

Innovativer Einsatz von Ringfedern in der Erdbebenauslegung

Ringfedern finden im Erdbebeningenieurwesen kaum Anwendung und sind nur wenig erforscht. Dabei bieten sie eine Reihe von Vorteilen: sie sind äußerst robust, hitzebeständig, langlebig und wartungsarm. Ihr Verhalten ist superelastisch, wobei die Feder trotz großer plastischer Verformungen und hoher Energiedissipation immer wieder in den Ausgangszustand zurückkehrt. Ein mit Ringfedern ausgestattetes System kann ein Erdbeben ohne große plastische Verformungen und Schäden überstehen und liefert somit einen maßgeblichen Beitrag zum Investitionsschutz (Wirtschaftlichkeit) und zum nachhaltigen Einsatz von knappen Materialien und Ressourcen. Die Dämpfer selbst bleiben dabei ebenfalls schadensfrei und müssen nicht ausgetauscht werden. In diesem Aufsatz wird ein neuartiger Einsatz von Ringfedern zur Erhöhung der Erdbebensicherheit und zur Schwingungsreduktion von Strukturen untersucht. Hierbei werden die klassischen Aussteifungselemente durch Ringfedern ersetzt. Um die praktische Anwendung im Erdbebeningenieurwesen zu ermöglichen und die Effizienz im Vergleich zu anderen Systemen zu bewerten, werden nichtlineare dynamische Simulationen durchgeführt, wobei die klassischen schwingungstechnischen Eigenschaften der Feder analytisch und numerisch quantifiziert werden. Abschließend wird die praktische Anwendung von Ringfedern zur Schwingungsreduktion und zur Optimierung der Erdbebenauslegung eines Hochhauses anhand eines Praxisbeispiels demonstriert.

Stichworte Erdbebenauslegung; Dämpfer; Reibungsfedern; Ringfedern; Diagonalverband; selbstständige Rückzentrierung; Energiedissipation

Innovative application of ring springs for seismic design

Ring springs are hardly used in earthquake engineering and have been little investigated. Though they offer several benefits: they are extremely robust, heat-resistant, durable and low-maintenance. Their behavior is superelastic, whereby the spring always returns to its initial state despite large plastic deformations and high energy dissipation. A system equipped with ring springs can withstand an earthquake without major plastic deformation and damage, thus makes a significant contribution to investment protection (economic efficiency) and the sustainable use of scarce materials and resources. The dampers themselves also remain damage-free and do not need to be replaced. In this paper, a novel use of ring springs to increase earthquake resistance and reduce vibration of structures is investigated. Here, the classical bracing elements are replaced by ring springs. To enable practical application in earthquake engineering and to evaluate the efficiency in comparison to other systems, nonlinear dynamic simulations are performed, quantifying the classical vibrational properties of the spring analytically and numerically. Finally, the practical application of ring springs for reducing vibrations and optimizing the seismic design of a high-rise building is demonstrated by means of a practical example.

Keywords seismic design; damper; friction springs; ring springs; bracing frames; self-centering; energy dissipation system

1 Einführung

Jedes Jahr führen auf der ganzen Welt seismische Aktivitäten zu Schäden an Gebäuden. Auch in Europa, v. a. am Mittelmeer und auf dem Balkan, kommt es zu Schäden in Milliardenhöhe. So haben mehrere Erdbeben Ende 2016 in Mittelitalien insgesamt 299 Todesopfer gefordert und viele Orte wurden fast vollständig zerstört. Heute, fünf Jahre nach der Naturkatastrophe, herrscht immer noch der Notstand, denn der Wiederaufbau geht nur schleppend voran und Betroffene müssen auch im Jahr 2021 noch im Wohncontainer leben [1].

Auch in Deutschland gibt es Erdbeben und die Erdbebenauslegung gewinnt zunehmend an Bedeutung. Mit der geplanten bauaufsichtlichen Einführung des Eurocode 8 mit der neuen Erdbebengefährdungskarte verschärfen sich die Anforderungen [2, 3].

Beim erdbebensicheren Bauen müssen Gebäude den Erdbeben standhalten und dürfen nicht einstürzen. Dabei werden bei der Auslegung grundsätzlich zwei verschiedene Ziele verfolgt. Zum einen wird das duktile Tragverhalten aktiviert, wodurch die Erdbebenenergie über plastische Verformungen im Gebäude aufgenommen wird. Die dabei entstehenden Schäden müssen anschließend ertüchtigt werden oder es kommt sogar zu einem vollständigen wirtschaftlichen Verlust. Zum anderen wird das Ziel verfolgt, den Funktionserhalt unmittelbar nach dem Erdbeben zu sichern. In diesem Fall wird zur Zielsicherung nur das elastische Tragwerksverhalten ausgenutzt. Besonders bei sicherheitsrelevanten Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen, wie z. B. Krankenhäuser, Feuerwehr, Elektrizität und die Wasserversorgung, ist die Ausfallsicherheit wichtig.

Eine solche Auslegung führt allerdings zu größeren Querschnitten, denn die Horizontallasten müssen über die

aussteifenden Elemente elastisch abgetragen werden. Mit innovativen Lösungen werden die Horizontallasten und somit auch die Querschnitte in einem Gebäude reduziert. Zum Beispiel wird bei der Basisisolierung das Gebäude vom Baugrund entkoppelt oder Massendämpfer sorgen anhand einer Sekundärmasse für eine Tilgung von Schwingungen.

Klassische Dämpfer wandeln Bewegungsenergie in Wärmeenergie um. Diese Energiedissipation wird im Erdbebeningenieurwesen genutzt, um Schwingungen in einer Gebäudestruktur zu verringern. Ringfedern haben genau diese Wirkung und somit ist der Einsatz als Dämpfer naheliegend.

Ringfedern sind im Maschinenbau durchaus bekannt [4] und gehören zur Gruppe der zug- und druckbeanspruchten Federn, welche zahlreiche Anwendungsgebiete der Maschinenbaupraxis seit Jahrzehnten abdecken. Anwendungen im Bauingenieurwesen hingegen sind weltweit sehr selten. Insbesondere die Anwendung von Ringfedern für die seismische Auslegung und Optimierung von Tragstrukturen ist kaum erforscht und es existieren keine praxistauglichen Ansätze hierzu. Dabei bieten die Federn eine Reihe von sehr vorteilhaften schwingungstechnischen, dissipativen und konstruktiven Eigenschaften, welche sie für einen Einsatz im erdbebensicheren Bauen sehr interessant machen. In diesem Beitrag sollen diese Eigenschaften und seismisch relevante Anwendungsbereiche eingehend untersucht und praxisgerecht quantifiziert werden.

2 Eigenschaften von Ringfedern

Die Ringfedern, oder auch Reibungsfedern genannt, werden aus zyklisch belastbarem Federstahl hergestellt. Sie bestehen aus Außen- und Innenringen mit jeweils konischen Berührungsflächen.

Die Federn werden axial belastet und dadurch dehnen sich die Außenringe im Durchmesser aus, während die Innenringe gestaucht werden. Die Verformung der Ringe ist elastisch, aber es entstehen so hohe Reibkräfte, dass die Rückstellkraft F_R schließlich sehr viel kleiner ist als die max. Verformungskraft F_{max} . Typischerweise beträgt die Reduktion ca. 66%. In Bild 1 ist die idealisierte flaggenförmige Kraft-Verformungskurve (Hysteresekurve) und in Bild 3 eine tatsächliche gemessene Kurve aus einem aktuellen Versuch dargestellt. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass das Verhalten der Feder kaum Abweichungen zur idealisierten Kurve aufweist und somit ohne typische Streubeiwerte in der Simulation/Auslegung angesetzt werden kann. Dies führt zu einem sehr zuverlässigen und berechenbaren Verhalten der Feder. Die gelb hinterlegte Fläche stellt die Hysteresedämpfung D_{rel} dar. Es besteht ein direkter funktionaler Zusammenhang zwischen der Endkraft F_{max} und der dazugehörigen Rückstellkraft F_R (Gl. (1)).

$$F_R = (1 - D_{rel}) F_{max} \quad (1)$$

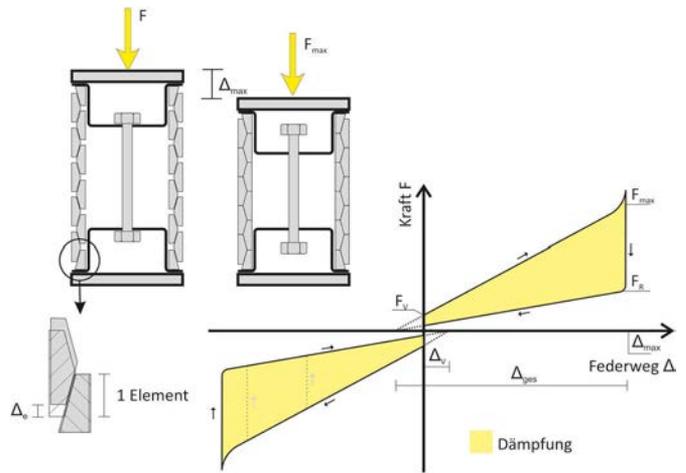


Bild 1 Aufbau und Kraft-Verformungskurve einer Ringfeder
Design and load-deformation curve of a ring spring

Die im Maschinenbau als relative Dämpfung bekannte Konstante D_{rel} (nicht zu verwechseln mit der in der Baudynamik bekannten Dämpfung D) hängt u. a. auch von der Schmierung (Lebensdauerschmierung) ab, sodass neben dem typischen Wert von ca. 66% auch relative Dämpfungen von z. B. 55%, 45% und 35% möglich sind. Die Gleitflächen werden typischerweise ab Werk geschmiert und i. Allg. ist ein Nachschmieren im Betrieb nicht erforderlich.

Da die Ringe selbst nicht fixiert werden, muss die Feder zur Lagesicherung vorgespannt werden. Diese muss mind. 5–10% der Endkraft betragen und kann bei Bedarf auch auf bis zu 60% erhöht werden. Der Vorspannweg Δ_V berechnet sich aus dem gesamten Federweg Δ_{ges} und der Vorspannkraft F_V (Gl. (2)).

$$\Delta_V = \frac{F_V}{F_{max}} \Delta_{ges} \quad (2)$$

Der Federweg wird über die Anzahl der Ringe bestimmt. Die Feder in Bild 1 besteht aus fünf Außen-, vier Innen- und zwei halben Innenringen. Der Federweg ergibt sich aus der Relativverschiebung zweier Ringe Δ_e und diese Einheit wird als ein Element e definiert. Somit besitzt diese Feder zehn Elemente. Der gesamte Federweg berechnet sich zu (Gl. (3)):

$$\Delta_{ges} = e \Delta_e \quad (3)$$

Unter Berücksichtigung des Vorspannwegs ergibt sich der nutzbare Federweg aus Gl. (4):

$$\Delta_{max} = \Delta_{ges} - \Delta_V \quad (4)$$

Die Ringfedern selbst nehmen nur Druckkräfte auf, aber eine geeignete Konstruktion ermöglicht auch die Aufnahme von Zugkräften, wie in Bild 2 dargestellt ist [4, 5].

Nach einer Überschreitung des max. Federwegs befindet sich die Feder im Blockzustand. Es werden nun noch

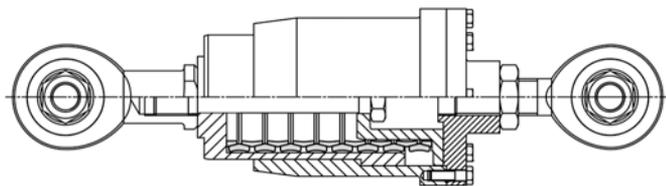


Bild 2 Beispielhafte Ausführung einer Zug-Druckeinheit
Exemplary desing of a double acting ring spring

größere Lasten übertragen, aber die Feder selbst verhält sich hierbei starr. Somit kann die Feder auch auslegungsüberschreitende seismische Lasten ohne Versagen aufnehmen, verliert jedoch zeitweise ihr dissipatives Verhalten. Bei einer Entlastung kehrt die Feder in ihre Ausgangslage zurück und bleibt voll einsatzbereit. Dadurch ergibt sich eine hohe Sicherheit, weil die größte übertragbare statische Kraft durch die Konstruktion begrenzt wird und nicht durch die Ringfedern.

Zurzeit finden Ringfedern umfangreich Anwendung in Bereichen des Maschinenbaus, in denen hohe kinetische Energien aufgefangen und dissipiert werden müssen. Hier wird eine Reihe von Eigenschaften genutzt, welche auch im Erdbebeningenieurwesen große Vorteile bieten.

Wesentliche Vorteile sind das superelastische (oder pseudoelastische) Verhalten und die automatische Rückzentrierung nach einem Erdbebenereignis. Bleibende Verformungen in der zu schützenden Struktur werden hierdurch verhindert und der Funktionserhalt ist sichergestellt.

Sie überstehen viele Zyklen, sind wiederverwendbar und für den Dauereinsatz geeignet. Dadurch sind sie auch bei mehreren Erdbeben stets einsatzbereit und es geht durch eintretende Nachbeben keine zusätzliche Gefahr aus. Es ist sogar eine dauerhafte Dämpfung von windverursachten Schwingungen denkbar. Sollte dennoch ein Ring in einer Ringfederbaugruppe brechen, dann verringert sich die Vorspannung, aber die max. übertragbare Last bleibt

erhalten. Zudem sind Ringfedern weitgehend wartungsfrei und werden im Maschinenbau mit Wartungsintervallen von bis zu 50 Jahren eingesetzt [6].

Die Ringfedern sind nicht nur robust gegenüber zyklischer Belastung, sie sind auch im Brandfall günstig und behalten ihre Funktion bis zum Erreichen der kritischen Temperatur bei [7].

3 Einsatz von Ringfedern in Gebäuden zur Erhöhung der Erdbebensicherheit

3.1 Einsatzbereiche

Bei der klassischen Erdbebenauslegung werden die aussteifenden Elemente in einer Struktur ausreichend dimensioniert, damit die durch das Erdbebenereignis entstehenden Horizontalkräfte sicher in das Fundament abgeleitet werden können. Dabei werden plastische Verformungen bzw. Schäden am Gebäude zugelassen und dies wird über den Verhaltensbeiwert in der Nachweisführung berücksichtigt. Soll die zu dimensionierende Struktur die seismische Einwirkung ohne Schäden überstehen, dann muss eine elastische Bemessung durchgeführt werden. Dies führt zwangsläufig zu größeren Querschnitten und somit zu einer unwirtschaftlichen Auslegung.

Alternativ werden mit innovativen Methoden die Schwingungen reduziert und somit schlankere Tragstrukturen ermöglicht. Im Folgenden werden innovative Systeme und Entwicklungen vorgestellt, bei denen die Eigenschaften der Ringfedern ausgenutzt werden.

Controlled rocking steel braced frames (CRSBF) werden Systeme genannt, die unter Erdbebenbeanspruchung ein Abheben von ausgewählten Zugstützen erlauben und geringe Verformungen über die Gebäudehöhe verursachen. Es werden zusätzlich Energiedissipatoren wie Ringfedern, an der Basis oder über die Gebäudehöhe verteilt, inte-

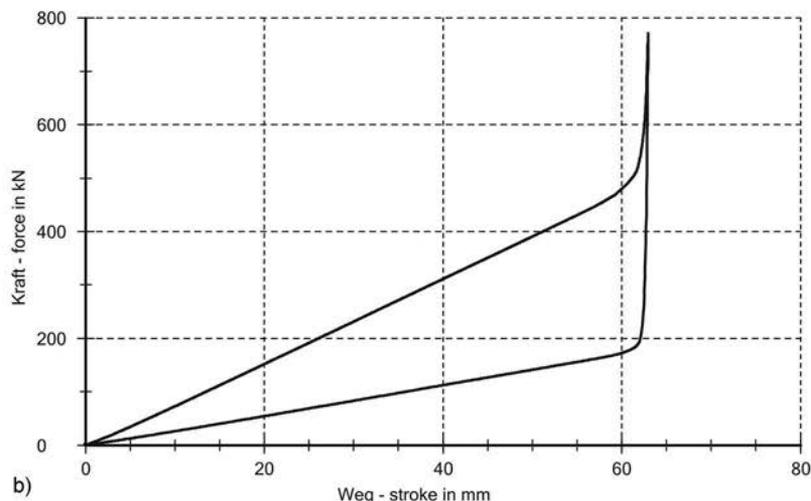


Bild 3 Messung einer Hysteresekurve: a) der Versuchsstand und b) die Kraft-Verformungskurve
Hysteresis curve measurement: a) experimental setup and b) force-deformation curve

griert [8]. Für diese Form der Basisisolierung werden die Ringfedern über Stäbe im Fundament verankert und vorgespannt [9].

Der sliding hinge joint ist eine Riegel-Stützenverbindung, die Rotationen mit min. Schaden aufnimmt und durch Reibung Energie dissipiert. In Verbindung mit einer Ringfeder als Dämpfungselement wurde der SCSHJ (self-centering sliding hinge joint) weiterentwickelt. Die Ringfeder beeinflusst die Momentenkapazität der Verbindung und ermöglicht die Selbstzentrierung nach der Belastung [10].

Beide zuvor genannten Systeme wurden bereits bei Neubauten in Neuseeland angewendet. Die Studentenunterkünfte Te Puni Village und das 15-stöckige Elevate Apartments in Wellington (Neuseeland) wurden mit CRSBFs und moment resisting frames (MRF) mit sliding hinge joints umgesetzt. Die Gebäude verfügen an der Basis von Stahlrahmen mit zentrisch angeschlossenen Verbänden über vorgespannte Ringfedern [6, 11, 12].

SBPBs (spring based piston bracing systems) sind für eine Anordnung in Aussteifungselementen vorgesehen, die diagonal in Riegel-Stützenverbindungen angebracht sind. Diese werden sowohl in Neubauten als auch im Bestand eingesetzt und eignen sich sowohl für Stahl- als auch für Massivbaustrukturen. SBPBs bestehen aus einer Kolben-Zylinderkombination und einer oder mehreren Ringfedern [13].

3.2 Effektiver Dämpfungsgrad

Ringfedern besitzen typischerweise eine maschinenbautechnisch relative Dämpfung (nicht zu verwechseln mit der in der Baudynamik bekannten Dämpfung D) von ca. 66%. Allerdings bezieht sich dieser Wert auf den Betrag der Rückstellkraft F_R im Verhältnis zur Endkraft F_{max} und beschreibt somit nicht direkt die Fläche der Hysteresedämpfung bzw. der Kraft-Verformungskurve, welche die Hysteresedämpfung darstellt. Zur Quantifizierung der Hysteresedämpfung wird daher das aus der Baudynamik bekannte äquivalente Lehrsche Dämpfungsmaß ξ bestimmt. Dieser Wert ist zwar für lineare Schwingungen mit einer viskosen Dämpfung definiert, jedoch kann auch für Ringfedern ein äquivalenter Wert zur Quantifizierung der Hysteresedämpfung über das logarithmische Dekrement oder über die Hysteresekurve selbst ermittelt werden.

Zunächst ist in Bild 4 die verrichtete Arbeit über die Verschiebung ohne Vorspannung dargestellt. Dabei ist W_S die Arbeit der Steifigkeit und W_D die Arbeit der Dämpfung. Aus deren Verhältnis lässt sich das äquivalente Dämpfungsmaß berechnen [14].

$$\xi_{eq} = \frac{2 W_D}{4\pi W_S} = \frac{2 \frac{2}{3} \Delta}{4\pi \frac{2}{3} \Delta} = \frac{1}{2\pi} \approx 16\% \quad (5)$$

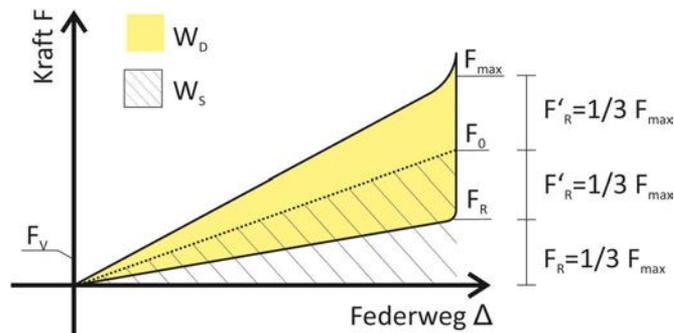


Bild 4 Verrichtete Arbeit aufgetragen über die Verschiebung mit F_R – Rückstellkraft, F_{max} – Endkraft, F_V – Vorspannkraft
Work done plotted against displacement with F_R – restoring force, F_{max} – end force, F_V – preload force

Aus dieser einfachen Betrachtung (Gl. (5)) ergibt sich ein äquivalentes Dämpfungsmaß von ca. 16% für typische Federn, allerdings ohne Berücksichtigung der Einflüsse aus Vorspannung. In einem alternativen, analytischen Ansatz werden die Schwingungsamplituden berechnet. Das logarithmische Dekrement liefert über die Abnahme der Amplituden anschließend das Dämpfungsmaß. Dieser Zusammenhang ist in Bild 5 für eine freie Schwingung einer Ringfeder dargestellt.

Zunächst wird der Bereich der Vorspannung berechnet. Als Annahme gilt hier für kleine Verschiebungen die konstante Federkraft F . Die Masse m besitzt zum Startzeitpunkt die Auslenkung Δ_0 und nun beschleunigt die konstante Federkraft die Masse auf die max. Geschwindigkeit v . Aus dieser lässt sich anschließend die neue Amplitude $\Delta_{0,5}$ berechnen (Gln. (6)–(9)).

$$v = \sqrt{\frac{2 F}{3 m} \Delta_0} \quad (6)$$

$$\Delta_{0,5} = \frac{v^2 m}{2 F} = \frac{1}{3} \Delta_0 \quad (7)$$

$$\delta = 2 \ln \left(\frac{\Delta_0}{\frac{1}{3} \Delta_0} \right) = 2 \ln(3) \quad (8)$$

$$\xi = \frac{2 \ln(3)}{\sqrt{4\pi^2 + (2 \ln(3))^2}} \approx 33\% \quad (9)$$

Hier ergibt sich eine deutlich höhere Dämpfung von 33%. Mit dem gleichen Vorgehen werden jetzt Ringfedern ohne Vorspannung berechnet und die Federkraft wird somit als linear mit der Steifigkeit K_{RL} (Belastung) bzw. $\frac{1}{3} K_{RL}$ (Entlastung) angesehen (Gln. (10)–(13)).

$$v = \Delta_0 \omega \sin(\omega t) = \Delta_0 \sqrt{\frac{1}{3} \frac{K_{RL}}{m}} \quad (10)$$

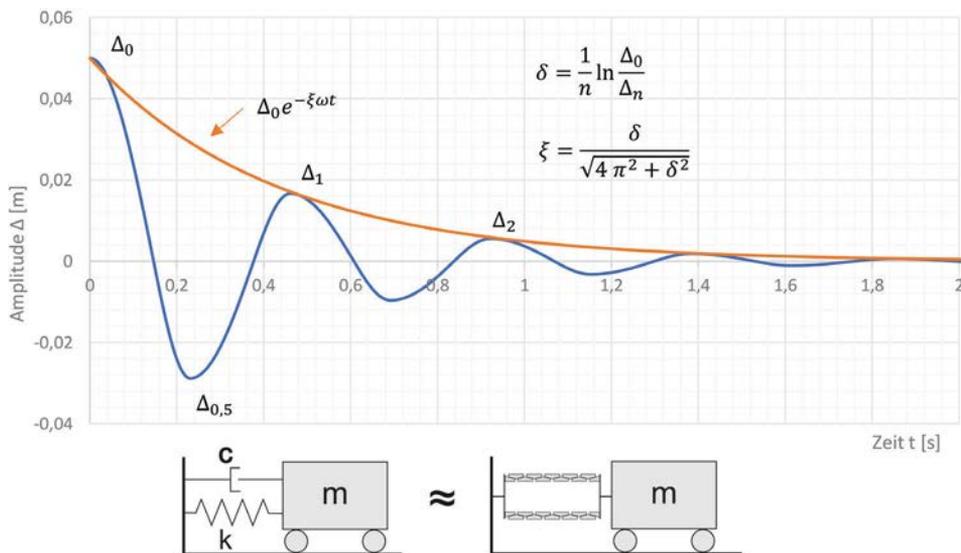


Bild 5 Freie Schwingung einer Ringfeder ohne Berücksichtigung der Vorspannung
Free vibration of a ring spring without consideration of preload

$$\Delta_{0,5} = \frac{v}{\omega \sin(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{3}} \Delta_0 \quad (11)$$

$$\delta = 2 \ln \left(\frac{\Delta_0}{\sqrt{\frac{1}{3}} \Delta_0} \right) = 2 \ln(\sqrt{3}) \quad (12)$$

$$\xi = \frac{2 \ln(\sqrt{3})}{\sqrt{4\pi^2 + (2 \ln(\sqrt{3}))^2}} \approx 17\% \quad (13)$$

Dieser Ansatz ergibt ein Maß von 17% und entspricht in etwa der Berechnung mit der verrichteten Arbeit. Tatsächlich liegt somit die Dämpfung zwischen 17% und 33% in Abhängigkeit von der Vorspannung. Dieser Zusammenhang wird nun genauer untersucht. Hierzu werden einem Einmassenschwinger ohne Systemsteifigkeit

Auslenkungen vorgegeben und der Ausschwingvorgang wird berechnet. Mit den max. Amplituden und dem logarithmischen Dekrement wird die Dämpfung bestimmt. Die Untersuchung zeigt, dass sie sich im Gegensatz zu linearen Systemen über die Verschiebung ändert. Weiterhin hat auch die Anfangssteifigkeit einen Einfluss, welche die Steifigkeit des Gesamtsystems beschreibt, wenn die Vorspannung der Federn noch nicht überschritten wird. Die Ergebnisse werden, getrennt für die Vorspannung und die Anfangssteifigkeit, in den Bildern 6, 7 dargestellt.

Bei einem System ohne Vorspannung wird eine Dämpfung von knapp 17% erreicht. Sobald eine geringe Vorspannung vorhanden ist, wird bei kleinen Verschiebungen eine Dämpfung von ca. 33% erreicht, die jedoch bei größeren Verschiebungen schnell abfällt. In diesem Fall ist die hier als unendlich hoch angesetzte Anfangssteifigkeit maßgebend. Wird die Vorspannung auf 10–20% gesteigert, welcher der für die Praxis relevante Bereich ist,

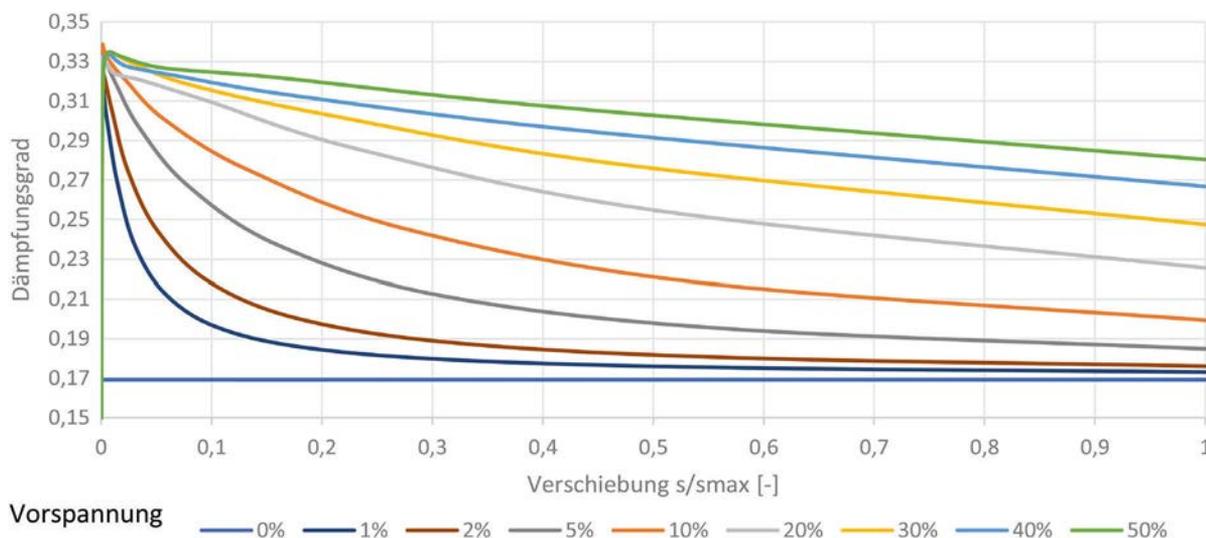


Bild 6 Dämpfungsgrad in Abhängigkeit von der Vorspannung
Damping ratio as a function of preload

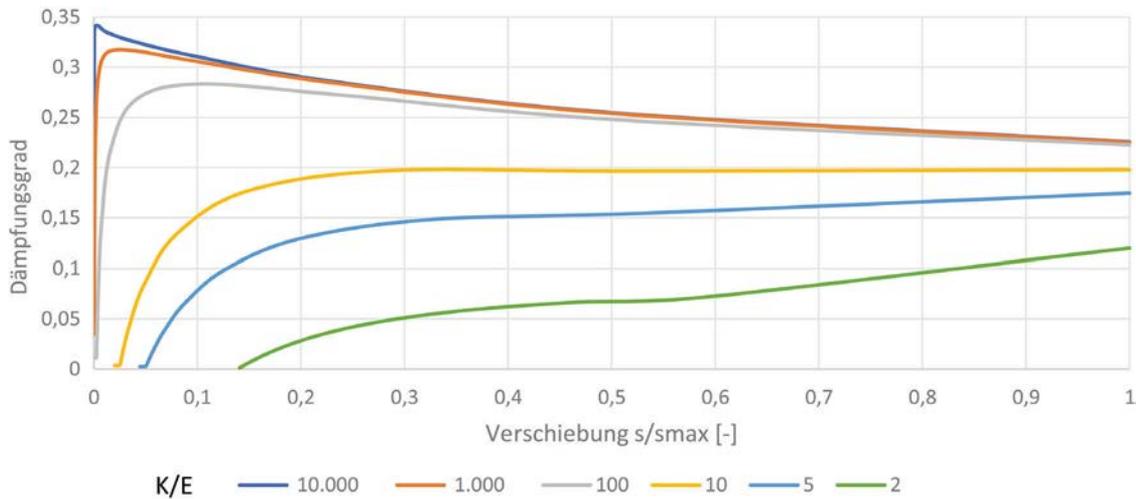


Bild 7 Dämpfungsgrad in Abhängigkeit von der Anfangssteifigkeit
Damping ratio as a function of initial stiffness

dann sind Dämpfungen von 20% bis 33% möglich. Mit zunehmender Vorspannung nähern sich auch die größeren Verschiebungen einer höheren Dämpfung an.

Die Anfangssteifigkeit K wird im Verhältnis zur Tangentensteifigkeit E angegeben. Die Tangentensteifigkeit E beschreibt die Steifigkeit des Gesamtsystems, wenn die Vorspannung der Federn überschritten ist und bei aktiver Belastung. Es zeigt sich, dass eine kleine Anfangssteifigkeit die Dämpfung verringert und v. a. bei kleinen Verschiebungen der Effekt sehr groß ist.

Bei einer realistischen Konstruktion mit Ringfedern als Aussteifung ist v. a. das Verhältnis zwischen der Systemsteifigkeit und den eingesetzten Federn für das Dämpfungsmaß verantwortlich.

3.3 Vergrößerungsfunktion

Eine Vergrößerungsfunktion beschreibt die Antwort einer Struktur auf eine harmonische Fußpunkt- oder Kraftanregung. Aus ihr lässt sich schließen, wie robust sich ein System bei verschiedenen Frequenzen verhält. Die harmonische Fußpunktanregung $\Delta_g(t)$ ist definiert als (Gl. (14)):

$$\Delta_g(t) = \Delta_{g,0} \sin \omega_p t \quad (14)$$

Dabei ist $\Delta_{g,0}$ die Amplitude der Fußpunktanregung und ω_p die dazugehörige Kreisfrequenz. Die Vergrößerungsfunktion V_d ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen $\Delta_{g,0}$ und der größten Auslenkung Δ_{max} aufgrund der harmonischen Anregung $\Delta_g(t)$, wobei hier nur der stationäre Anteil der Schwingung berücksichtigt wird.

$$V_d = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{g,0}} \quad (15)$$

Für einen elastischen Einmassenschwinger mit einer viskosen Dämpfung ξ lässt sich die Vergrößerungsfunktion

aus der Bewegungsgleichung herleiten und berechnet sich mit (Gl. (16)):

$$V_d = \frac{\sqrt{1+(2\xi\beta)^2}}{\sqrt{(1-\beta^2)^2+(2\xi\beta)^2}} \quad (16)$$

Hierbei ist β das Verhältnis der Erregerfrequenz zur Eigenfrequenz und es ergibt sich für einen Dämpfungsgrad von 5% in Resonanz ein Faktor von $V_d = 10,05$. Ein solches System wird nun zusätzlich mit Ringfedern aussteift und untersucht. Hierbei werden die Ringfedern so dimensioniert, dass sich die Eigenkreisfrequenz verdoppelt, und vereinfacht wird keine Vorspannung berücksichtigt. Für dieses System muss die Lösung mit einem Zeitschrittverfahren gefunden werden. Die Ergebnisse dafür sind in Bild 8 dargestellt.

Durch die höhere Dämpfung der Ringfedern wird der Vergrößerungsfaktor in Resonanz auf $V_d = 4,54$ gesenkt, was einem Dämpfungsgrad von 11% entspricht.

3.4 Generischer Vergleich

An einem generischen Beispiel wird das Verhalten von Ringfedern unter seismischen Einwirkungen untersucht. Hierzu wird ein Rahmen jeweils ohne Aussteifung, mit einem V-Verband und mit Ringfedern nach dem Eurocode 8 ausgelegt. Anschließend werden die Schnittgrößen für die Systeme ohne Dämpfer nach dem Antwortspektrumverfahren mit den anzusetzenden Verhaltensbeiwerten ermittelt und für das System mit Ringfedern wird eine Zeitverlaufsrechnung mit einem Bemessungs-erdbeben durchgeführt, welches aus dem elastischen Antwortspektrum ermittelt wird. Bemessen wird für das Eigengewicht und die seismische Einwirkung, andere Lasten werden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 dargestellt.

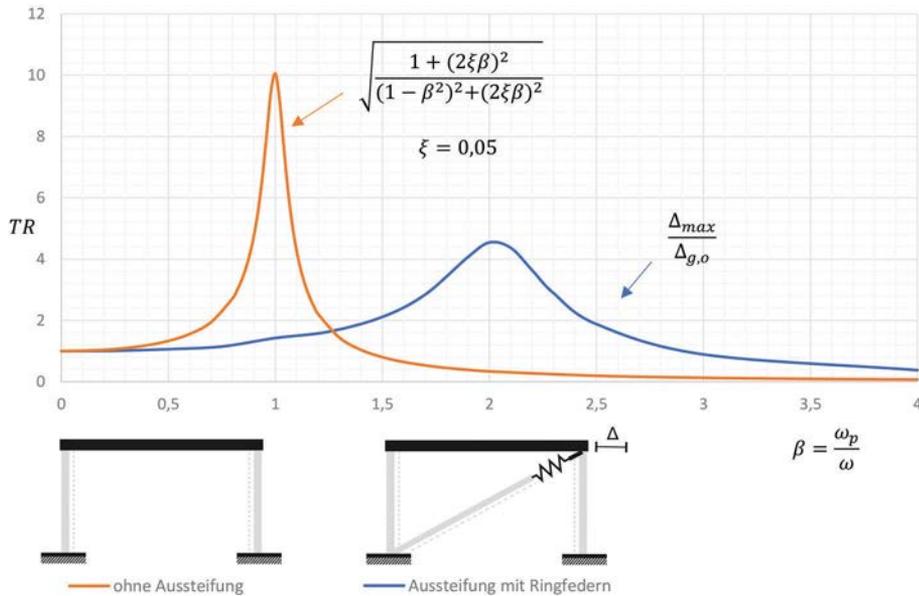


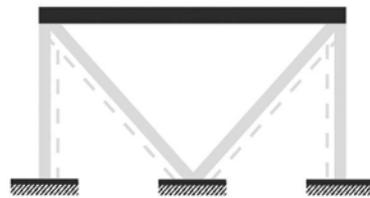
Bild 8 Vergrößerungsfunktion für ein System mit und ohne Ringfedern
Magnification factor for a system with and without ring springs

Tab. 1 Generischer Vergleich für einen Rahmen mit seismischer Einwirkung und Auslegung nach Eurocode 8
Generic comparison for a frame with seismic loading and design acc. to Eurocode 8

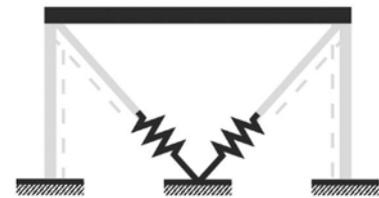
System



Umgekehrtes Pendelsystem



V-Verband



V-Verband mit Ringfedern

Berechnungsmethode

Antwortspektrumverfahren
 $q = 2,2$

Antwortspektrumverfahren
 $q = 2,5$

Nichtlineare Zeitverlaufsberechnung

Erforderliche Stahlmasse

7,3 t

3,4 t

2,9 t

Das umgekehrte Pendelsystem ist in diesem Beispiel aufgrund der fehlenden Aussteifung nicht geeignet, hohe seismische Einwirkungen abzutragen, weil die hohen Biegemomente in den Stützen zu Querschnitten führen, die nicht mehr praktikabel sind. Deutlich besser ist der V-Verband aus Stahl geeignet, auch wenn sich die Eigenfrequenz aufgrund der hohen Steifigkeit im Plateaubereich des Antwortspektrums befindet. Mit dem Einsatz der Ringfedern in dem V-Verband wird die Stahlmasse weiter reduziert. Dies liegt v. a. an der Energiedissipation der Dämpfer und einer Reduzierung der Steifigkeit, wodurch sich auch die Spektralbeschleunigung verringert.

3.5 Auslegung und Optimierung

Im letzten Abschnitt wurde der Einfluss von Anfangssteifigkeit und Vorspannung dargelegt. Gemeinsam mit

dem zulässigen Federweg und dem Anteil der Ringfedern am Gesamtsystem stellen sie die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Robustheit dar.

Es wurde bereits gezeigt, dass eine hohe Anfangssteifigkeit den Dämpfungsgrad der Ringfedern positiv beeinflusst. Dies wiederum führt bei einer Zeitverlaufsberechnung zu deutlich kleineren Verschiebungen. Weiterhin ist die Steifigkeit innerhalb der Vorspannung höher und dies führt ebenfalls zu kleineren Verschiebungen. Zwar werden dadurch die durch die Aussteifung übertragenen Kräfte größer, aber durch die Ringfedern werden diese limitiert. Die Steifigkeit hängt stark von der konstruktiven Ausführung ab und es ist nicht immer wirtschaftlich, durch eine Erhöhung der Anfangssteifigkeit die Robustheit zu verbessern.

Auch eine hohe Vorspannung bewirkt einen höheren Dämpfungsgrad, aber es verkürzt auch den Federweg.



Bild 9 Untersuchtes Hochhausprojekt
High-rise building investigated

Der mögliche Federweg hängt von der Anzahl der Elemente in einer Ringfeder ab. Theoretisch ideal ist eine max. große Vorspannung mit gleichbleibendem Federweg. Da dies in der Praxis nicht umsetzbar ist, muss individuell festgelegt werden, ob eine höhere Vorspannung und dafür größere Ringfedern lohnenswert sind. Es wird empfohlen, bei der Dimensionierung der Ringfedern auf jeden Fall die zulässigen Verschiebungen auszunutzen.

4 Beispielprojekt aus der Praxis zur Optimierung der Erdbebenauslegung

Im Folgenden wird anhand eines Praxisprojekts die Anwendung von Ringfedern zur Optimierung der Erdbebenauslegung eines Hochhauses in Indien vorgestellt und diskutiert. Das Hochhaus mit 26 Etagen und einer Höhe von 100 m wurde ursprünglich als Stahlstruktur mit konventionellen Aussteifungsverbänden geplant (Bild 9). Das Gebäude wurde konventionell entsprechend Eurocode 8 für eine max. Bodenbeschleunigung von 0,2g ausgelegt. Die ursprüngliche erste Eigenfrequenz des Hochhauses lag bei 0,44 Hz.

Das Gebäude wird nach dem Eurocode 8 mit der Methode der nichtlinearen Zeitverlaufsrechnung für Erdbeben ausgelegt. Hierzu werden künstliche Beschleunigungszeitverläufe generiert. Es werden ansonsten keine weiteren Lastfälle betrachtet.

Zunächst wird das Gebäude elastisch und ohne Ringfedern bemessen. Hierbei wird eine modale Dämpfung von 5% angenommen und ein elastisches Materialverhalten angesetzt. Ziel der Untersuchung ist es, dass das Gebäude die seismische Einwirkung ohne Schäden und ohne wesentliche plastische Verformungen übersteht.

Anschließend erfolgt die Bemessung des Gebäudes mit Ringfedern, welche als Dämpfer in die aussteifenden Diagonalverbände eingeplant werden. Dabei wird die Steifigkeit der Ringfedern so dimensioniert, dass diese 10% des Diagonalverbands entspricht. Die max. statisch übertragbare Kraft wird dadurch nicht reduziert. Die Vorspannung beträgt ca. 20% und es wird vorausgesetzt, dass die Dämpfer durch eine geeignete Einhausung sowohl Druckkräfte als auch Zugkräfte aufnehmen. Für das Materialverhalten der Stahlstruktur wird auch hier nur der elastische Bereich ausgenutzt.

Es stellt sich die Frage, ob trotz der reduzierten Steifigkeit des Gebäudes die zulässigen Verformungen eingehalten werden. Der geringeren Steifigkeit steht die deutlich höhere Dämpfung durch die Ringfedern gegenüber. Weiterhin fällt die erste Eigenperiode in einen günstigeren Bereich im Antwortspektrum, wodurch die Erdbebenkräfte geringer ausfallen.

In Bild 10 sind die horizontalen Verformungen des obersten Stockwerks aufgezeigt. Bei der Konfiguration mit Ringfedern sind die max. Verschiebungen kleiner, obwohl die Struktur insgesamt weicher ist. Somit wird die reduzierte Steifigkeit der Struktur durch die größere Dämpfung kompensiert und die Verformungen sind geringer.

Für die Dimensionierung der Querschnitte sind die Schnittgrößen ausschlaggebend. In dem hier betrachteten Beispiel zeigen die Normalkräfte in den Randstützen, wie effektiv sich der Einsatz der Dämpfer und somit die Reduktion der Steifigkeiten auswirkt. Die max. Druckkraft infolge der seismischen Einwirkung reduziert sich von knapp -58 MN auf -20 MN und die max. Zugkraft von 56 MN auf 19 MN (Bild 11). Aufgrund der Symmetrie sind auf der gegenüberliegenden Außenstütze Zug- und Druckkräfte jeweils vertauscht.

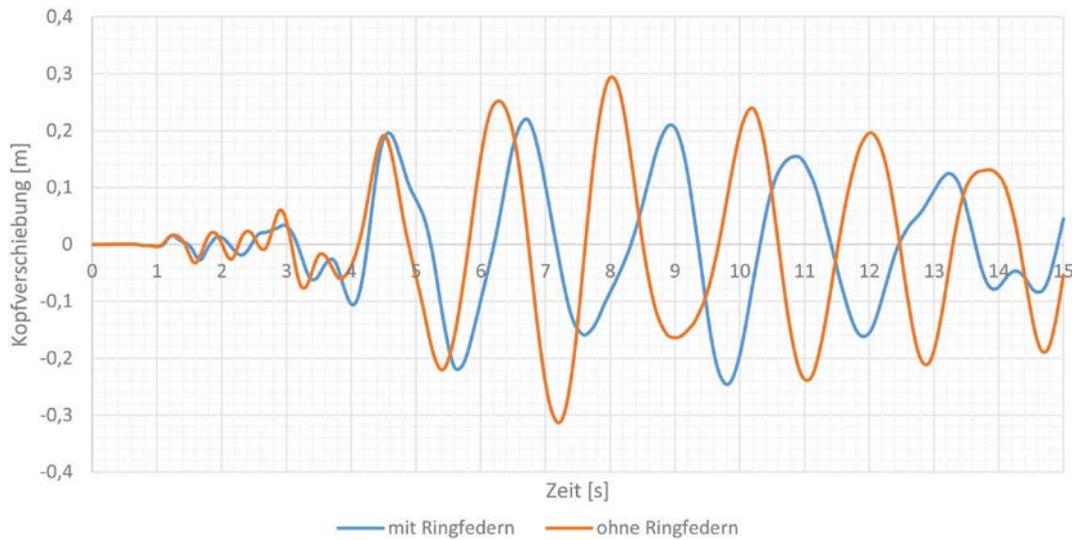


Bild 10 Kopferschiebungen des obersten Stockwerks mit und ohne Ringfedern
Displacements of the top floor with and without ring springs

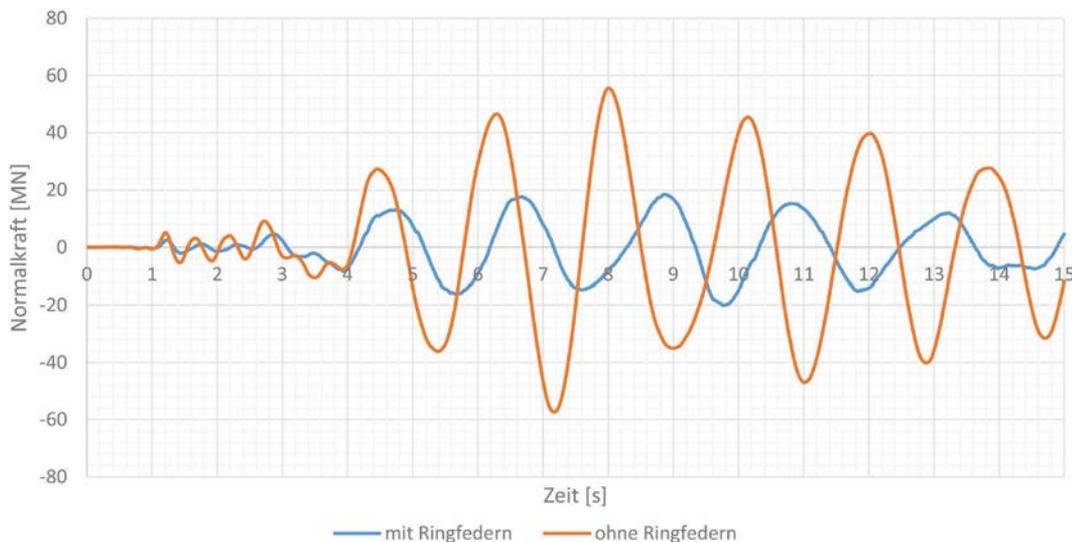


Bild 11 Normalkräfte in der Außenstütze mit und ohne Ringfedern
Axial forces in the external columns with and without ring springs

Unter Berücksichtigung des Eigengewichts und der seismischen Einwirkungen ermöglicht die Verwendung von Ringfedern eine Reduktion der Stahlmenge in den Stützen und Diagonalverbänden von 60.700 t auf 51.600 t.

Bei dem Vergleich wird davon ausgegangen, dass die Schnittgrößen elastisch abgetragen werden. Alternativ können plastische Verformungen zur Energiedissipation herangezogen und somit kleinere Querschnitte genutzt werden. Der entscheidende Nachteil beim gewollten Einsatz plastischer Verformungen sind die bleibenden Schäden an Gebäuden und Infrastruktur. Diese ziehen nach einem Erdbeben unweigerlich Ertüchtigungsmaßnahmen oder gar den vollständigen Verlust nach sich und damit langwierige Betriebsunterbrechungen und erhebliche finanzielle Aufwendungen. Besonders bei sicherheitsrelevanten Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen, wie z.B. Krankenhäusern, Feuerwehren, Elektrizität und die Wasserversorgung, ist der Funktionserhalt auch nach

einem Erdbeben überlebenswichtig. Durch den Einsatz von Ringfedern wird die notwendige Verformbarkeit in die zu schützenden Strukturen eingebracht, um diese im elastischen Bereich zu halten. Das Gebäude ist nach dem Erdbeben schadensfrei und aufwendige Bemessungen entfallen.

Auch aus konstruktiver Sicht sind die Ringfedern als sinnvolle Alternative in der Erdbebenauslegung zu bewerten. Ausschlaggebend sind hier die hohe Robustheit und ihr wartungsfreier Einsatz. Werden diese Eigenschaften z.B. aufgrund hoher Sicherheitsanforderungen wichtig, oder wenn die Dämpfer für Wartungsarbeiten nur schwer zugänglich sind, dann sind die Ringfedern im Vorteil.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von Ringfedern im Erdbebeningenieurwesen findet kaum Anwendung und ist auch kaum erforscht, dabei bieten die Federn eine Reihe von konstruktiven Vorteilen. Sie sind äußerst robust, wartungsarm, hitzebeständig und langlebig. Sie kombinieren Reibung (Dämpfung) und Flexibilität (Verformbarkeit) und es erfolgt eine selbstständige Rückzentrierung. Die Kraftübertragung ist unabhängig von der Geschwindigkeit und somit werden lokale Überlastungen vermieden. Es wurde gezeigt, dass ein Dämpfungsgrad von 17% bis 33% in Abhängigkeit von der Vorspannung erreicht wird. Hierzu wurden analytische Berechnungen durchgeführt und numerische Ausschwingversuche modelliert.

Literatur

- [1] Rüb, M. (2021) *Ein einziger Kran als Symbol für den Wiederaufbau* [online]. FAZ.net. 24. Aug. 2021.
- [2] DIN EN 1998-1 (2010) *Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009*. Berlin: Beuth.
- [3] DIN EN 1998-1/NA (2020) *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten*. Berlin: Beuth.
- [4] Meissner, M.; Schorcht, H.; Kletzin, U. (2015) *Metallfedern – Grundlagen, Werkstoffe, Berechnung, Gestaltung und Rechnerinsatz*. 3. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.
- [5] Ringfedern [Hrsg.] *Reibungsfedern RINGFEDER im Maschinenbau*. Katalog R 60.
- [6] Jahnel, L.; Cole, E. M. (2015) *Design Approach for Friction Spring Dampers in Steel Framed Buildings. Experiences from Christchurch/NZ*. The 11th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Victoria, BC, July 21–24, 2015.
- [7] Sadegh-Azar, H.; Goldschmidt, K.; Jahnel, L. (2019) *Innovative Reibungsfedern zur Erhöhung der Erdbebensicherheit*. 16. D-A-CH Tagung Erdbebeningenieurwesen & Baudynamik. Innsbruck, 26./27. Sept. 2019.
- [8] Wiebe, L. D. A. (2015) *Design and Construction of Controlled Rocking Steel Braced Frames in New Zealand* in: Leon, R. T. [ed.] *Second ATC & SEI Conference on Impro-*

ving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. San Francisco, California. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 810–821.

- [9] Gledhill, S. (2015) *A Practitioners Guide to Design and Delivery of Controlled Rocking Steel Braced Frame Structures*. Steel Innovations Conference. New Zealand, Sept. 1–4, 2015.
- [10] Khoo, H.-H. et al. (2012) *Development of the self-centering Sliding Hinge Joint with friction ring springs*. Journal of Constructional Steel Research 78, pp. 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.07.006>
- [11] Gledhill, S. M.; Sidwell, G. K.; Bell, D. K. (2008) *The Damage Avoidance Design of tall steel frame buildings – Fairlie Terrace Student Accommodation Project, Victoria University of Wellington*. NZSEE Conference. Wairaki, New Zealand, Apr. 11–13, 2008.
- [12] Bishay-Girges, N. W.; Carr, A. J. (2014) *Ring spring dampers*. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering 47, No. 3, pp. 173–180. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.47.3.173-180>
- [13] Issa, A. (2018) *Innovative spring & piston based self-centering bracing systems for enhanced seismic performance of buildings*.
- [14] Clough, R. W.; Penzien, J. (2015) *Dynamics of structures*. New Delhi: CBS Publishers & Distributors.

Autoren

Lukas Helm M. Sc. (Korrespondenzautor)
lukas.helm@bauing.uni-kl.de
Fachgebiet Statik und Dynamik der Tragwerke
TU Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Straße 14
67663 Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar
hamid.sadegh-azar@bauing.uni-kl.de
Fachgebiet Statik und Dynamik der Tragwerke
TU Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Straße 14
67663 Kaiserslautern

Dipl.-Ing. Lars Jahnel
lars.jahnel@ringfeder.com
Ringfeder Power Transmission GmbH
Werner-Heisenberg-Str. 18
64823 Groß-Umstadt

Dr.-Ing. Hauke Jandrey
hauke.jandrey@ringfeder.com
Ringfeder Power Transmission GmbH
Werner-Heisenberg-Str. 18
64823 Groß-Umstadt

Zitieren Sie diesen Beitrag

Helm, L.; Sadegh-Azar, H.; Jahnel, L.; Jandrey, H. (2022) *Innovativer Einsatz von Ringfedern in der Erdbebenauslegung*. Bautechnik 99, H. 1, S. 31–40. <https://doi.org/10.1002/bate.202100075>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 17. August 2021; angenommen: 1. November 2021.