

Erdbebenantwort von schwingungsfähigen Einbauten in elastoplastischen Tragwerken

Thomas Furtmüller & Christoph Adam

Institut für Grundlagen der Bauingenieurwissenschaften, Universität Innsbruck, Österreich

ZUSAMMENFASSUNG: Es wird das dynamische Verhalten von schwingungsfähigen Einbauten in inelastischen Tragwerken unter Erdbebenanregung anhand einer Parameterstudie untersucht. Die lastabtragende Struktur wird dabei als elastoplastischer Einmasseschwinger konstanter Duktilität und das Einbauteil als elastischer Einmasseschwinger modelliert. Aus einer statistischen Auswertung der Schwingungsantwort zufolge von 40 Erdbebenereignissen werden Antwortspektren in dreidimensionaler Form ermittelt. Das Interaktionsverhalten zwischen den beiden Teilsystemen wird für unterschiedliche Massenverhältnisse, Dämpfungsverhältnisse und Duktilitäten durch Vergleich der gekoppelten und der entkoppelten dynamischen Lösung beurteilt.

1. EINLEITUNG

Unter Einbauten (auch Gebäudeausrüstung oder Sekundärelement genannt) versteht man diejenigen Bauwerkbestandteile, die nicht zum lastabtragenden Tragwerk (im Folgenden auch mit Hauptsystem oder Primärstruktur bezeichnet) gehören, aber mit diesem verbunden sind. Beispiele dafür sind Gasleitungen, große Antennen, Generatoren und abgehängte Decken.

Erdbebenereignisse der beiden letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass zwar die Tragwerke den seismischen Kräften gut widerstanden haben, die Funktions- und Betriebsfähigkeit der Bauwerke jedoch durch Versagen der Einbauten nicht mehr gegeben war und ein zum Teil erhebliches Sicherheitsrisiko für Personen darstellen. Oftmals weisen die Sekundärstrukturen Eigenschaften auf, die sie anfällig im Hinblick auf Erdbebenanregung machen (Villaverde, 2004). Zum einen werden sie nicht durch das Erdbeben direkt zu Schwingungen angeregt, sondern durch eine verstärkte dynamische Antwort der Hauptstruktur. Zum anderen weisen Sekundärelemente in der Regel eine wesentlich geringere Masse und Steifigkeit als das Tragwerk auf, sodass die Eigenfrequenzen der Primär- und Sekundärstruktur in etwa übereinstimmen. Dies kann zu großen Schwingungsantworten der Sekundärelemente führen.

Es existiert eine Reihe von Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Erdbebenantwort der Gebäudeausrüstung, die jedoch aufgrund der Komplexität und auch der Vielfalt verschiedener Systeme meist auf Vereinfachungen beruhen: Beispielsweise beschränken sie sich auf elastisches Materialverhalten (Building Seismic Safety Council, 2003) oder vernachlässigen die Interaktion zwischen Haupt- und Sekundärstruktur gänzlich (z.B. im Rahmen der sogenannten Floorspektren-Methode (Villaverde, 2004)).

Aus den obigen Ausführungen folgt, dass bei schwingungsanfälligen Einbauten die Interaktion zwischen der lastabtragenden Struktur und der Gebäudeausrüstung eine

wichtige Rolle spielt, wenn Eigenfrequenzen der beiden Teilstrukturen benachbart sind. Eine entkoppelte Berechnung der Schwingungsantwort würde zu einer wesentlichen Fehleinschätzung der Beanspruchung der Einbauten führen, auch wenn das Massenverhältnis zwischen Primärstruktur und Sekundärelement relativ klein ist. Für elastische Tragwerke sind in Vorschriften bzw. in der Literatur Kriterien für eine entkoppelte Betrachtung von schwingungsfähigen Ausrüstungen angegeben, siehe z.B. Building Seismic Safety Council (2003), Igusa und Der Kiureghian (1985).

Nach moderneren Entwurfsgrundsätzen wird unter der Einwirkung von Katastrophenerdbeben an bestimmten Stellen des Bauwerks inelastisches Materialverhalten gezielt zugelassen. In solchen Fällen wird durch nichtlineare Verlängerung der Eigenschwingungsdauern die Interaktion zwischen Tragwerk und Einbauten über ein breiteres Frequenzband verteilt, und die oben erwähnten Entkopplungskriterien sind nicht mehr anwendbar, Schwarz (1990), Adam (2006), Medina et al. (2006).

In dieser Arbeit soll das Kopplungsverhalten von schwingenden Einbauten untersucht werden, wenn das zugehörige Tragwerk durch Erdbebeneinwirkung inelastisch verformt wird.

2. MECHANISCHES MODELL

Im Folgenden wird sowohl die lastabtragende Struktur als auch das Sekundärelement als Einmassenschwinger modelliert, die in Serie geschaltet einen Zweimassenschwinger ergeben, siehe Abb. 1.

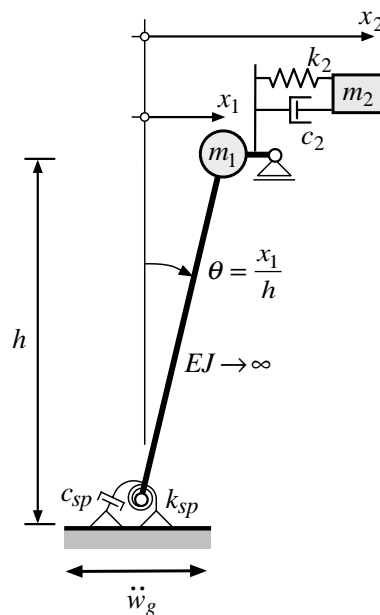


Abbildung 1: Mechanisches Modell des Primär-Sekundärsystems.

Das Hauptsystem wird dabei durch ein stehendes mathematisches Pendel mit der Länge h und der Punktmasse m_1 beschrieben, welches über eine inelastische Drehfeder (initiale Drehfedersteifigkeit k_{sp}) und einem viskosen Dämpfer (Drehdämpferkonstante c_{sp}) mit dem Boden verbunden ist. Als Werkstoffmodell für die Drehfeder wird eine bilineare Hysterese mit 3% kinematischer Verfestigung verwendet.

In der Höhe h ist das Sekundärelement, bestehend aus der Punktmasse m_2 und einem Kelvin-Voigt Körper (lineare elastische Feder mit der Steifigkeit k_2 , viskoser Dämpfer mit der Dämpferkonstante c_2), mit dem Hauptsystem in Serie geschaltet. Die gekoppelte Struktur wird am Fußpunkt des Pendels durch horizontale Erdbebeneinwir-

kung (gegeben durch Zeitverläufe von aufgezeichneten Bodenbeschleunigungen \ddot{w}_g) zu Schwingungen angeregt.

Kleine Bewegungen vorausgesetzt, sind die Bewegungsgleichungen dieses Zwei-Freiheitsgrad-Systems, formuliert in den horizontalen Verschiebungen x_1 und x_2 der beiden Punktmassen, gemessen jeweils relativ zum Fundament, durch

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{c_{sp}}{h^2} + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_{sp}}{h^2} + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{Bmatrix} \ddot{w}_g + \begin{Bmatrix} \frac{k_{sp}}{h^2} \\ 0 \end{Bmatrix} x_1^p \quad (1)$$

gegeben. Dabei ist x_1^p der plastische Anteil der primären Verschiebung x_1 . Im Allgemeinen sind diese Gleichungen des elastischen Systems nichtklassisch gedämpft, d.h. die Eigenschwingungsformen der ungedämpften Struktur sind nicht orthogonal zur Dämpfungsmatrix. Der Zusammenhang zwischen den dimensionsbehafteten Dämpferkonstanten c_{sp} und c_2 und den Lehr'schen Dämpfungskoeffizienten der Primär- und Sekundärstruktur ζ_1 und ζ_2 , die im Weiteren die Systemdämpfung charakterisieren, ist wie folgt gegeben:

$$c_{sp} = 2\zeta_1 \omega_1 m_1 h_1^2, \quad \omega_1 = \sqrt{m_1 h_1^2 / k_{sp}}, \quad c_2 = 2\zeta_2 \omega_2 m_2, \quad \omega_2 = \sqrt{m_2 / k_2} \quad (2)$$

Zur Lösung des Gleichungssystems (1) wird eine modifizierte modale Analyse herangezogen (Adam und Fotiu, 2000). Dabei werden die Lagekoordinaten x_1 und x_2 nach den Eigenschwingungsformen des ungedämpften elastischen Systems in modale Koordinaten übergeführt, und die Koppelterme aus nichtklassischer Dämpfung und die Terme aus den plastischen Deformationen des Hauptsystems x_1^p als „Anregung“ auf die rechte Seite geschrieben. Die beiden modalen Einmasseschwinger werden in jedem Zeitschritt iterativ gelöst, wobei bei jeder Iteration die Anregung aus nichtklassischer Dämpfung und inelastischer Verformung solange verbessert wird, bis Konvergenz erreicht ist (Adam und Fotiu, 2000).

Für Vergleichszwecke wird die dynamische Antwort der untersuchten Primär-Sekundärsysteme auch unter Vernachlässigung der Koppelterme ermittelt. Dabei wird zunächst die Schwingungsantwort x_1 des Primärsystems allein berechnet. Nachfolgend wird die entkoppelte Sekundärstruktur mit der totalen Beschleunigung aus \ddot{w}_g und \ddot{x}_1 angeregt und daraus die Auslenkung x_2 berechnet.

3. UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Da es sich bei Erdbebenanregungen um einmalige nicht wiederkehrbare Prozesse handelt, werden die Zeitverlaufsberechnungen mit einem Satz von 40 gewöhnlichen Erdbebenschriften des so genannten LMSR-N-Satzes durchgeführt, die in Kalifornien auf NEHRP Bodenklasse D (steife Böden) aufgezeichnet worden sind. Diese weisen Momenten-Magnituden M_w von 6.5 bis 6.9 und Hypozentraldistanzen von 13 bis 30 km auf (Medina und Krawinkler, 2003). Die zugehörigen Maximalwerte der dynamischen Antworten werden statistisch ausgewertet. Als maßgebendes Ergebnis wird dazu der Median der 40 Einzelantworten herangezogen. Zudem werden die 16%- und die 84%-Perzentile ermittelt, um ein Bild über die Verteilung der Antworten zu bekommen.

Als Maß für die inelastischen Deformationen der Hauptstruktur wird die Duktilität $\mu = |x_{1\max}| / x_{1y}$ herangezogen. Dabei stellt $|x_{1\max}|$ den Absolutbetrag der größten während einer Zeitverlaufsberechnung ermittelten Verschiebung der Punktmasse m_1 und x_{1y}

die Verschiebung bei Fließbeginn dar.

Die Ergebnisse werden in spektraler Form für vorgegebene Duktilitäten der Hauptstruktur angegeben. Dabei muss für jeden Erdbebenschrieb und für jedes untersuchte System die Fließgrenze der Drehfeder iterativ ermittelt werden, um eine bestimmte konstante Duktilität der Schwingungsantwort der Primärstruktur zu gewährleisten. Die Spektren werden dreidimensional als Funktion der beiden entkoppelten Eigenperioden des Primär- und des Sekundärsystems T_1 und T_2 dargestellt.

Bei allen Berechnungen wird das Lehr'sche Dämpfungsmaß der Hauptstruktur ζ_1 mit 5% festgesetzt, während für die unten angegebenen Parameter die folgenden Werte herangezogen werden:

- Massenverhältnis m_2 / m_1 : 0.1, 0.05, 0.02, 0.01, 0.001
- Lehr'sche Dämpfung der Sekundärstruktur ζ_2 : 0.1, 0.05, 0.005
- Konstante Duktilität der Primärstruktur μ : 1 (elastisches System), 1.5, 2, 4, 8
- Eigenperiodenbereich T_1 bzw. T_2 : 0.1 ÷ 9.9s (Schrittweite 0.2s)

4. ERGEBNISSE

4.1 ANTWORTSPEKTREN UND R_y - μ - T - BEZIEHUNG DER HAUPTSTRUKTUR

Abb. 2(a) zeigt Antwortspektren konstanter Duktilität für die Hauptstruktur ohne Sekundärelement. Dargestellt ist jeweils der Median aus den 40 einzelnen Antwortspektren für die gewählten fünf Duktilitäten über die Eigenperiode der Hauptstruktur T_1 . Auf der Ordinate ist die auf die Masse m_1 und die Erdbeschleunigung g bezogene Schubkraft am Fundament bei Fließeintritt V_y aufgetragen. Dieser Wert entspricht dem Verhältnis aus der Pseudo-Antwortbeschleunigung bei einer festgelegten Duktilität S_{ay} zu g (Chopra, 2007). S_{ay} errechnet sich aus der Verschiebung bei Fließeintritt x_{1y} gemäß $S_{ay} = x_{1y} (2\pi / T_1)^2$. In Abb. 2(b) sind die sich daraus ergebenden Festigkeitsreduktionsfaktoren R_y dargestellt (durchgezogene Linien), die als Verhältnis zwischen der maximalen Rückstellkraft im zugehörigen elastischen System und der zur festgeleg-

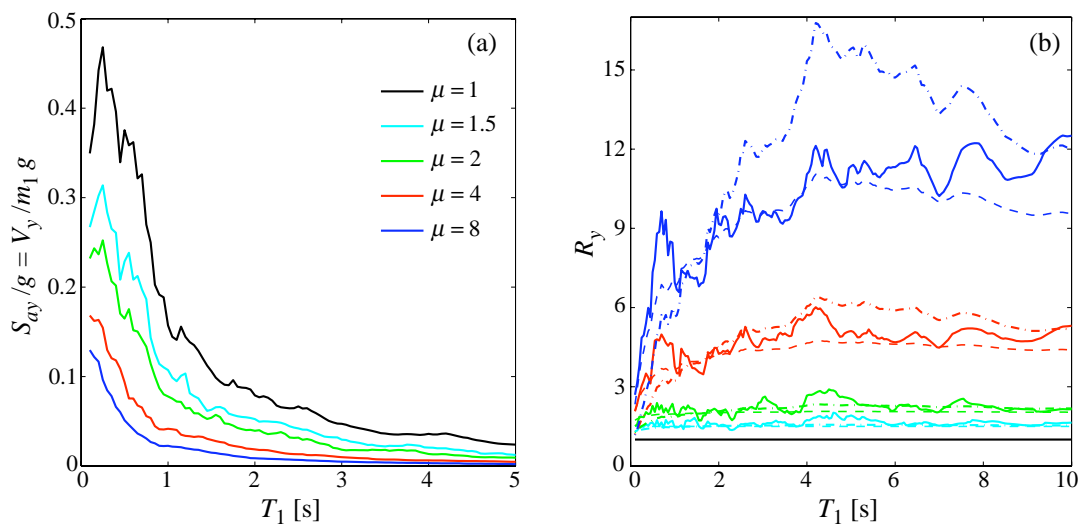


Abbildung 2: Spektren für die entkoppelte Hauptstruktur. (a) Beschleunigungsspektren für konstante Duktilitäten. (b) Zugehörige R_y - μ - T - Beziehungen aus den Berechnungen, und Abschätzungen für harte (strichlierte Linien) und weiche Böden (strich-punktierte Linien).

ten Duktilität zugehörigen Fließkraft definiert sind (Chopra, 2007). Zusätzlich sind für jede Duktilität jeweils zwei Entwurfsspektren für R_y eingetragen, die entsprechend einer Gleichung gemäß Ordaz und Pérez-Rocha (1998) ermittelt worden sind. Entwurfsspektren für harte Böden sind durch eine strichlierte Linie gekennzeichnet, für weiche Böden durch eine strich-punktierte Linie. Dabei stimmen die berechneten R_y -Spektren mit diesen Entwurfsspektren gut überein.

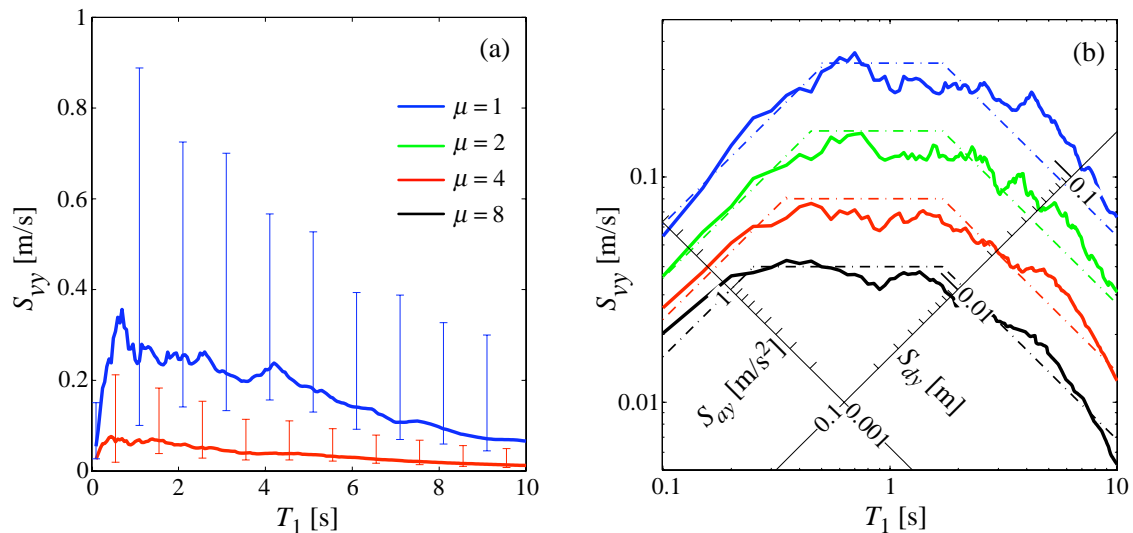


Abbildung 3: Geschwindigkeits-Antwortspektren der entkoppelten Hauptstruktur. (a) Median, 16%- und 84%-Perzentilen. (b) Tripartite Darstellung.

In der Abb. 3(a) stellen die durchgezogenen Linien die Mediane der zugehörigen Pseudogeschwindigkeits-Antwortspektren $S_{vy} = x_{1y} 2\pi / T_1$ für die Duktilitäten $\mu = 1$ und 4 dar, die Endwerte der eingezeichneten Säulen bezeichnen die zugehörigen Werte der 16%- bzw. 84%-Perzentilen. Aus der Tatsache, dass die 84%-Perzentilen wesentlich weiter vom Median entfernt sind als die 16%-Perzentilen, kann man schließen, dass die Antwortspektren nicht normalverteilt sind, sondern eher einer log-Normalverteilung gehorchen.

Eine Darstellung im doppellogarithmischen Maßstab (auch tripartite Darstellung genannt) gemäß Abb. 3(b) ermöglicht es, aus demselben Diagramm neben den spektralen Pseudogeschwindigkeiten S_{vy} auch die zugehörigen spektralen Verschiebungen bei Fließeintritt $S_{dy} = x_{1y}$ und spektralen Pseudobeschleunigungen S_{ay} abzulesen (Chopra, 2007). Zudem sind in dieser Abbildung Entwurfsspektren durch strich-punktierte Linien gegenübergestellt, die nach einer Näherung von Newmark und Hall (1982) ermittelt worden sind. Diese Entwurfsspektren approximieren die tatsächlichen Spektren mit hinreichender Genauigkeit.

4.2 VERSCHIEBUNGS-FLOORSPEKTREN

Im Folgenden werden die maximalen Relativverschiebungen (bezogen auf das Fundament) des Sekundärelements in Form von Floorspektren betrachtet. In Abb. 4 sind Mediane der Verschiebungs-Floorspektren S_{d2} über die Eigenperiodenbereiche der entkoppelten Hauptstruktur T_1 und der entkoppelten Sekundärstruktur T_2 in Form eines Oberflächenplots und eines Konturplots dargestellt. Die zugrunde liegenden Berechnungen wurden für ein Massenverhältnis m_2 / m_1 von 0.01 und einer Dämpfung der Sekundär-

struktur ζ_2 von 5% für elastisches Verhalten des Gesamtsystems, d.h. $\mu = 1$, durchgeführt. Im Resonanzbereich, also für $T_1 \approx T_2$, treten deutliche Antwortspitzen auf. Die maximale Verschiebung wird bei Eigenperioden T_1 und T_2 von jeweils etwa 4 s erreicht.

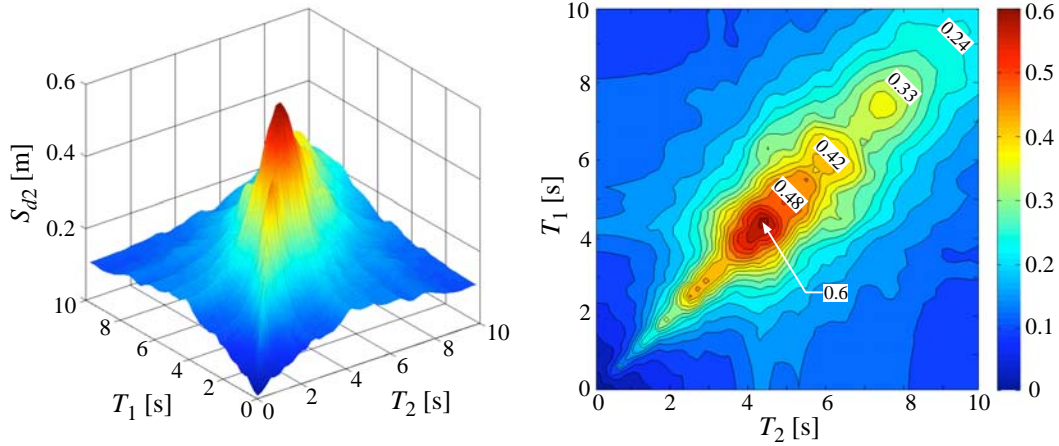


Abbildung 4: Median der Verschiebungs-Floorspektren für $m_2 / m_1 = 0.01$, $\zeta_2 = 0.05$, $\mu = 1$ (elastisches System).

Der Einfluss der plastizierenden Hauptstruktur auf die Schwingungsantwort des Sekundärelements wird aus Abb. 5 offensichtlich, in der Konturplots der Mediane der Verschiebungs-Floorspektren für die Duktilitäten $\mu = 4$ bzw. 8 bei dem gleichen Massenverhältnis und derselben Dämpfung dargestellt sind. Zum einen wirken sich die plastischen Verformungen dämpfend auf die Antwort der Sekundärstruktur aus, was verglichen mit der elastischen Lösung zu mehr als einer Halbierung der entsprechenden Spektralwerte führt, zum anderen verschiebt sich der Resonanzbereich und damit der Bereich der Antwortspitzen. Für eine gegebene elastische Eigenperiode T_1 ergibt sich aufgrund der Plastizität eine effektive Eigenperiode, die entsprechend länger ist, und somit erst bei größeren Werten für T_2 zu Resonanz führt.

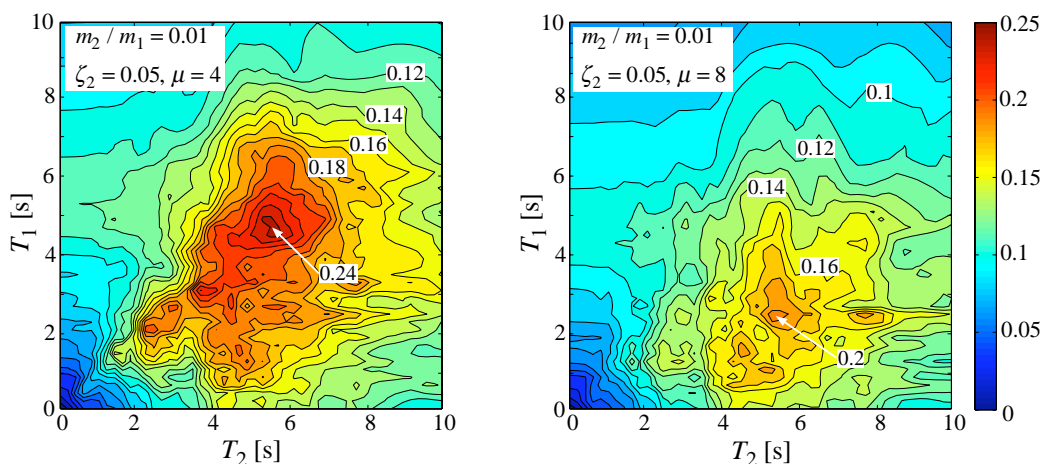


Abbildung 5: Median der Verschiebungs-Floorspektren für $m_2 / m_1 = 0.01$, $\zeta_2 = 0.05$, $\mu = 4$ bzw. $\mu = 8$ (elastoplastische Hauptstruktur).

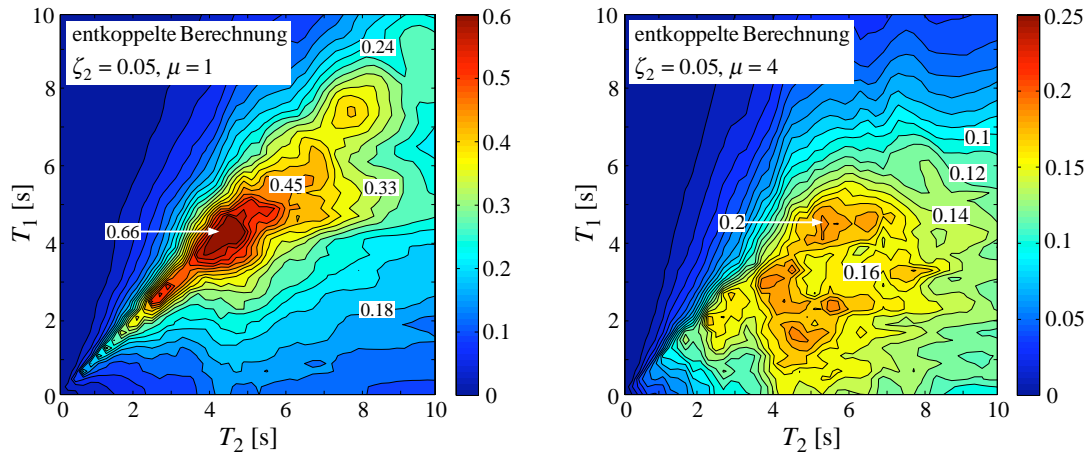


Abbildung 6: Median der Verschiebungs-Floorspektren, $\zeta_2 = 0.05$, $\mu = 1$ (elastisches System) bzw. $\mu = 4$. Entkoppelte Lösung.

In Abb. 6 sind Mediane der Verschiebungs-Floorspektren aus entkoppelten Berechnungen dargestellt. Links wird die rein elastische Lösung und rechts das Ergebnis für eine elastoplastische Hauptstruktur mit einer Duktilität μ von 4 gezeigt. Es wird darauf hingewiesen, dass die entkoppelte Schwingungsantwort des Sekundärelements vom Massenverhältnis m_2 / m_1 unabhängig ist. Vergleicht man das links dargestellte Bild mit der elastischen gekoppelten Lösung für $m_2 / m_1 = 0.01$ gemäß Abb. 4, so zeigt sich, dass durch eine entkoppelte Berechnung die Schwingungsantwort der Sekundärstruktur überschätzt wird. Ein gänzlich anderes Ergebnis liefert der Vergleich der entkoppelten (Abb. 6, rechts) und der gekoppelten Lösung (Abb. 5, links) für ein duktiler Hauptsystem mit $\mu = 4$ und $m_2 / m_1 = 0.01$. Hier werden die maximalen Spektralwerte mit der entkoppelten Berechnung um bis zu 30% unterschätzt, d.h. mit einer entkoppelten Rechnung liegt man auf der unsicheren Seite. Die beiden Konturplots weisen keine Ähnlichkeit auf. Sowohl beim elastischen als auch beim elastoplastischen System liefert für sehr weiche Primärsysteme mit steifen Sekundärsystemen (d.h. im Bereich von großen primären Eigenperioden T_1 und kleinen sekundären Eigenperioden T_2) die entkoppelte Berechnung zu geringe Verschiebungen. Dies wird damit begründet, dass für sehr weiche Einmassenschwinger die Relativbeschleunigung in etwa mit der negativen Erdbewegungsbeschleunigung übereinstimmt und somit – im Rahmen einer entkoppelten Berechnung – dem Sekundärsystem eine sehr geringe resultierende Beschleunigung als Anregung eingeprägt wird, was wiederum zu kleinen Spektralverschiebungen führt.

4.3 FEHLER BEI ENTKOPPELTER BERECHNUNG

Bei einer entkoppelten Berechnung der Schwingungsantwort ist der relative Fehler des Medians der Spektralverschiebungen des Sekundärelements wie folgt definiert:

$$\text{rel. Fehler [\%]} = 100 \cdot \frac{S_{d2,\text{entkoppelt}} - S_{d2,\text{gekoppelt}}}{S_{d2,\text{gekoppelt}}} \quad (3)$$

Ein negativer Wert bedeutet, dass die Schwingungsantwort unterschätzt wird, während sie bei einem positiven relativen Fehler zu groß ist.

In Abb. 7 ist der relative Fehler für schwach gedämpfte Sekundärelemente

($\zeta_2 = 0.005$) für 4 Duktilitäten ($\mu = 1, 2, 4, 8$) als Funktion des Massenverhältnisses m_2 / m_1 und des Eigenperiodenverhältnisses T_2 / T_1 aufgetragen. Um zu dieser Darstellung zu gelangen, wurden bei den Berechnungen für jedes Massenverhältnis sämtliche Eigenperiodenverhältnisse betrachtet, und bei jenen, die mehrfach vorkamen, jeweils der Maximalwert (positiv oder negativ) berücksichtigt. Schließlich wurde die sich daraus ergebende Fehler-Periodenverhältnis-Kurve geglättet und für alle betrachteten Massenverhältnisse als Fläche dargestellt.

Sämtliche dargestellte Fehlerverläufe haben ein ähnliches Aussehen. So wird mit einer entkoppelten Berechnung bei Eigenperiodenverhältnis kleiner als eins die Schwingungsantwort der Sekundärmasse zum Teil erheblich unterschätzt, während sie bei großen Eigenperiodenverhältnissen – abhängig von der Duktilität – entweder überschätzt oder relativ gut wiedergegeben wird. Weiters zeigt sich für den Resonanzfall ($T_2 / T_1 \approx 1$), dass die entkoppelte Berechnung im Allgemeinen viel zu große Verschiebungen liefert, wobei die Abweichung für das größte Massenverhältnis ($m_2 / m_1 = 0.1$) am deutlichsten ist. Mit abnehmendem Massenverhältnis, aber auch mit zunehmender Duktilität, wird der Unterschied zwischen gekoppelter und entkoppelter Berechnung geringer, siehe auch Abb. 6.

Die gezeigten Ergebnisse decken sich qualitativ mit Entkopplungskriterien, wie sie in der Literatur zu finden sind (siehe z.B. Chen und Wu, 1999), geben allerdings einen detaillierteren Überblick über die zu erwartenden Abweichungen im Rahmen von entkoppelten Berechnungen und enthalten zudem den nicht unwesentlichen Einfluss der Plastizität der Hauptstruktur.

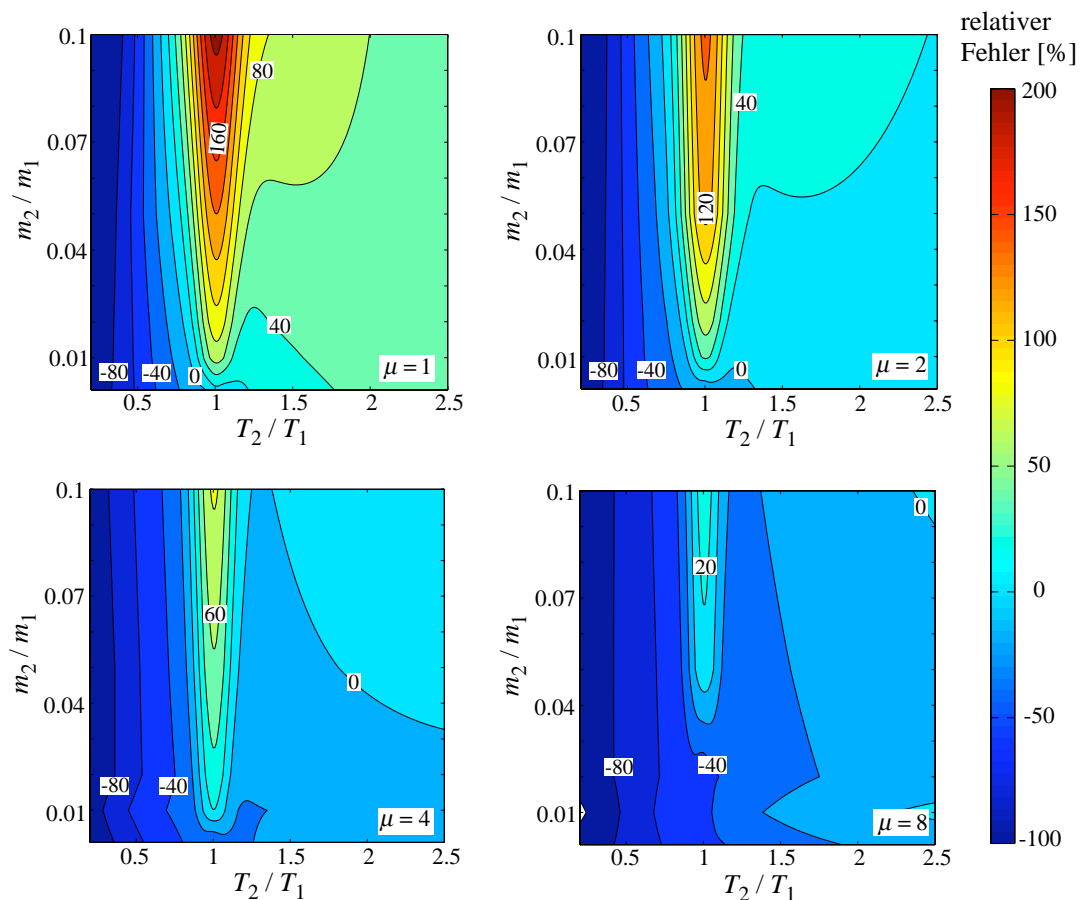


Abbildung 7: Relativer Fehler bei den Verschiebungs-Floorspektren zwischen entkoppelter und gekoppelter Berechnung für $\zeta_2 = 0.005$.

4.4 BESCHLEUNIGUNGS-FLOORSPEKTREN

In diesem Abschnitt wird die spektrale absolute Beschleunigungsantwort der Sekundärstruktur analysiert. Dabei werden die in Abb. 8 gezeigten Mediane der Beschleunigungs-Floorspektren S_{a2} auf die spektrale Pseudo-Beschleunigung S_{ay} der Hauptstruktur bezogen. Das Massenverhältnis m_2 / m_1 beträgt 0.01, die Dämpfung der Sekundärstruktur 5 %. Abb. 8(a) ist die elastische Lösung, Abb. 8(b) und (c) für Duktilitäten $\mu = 2$ bzw. 4 verdeutlichen den Einfluss der plastizierenden Hauptstruktur auf die Beschleunigungsantwort des Sekundärelements. Einerseits nehmen die maximalen bezogenen Spektralbeschleunigungen mit zunehmender Plastizität der Hauptstruktur zu, andererseits kommt es zu einer Verschiebung des Resonanzbereichs, in dem die maximalen Beschleunigungen auftreten. Dies lässt sich, wie schon bei den in Abb. 5 dargestellten Verschiebungs-Floorspektren, durch die Verlängerung der primären Eigenperiode T_1 aufgrund des Plastizierens erklären. Zudem werden die maximalen bezogenen Schwingungsantworten aufgrund des weicheren Primärsystems über einen größeren Periodenbereich verteilt, besonders bei großen sekundären Eigenperioden T_2 .

In Abb. 8(d) ist für die Duktilität $\mu = 2$ das Ergebnis aus einer entkoppelten Berechnung für die gewählten Systemparameter dargestellt. Vergleicht man dieses mit der komplementären gekoppelten Lösung gemäß Abb. 8(b), so zeigen sich hier nur relativ kleine Unterschiede.

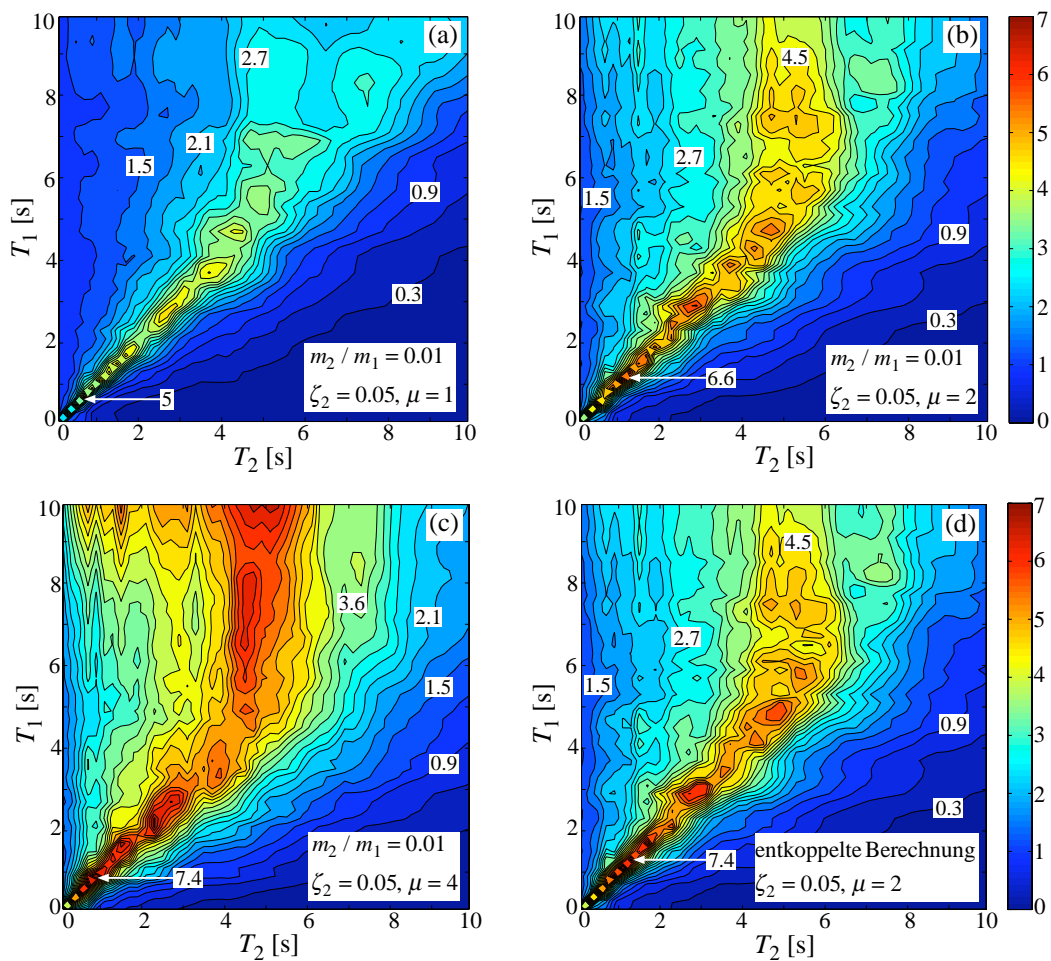


Abbildung 8: Mediane von Beschleunigungs-Floorspektren, bezogen die Pseudo-Beschleunigungsspektren der Hauptstruktur, für die angegebenen Systemparameter.

5. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Es wird das dynamische Verhalten von schwingungsfähigen Einbauten untersucht, die an seismisch erregten Hauptstrukturen befestigt sind. Sowohl Haupt- als auch Sekundärstruktur werden als Einmasseschwinger modelliert, die in Serie geschaltet sind. Bei den numerischen Simulationen erfolgt die Anregung durch 40 gewöhnliche Erdbebenschriebe, die bei kalifornischen Starkbebenereignissen aufgezeichnet worden sind. Es wird aufgezeigt, dass bei duktilen Hauptsystemen die tatsächliche Schwingungsantwort von Sekundärsystemen in weiten Eigenperiodenbereichen wesentlich größer sein kann als die zugehörige entkoppelte Lösung. Im Gegensatz dazu wird bei elastischen Systemen die dynamische Lösung bei einer entkoppelten Betrachtung im Allgemeinen überschätzt.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Adam, C., Fotiu, P.A., 2000. Dynamic analysis of inelastic primary - secondary systems. *Engineering Structures*, 22, S. 58 - 71.
- Adam, C., 2006. A parameter study of nonstructural elements in elastic-plastic buildings under seismic excitation. In: Proc. 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, April 18-22, 2006, Paper No. 1687.
- Building Seismic Safety Council, 2003. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, FEMA-450. Washington DC: Federal Emergency Management Agency.
- Chen, G., Wu, J., 1999. Transfer-function-based criteria for decoupling of secondary systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 125, S. 340-346.
- Chopra, A.K., 2007. *Dynamics of structures*. Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, New Jersey.
- Igusa, T., Der Kiureghian, A., 1985. Dynamic characterization of two-degree-of-freedom equipment-structure systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 111, S. 1-19
- Medina, R.A., Krawinkler, H., 2003. Seismic demands for nondeteriorating frame structures and their dependence on ground motions. Report No. 144. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University.
- Medina, R.A., Sankaranarayanan, R., Kingston, K.M., 2006. Floor response spectra for light components mounted on regular moment resisting frame structures. *Engineering Structures*, 28, S. 1972 - 1940.
- Newmark, N.M., Hall, W.J., 1982. *Earthquake spectra and design*. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.
- Ordaz, M., Pérez-Rocha, L.E., 1998. Estimation of strength-reduction factors for elastoplastic systems: A new approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, S. 889-901.
- Schwarz, J., 1990. Erdbebenerregung von Ausrüstungen unter Berücksichtigung inelastischen Bauwerksverhaltens. *Bauplanung - Bautechnik*, 44, S. 494 - 504.
- Villaverde, R., 2004. Seismic analysis and design of nonstructural components. In: *Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering*. CRC Press: Boca Raton, Florida.