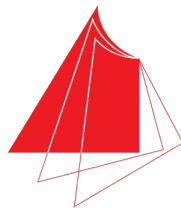


Erzeugung Modifizierter Antwortspektren Zur Vordimensionierung Von Seismisch Isolierten Bauwerken



Hochschule Karlsruhe
Technik und Wirtschaft
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Arne Rick

12. Februar 2020, Karlsruhe

Abstract

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

Danksagung

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Erdbeben	5
1.2	Berechnung	7
1.2.1	Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren	7
1.2.2	Antwortspektrenverfahren unter Berücksichtigung mehrerer Schwingungsformen (Modalanalyse)	8
1.2.3	Kapazitätsspektrenmethode	9
1.2.4	Zeitschrittberechnung	10
1.3	Erzeugung der Antwortspektren	11
1.4	Vordimensionierung	12
2	Dämpfer und Isolatoren	13
2.1	Bauweisen	13
2.2	Funktion	14
2.3	Schwierigkeiten bei der Vordimensionierung	15
3	Berechnung des modifizierten Antwortspektrums	16
3.1	Modellierung	16
3.1.1	Erzeugung von Antwortspektren	16
3.1.2	Erweitertes Modell	16
3.1.3	Bewegungsgleichung	16
3.2	Betrachtung als Übertragungsfunktion	17
3.3	Vergleich zum Zweimassenschwinger	19
3.3.1	Bemessungsspektrum	19
3.3.2	Betrachtung mit Isolationsspektrums	20
3.3.3	Betrachtung am Zweimassenschwinger	21
3.4	Grenzfälle	23
3.5	Nichtlinearitäten und Ansätze zur Linearisierung	24
4	Beispielberechnung	25
4.1	Beispielgebäude	25
4.2	Berechnung mit RStab	26
4.3	Diskussion der Ergebnisse	27
5	Analyse	28
6	Zusammenfassung	29
	Abbildungsverzeichnis	30

Bibliographie	31
Ressourcen	32
Erklärung	33

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Erdbeben

Erdbeben sind geophysikalische Extremereignisse, die eine Erschütterung des Erdkörpers darstellen und meist durch tektonische Massenverschiebungen an den Bruchfugen der Platten in der Lithosphäre, aber auch durch vulkanische Aktivität ausgelöst werden. [1]

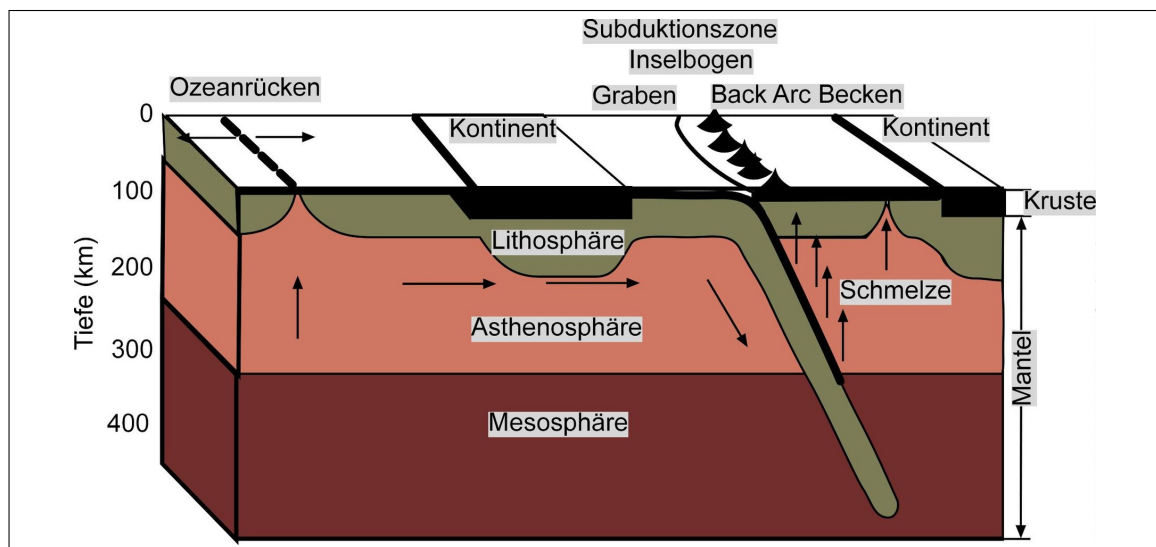


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Dynamik von Lithosphärenplatten: Divergenz an Mittelozeanischen Rücken und Konvergenz an Subduktionszonen - [Gunnar Ries]

In einer Analyse von mehr als 35.000 weltweiten Katastrophenereignissen in den Jahren zwischen 1900 und 2015 des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zeigte sich, dass Erdbeben für 26% der Schäden verantwortlich waren. Der größte Schaden trat jedoch durch das Tohoku-Erdbeben am 11. März 2011 vor Honshū, Japan auf. Der Schaden durch das Erdbeben und dem dadurch ausgelösten Tsunami belief sich auf 18.500 Tote, 450.000 Menschen wurden obdachlos, und ein direkter wirtschaftlicher Schaden von etwa 296 Milliarden Euro. [3]

Aufgrund des Erdbeben kam es zu der Fukushima-Nuklearkatastrophe im Atom-

kraftwerk Fukushima Daiichi.

Erdbebensicheres Design ist also von wirtschaftlicher und sicherheitstechnischer Bedeutung um die Aufgabe von Gebäuden zum Schutz des Menschen vor Naturereignissen und ein effektives Tragverhalten zu gewährleisten.

Die Ziele des Eurocode 8 sind daher das Schützen menschlichen Lebens, Schadensbegrenzung und das Aufrechterhalten des Betriebs von Strukturen, die zum zivilen Schutz dienen wie zum Beispiel Krankenhäuser, die keine großen Schäden davontragen und den Betrieb nach dem Ereignis vortsetzen können sollen um ihren Aufgaben im Katastrophenschutz unmittelbar weiter nachzugehen. Diese Anforderung der Wichtigkeit einer Struktur wird im Bedeutungsbeiwert erfasst. [4]

1.2 Berechnung

Grundlegend unterscheidet der Eurocode 8 vier verschiedene Berechnungsmethoden.

- Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren
- Antwortspektrenverfahren unter Berücksichtigung mehrerer Schwingungsformen (Modalanalyse)
- Kapazitätsspektrenmethode
- Zeitschrittberechnung

Da die beiden letzteren Verfahren ein genaueres Gebäudemodell voraussetzen und deutlich aufwändiger sind als die Antwortspektrenverfahren eignen sich diese nur schwer für die Vordimensionierung von Strukturen. Hier werden weiterhin nur die vereinfachten Verfahren mittels Antwortspektren und Modalanalyse betrachtet, die Kapazitätsspektrenmethode und Zeitschrittberechnung soll aber kurz erläutert werden.

1.2.1 Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren

Dieses Verfahren kann nur angewandt werden wenn die Anforderung aus dem Eurocode 8 an die Regelmäßigkeit des Grund- und Aufrisses erfüllt sind. Hier wird nur die Grundschiwingung der Struktur berücksichtigt. Daher kann dieses Verfahren nur angewendet werden wenn die höheren Schwingungsformen keinen wesentlichen Einfluss haben.

Die Grundschiwingzeit kann in einer Näherung nach Müller/Keintzel bestimmt werden.

$$T_1 = \frac{2\pi H^2}{\alpha_1^2} \sqrt{\frac{m}{hEI}}$$

H : Gestamthöhe des Bauwerks

h : Geschosshöhe

m : Geschossmasse

EI : Steifigkeit

α_1 : Schwingzeitbeiwert

Geschlosszahl	α_1
1	1,32
2	1,53
5	1,71
10	1,78

Mit der Grundschiwingzeit kann nun aus dem Antwortspektrum Abschnitt 1.3 der Bemessungswert der Spektralbeschleunigung S_d bestimmt und die Gesamterdbebenkraft F_b brechnet werden.

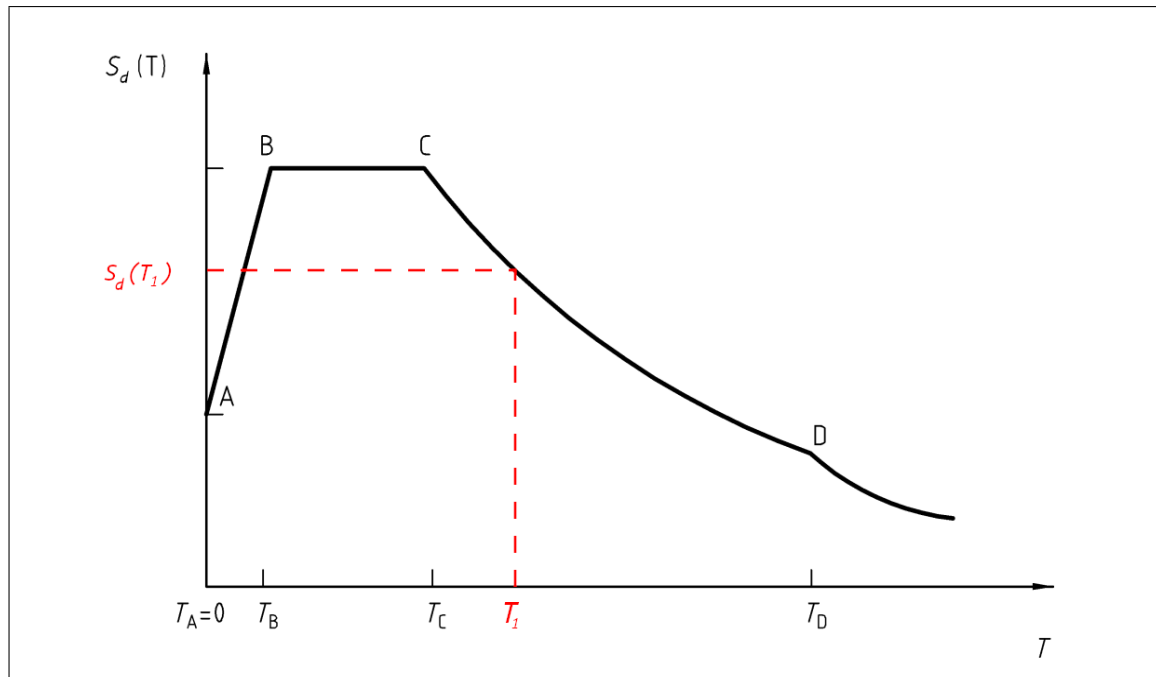


Abbildung 1.2: Bemessungsspektrum

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

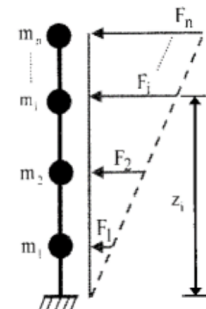
Wobei M die Gesamtmasse des Bauwerks und λ der Korrekturfaktor von 0,85 für $T_1 \leq 2T_c$ für Gebäude mit mehr als zwei Geschossen und sonst $\lambda = 1,0$ ist. Die Grundschwingungsform darf linear angenähert werden. Somit können die angreifenden Horizontalkräfte vereinfacht linear über die Geschosse verteilt werden.

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i m_i}{\sum z_i m_i}$$

F_i : Am Geschoss i angreifende Horizontalkraft

z_i : Höhen vom Boden zu den Geschossen

m_i : Geschossmassen



Mit den Horizontalkräften können nun die Nachweise der Standsicherheit geführt werden.

1.2.2 Antwortspektrenverfahren unter Berücksichtigung mehrerer Schwingungsformen (Modalanalyse)

Sind die Bedingungen an die Regelmäßigkeit des Bauwerks nicht erfüllt und es sollen mehr Schwingungsformen, zum Beispiel auch an einem dreidimensionalen Modell, betrachtet werden so kann eine Modalanalyse durchgeführt werden.

Das Vorgehen ist ähnlich zu Abschnitt 1.2.1, jedoch wird für jede Schwingungsformen die Periode ermittelt, eine Spektralbeschleunigung bestimmt und die Horizontallasten anhand der Beteiligungsfaktoren der Schwingungsform angesetzt.

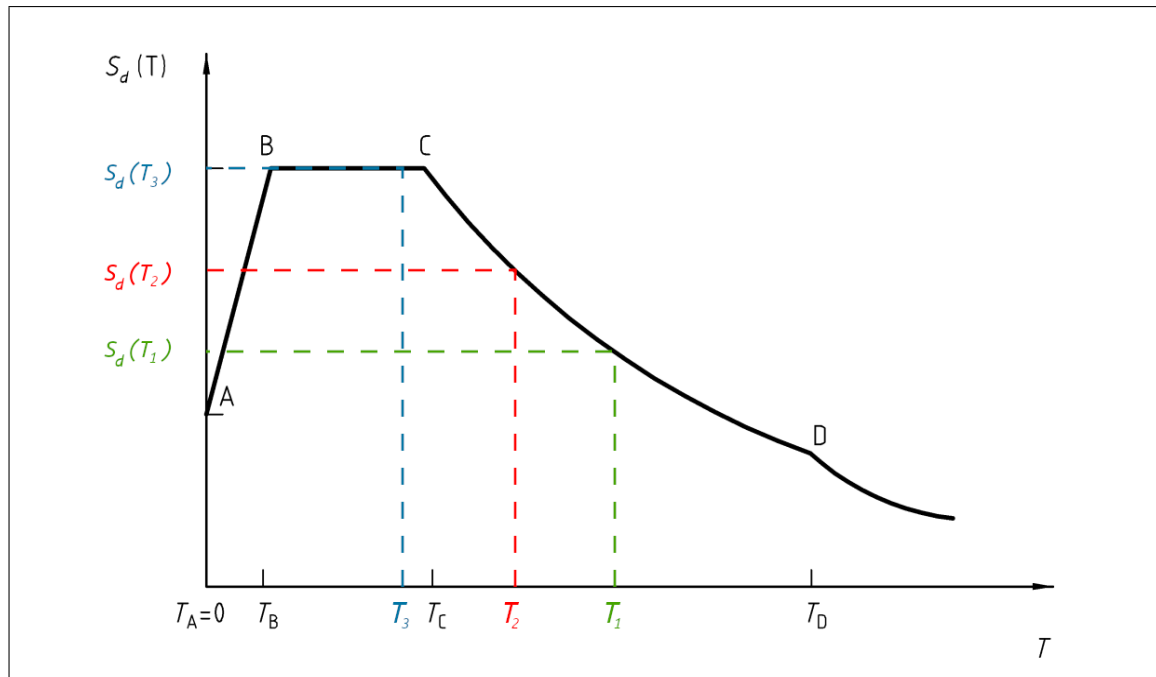


Abbildung 1.3: Bemessungsspektrum

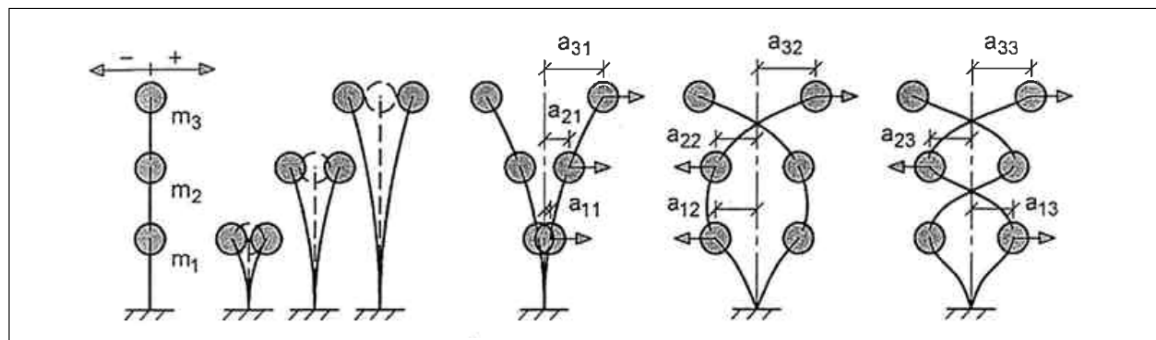


Abbildung 1.4: Eigenschwingungsformen eines Dreimassensystems [6]

Bild Beteiligungsfaktoren (Pocanschi)

Anschließend müssen die modalen Schnittgrößen und Verschiebungen kombiniert werden. Hier sieht der Eurocode die SRSS-Methode (Square Root of Sum of Squares), die CQC-Methode (Complete Quadratic Combination) und die CQC_i-Methode (CQC unter Berücksichtigung des Vorzeichens der i-ten Eigenform) vor.

1.2.3 Kapazitätsspektrenmethode

Die auch als "pushover analysis" bezeichnete Methode ist ein nicht-elastisches statisches Verfahren unter Berücksichtigung des Eigengewichts und monoton ansteigender horizontaler Lasten zur Bestimmung der Grenzlaster über die Grenzduktilität. Sie ist ein genaueres Verfahren zur Bestimmung der plastischen Kapazität, die in den vereinfachten Verfahren von dem Verhaltensbeiwert q erfasst werden.

1.2.4 Zeitschrittberechnung

Die Berechnung mittels Zeitschrittverfahren ("time-history analysis") ist ein nicht-lineares Verfahren, welches eine zeitabhängige Antwort einer Struktur über die direkte numerische Integration der Differentialgleichungen der Bewegung unter den im Eurocode 8 angegebenen Akzelerogrammen der Bodenbeschleunigung bestimmt.

1.3 Erzeugung der Antwortspektren

1.4 Vordimensionierung

Kapitel 2

Dämpfer und Isolatoren

Warum Isolator?

Hohe Einwirkungen -> wirtschaftlicher zu isolieren (da gab es ein paper...) Hohe Einwirkungen aus Erdbebengebiet oder Anforderung zB Bedeutungsbeiwert

2.1 Bauweisen

2.2 Funktion

2.3 Schwierigkeiten bei der Vordimensionierung

Kapitel 3

Berechnung des modifizierten Antwortspektrums

3.1 Modellierung

3.1.1 Erzeugung von Antwortspektren

* Variation der Eigenfrequenz

* Gleichung

* Zeitschrittverfahren

3.1.2 Erweitertes Modell

Für die Erzeugung der Isolationsspektren wird hier das System um den Isolator erweitert und als Zweimassenschwinger (Abbildung 3.1) betrachtet. Wobei der obere Schwinger die aufgehende Struktur (s) und der untere Schwinger den Isolator (i) samt des steifen Kellergeschosses beschreiben soll.

Unter Annahme der Linearität können die Systeme getrennt betrachtet werden. Am System der Struktur wird durch Parameter Sweeps das Antwortspektrum berechnet. Da der untere Teil des Systems dabei unverändert bleibt kann anschließend durch Komposition das Isolationsspektrum ermittelt werden. Da das Antwortspektrum für Einmassenschwinger bereits bekannt ist, kann die Betrachtung des Gesamtsystems und eine aufwändige Zeitschrittanalyse entfallen.

3.1.3 Bewegungsgleichung

Die Bewegungsgleichung (siehe auch [5] (S. 92, Gl. 7.3)) für das System des Isolators ist durch

$$c_i^* \cdot \dot{x}(t) + k_i^* \cdot x(t) = -m_i \cdot \ddot{x}(t) \quad (3.1)$$

gegeben.

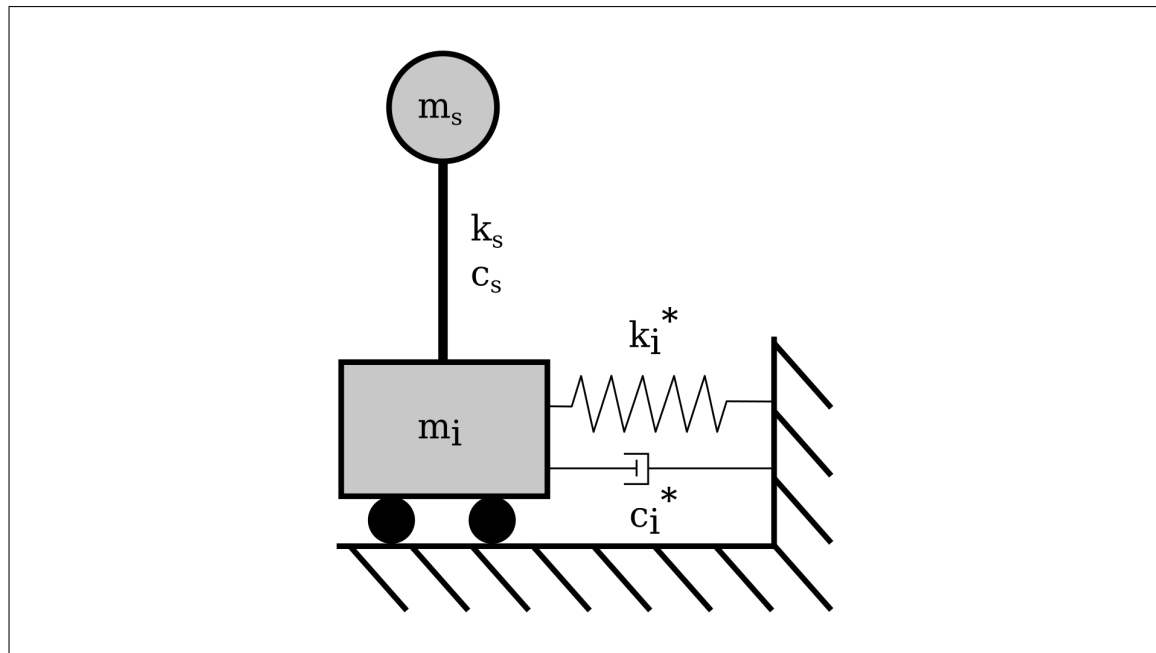


Abbildung 3.1: Voigt-Kelvin-Modell

3.2 Betrachtung als Übertragungsfunktion

Ziel ist Relation von Eingang zu Ausgang -> Bewegungsgleichung -> Lösung über Laplacetransformation

Quote, Umformung zur Lösung Seite 673

Lösung der DGL

System ist linear -> Laplace

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (3.2)$$

Umformung von (Gleichung (3.1)) zur Transformation von dem Zeitbereich in den Bildbereich (t in s Domäne) mittels der Differentiationsregel

*Differentiationsregel

$$F(s) = m_i \cdot s^2 \cdot X(s) + c_i^* \cdot s \cdot X(s) + k_i^* \cdot X(s) \quad (3.3)$$

Somit ergibt sich die Übertragungsfunktion zu

für ein Eingangssignal $X(s)$ und das Ausgangssignal $F(s)$

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{m_i \cdot s^2 + c_i^* \cdot s + k_i^*} \quad (3.4)$$

Die Polstellen ergeben sich zu und beschreiben die Resonanzfrequenzen werden aber hier nicht weiter betrachtet.

$$s_{1,2} = \frac{-c_i^* \pm \sqrt{(c_i^*)^2 - 4m_i k_i^*}}{2m_i} \quad (3.5)$$

$$G(s) = \frac{1}{(s - s_1)(s - s_2)} \quad (3.6)$$

Ersetzt man s durch $i\omega$ und nimmt den Betrag der Funktion so erhält man das Amplitudenspektrum.

$$|G(i\omega)| \quad (3.7)$$

* Laplace Transformation

* Filterfunktion

* Filtern des Spektrums

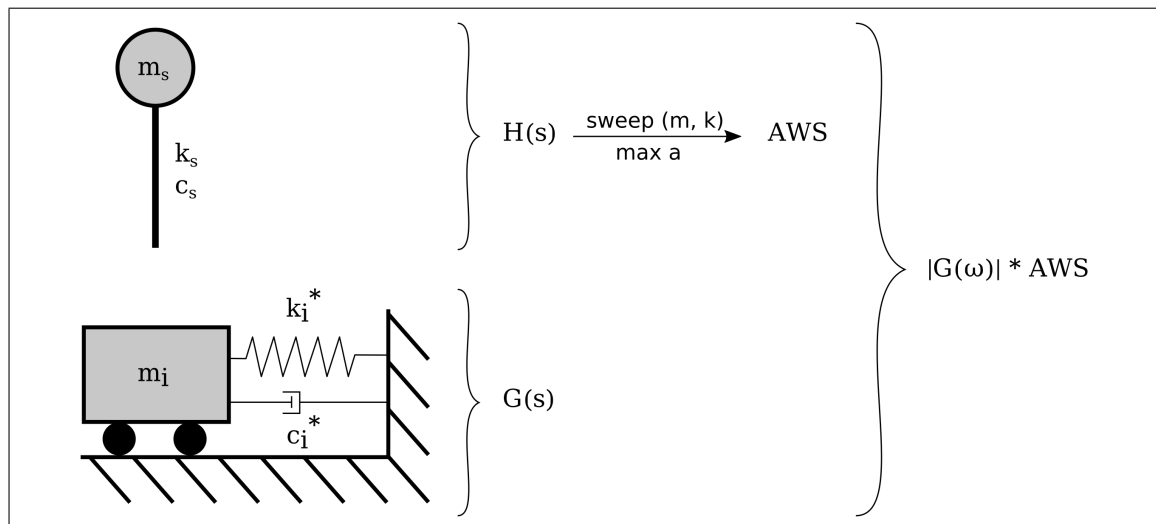


Abbildung 3.2: Komposition

3.3 Vergleich zum Zweimassenschwinger

Anhand eines Beispiels soll in einer Handrechnung an einem einfachen System zunächst die auf die aufgehende Struktur wirkende Gesamterdbebenkraft F_b mittels des Isolationsspektrums ermittelt werden und anschließend mit den Ergebnissen einer Berechnung am Zweimassenschwinger verglichen werden.

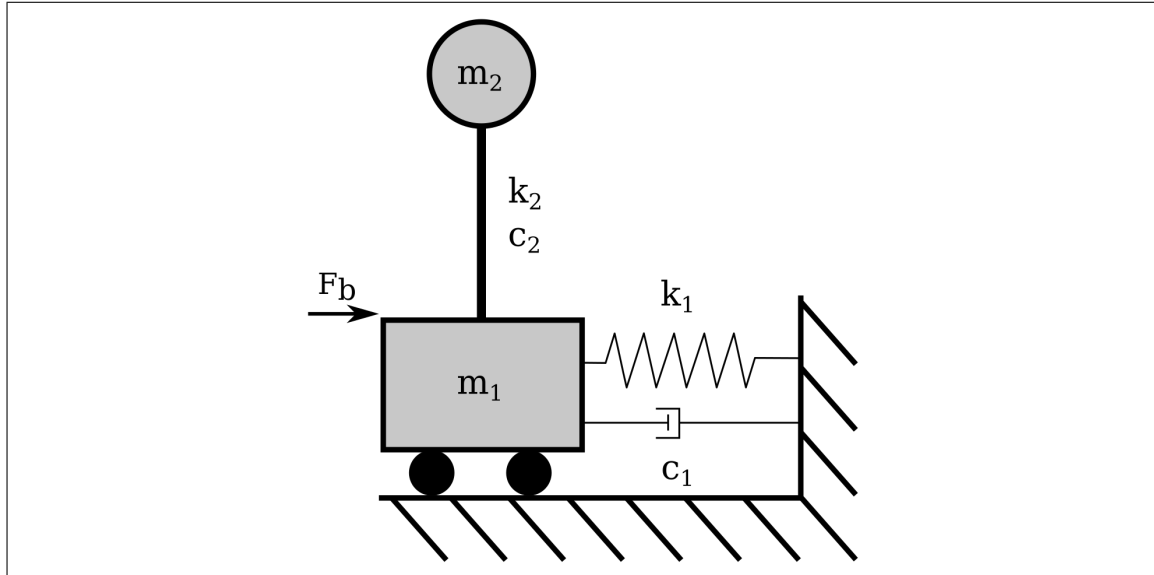


Abbildung 3.3: Zweimassenschwinger

Die Dämpfung beträgt $c_1 = c_2 = 5\%$, die Masse des Kellergeschosses $m_1 = 0.2 \text{ MN/s}^2/\text{m}$ mit einer Steifigkeit von $k_1 = 5 \text{ MN/m}$ und die Masse der aufgehenden Struktur $m_2 = 1 \text{ MN/s}^2/\text{m}$ mit einer Steifigkeit von $k_2 = 45 \text{ MN/m}$.

Das Verhältnis der Eigenkreisfrequenzen der Basis ω_1 zur Struktur ω_2 beträgt somit ungefähr $1/3$. Ein Wert der sich beim Design von Isolatoren in der Praxis bewährt hat.

3.3.1 Bemessungsspektrum

Für dieses Beispiel wird ein Antwortspektrum aus dem Raum Karlsruhe herangezogen. Damit ergibt sich eine Bodenbeschleunigung in der Erdbebenzone 1 von $a_g = 0.4 \text{ m/s}^2$ und die Baugrundklasse C-S mit den Kontrollperioden T_B , T_C , T_D und Untergrundparameter S :

$$S = 0.75 \text{ s}$$

$$T_B = 0.1 \text{ s}$$

$$T_C = 0.5 \text{ s}$$

$$T_D = 2.0 \text{ s}$$

Der Bedeutungsbeiwert wird mit $\gamma_1 = 1.0$ für gewöhnliche Bauten mit Bedeutungsklasse II, der Verstärkungsbeiwert der Spektralbeschleunigung mit $\beta_0 = 2.5$ für eine viskose Dämpfung von 5% und der Verhaltensbeiwert für Duktilitätsklasse 1 mit $q = 1.5$ angesetzt. Daraus ergibt sich das Bemessungsspektrum zu Abbildung 3.5.

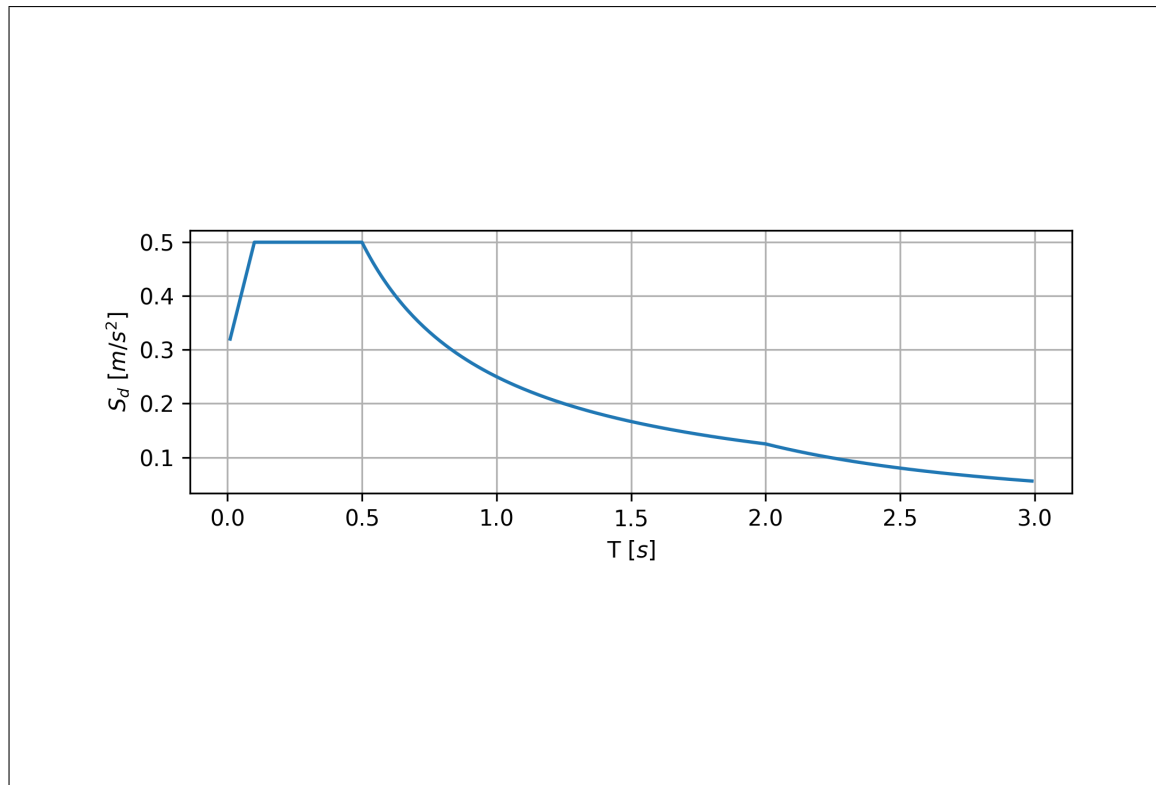


Abbildung 3.4: Bemessungsspektrum

3.3.2 Betrachtung mit Isolationsspektrums

*Isolationsspektrum zeigen

Die Eigenfrequenz der Struktur ergibt sich zu

$$\begin{aligned}\omega &= \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} = \sqrt{\frac{45}{1}} \\ &= 6.708 \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T &= \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = \frac{2 \cdot \pi}{6.708} \\ &= 0.936 \text{ s}\end{aligned}$$

und eine Beschleunigung von

$$\begin{aligned}S_d(T) &= a_g \cdot \gamma_1 \cdot S \cdot \frac{\beta_0}{q} \cdot \frac{T_C}{T} \\ S_d(0.936) &= 0.4 \cdot 1.0 \cdot 0.75 \cdot \frac{2.5}{1.5} \cdot \frac{0.5}{0.936} \\ &= 0.277 \text{ m/s}^2\end{aligned}$$

Die Übertragungsfunktion für den hier gegebenen Isolator lautet:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{1}{m_1 \cdot s^2 + c_1 \cdot s + k_1} \\ &= \frac{1}{0.2 \cdot s^2 + 0.05 \cdot s + 5} \end{aligned}$$

Um die Amplitude zu erhalten wird der Laplace-Faktor s bestimmt und der Betrag der Übertragungsfunktion ermittelt.

$$\begin{aligned} s &= i \cdot \omega \\ &= i \cdot 6.708 \\ &= 6.708i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |G(6.708i)| &= \left| \frac{1}{0.2 \cdot 6.708i^2 + 0.05 \cdot 6.708i + 5} \right| \\ &= 0.208 \end{aligned}$$

Die an der Struktur wirkende Gesamterdbebenkraft F_b ergibt sich somit zu:

$$\begin{aligned} F_b &= |G(s)| \cdot S_d(T) \cdot m_2 \\ &= 0.208 \cdot 0.277m/s^2 \cdot 1MN/s^2/m \\ &= \underline{\underline{0.0576MN}} \end{aligned}$$

3.3.3 Betrachtung am Zweimassenschwinger

Bei der Betrachtung des Zweimassenschwingers kann vereinfacht angenommen werden, dass der weiche Isolator die Eigentform dominiert [2] und sich die Eigenfrequenz des Gesamtsystems somit zu

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \sqrt{\frac{k_1}{m_1 + m_2}} \\ &= \sqrt{\frac{5}{1.0 + 0.2}} \\ &= 2.041s^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{2 \cdot \pi}{\omega} = \frac{2 \cdot \pi}{2.041} \\ &= 3.078s \end{aligned}$$

ergibt. Die auf die Struktur wirkende Gesamterdbebenkraft F_b ist dann:

$$\begin{aligned} F_b &= S_d(T) \cdot m_2 \\ &= 0.053 m/s^2 \cdot 1 MN/s^2/m \\ &= \underline{\underline{0.053 MN}} \end{aligned}$$

Damit liegt die Abweichung der beiden Ansätze in dem Fall bei $0.0576/0.053 = 1.0945$, also ungefähr 9.5%.

3.4 Grenzfälle

Zur weiteren Untersuchung soll noch eine Berechnung am Zweimassenschwinger mit den Beteiligungsfaktoren der Schwingungsform erfolgen, wobei hier die Steifigkeit des Isolators variiert wird. Die Berechnung mittels Isolationsspektrum erfolgt analog zum vorherigen Beispiel.

Die Eigenkreisfrequenz wird über die Lösung des charakteristischen Polynoms der Matrizenform des Systems der gekoppelten Bewegungsdifferentialgleichungen des Zweimassenschwingers ([6] S. 143, Gl. 8.11) ermittelt.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(k_1 + k_2) \cdot m_2 + k_2 \cdot m_1 - \sqrt{[(k_1 + k_2) \cdot m_2 + k_2 \cdot m_1]^2 - 4 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot k_1 \cdot k_2}}{2 \cdot m_1 \cdot m_2}}$$

Und der Beteiligungsfaktor des Isolators zu

$$X = 1 / \left(\frac{k_1 + k_2 - m_1 \cdot \omega_1^2}{k_2} \right)$$

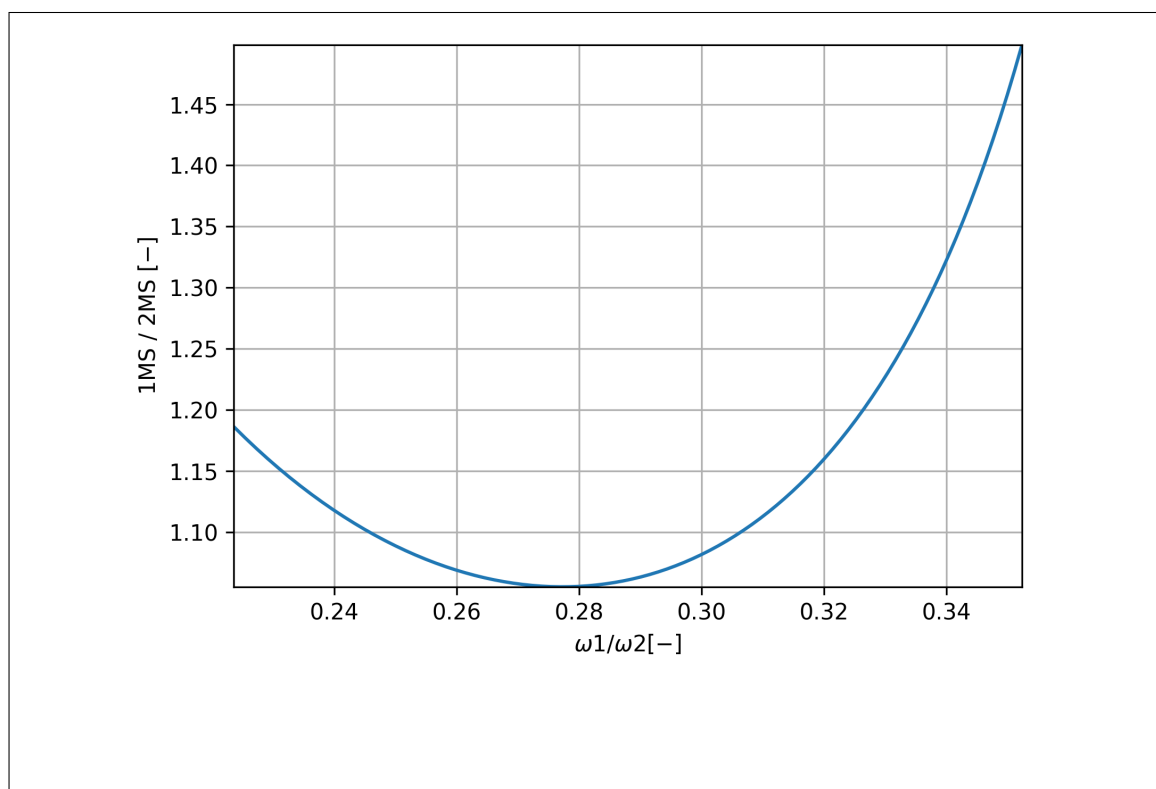


Abbildung 3.5: Abweichung der beiden Ansätze

*2MS mit Beteiligungsfaktor - ζ Diagramm mit Verschiebung = 1

*Abweichung durch Schwebung/Beteiligung 2. Feder

3.5 Nichtlinearitäten und Ansätze zur Linearisierung

*Huber

Kapitel 4

Beispielberechnung

4.1 Beispielgebäude

4.2 Berechnung mit RStab

4.3 Diskussion der Ergebnisse

Kapitel 5

Analyse

Kapitel 6

Zusammenfassung

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der Dynamik von Lithosphärenplatten: Divergenz an Mittelozeanischen Rücken und Konvergenz an Subduktionszonen - [Gunnar Ries]	5
1.2	Bemessungsspektrum	8
1.3	Bemessungsspektrum	9
1.4	Eigenschwingungsformen eines Dreimassensystems [6]	9
3.1	Voigt-Kelvin-Modell	17
3.2	Komposition	18
3.3	Zweimassenschwinger	19
3.4	Bemessungsspektrum	20
3.5	Abweichung der beiden Ansätze	23

Literatur

- [1] Schweizerischer Erdbebendienst (SED). *Ursache von Erdbeben*. 2014. URL: https://web.archive.org/web/20141228103510/http://www.seismo.ethz.ch/eq_swiss/Ursache_Erdbeben/index (besucht am 28.12.2014).
- [2] Jan Akkermann und Alexander Hewener. “Seismische Isolierung des Gebetsaals der Großen Moschee von Algerien”. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110.2 (2015).
- [3] James Daniell. “Bilanz von Naturkatastrophen seit 1900: acht Millionen Tote, sieben Billionen Dollar Schaden”. In: *KIT-Zentrum Klima und Umwelt - Presseinformation* 058 (2016).
- [4] *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009*. 2010.
- [5] Helmut Kramer. *Angewandte Baudynamik. Grundlagen und Beispiele für Studium und Praxis*. 2. Aufl. Ernst & Sohn, 2013. ISBN: 978-3433030288.
- [6] Adrian Pocanschi und Marios C. Phocas. *Kräfte in Bewegung. Die Techniken des erdbebensicheren Bauens*. 1. Aufl. Teubner, 2003. ISBN: 3-3519-00429-1.

Resourcen

Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Master Thesis ohne Hilfe Dritter, nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln, angefertigt zu haben. Alle Stellen, die den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden.

Arne Rick
12. Februar 2020, Karlsruhe