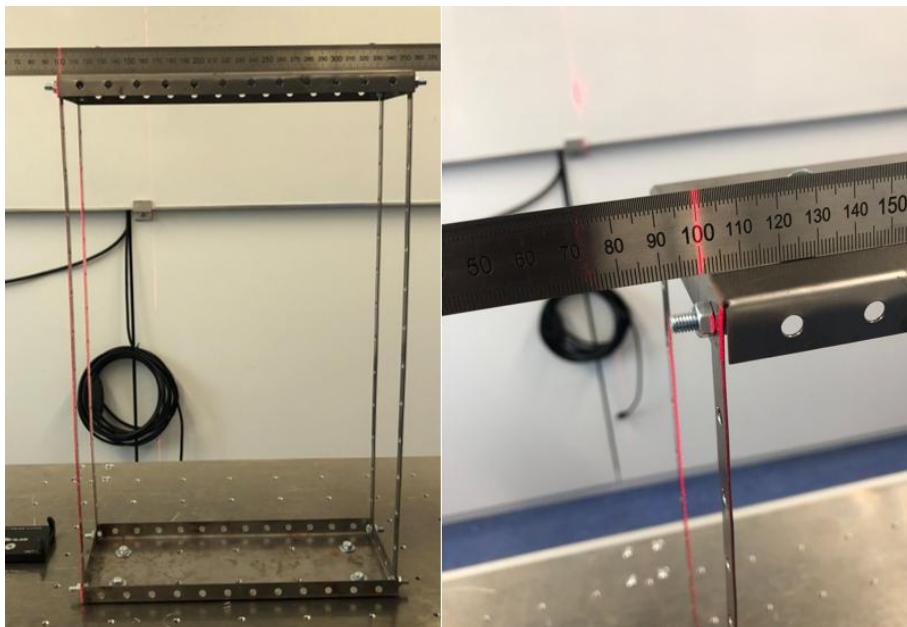


Abb. 4.56: Ausgangssituation

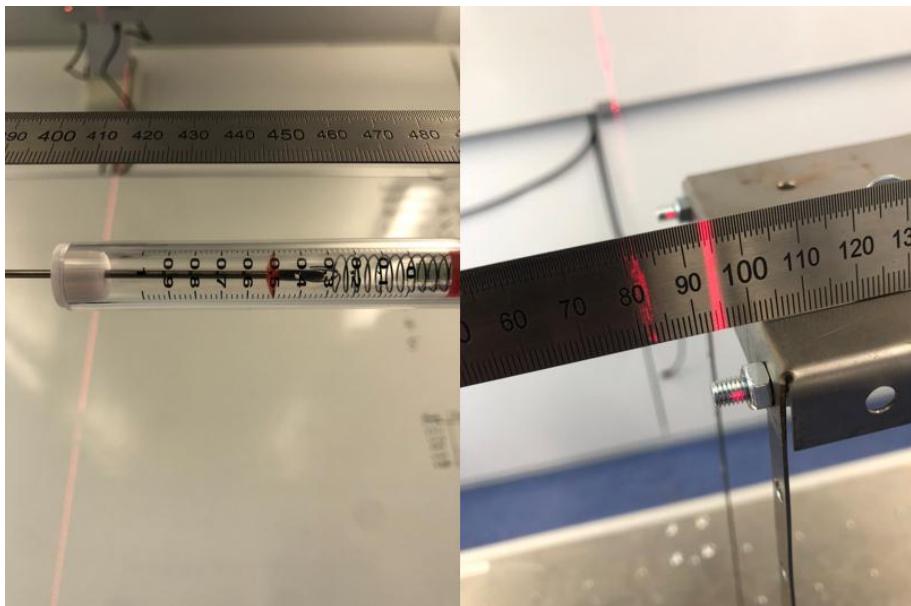


Abb. 4.57: Erste Belastung (links) mit Verschiebung (rechts)

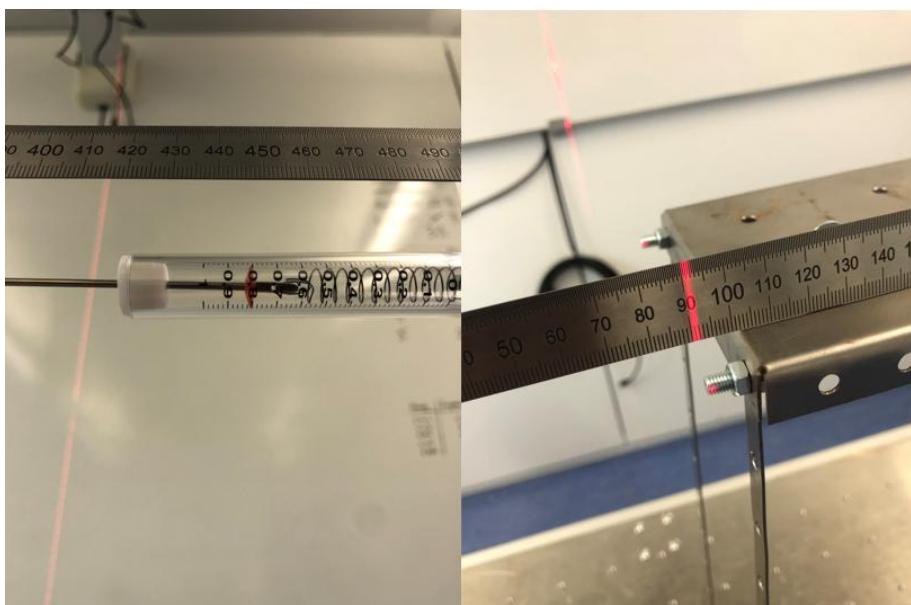


Abb. 4.58: Zweite Belastung (links) mit Verschiebung (rechts)

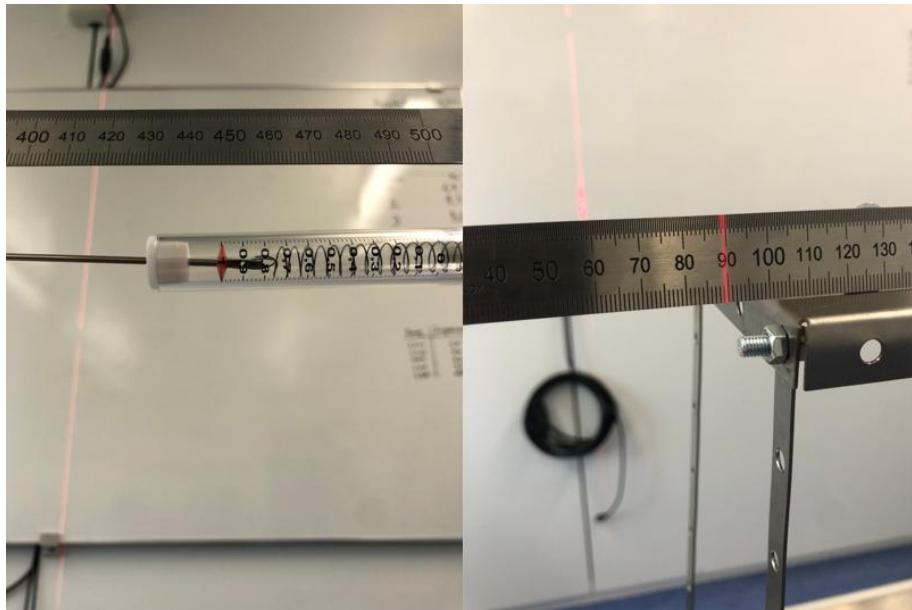


Abb. 4.59: Dritte Belastung (links) mit Verschiebung (rechts)

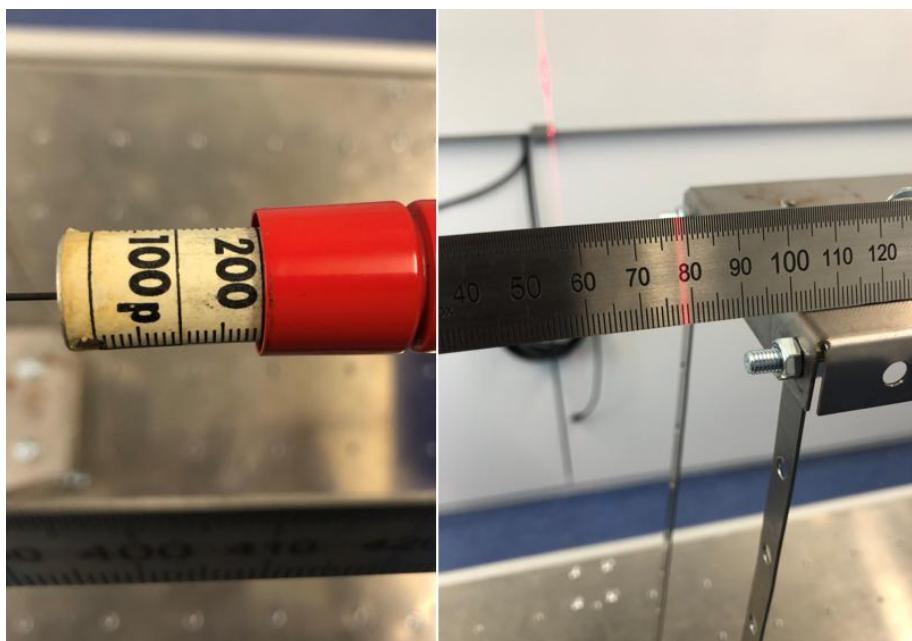


Abb. 4.60: Vierte Belastung (links) mit Verschiebung (rechts)

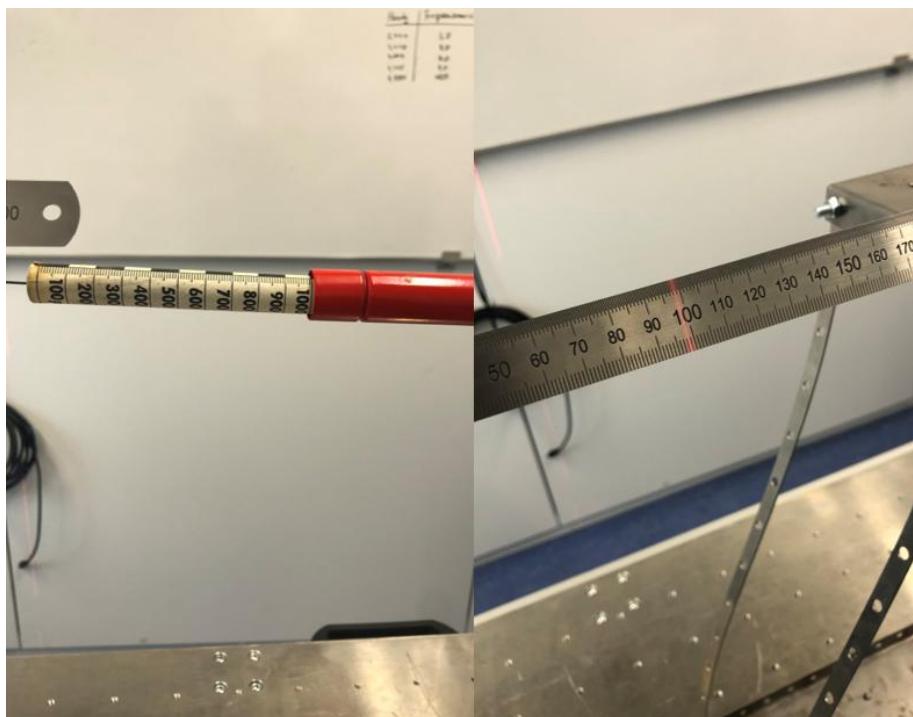


Abb. 4.61: Fünfte Belastung (links) mit Verformung (rechts)

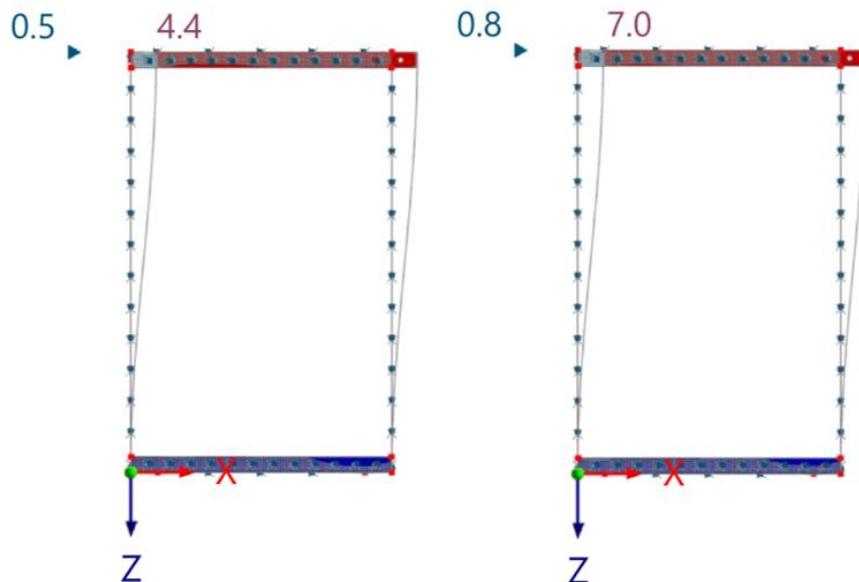


Abb. 4.62: Erste und zweite Belastung mit Verformung

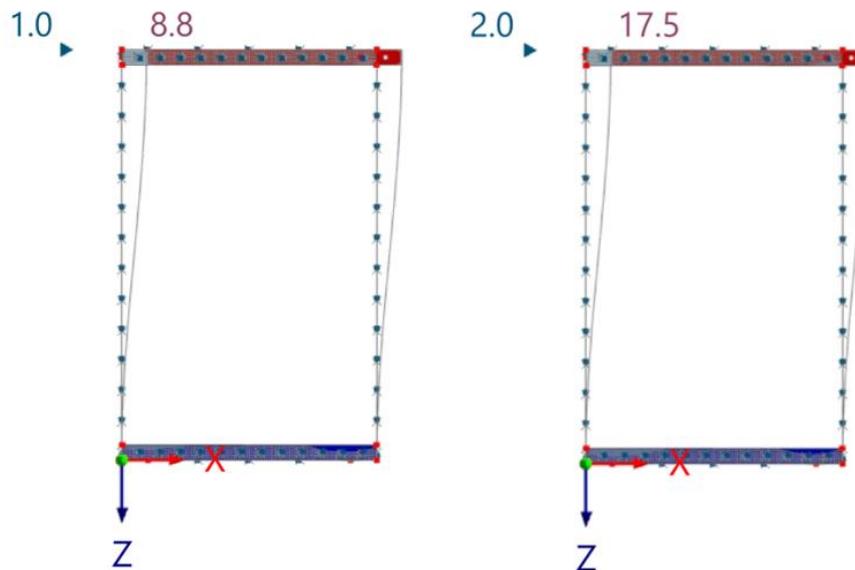


Abb. 4.63: Dritte und vierte Belastung mit Verformung

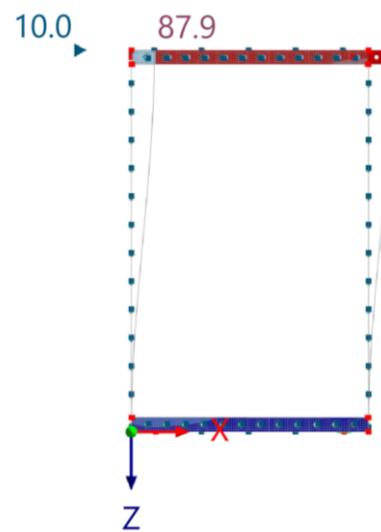


Abb. 4.63: Fünfte Belastung mit Verformung

Belastung [N]	Verformung [mm] (Versuch)	Verformung [mm] RFEM
0,5	5,50	4,40
0,8	8,75	7,00
1,0	10,50	8,80
2,0	21,50	17,50
10,0	101,50	87,90

Tab. 4.11: Vergleich der Verformungen ( $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ )

Die Werte zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentell ermittelten Verformungen und den simulierten Ergebnissen. Es ist jedoch erkennbar, dass die RFEM-Simulation etwas geringere Verformungen berechnet als im Versuch gemessen wurden. Diese Abweichung könnte auf die in der Simulation verwendeten Materialparameter zurückzuführen sein.



Abb. 4.64: Verwendetes Material

Die Abbildung 4.64 zeigt das für die Stützen verwendete Material. Zusätzlich sind die genaue Werkstoffnummer sowie die entsprechende Webseite angegeben. Eine Recherche im Internet ergab, dass der E-Modul des verwendeten Stahls bei  $185\,000\frac{N}{mm^2}$  liegt.

## Simulation des Stahltragwerks

Dichte:	7,9 g/cm <sup>3</sup>
Wärmeleitung:	15 - 19 W/(m °C) in Abhängigkeit von der Temperatur
Wärmekapazität:	500 J/(Kg °C) mittlere Werte bei 50 - 100 °C
	15,5x10 -6 (zwischen 30 - 100 °C)
Wärmeausdehnung:	16,0x10 -6 (zwischen 30 - 200 °C)
	16,5x10 -6 (zwischen 30 - 300 °C)
Elektrischer Widerstand:	0,73 Ohm x mm <sup>2</sup> /m
Elastizitätsmodul:	185 000 MPa bei 20°C

Abb. 4.65: Angaben zum Material [metallstore24 2024]

Im Folgenden werden die Materialkennwerte in RFEM angepasst, und die Berechnung wird erneut durchgeführt.

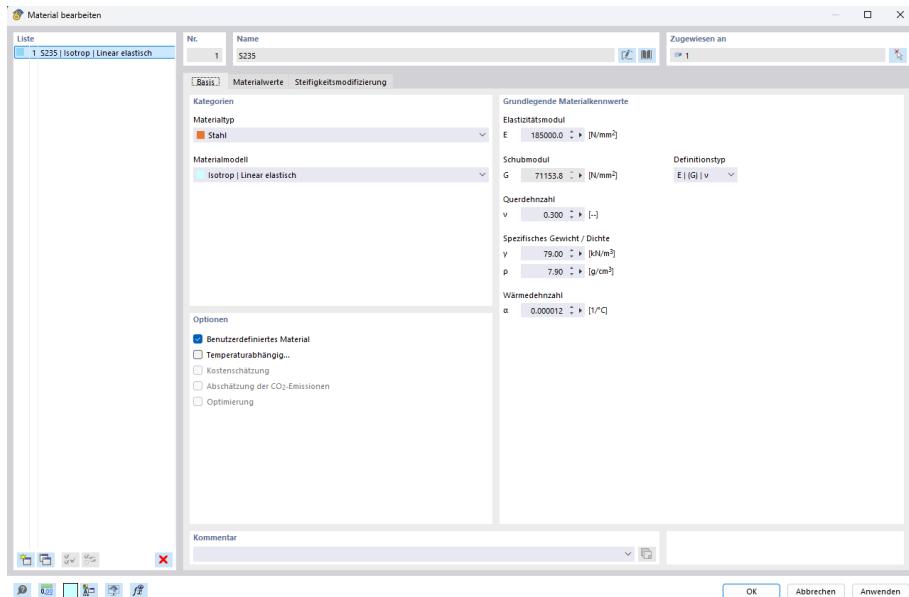


Abb. 4.66: Angepasste Materialkennwerte

Belastung [N]	Verformung [mm] (Versuch)	Verformung [mm] RFEM
0,5	5,50	5,00
0,8	8,75	8,10
1,0	10,50	10,10
2,0	21,50	20,20
10,0	101,50	101,20

Tab. 4.12: Vergleich der Verformungen ( $E = 185\,000\text{ N/mm}^2$ )

Nach der Anpassung des E-Moduls liegen die Messwerte nun enger beieinander. Es kann nun davon ausgegangen werden, dass das RFEM-Modell die Realität gut abbildet. Damit ist die Kalibrierung des Stahltragwerks abgeschlossen.

## 4.7 Modalanalyse

Die Modalanalyse wird nun mit den angepassten Materialkennwerten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

	Versuch	RFEM
Eigenfrequenz [Hz]	1,816	1,840
Periodendauer [s]	0,551	0,544

Tab. 4.13: Vergleich der zweiten Modalanalyse

Nach der zweiten Modalanalyse zeigt sich, dass die RFEM-Ergebnisse nahezu vollständig mit den experimentell ermittelten Werten übereinstimmen. Um die Eigenfrequenz besser abzubilden, werden die Massen der Schrauben berücksichtigt. Dafür ist es zunächst erforderlich, eine Schraube zu wiegen.



Abb. 4.67: Gewicht einer Schraube

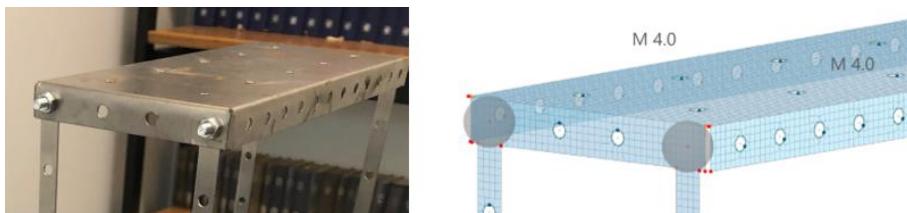


Abb. 4.68: Schrauben am Stahltragwerk (links), Schraubenmassen im RFEM-Modell (rechts)

	<b>Versuch</b>	<b>RFEM</b>
<b>Eigenfrequenz [Hz]</b>	1,816	1,813
<b>Periodendauer [s]</b>	0,551	0,552

Tab. 4.14: Vergleich der dritten Modalanalyse

Die Ergebnisse der dritten Modalanalyse zeigen eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen der experimentellen Messung und der Simulation in RFEM. Insgesamt liegt die Übereinstimmung der Ergebnisse bei 99,8%, was die Genauigkeit der Simulation bestätigt.

## 5 Zeitverlaufsanalyse

### 5.1 Versuche

Das Stahltragwerk wurde auf dem Shake Table aufgebaut, und es wurden drei Versuche durchgeführt, bei denen die Erregerfrequenz variiert wurde. Mithilfe von Smartphones wurden sowohl die Erregerbeschleunigung als auch die Antwortbeschleunigung aufgezeichnet. Die Smartphones erfassten die Beschleunigungen in Intervallen von 20 Millisekunden. Anschließend können die Daten in Excel verarbeitet werden, um die Beschleunigung-Zeit-Diagramme zu visualisieren.

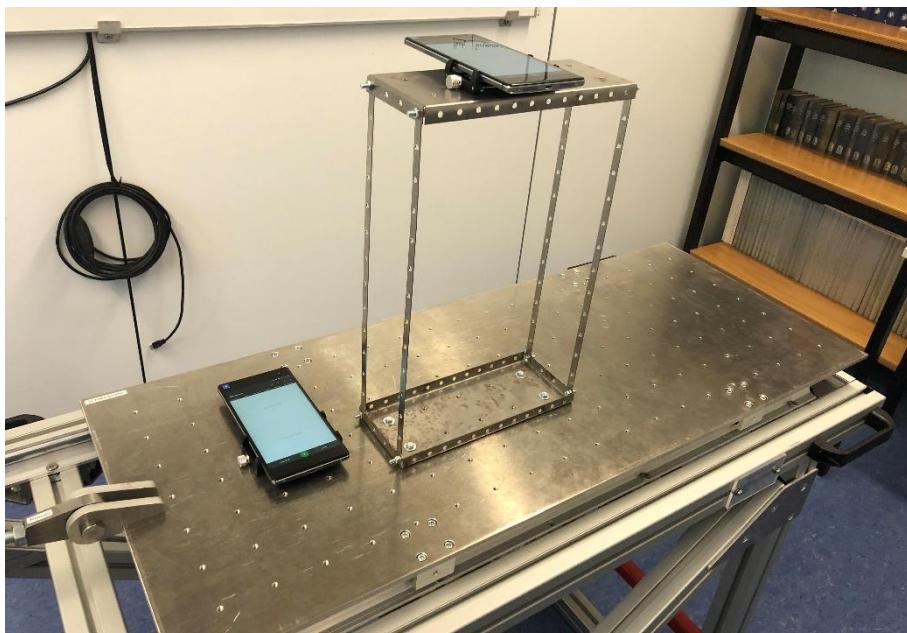


Abb. 5.1: Stahltragwerk von den Versuchen.

Die Abbildung 5.1 zeigt das Stahltragwerk, das auf dem Shake Table aufgebaut ist. Ein Smartphone ist direkt auf dem Shake Table montiert und zeichnet die Erregerfrequenz auf. Das zweite Smartphone ist auf der Stahl-Geschossdecke montiert und erfasst die Antwortbeschleunigung des Stahltragwerks.

### 5.1.1 Versuchsergebnisse

Es wurden drei Versuche durchgeführt, bei denen die Daten zur Erregerfrequenz und Antwortbeschleunigung des Stahltragwerks aufgezeichnet wurden. Da die Versuche über eine Dauer von 50 Sekunden durchgeführt wurden, sind im Diagramm lediglich die ersten 11 Sekunden zur Veranschaulichung dargestellt.

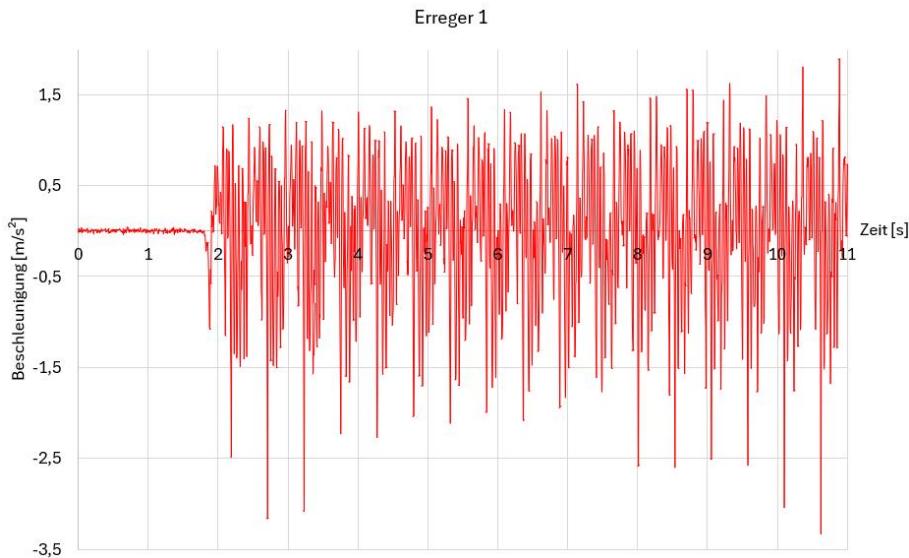


Abb. 5.2: Erreger 1

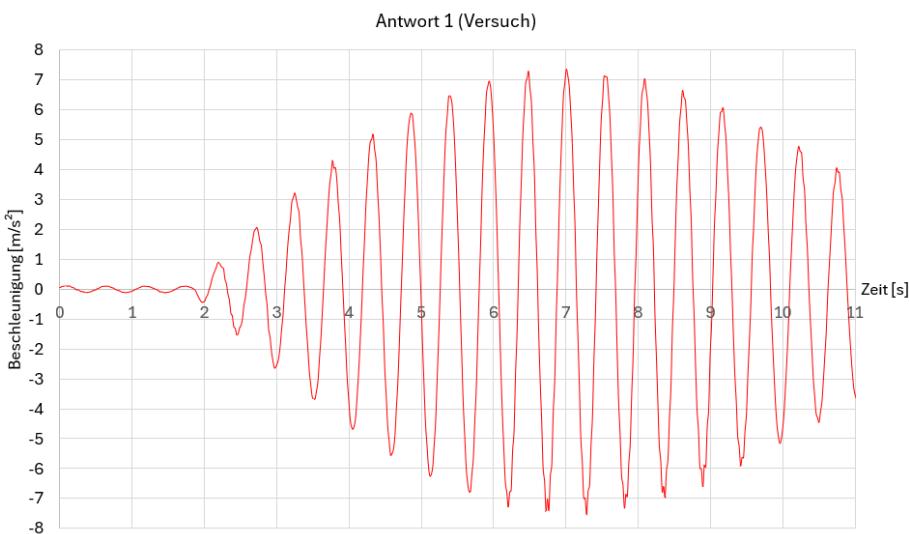


Abb. 5.2: Antwort 1 (Versuch)

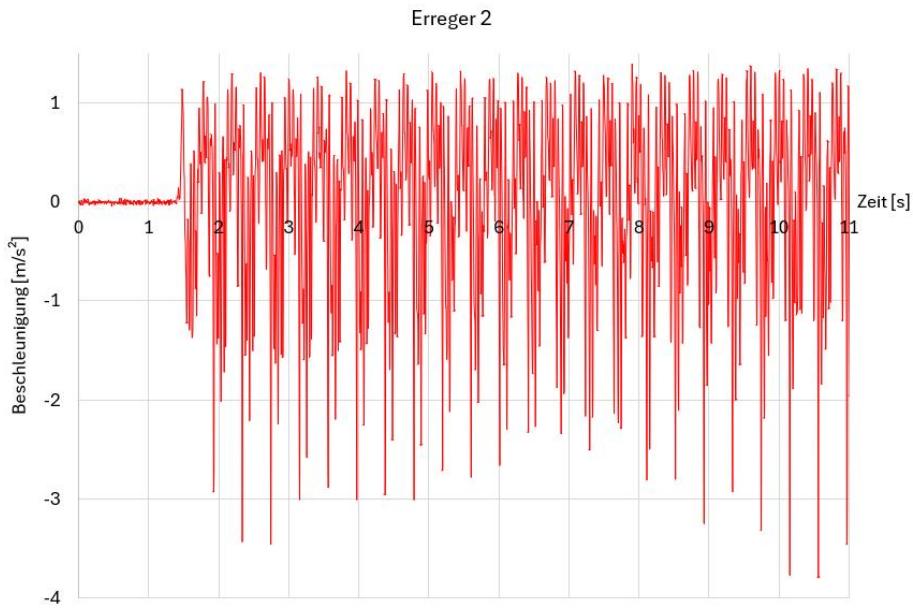


Abb. 5.3: Erreger 2



Abb. 5.4: Antwort 2 (Versuch)

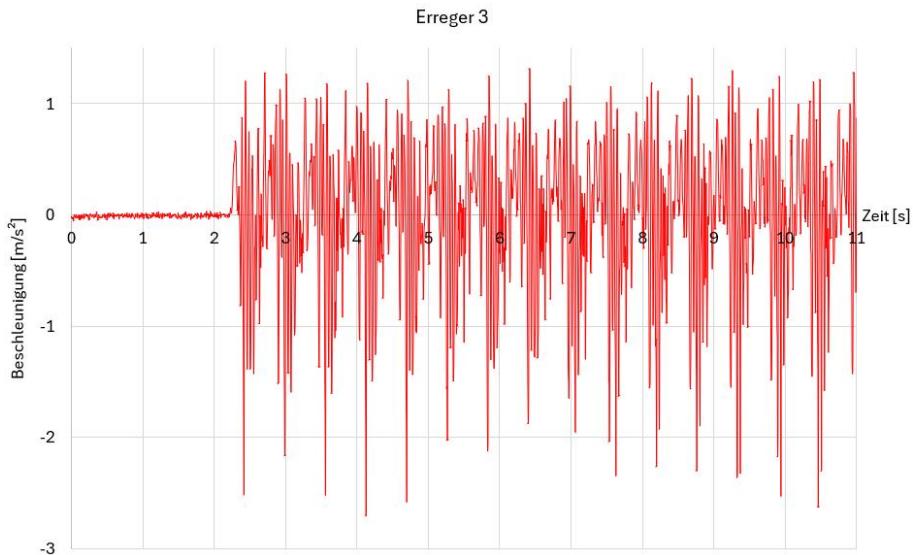


Abb. 5.5: Erreger 3

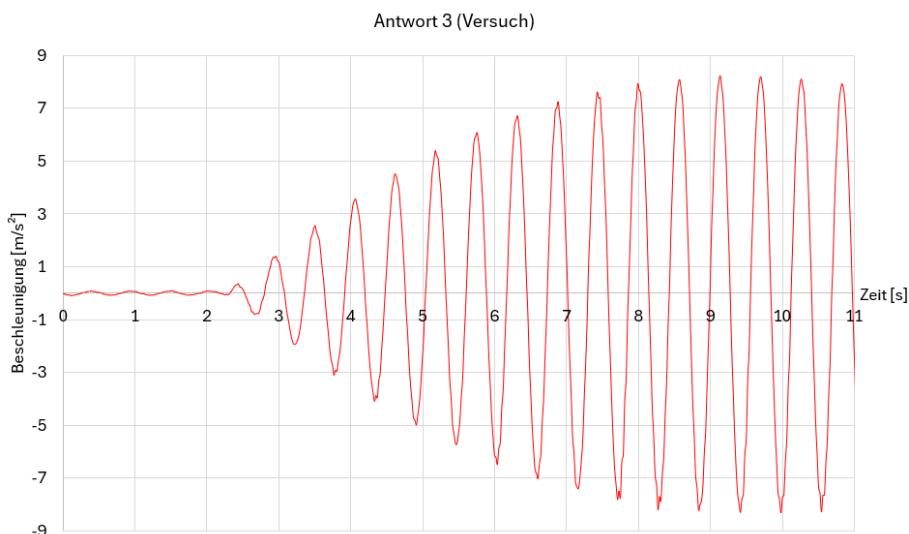


Abb. 5.6: Antwort 3 (Versuch)

## 5.2 RFEM

Die aufgezeichneten Daten werden in RFEM eingelesen, um eine Zeitverlaufsanalyse durchzuführen. Dabei wird die Reaktion des Stahltragwerks simuliert und die Ergebnisse mit den experimentellen Messungen verglichen. Die wesentlichen Eingabeschritte für den Import der Daten sowie die Durchführung der Zeitverlaufsanalyse werden ausführlich erläutert.

### Schritt 1: Lastfälle, Einstellungen

Zuerst wird ein zusätzlicher Lastfall in RFEM erstellt. Für diesen Lastfall wird der Analysetyp „Zeitverlaufsanalyse I Akzelerogramm“ ausgewählt. Der Lastfall wurde mit dem Namen „Zeitverlaufsanalyse Erreger 1“ benannt.

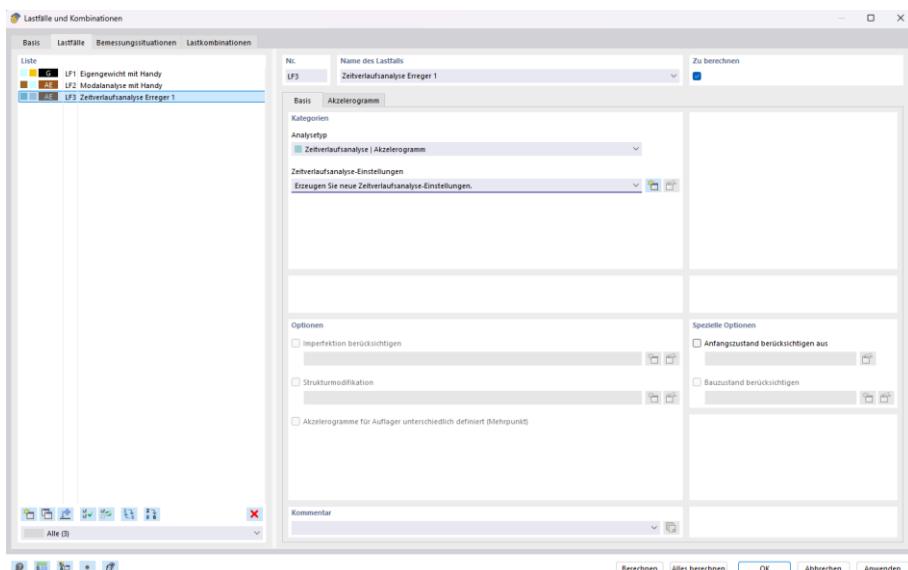


Abb. 5.7: Lastfall „Zeitverlaufsanalyse“

Als nächstes müssen die Zeitverlaufsanalyse-Einstellungen angepasst werden. Mit einem Klick auf „ Neue Zeitverlaufsanalyse-Einstellungen erzeugen...“ öffnet sich ein neues Fenster. Unter Basis wird die Art des Nachweisverfahrens auf „Linear modal“ festgelegt. Anschließend wird unter Zeitschritte bei „Maximale Zeit“ ein Wert von 33 Sekunden eingegeben, um die Dauer der Zeitverlaufsanalyse zu bestimmen. Da die Smartphones die Beschleunigung in Intervallen von 20 Millisekunden aufzeichnen, wird dieser Intervall auch bei „Gespeicherter Zeitschritt“ eingetragen.

## Zeitverlaufsanalyse

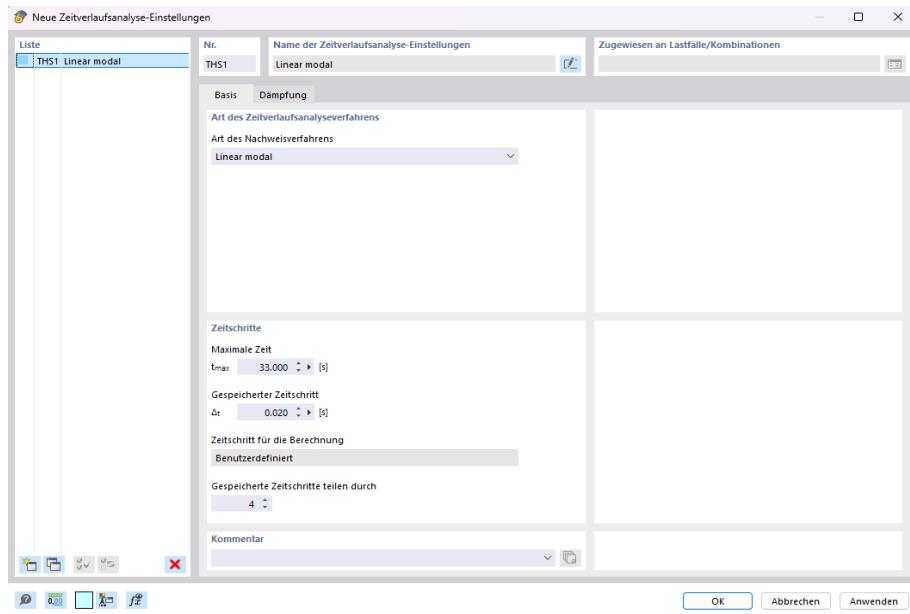


Abb. 5.8: Zeitverlaufsanalyse-Einstellungen

Unter Dämpfung wird die Dämpfungsart „Lehrsche Dämpfung | Konstant“ ausgewählt. Dadurch kann das in Abschnitt 4.4 berechnete Dämpfungsmaß eingetragen werden. Abschließend werden die Zeitverlaufsanalyse-Einstellungen mit „OK“ bestätigt und geschlossen.

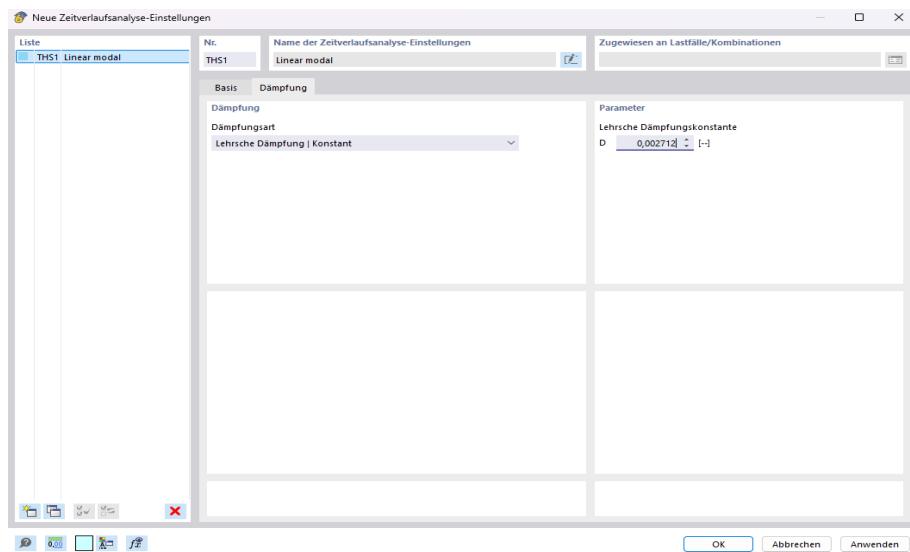


Abb. 5.9: Eingabe des Dämpfungsmaßes

Das Fenster „Lastfälle und Kombinationen“ bleibt weiterhin geöffnet. In diesem Schritt muss die Modalanalyse ausgewählt werden, auf der die Zeitverlaufsanalyse basiert. Dazu wird unter „Modalanalyse aus Lastfall übernehmen“ die bereits vorhandene Modalanalyse mit dem Namen „Modalanalyse mit Handy“ ausgewählt.

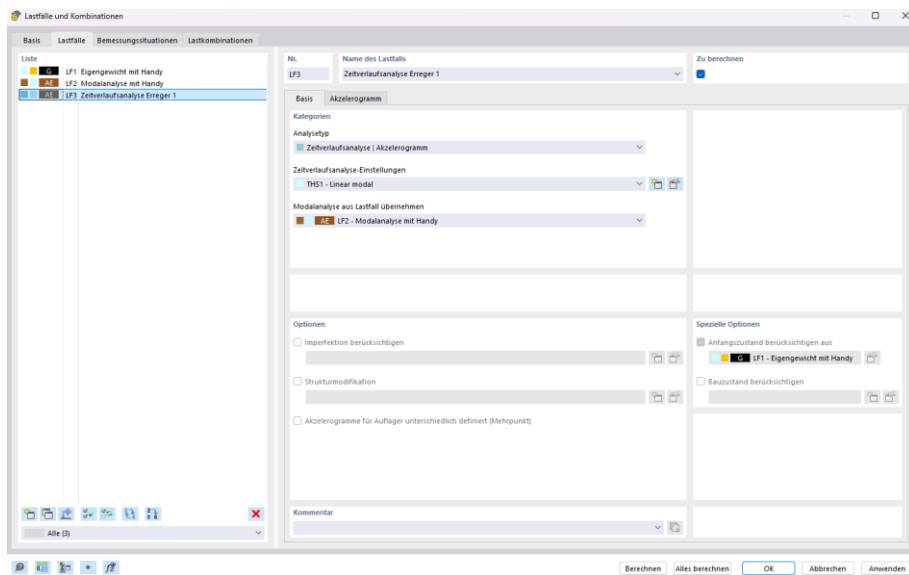


Abb. 5.10: Auswahl der Modalanalyse

Nun kann die aufgezeichnete Erregerbeschleunigung in RFEM importiert werden. Dafür wechselt man zunächst zum Abschnitt „Akzelerogramm“ und klickt auf das Symbol „Akzelerogramm bearbeiten...“. Anschließend können alle aufgezeichneten Beschleunigungs-Zeit-Diagramme importiert werden. Für das erste Diagramm wird der Name „Erreger 1“ vergeben. Die entsprechenden Werte aus der Excel-Datei werden durch Kopieren und Einfügen übernommen. Dabei werden lediglich die Zeit und die Beschleunigung in X-Richtung eingefügt. Danach können zwei weitere Akzelerogramme erzeugt und entsprechend wie bei „Erreger 1“ mit den zugehörigen Werten befüllt werden. Zum Abschluss wird das Fenster mit „OK“ geschlossen.

## Zeitverlaufsanalyse

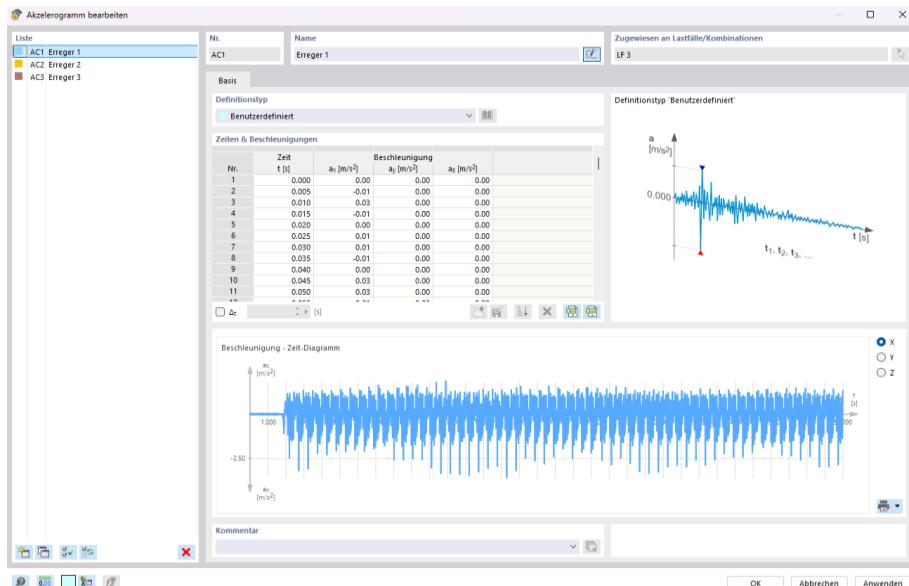


Abb. 5.11: Akzelerogramm

Der Lastfall „Zeitverlaufsanalyse Erreger 1“ (LF3) kann nun zweimal kopiert werden. Für die neuen Lastfälle wird unter „Akzelerogramm“ jeweils das entsprechende Beschleunigung-Zeit-Diagramm zugewiesen. Das Fenster kann mit „OK“ geschlossen werden.

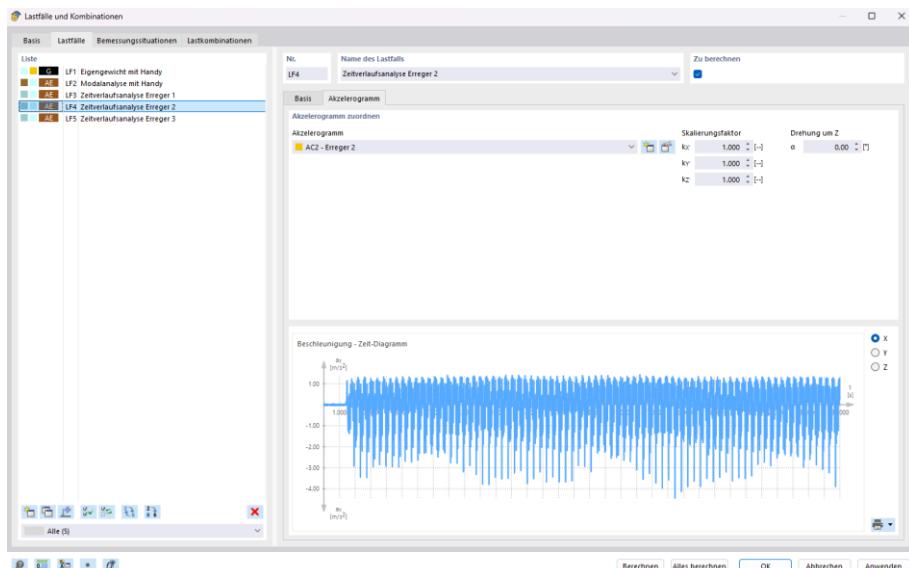


Abb. 5.12: Zuweisung Akzelerogramm

## Schritt 2: Berechnungsdiagramme

Die Berechnungsdiagramme dienen dazu, um die Ergebnisse der Zeitverlaufsanalyse zu veranschaulichen. Hier können verschiedene Diagramme angezeigt werden. In diesem Fall benötigt man ein Beschleunigung-Zeit-Diagramm. Im linken Bildschirmbereich im Navigator klickt man auf „Berechnungsdiagramme“ mit einem Doppelklick an, woraufhin sich ein Fenster öffnet.

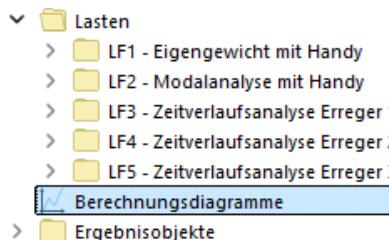


Abb. 5.13: Öffnen der Berechnungsdiagramme

Die Berechnungsdiagramme dienen der Veranschaulichung der Ergebnisse der Zeitverlaufsanalyse. Hier können verschiedene Diagramme angezeigt werden. Für diese Analyse wird ein Beschleunigung-Zeit-Diagramm benötigt. Dazu geht zum Navigator im linken Bildschirmbereich und klickt doppelt auf „Berechnungsdiagramme“. Daraufhin öffnet sich ein neues Fenster zur Auswahl und Darstellung der gewünschten Diagramme. Das erste Berechnungsdiagramm wird mit dem Namen „Antwort 1“ versehen. Unter „Quelle“ wird der Analysetyp „Zeitverlaufsanalyse“ ausgewählt. Anschließend wird bei „Lastfall/Lastkombination“ automatisch der richtige Lastfall 3 angezeigt. Für die Achsen werden die passenden Ergebnistypen festgelegt: Für die horizontale Achse wird „Zeit“ gewählt, und für die vertikale Achse „Knoten – Beschleunigung“. Rechts daneben ist der Wert  $u''x$  auszuwählen, damit ausschließlich die Beschleunigung in X-Richtung dargestellt wird. Mit einem Klick auf das Symbol „ Objekt in Grafik wählen“ kann der Knoten ausgewählt werden, an dem die Beschleunigung gemessen werden soll.



Abb. 5.14: Knotenauswahl

In diesem Fall wird der Knoten an der oberen Kante der Stahl-Geschossdecke ausgewählt.

## Zeitverlaufsanalyse

Das Berechnungsdiagramm kann nun mit einem Klick auf das Symbol „Ausgewählte Berechnungsdiagramme kopieren“ zweimal dupliziert werden. Anschließend werden die Namen der Diagramme angepasst, und es wird der jeweils korrekte Lastfall zugewiesen.

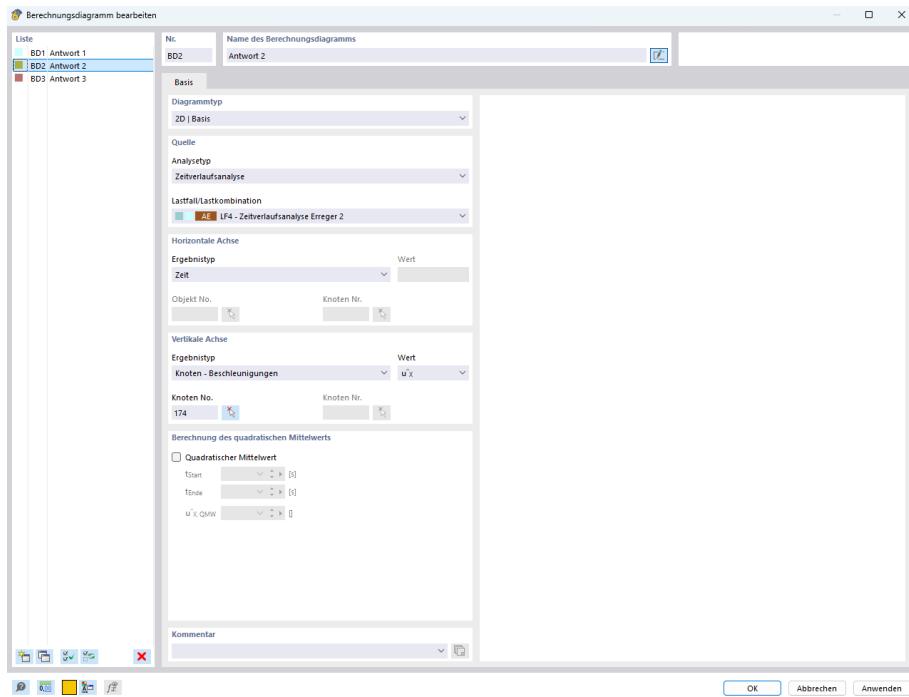


Abb. 5.15: Berechnungsdiagramme

## Schritt 3: Berechnen und Ergebnisse

Das Modell kann nun vollständig berechnet werden. Nach Abschluss der Berechnung können die zuvor erstellten Berechnungsdiagramme angezeigt werden. Dafür geht man erneut zu den Berechnungsdiagrammen im Navigator und öffnet das gewünschte Ergebnis mit einem Doppelklick.



Abb. 5.16: Öffnen der Ergebnisse

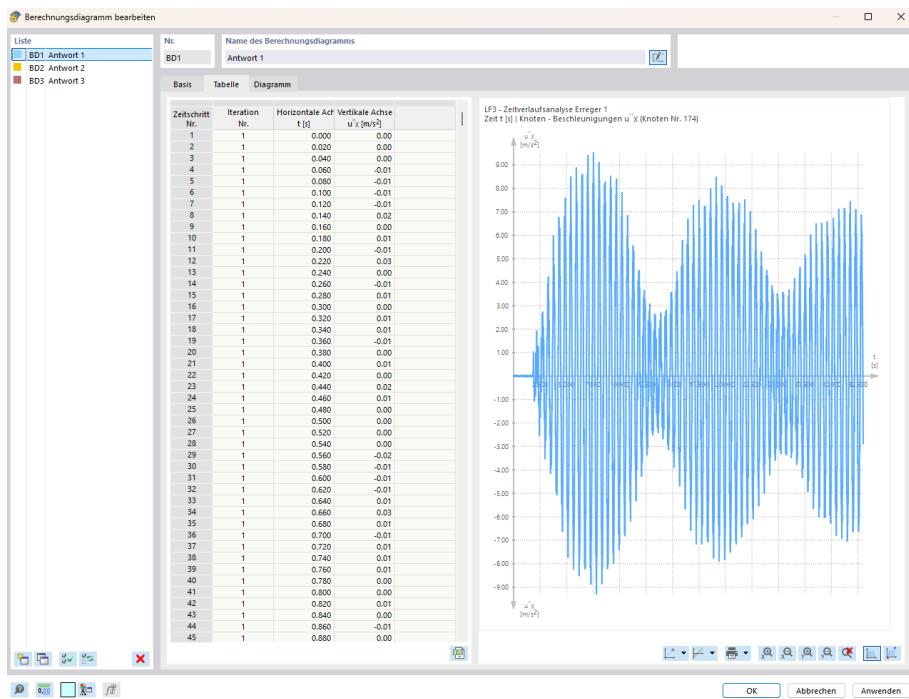


Abb. 5.17: Beschleunigungs-Zeit-Diagramm, Antwort 1

Unter dem Register „Tabelle“ können die Ergebnisse zur weiteren Analyse nach Excel exportiert werden.

### 5.2.1 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche mit den Berechnungsergebnissen aus RFEM verglichen.

### 5.2.1.1 Antwort 1

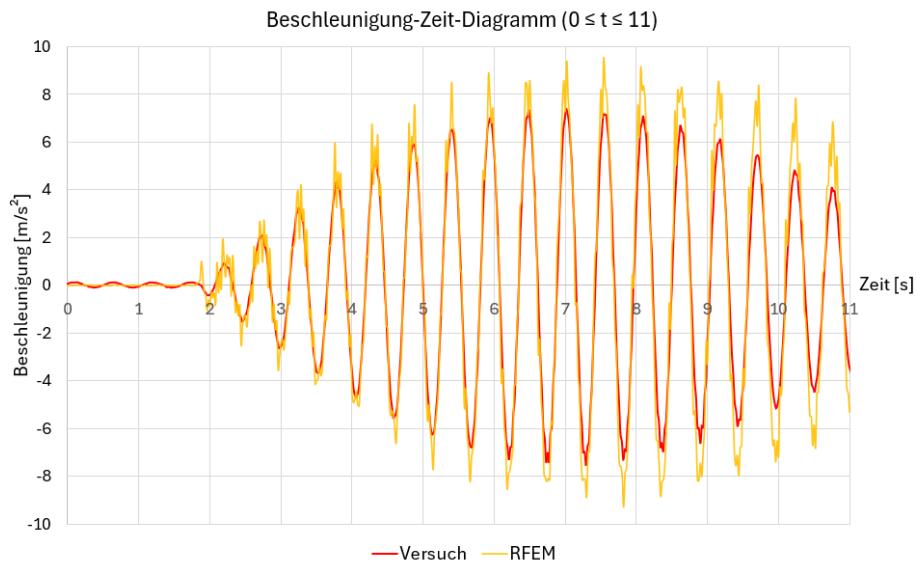


Abb. 5.18: Antwort 1 zwischen 0 und 11 Sekunden

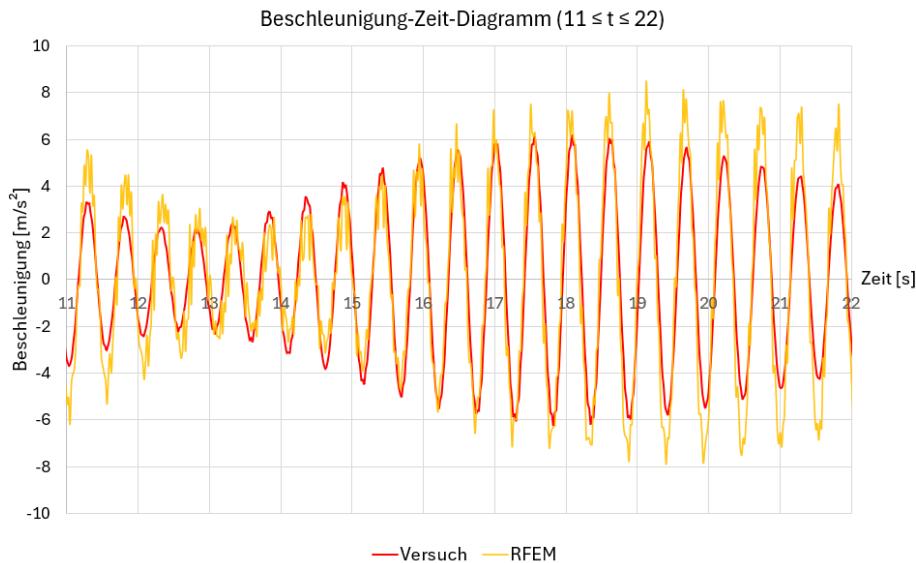


Abb. 5.19: Antwort 1 zwischen 11 und 22 Sekunden

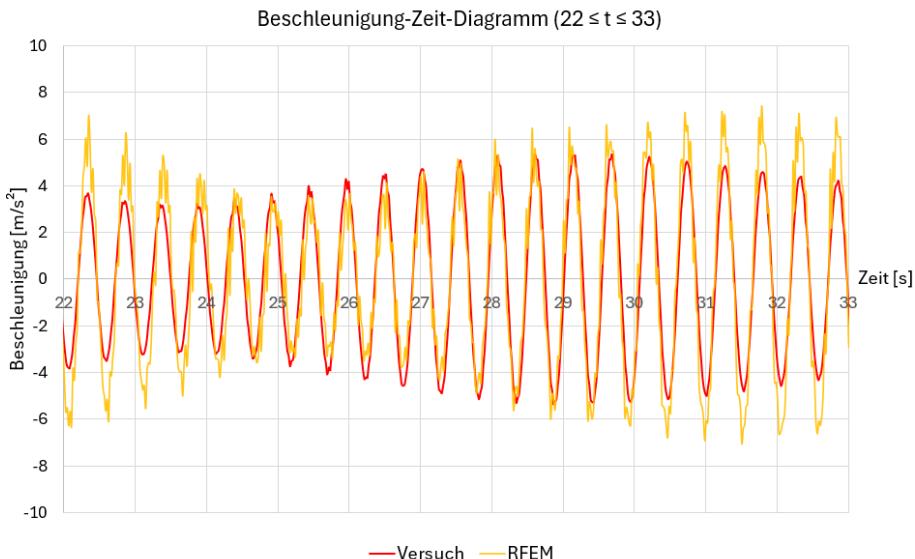


Abb. 5.20: Antwort 1 zwischen 22 und 33 Sekunden

Die Beschleunigung-Zeit-Diagramme (siehe Abbildungen 5.18 bis 5.20) zeigen den Vergleich zwischen den experimentellen Ergebnissen (Versuch) und den simulierten Werten aus der RFEM-Zeitverlaufsanalyse. Die Daten wurden über einen Zeitraum von 0 bis 11 Sekunden, 11 bis 22 Sekunden und 22 bis 33 Sekunden analysiert.

Die rote Linie stellt die experimentell gemessene Beschleunigung dar, während die orangefarbene Linie die simulierten Werte aus RFEM zeigt. Es ist erkennbar, dass die Simulation die experimentellen Daten gut nachbildet. Besonders in den ersten Sekunden stimmen die Ergebnisse nahezu exakt überein. Im weiteren Verlauf sind leichte Abweichungen in der Beschleunigung sichtbar, wobei die RFEM-Ergebnisse in der Regel etwas höhere Spitzenwerte aufweisen.

Trotz dieser leichten Unterschiede ist die Gesamtübereinstimmung zwischen Experiment und Simulation als gut zu bewerten.

In der nächsten Abbildung ist das Beschleunigung-Zeit-Diagramm über die gesamte Versuchs- und Simulationsdauer dargestellt.

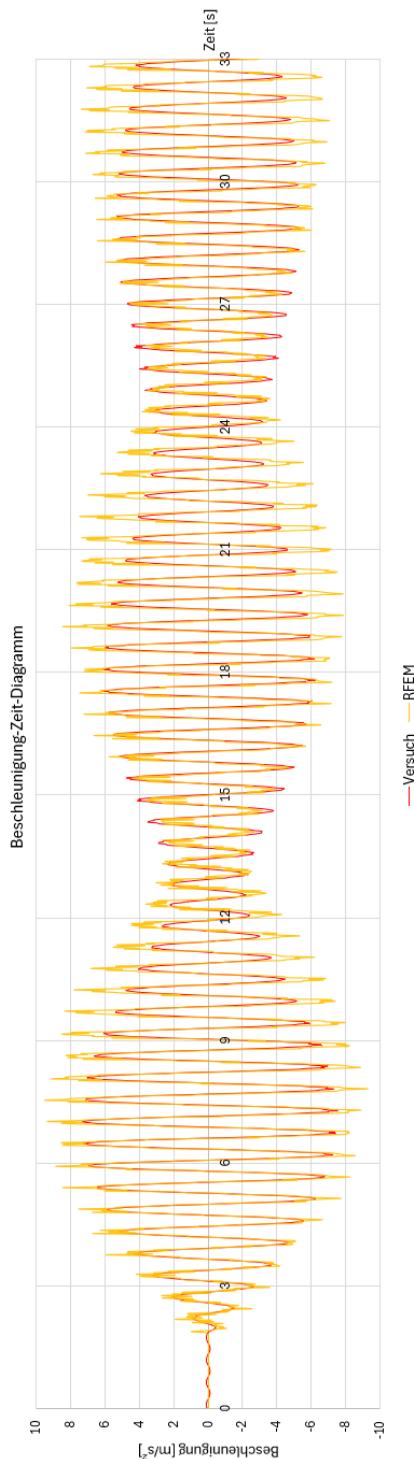


Abb. 5.21: Vergleich Antwort 1

### 5.2.1.2 Antwort 2

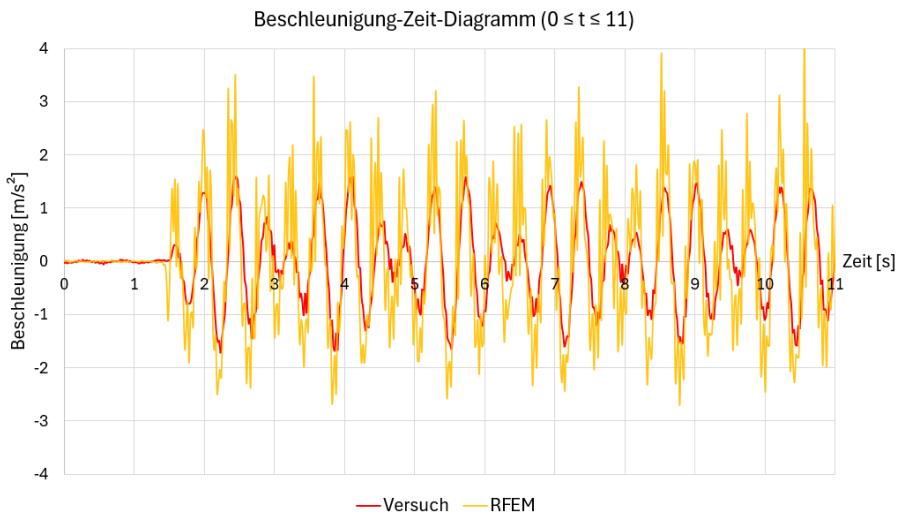


Abb. 5.22: Antwort 2 zwischen 0 und 11 Sekunden

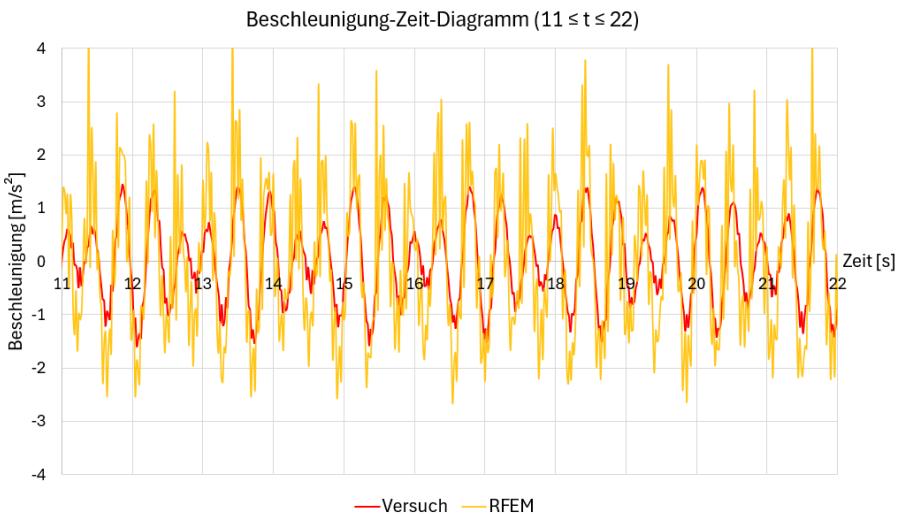


Abb. 5.23: Antwort 2 zwischen 11 und 22 Sekunden

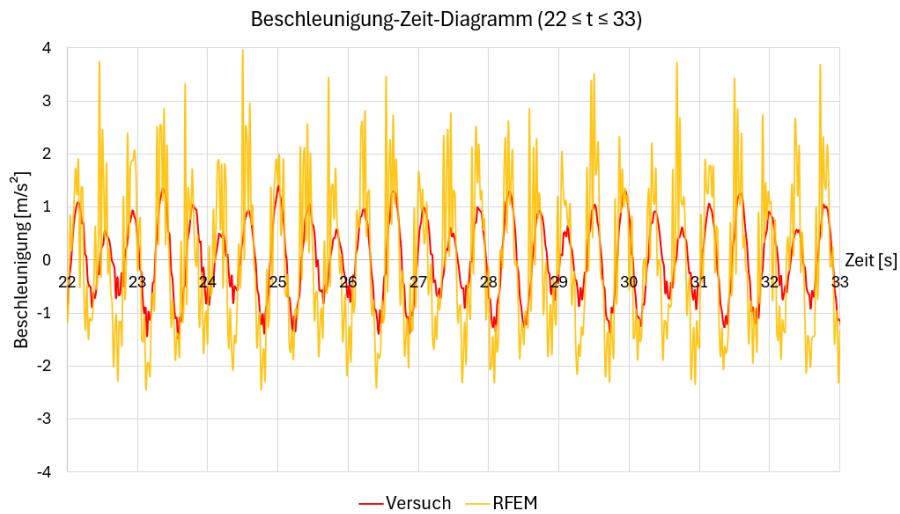


Abb. 5.24: Antwort 2 zwischen 22 und 33 Sekunden

Auch hier sind die zeitliche Übereinstimmung der Schwingungen sowie die Beschleunigungsverläufe qualitativ ähnlich, wobei kleinere Abweichungen in den Amplituden sichtbar sind. Nichtsdestotrotz bildet die Simulation den experimentellen Verlauf gut ab.

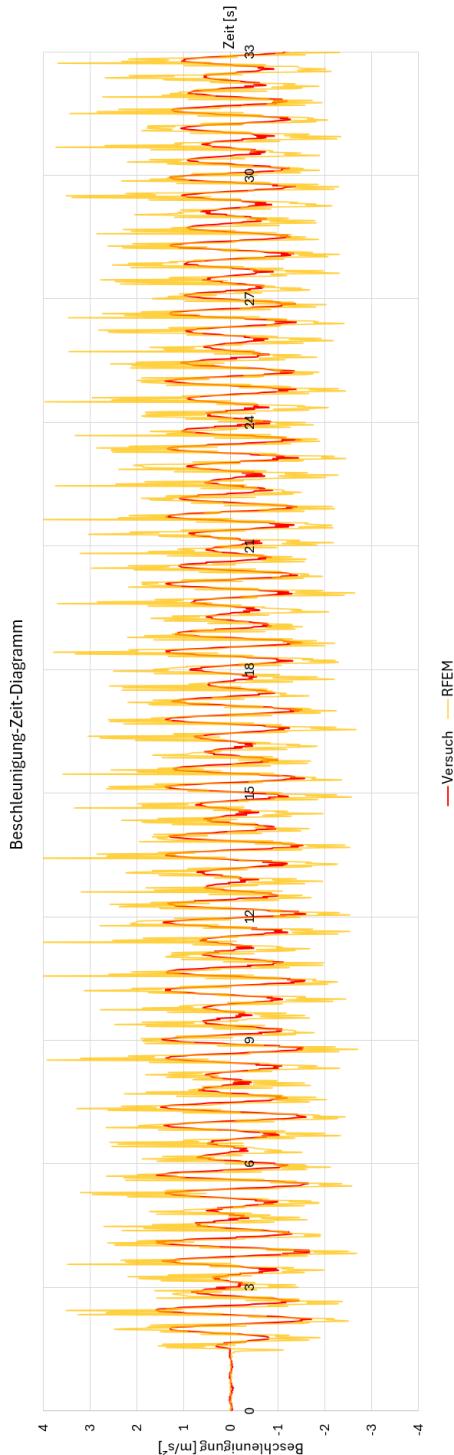


Abb. 5.25: Vergleich Antwort 2

### 5.2.1.3 Antwort 3

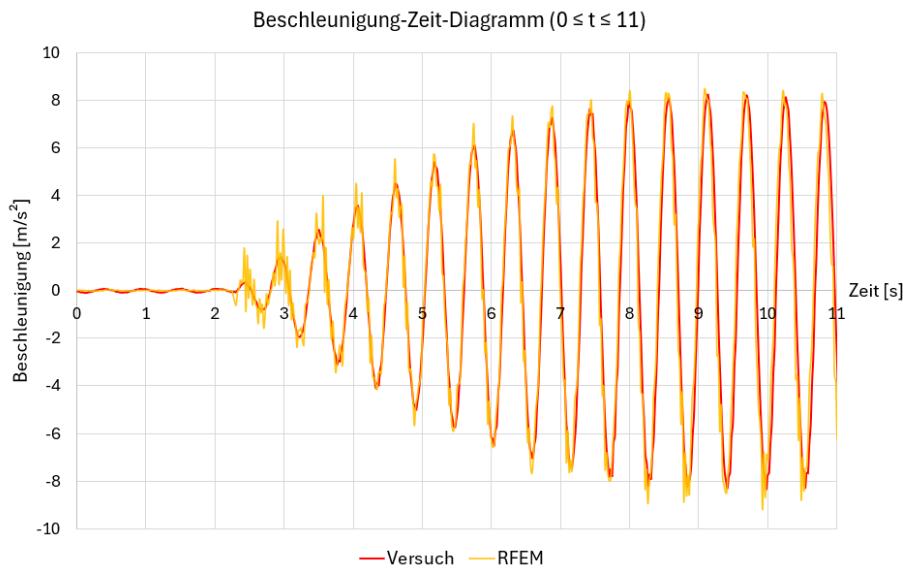


Abb. 5.26: Antwort 3 zwischen 0 und 11 Sekunden

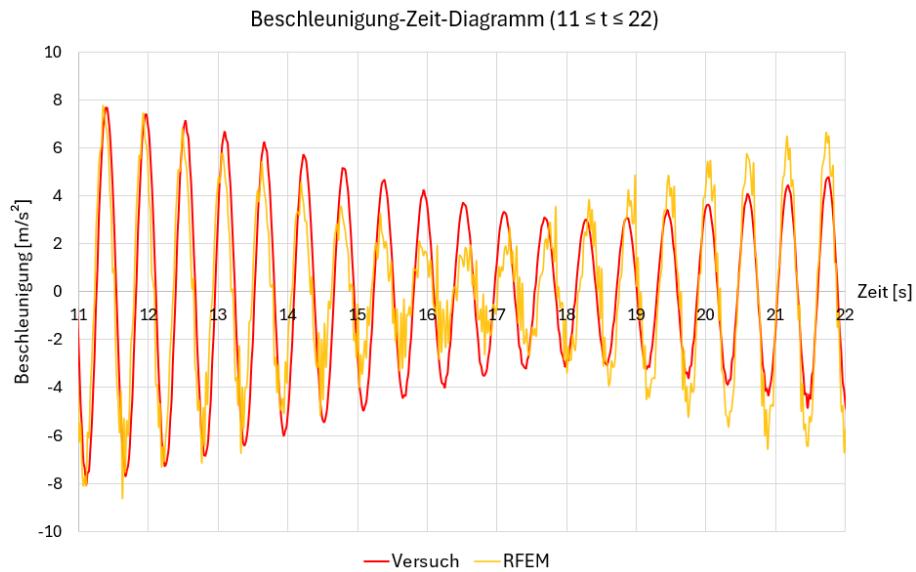


Abb. 5.27: Antwort 3 zwischen 11 und 22 Sekunden

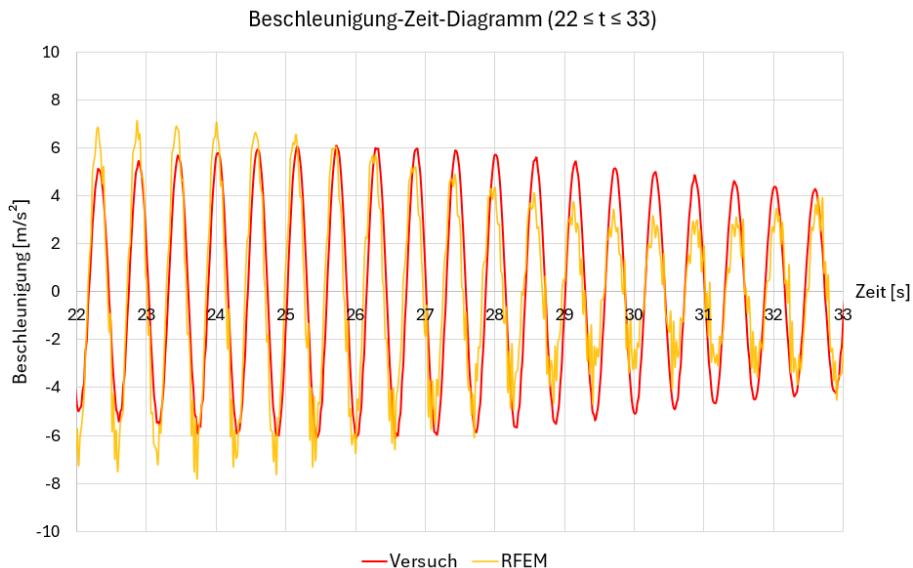


Abb. 5.28: Antwort 3 zwischen 22 und 33 Sekunden

Die Simulationsergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Werten. Die Verläufe sind nahezu identisch, wobei kleinere Abweichungen lediglich in den Amplituden erkennbar sind. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die hohe Genauigkeit der Simulation und ihre Eignung zur Nachbildung des realen Verhaltens.

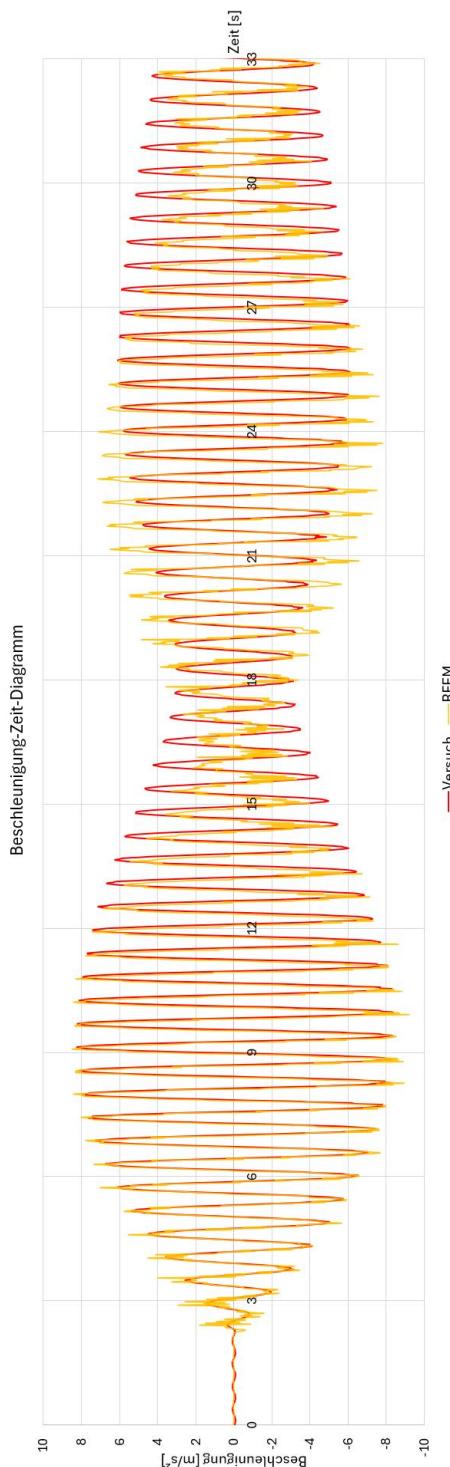


Abb. 5.29: Vergleich Antwort 3

## 6      **Antwortspektrenverfahren**

### 6.1      **Annahme**

Für die Ermittlung der Erdbebenbelastung wird die Stadt Aachen als Standort angenommen. Die spektrale Antwortbeschleunigung im Plateaubereich für Aachen beträgt  $S_{ap,R} = 2,54 \frac{m}{s^2}$ . Daraus ergibt sich die Bezugsspitzenbeschleunigung  $a_{gR} = 1,016 \frac{m}{s^2}$ . Weitere Annahmen sind die Baugrundklasse, die Bedeutungsklasse sowie der Verhaltensbeiwert. Diese sind in Abbildung 6.1 zu sehen.

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit	Referenz
<b>Art des Spektrums</b>				
Spektrumform			Bemessungsspektrum	
Spektrumrichtung			Horizontal	
Baugrundklasse			B-R	
Referenz-Wiederkehrperiode	TNCR	475		
<b>Erdbebeneinwirkung</b>				
Referenz-Spitzenbodenbeschleunigung	$a_{gR}$	1.02	$m/s^2$	3.2.1(5)P, Anm. 2
Spektrale Antwortbeschleunigung	$S_{ap,R}$	2.54	$m/s^2$	3.2.1(3), Gl. (NA.1)
Bedeutungsklasse		II		
Bedeutungsbeiwert   Klasse II	$\gamma_1$	1.000	--	4.2.5(5)P, Tab. NA.5
Bemessungsbodenbeschleunigung   ...	$a_g$	1.02	$m/s^2$	
<b>Faktoren</b>				
Verhaltensbeiwert	$q$	1.500	--	
<b>Parameter der Baugrundklasse</b>				
Baugrundfaktor   Baugrundklasse B-...	$S$	1.200	--	3.2.2.2(1)P, Tab. NA.2
Kontrollperiode   Baugrundklasse B-R-...	$T_B$	0.100	s	3.2.2.2(1)P, Tab. NA.1
Kontrollperiode   Baugrundklasse B-R-...	$T_C$	0.250	s	3.2.2.2(1)P, Tab. NA.1
Kontrollperiode   Baugrundklasse B-R-...	$T_D$	2.000	s	3.2.2.2(1)P, Tab. NA.1
Maximale Periode	$T_{max}$	2.500	s	

Abb. 6.1: Erdbebeneinwirkung

Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich das folgende Beschleunigungsantwortspektrum.

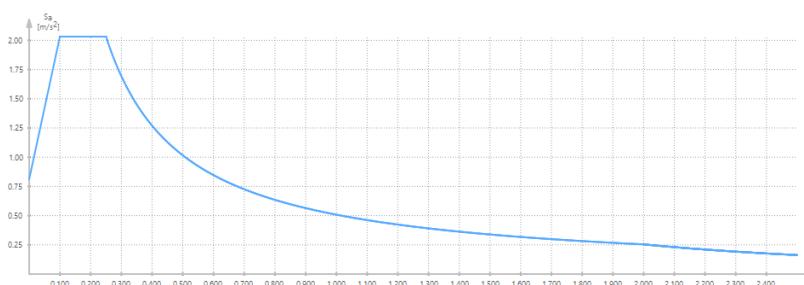


Abb. 6.2: Beschleunigungsantwortspektrum

## Antwortspektrenverfahren

Des Weiteren wird ausschließlich das Eigengewicht des Stahltragwerks berücksichtigt, also ohne zusätzliche Massen.

### 6.2 Ergebnisse

#### 6.2.1 Modalanalyse

Da die Masse des Smartphones nicht berücksichtigt wird, ändern sich sowohl die Eigenfrequenz als auch die Eigenperiode des Stahltragwerks.

Eigenfrequenz f [Hz]	Eigenperiode T [s]
2.713	0.369

Abb. 6.3: Modalanalyse ohne Smartphone

#### 6.2.2 Antwortspektrenverfahren

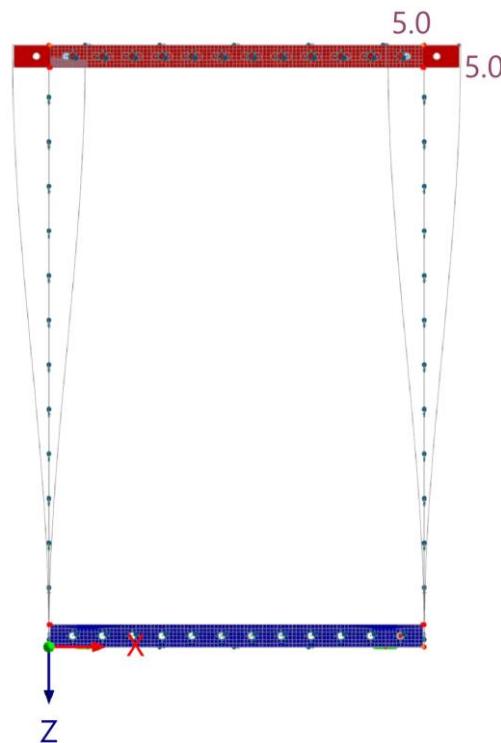


Abb. 6.4: Maximale Kopfauslenkung unter der Erdbebenlast

Die maximale Kopfauslenkung des Stahltragwerks unter der Einwirkung der Erdbebenlast beträgt 5 mm.

### 6.2.2.1 Kontrolle des Ergebnisses

Hier wird das Ergebnis mit Hilfe einfacher Berechnungen überprüft.

Basierend auf den Werten aus den statischen Versuchen (Abschnitt 4.6) kann eine Federkonstante  $k$  berechnet werden, die das Verhalten des Stahltragwerks abbildet:

$$k_1 = \frac{0,5N}{5,50mm} = 0,0909 \frac{N}{mm}$$

$$k_2 = \frac{0,8N}{8,75mm} = 0,0914 \frac{N}{mm}$$

$$k_3 = \frac{1,0N}{10,50mm} = 0,0952 \frac{N}{mm}$$

$$k_4 = \frac{2,0N}{21,50mm} = 0,0930 \frac{N}{mm}$$

$$k_5 = \frac{10,0N}{101,50mm} = 0,0985 \frac{N}{mm}$$

Durch Mittelung dieser Werte ergibt sich die mittlere Federkonstante:

$$k = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5}{5} = 0,0938 \frac{N}{mm} = 0,0938 \frac{kN}{m}$$

Multipliziert man die Kopfauslenkung von 5,0mm mit der errechneten Federkonstanten, erhält man die Ersatzkopflast, die sich aus der Erdbebenbelastung ergibt:

$$F_b = 0,0938 \frac{N}{mm} * 5,0mm = 0,469N$$

Es war zu erwarten, dass das Ergebnis etwas kleiner als 0,5N ist, da beim statischen Versuch die Kopfauslenkung von 5,50mm bei einer Last von 0,5N betrug.

Die Masse des gesamten Stahltragwerks wurde während der Experimente mit einer Waage aufgenommen. Sie beträgt:

$$m_{gesamt} = 674g$$

Die modale Masse kann mit einem Faktor von 0,5 abgeschätzt werden. Daraus folgt:

$$m_{Modal} = 0,5 * 674g = 337g = 0,000337t$$

Die Eigenkreisfrequenz  $\omega$  kann wie folgt berechnet werden:

$$\omega = \sqrt{\frac{0,0938 \frac{kN}{m}}{0,000337t}} = 16,68 \frac{rad}{s}$$

Daraus ergibt sich die Eigenfrequenz  $f$ :

$$f = \frac{16,68 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{2\pi} = 2,65 \text{Hz}$$

Die Periodendauer  $T$  ergibt sich zu:

$$T = \frac{1}{2,65 \text{Hz}} = 0,377 \text{s}$$

Aus dem Bemessungsbeschleunigungsspektrum (siehe Abbildung 6.5) wird die Beschleunigung für  $T = 0,377 \text{s}$  abgelesen:

$$S_d(T) = 1,35 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

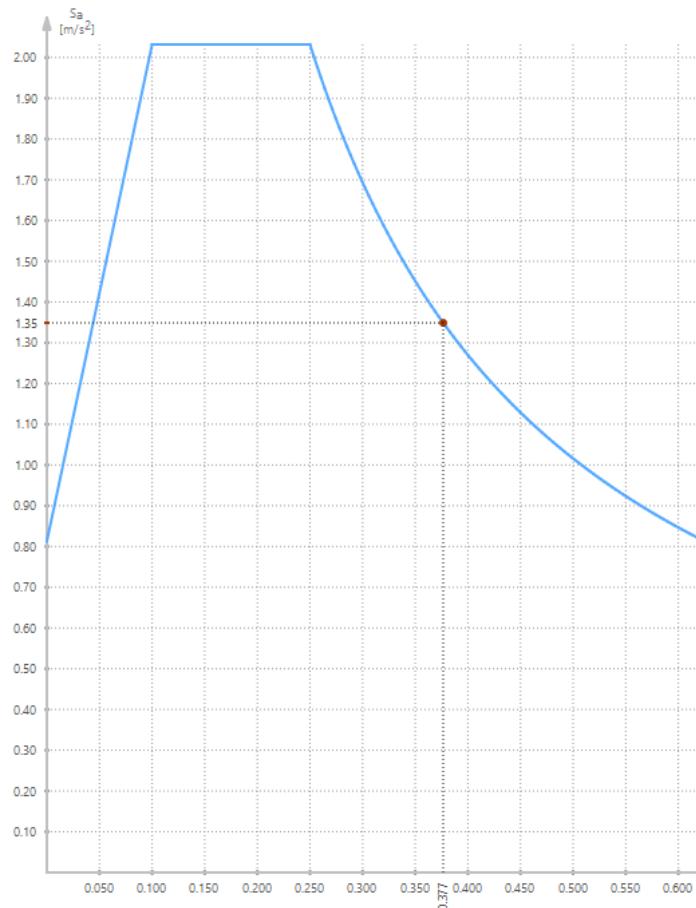


Abb. 6.5: Bemessungsbeschleunigung

Damit kann die Gesamterdbebenlast  $F_b$  berechnet werden:

$$F_b = 1,35 \frac{m}{s^2} * 0,337kg = 0,455N$$

Nach diesen einfachen Kontrollrechnungen kann das RFEM-Ergebnis bestätigt werden.

## **7 Pushover-Analyse**

Da in dieser Arbeit das betrachtete Stahltragwerk ausschließlich im linearen Bereich analysiert wurde, wird auf eine nichtlineare Pushover-Berechnung verzichtet. Sowohl bei den statischen als auch bei den dynamischen Versuchen bildeten sich keine Fließgelenke, sodass keine experimentellen Ergebnisse vorliegen, die mit einer Pushover-Berechnung verglichen werden könnten. Für eine entsprechende Berechnung wären Gelenke erforderlich, die plastizieren können, was für das vorliegende Tragwerk nur schwer umsetzbar ist, da alle Bauteile biegesteif miteinander verbunden sind.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

### **8.1 Zusammenfassung**

Ziel dieser Arbeit war die dynamische Untersuchung eines Einmassenschwingers mithilfe der Software Dlubal RFEM 6. Der Einmassenschwinger war ein Stahltragwerk, bestehend aus vier Kragstützen mit einer biegesteif angeschlossenen Stahl-Geschossdecke.

Im ersten Teil der Arbeit wurden die Grundlagen der Baudynamik vorgestellt und anhand einfacher Rechenbeispiele erläutert. Zur besseren Veranschaulichung wurden Excel-Tools [Werkle 2017] zur Darstellung der Ergebnisse genutzt. Zudem wurde ein Beispiel mit der Software Dlubal RFEM 6 nachgebildet, wobei die Ergebnisse der analytischen Berechnungen bestätigt werden konnten.

Da das Tragwerksmodell in RFEM ausschließlich aus Flächen bestand, wurde zunächst ein Versuch mit einem Kragarm und einer Belastung am freien Ende durchgeführt. Ziel war es, die optimale Länge der finiten Elemente zu ermitteln, um eine realitätsnahe Abbildung der experimentell gemessenen Durchbiegung in RFEM zu gewährleisten. Anschließend wurde das gesamte Stahltragwerk in RFEM modelliert.

Eine erste Modalanalyse zeigte eine Abweichung zwischen der simulierten und der experimentell ermittelten Eigenfrequenz. Daraufhin wurden weitere Versuche durchgeführt, um das Modell zu kalibrieren. Diese Versuche wurden ebenfalls in RFEM nachgestellt und miteinander verglichen. Die ermittelten Abweichungen konnten durch Anpassung der Materialkennwerte und Berücksichtigung zusätzlicher Massen erheblich reduziert werden.

Nach der Kalibrierung des Modells wurden dynamische Versuche auf einem Shake Table durchgeführt und die Erregerbeschleunigungen aufgezeichnet. Diese wurden anschließend in RFEM importiert, um eine Zeitverlaufsanalyse durchzuführen. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den simulierten Antwortbeschleunigungen.

Abschließend wurde das Add-On „Antwortspektrenverfahren“ genutzt, um die Erdbebenbelastung auf das Tragwerk zu berechnen. Die ermittelten Ergebnisse konnten durch einfache Kontrollrechnungen bestätigt werden.

### **8.2 Ausblick**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Stahltragwerk dynamisch untersucht, wobei der Fokus auf der Anwendung der Software Dlubal RFEM 6 und der darin enthaltenen Add-Ons lag. Ziel war es, das Tragwerk so zu modellieren, dass es die Realität möglichst präzise abbildet. Das betrachtete System stellte einen Einmassenschwinger dar, bestehend aus einem Stahltragwerk ohne aussteifende Verbände, Dämpfer oder Gelenke, da alle Bauteile biegesteif miteinander verbunden waren. Die Untersuchung beschränkte sich auf Schwingungen in Längsrichtung des Tragwerks und konzentrierte sich ausschließlich auf die erste Eigenform.

## Zusammenfassung und Ausblick

---

Die durchgeführten Analysen zeigten eine hohe Übereinstimmung zwischen den experimentell ermittelten und den simulierten Ergebnissen, was die Qualität der Modellierung bestätigt.

Aufbauend auf dieser Arbeit lassen sich zahlreiche weiterführende Untersuchungen anstellen. Eine mögliche Erweiterung wäre die Analyse des Tragwerks in Querrichtung, um das dynamische Verhalten in dieser Richtung besser zu verstehen. Zudem könnte das Modell durch zusätzliche Stahl-Geschossdecken oder aussteifende Elemente ergänzt werden. Auch eine Variation der aufliegenden Massen würde neue Erkenntnisse liefern.

Ein weiterer interessanter Aspekt wäre die Integration von Dämpfern. Dabei könnte untersucht werden, welche Dämpfersysteme erforderlich sind, um einer bestimmte Erdbebenbelastung standzuhalten. Darüber hinaus bietet sich eine genauere Betrachtung der Pushover-Analyse an, die in dieser Arbeit nur am Rande behandelt wurde. Hierzu könnten gezielt Fließgelenke definiert werden, indem Querschnitte an bestimmten Stellen geschwächt werden.

Zusammenfassend gibt es zahlreiche Möglichkeiten, das bestehende System weiterzuentwickeln, um zusätzliche spannende Untersuchungen zur dynamischen Tragwerksanalyse durchzuführen.

## Literatur

<b>DIN 4149</b>	DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten –Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2005.
<b>DIN EN 1998</b>	DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2010.
<b>DIN EN 1998-1/NA</b>	DIN EN 1998-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2023
<b>Dlubal 2024</b>	Dlubal 2024 RFEM 6 / RSTAB 9 I Dynamische Analyse, Internetlink: <a href="https://www.dlubal.com/de/downloads-und-infos/dokumente/online-handbuecher/rfem-6-rstab-9-dynamische-analyse?srsltid=AfmBOookzIBKUkg2rJPYNgiVbaE8Zs40Vy-viFQsnYj8yJD96EeqBcXA">https://www.dlubal.com/de/downloads-und-infos/dokumente/online-handbuecher/rfem-6-rstab-9-dynamische-analyse?srsltid=AfmBOookzIBKUkg2rJPYNgiVbaE8Zs40Vy-viFQsnYj8yJD96EeqBcXA</a> , aufgerufen am 03.12.2024.
<b>Handbuch GEO 2024</b>	Handbuch GEO 2024 GEO – Das FRILO Gebäudemodell, Internetlink: <a href="https://www.friло.eu/wp-content/uploads/DE/Manuals/geo.pdf">https://www.friло.eu/wp-content/uploads/DE/Manuals/geo.pdf</a> , aufgerufen am: 06.12.2024
<b>MAUERWERK KALENDER 2023</b>	Butenweg, C.; Kubalski, T.; Gellert, C.; El-Deib, K.: Mauerwerk-Kalender 2023: Schwerpunkte: Instandsetzung – Erdbeben – Lehmbau. Verlag Ernst & Sohn, 2023.
<b>Meskouris 2011</b>	Meskouris, K.; Hinzen, K.-G.; Butenweg, C.; Mistler, M.: Bauwerke und Erdbeben: Grundlagen – Anwendung – Beispiele. Vieweg + Teubner Verlag, 3. Auflage, Wiesbaden, 2011.

<b>Metallstore24 2024</b>	Metallstore24 Technische Informationen – kaltgewalzter Federbandstahl 1.4310, Internetlink: <a href="https://metallstore24.de/federbandstahl-1.4310">https://metallstore24.de/federbandstahl-1.4310</a> , aufgerufen am 12.12.2024.
<b>Petersen 2018</b>	Petersen, C.; Werkle, H.: Dynamik der Baukonstruktionen. Springer Vieweg, 2. Auflage, Wiesbaden, 2018.
<b>Proske 2021</b>	Proske, D.: Baudynamik for Beginners. Springer Vieweg, Würenlingen, 2021
<b>Schneider Bautabellen 2022</b>	Schneider Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Reguvis, 25. Auflage, Bochum, 2022
<b>Werkle 2017</b>	Schneider Bautabellen. Excel-Tools zur Baudynamik, Version 2.0, Werkle, H.; 2017.

**Anhang „Nutzung KI-Tools“**

KI-Tool	Genutzt für	Wann?	An welcher Stelle der Arbeit übernommen
ChatGPT	Sprachliche Überarbeitung	Am Ende der Arbeit	S. 1 bis 102