

Kurzfassung zum Schlussbericht IGF-Vorhaben 20912 N

Thema

Entwicklung eines innovativen Ansatzes zur Entkopplung von Ausfachungen und nicht tragenden Trennwänden aus Mauerwerk von der Tragstruktur

Essen, den 30.04.2023

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

INSTITUT FÜR ZIEGELFORSCHUNG ESSEN E.V.

Am Zehnthof 197, 45307 Essen, Tel. +49 201 59 2132 30, info@izf.de

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1 Hintergrund und Motivation

Das nicht tragende Mauerwerk erfüllt bei entsprechender konstruktiver Durchbildung die Anforderungen an den Brand-, Schall- und Wärmeschutz sowie nutzungsbezogene Beanspruchungen. Die modernen nicht tragenden Trennwände bestehen in der Regel aus Ziegeln und sind nicht mit der Übertragung von Lasten auf die Hauptstruktur des Gebäudes verbunden. Daher tragen sie nicht zur Stabilität des Gebäudes bei. Sie werden jedoch mit geeigneten Anschlüssen an die angrenzenden Gebäudeteile angeschlossen, um die Stabilität der Trennwand selbst zu gewährleisten und die Zwangsbeanspruchungen aufgrund der Veränderung der angrenzenden Strukturen zu vermeiden. Das Problem bei den bestehenden Anschlüssen ist die ungewollte Verformung und die sehr hohe horizontale Lasteinwirkung auf die Ausfachungen und die nichttragende Trennwand bei Erdbeben und starken Windlasten. Diese ungewollten Verformungen können zu einer Versteifung der Strukturen führen, was wiederum eine Torsion der Struktur zur Folge hat, die zum Versagen des gesamten oder eines Teils des Gebäudes führt.

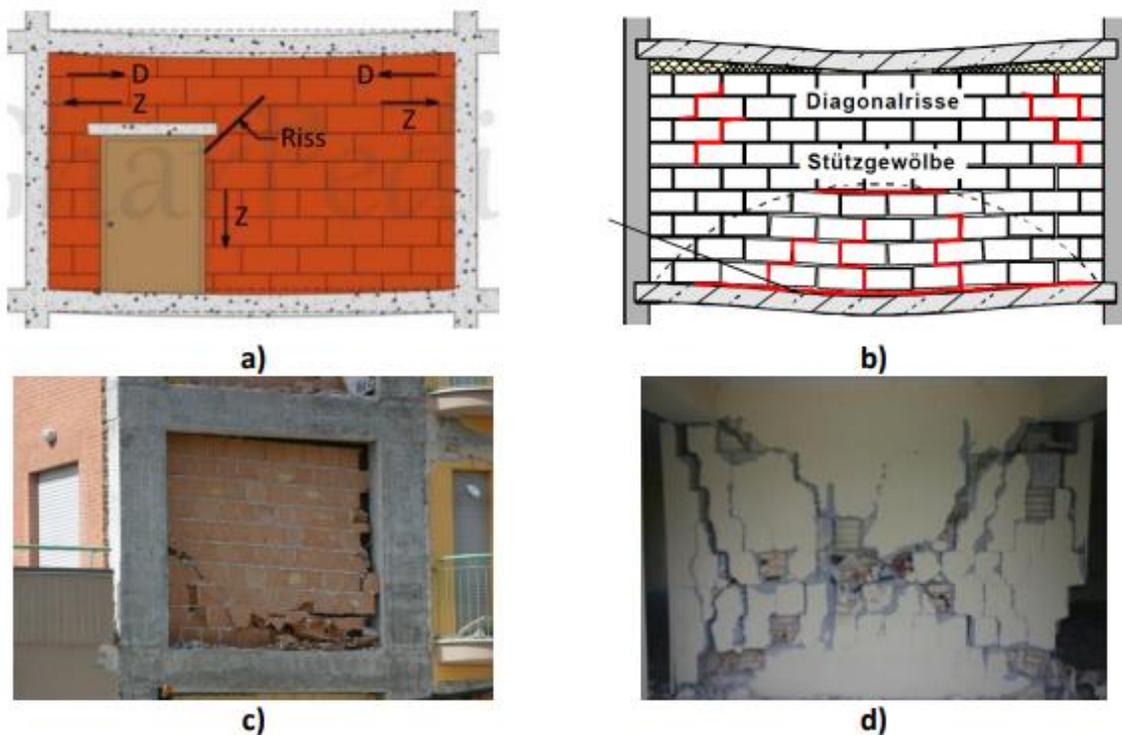


Abbildung 1: Risse durch Formänderungen: a) Ausfachung mit Öffnung, b) nichttragende Trennwand, Erdbebenschäden: c) Ausfachung, d) nicht tragende Trennwand.

Daraus resultierende typische Rissbilder sind in Abbildung 1 a) für eine Ausfachung mit Öffnung und in Abbildung 1 b) für eine nicht tragende Trennwand dargestellt. Die Wichtigkeit geeigneter verformungskompatibler Anschlüsse zeigt sich aber auch bei hohen einwirkenden Horizontallasten infolge von Wind oder Erdbeben. So traten in den Erdbebenserien in Norditalien zahlreiche Schäden an Ausfachungswänden Abbildung 1 c) und nicht tragenden Innenwänden Abbildung 1

d) auf. Hauptgrund für die aufgeführten Schäden sind kraftschlüssige Anschlüsse der nicht tragenden Mauerwerkswände an die Tragstruktur, die bei unplanmäßigen Verformungen im Gebrauchszustand oder hohen horizontalen Einwirkungen zu einer Beteiligung der Ausfachungen und Trennwände am Lastabtrag führen. Besonders kritisch bei der Mitwirkung der Wände im seismischen Lastfall sind die ungewollte Versteifung des Gebäudes und der Eintrag von Torsionswirkungen, die zu einem Gesamtversagen von Gebäuden führen können. Weiterhin zeigen beobachtete Schäden und Versuche, dass Ausfachungswände insbesondere unter kombinierten Beanspruchungen in- und senkrecht zur Ebene versagen.

Da die Schäden an nicht-strukturellen oder sekundären Elementen die häufigsten Schäden sind, die bei den vergangenen Erdbeben festgestellt wurden, besteht die Notwendigkeit einer neuen Lösung, die die nicht-strukturellen Elemente weniger anfällig für das Versagen während der Erdbeben macht. Dies gilt vor allem für Ausfachungen und Trennwände, deren Schäden hohe wirtschaftliche Verluste verursachen und vor allem eine Gefahr für Menschenleben darstellen können.

Bei der Entwicklung von Anschlüssen, die in der Lage sind, den Erdbebenlasten zu widerstehen, wurden bereits erste Fortschritte erzielt. Die entwickelten Anschlüsse sind jedoch entweder kostspielig oder praktisch nicht umsetzbar.

2 Zielsetzung

Mit dem Ziel, die oben genannten Nachteile der bestehenden Anschlüsse zu überwinden, zielt dieses Projekt darauf ab:

- eine Entkopplung auf der Basis von Simulationen so zu entwerfen, dass die Wand möglichst wenig beansprucht wird und gleichzeitig die senkrecht zur Wandebene wirkende Last sicher aufnehmen kann
- Sicherstellung der Praxistauglichkeit der entworfenen Entkopplung durch die Durchführung verschiedener Tests, die den realen Szenarien nachempfunden sind
- Einführung der entworfenen Entkopplung bei den Ziegelherstellern

3 Durchführung und Ergebnisse

Das gesetzte Forschungsziel erforderte einen hohen Aufwand an Untersuchungen, die durch die Beteiligung von zwei Forschungseinrichtungen dem Institut für Ziegelforschung Essen e.V. (IZF) und dem Center for Wind and Earthquake Engineering (CWE) erbracht worden sind. Zum einen wurden experimentelle Untersuchungen an einzelnen Ziegeln, die für Ausfachungen und Trennwände verwendet werden, nach den geltenden Normen durchgeführt, um die Abmessungen, den Prozentsatz des Lochanteils und die Druckfestigkeit der Ziegel zu bestimmen. Außerdem wurden Mauerwerkskörper aus beiden ausgewählten Ziegelarten getestet, um die Druckfestigkeit, das Elastizitätsmodul, die Biegezugfestigkeit (parallel und senkrecht zu den Lagerfugen) und die Anfangsscherfestigkeit des Mauerwerks zu bestimmen. Hierbei wurde sich für einen Außenwandziegel SX 10 mit einer Wanddicke von 300 mm und einem Innenwandziegel TS² mit einer Wanddicke von 115 mm entschieden. Neben den repräsentativen marktüblichen Hochlochziegeln wurde ein zulassungsgemäßer zugehöriger Dünnbettmörtel ausgewählt. Die ermittelten Materialparameter sind für die Klassifizierung des Mauerwerks notwendig. Darüber hinaus müssen die entsprechenden Festigkeiten bestimmt werden, da sie als Eingangsdaten für die entwickelten analytischen und numerischen Modelle dienen, die für die Simulation experimenteller Versuche an Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen, Trennwänden und weiterer parametrischer Studien verwendet werden.

Die Basismaterialien für die Entkopplung wurden sorgfältig ausgewählt. Das Unternehmen BSW (Regupol) mit Sitz in Bad Berleburg konnte für die Bereitstellung der Basismaterialien gewonnen werden. Nach Berücksichtigung verschiedener Materialparameter, wie z.B. Verformungsfähigkeit, Steifigkeitseigenschaften, Energiedissipation, Recyclingfähigkeit, Brandbeständigkeit, Schallschutzeigenschaften, Kosten und Verfügbarkeit, wurde ein Elastomerwerkstoff namens Regupol® als Basismaterial ausgewählt. Regupol® ist eine Kombination aus Gummigranulat und Polyurethan-Bindemittel. Darüber hinaus ist Regupol® weltweit als langlebiger und belastbarer Recyclingwerkstoff anerkannt, der in zahlreichen Bereichen des Bauwesens eingesetzt werden kann.

Um den Regupol-Typ für die Entkopplung von Mauerwerksausfachungen vom Stahlbetonrahmen auszuwählen, wurden statische und zyklische Druckversuche an verschiedenen Elastomermischungen durchgeführt. Die Prüfkörper hatten einen quadratischen Querschnitt von 100 x 100 mm und wurden mit einer Stahldruckplatte belastet. Die Verformungsgeschwindigkeit bei Druckversuchen betrug 0,4 mm/s. Die aus statischen und zyklischen Druckversuchen gewonnenen Spannungs-Dehnungs-Kurven Für die großmaßstäblichen Versuche an Stahlbetonrahmen mit entkoppelten Mauerwerksausfachungen wurden weichere Elastomermischungen (Regupol 450 mit einer Dicke von 50 mm) zwischen Stützen und Ausfachung und steifere Elastomermischungen (Regupol 800 mit einer Dicke von 15 mm) zwischen Balken und Ausfachung gewählt.

Abbildung 2 zeigt den Aufbau des entwickelten Entkopplungssystems, das bei den Versuchen an Stahlbetonrahmen mit entkoppelten Ausfachungen in Originalgröße verwendet wurde. Das Ent-

kopplungssystem besteht aus drei Streifen. Während des Einbaus werden die mittleren Elastomerstreifen am umgebenden Stahlbetonrahmen befestigt, während die äußeren Elastomere an der Ausfachung des Mauerwerks angebracht werden. Zum Verkleben wird Dünnbettmörtel verwendet. Die Streifen aus der weichen Elastomermischung Regupol 450 werden zwischen Stützen und Ausfachung eingesetzt, während die steiferen Streifen aus der Elastomermischung Regupol 800 oben und unten auf der Mauerwerksausfachung verwendet werden. Auf diese Weise absorbieren die seitlichen Elastomere die Verformung in der Ebene (IP), während die steifen Elastomere hauptsächlich eingesetzt verwendet werden, um die Mauerwerksausfachung gegen Belastungen senkrecht zur Ebene (OOP) zu schützen. Zusätzlich sind Gleitflächen an den oberen Elastomeren angebracht, um das Gleiten zwischen dem oberen Balken und der Mauerwerksausfachung zu ermöglichen.

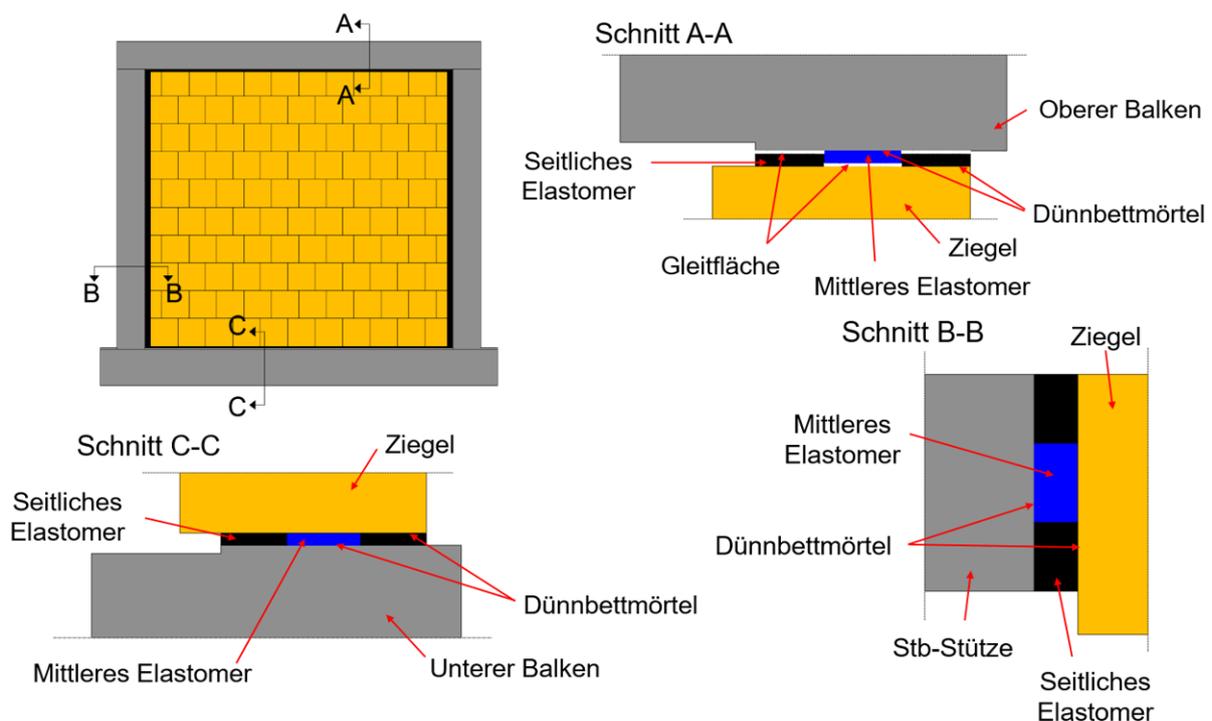
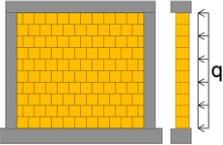
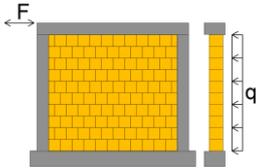
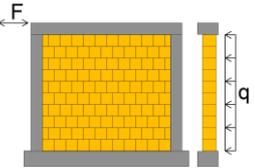
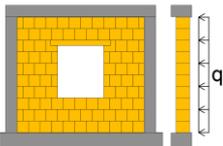
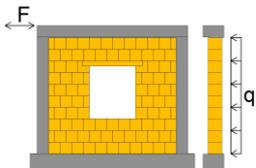
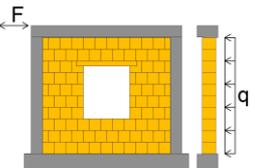
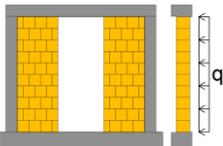
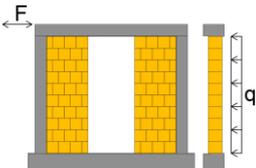
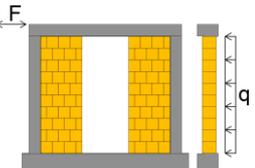


Abbildung 2: Details des entwickelten Systems zur Entkopplung von Mauerwerksausfachungen von Stahlbetonrahmen

Im Rahmen des Projekts wurden experimentelle Versuche an Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen im Originalmaßstab durchgeführt. Die Versuchsreihe war in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wurden experimentelle Versuche an Stahlbetonrahmen mit traditionellen Ausfachungen durchgeführt. Im zweiten Teil der Versuchsreihe wurden Stahlbetonrahmen mit entkoppelten Ausfachungen geprüft. In Tabelle 1 sind die Probekörper und Belastungsarten zusammengefasst. Jede Ausfachungskonfiguration wurde auf traditionelle Weise (T-traditionell; mit Mörtelverbindungen zum Rahmen) und mit dem Entkopplungssystem (D-decoupled/entkoppelt)

gebaut. Die Probekörper sind Belastungen senkrecht zur Ebene (OOP), sequentiellen Belastungen in- und senkrecht zur Ebene (IP-OOP) sowie gleichzeitigen Belastungen in- und senkrecht zur Ebene (OOP+IP) ausgesetzt. Dadurch konnte ein direkter Vergleich des Verhaltens der Stahlbetonrahmen mit traditionellen Ausfachungen und Stahlbetonrahmen mit entkoppelten Ausfachungen durchgeführt werden.

Tabelle 1: Testprogramm mit Öffnungsanordnung und Belastungsarten

<p>T1/D1: Stahlbetonrahmen mit Ausfachung ohne Öffnungen OOP</p>	<p>T2/D2: Stahlbetonrahmen mit Ausfachung ohne Öffnungen IP – OOP</p>	<p>T3/D3: Stahlbetonrahmen mit Ausfachung ohne Öffnungen OOP + IP</p>
		
<p>T4/D4: Stahlbetonrahmen mit Ausfachung mit Fensteröffnung OOP</p>	<p>T5/D5: Stahlbetonrahmen mit Ausfachung mit Fensteröffnung IP – OOP - IP</p>	<p>T6/D6: Stahlbetonrahmen mit Ausfachung mit Fensteröffnung OOP + IP</p>
		
<p>T7/D7: Stahlbetonrahmen mit Ausfachung mit Türöffnung OOP</p>	<p>T8/D8: Stahlbetonrahmen mit Ausfachung mit Türöffnung IP – OOP - IP</p>	<p>T9/D9: Stahlbetonrahmen mit Ausfachung mit Türöffnung OOP + IP</p>
		

Bei der Prüfvorrichtung in Abbildung 3 werden Kraftmesszellen, Verschiebungs-Aufnehmer (LVDTs), Luftdrucksensoren und Öldruck-Sensoren als Stell- und Messeinrichtungen verwendet, wobei das gesamte Versuchsschiebungsfeld an der Stirnseite der Wand durch optische Messungen (GOM System) begleitet wird.

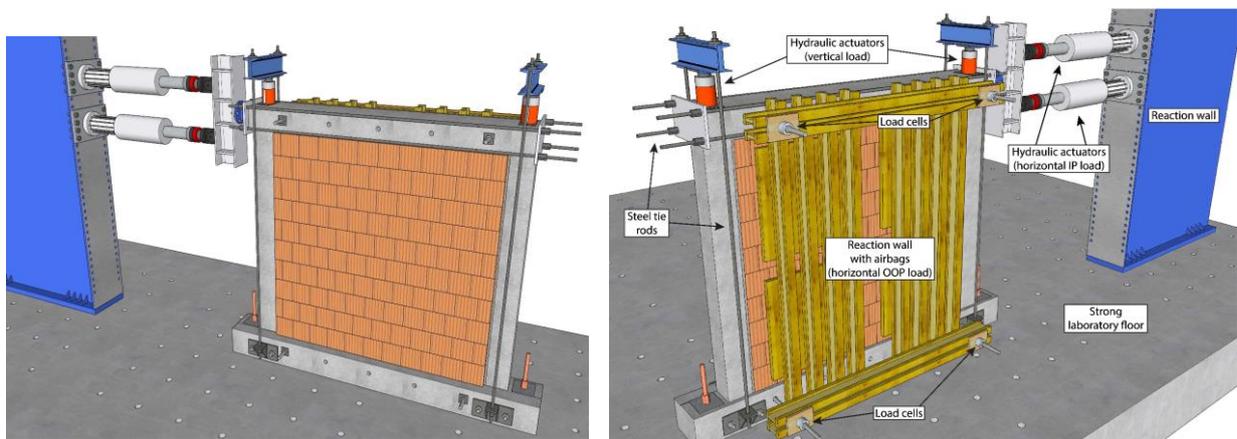


Abbildung 3: Vorderansicht des Prüfkörpers in der Prüfvorrichtung (links); Rückansicht (rechts)

Besonders wichtig ist die Betrachtung der kombinierten Einwirkungen in und senkrecht zur Ebene, da es an Forschungsergebnissen zu diesem Thema mangelt, obwohl sich die Interaktion von Einwirkungen in und senkrecht zur Ebene bei Erdbebenereignissen nachteilig auf Mauerwerksausfachungen auswirkt.

Im ersten Teil der Versuchskampagne wurden neun experimentelle Versuche an Stahlbetonrahmen mit traditionellen Ausfachungen durchgeführt. Die Versuchsergebnisse weisen auf das schlechtere seismische Verhalten traditioneller Mauerwerksausfachungen hin, insbesondere, wenn sie kombinierten Belastungen in und senkrecht zur Ebene ausgesetzt sind. Darüber hinaus wird in der Studie die nachteilige Wirkung von Öffnungen erkannt. Die erzielten experimentellen Ergebnisse und Erkenntnisse stellen einen wertvollen Beitrag zum gesamten Forschungsgebiet dar.

Es wurde festgestellt, dass die kombinierte Beanspruchung in der Ebene und senkrecht zur Ebene heraus einen stärkeren negativen Einfluss auf die perforierten Ausfachungen hatte als auf den vollständig ausgefüllten Stahlbetonrahmen. Ein stufenförmiger Riss entlang der Diagonale der Pfeiler im Probestück, wie beispielsweise in Abbildung 4, als direkte Gegenüberstellung einer traditionell mit einer entkoppelten Mauerwerksausfachung dargestellt, verursachte die Ablösung von Ausfachungsteilen neben der Fensteröffnung. Bei größeren Verschiebungen folgten diese Teile nicht der Verformung der Mauerwerksausfachung. Außerdem wurde am rechten Pfeiler der Wand ein lokaler Anstieg der Verschiebungen senkrecht zur Ebene festgestellt. Obwohl die Ausfachung durch die in der Ebene wirkende Belastungskomponente schwer geschädigt wurde, reagierte es nicht global auf die aus der Ebene wirkende Belastungskomponente, sondern nur lokal, an den freistehenden Teilen der Pfeiler um die Öffnung.



a)

b)

Abbildung 4: a) Traditionelle Mauerwerksausfachung (Drift 1,6 %) und b) entkoppelte Mauerwerksausfachung (Drift 1,6 %)

Im zweiten Teil der Versuchskampagne, wie in der vorangehenden Abbildung 4b und nachfolgend in Abbildung 5b dargestellt, wurde das Verhalten von Stahlbetonrahmen mit entkoppelten Mauerwerksausfachungen untersucht. Es wurden die gleichen Ausfachungskonfigurationen und ähnliche Belastungsprotokolle wie im ersten Teil der Versuchskampagne verwendet, um einen direkten Vergleich des Verhaltens von Stahlbetonrahmen mit traditionellen und entkoppelten Ausfachungen zu ermöglichen. Die Ergebnisse der experimentellen Versuche an Stahlbetonrahmen mit entkoppelten Ausfachungen bestätigten die Wirksamkeit des Entkopplungssystems. Es zeigte sich deutlich, dass das Entkopplungssystem die Einwirkung von Mauerwerksausfachungen auf sehr hohe Stockwerksverschiebungen in der Ebene verzögert und gleichzeitig perfekte Randbedingungen für Belastungen senkrecht zur Ebene bietet.

Nachfolgender Versuch in Abbildung 5a wurde beispielweise an einer traditionellen Ausfachung mit zentraler Türöffnung über die gesamte Höhe durchgeführt, während in Versuch 5b die gleiche Ausfachungskonfiguration mit dem Entkopplungssystem untersucht wurde. Im Versuch links begann die Beschädigung von Ziegeln bereits bei einer relativen Stockwerksverschiebung in der Ebene von 0,4 %, und die Ausfachung versagte vollständig bei 1,6%. Auf der anderen Seite wurde im Versuch Abbildung 5b eine vollständige Entkopplung der Mauerwerksausfachung vom umgebenden Stahlbetonrahmen erreicht. Die Mauerwerksausfachung wurde bei den aufgetragenen Verschiebungen in der Ebene nicht aktiviert und erreichte relative Stockwerksverschiebungswerte von 3,0 %, ohne dass eine Beschädigung festgestellt werden konnte.



Abbildung 5: a) Traditionelles System bei 1,6 % Drift und b) entkoppeltes System bei 3,0 % Drift

Das Verhalten von Stahlbetonrahmen mit traditionellen und entkoppelten Ausfachungen wurde außerdem mit Hilfe numerischer Simulationen untersucht. In der parametrischen Studie wurden verschiedene Ausfachungskonfigurationen berücksichtigt. Die Ergebnisse der parametrischen Studie zeigen, dass die Anwendung des Entkopplungssystems Schäden in verschiedenen Ausfachungskonfigurationen verhindern kann. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass das Verhalten von Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen dem Verhalten des bloßen Rahmens ähnlicher ist, was die Bemessung von Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen erheblich vereinfachen kann. Außerdem wurden experimentelle Tests an traditionell gebauten Trennwänden durchgeführt. Die Ergebnisse des Tests an einer traditionellen Trennwand senkrecht zur Ebene wurden zur Validierung des entwickelten numerischen Modells verwendet. Anschließend wurde in numerischen Simulationen eine parametrische Studie durchgeführt, in der verschiedene Stufen der Deckendurchbiegung berücksichtigt wurden, und die Auswirkungen der Deckendurchbiegung auf das OOP-Verhalten von Trennwänden mit und ohne eingebautes Entkopplungssystem untersucht. Die Ergebnisse weisen eindeutig auf eine erhebliche Verbesserung des Verhaltens von Trennwänden hin, wenn das Entkopplungssystem eingebaut ist.

Die im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse bestätigen eindeutig die Funktionalität des entwickelten Systems für Mauerwerksausfachungen und Trennwände. Darüber hinaus ist der Einbau des Entkopplungssystems einfach und praktisch, was für die Anwendung in der Praxis von größter Bedeutung ist.

4 Ausblick

In Zukunft sollte die umfangreiche Versuchskampagne an Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen durch Schwingungstischversuche an dreidimensionalen Probekörpern in Originalgröße erweitert werden. Auf diese Weise könnten die Vorteile des Entkopplungssystems für die gesamte ausgefachte Rahmenstruktur unter realen Erdbebenbedingungen nachgewiesen werden.

Darüber hinaus konnte der experimentelle Versuchsaufbau für die Prüfung von Trennwänden weiter verbessert werden, so dass die Auswirkungen der Deckendurchbiegung auf das OOP-Verhalten der Trennwand an einem Probekörper untersucht werden können.

Außerdem könnten Softwarepakete entwickelt werden, die den Entwurf des Entkopplungssystems für die gewünschte Mauerwerksausfachung oder Trennwand durchführen. Die Softwarepakete sollten benutzerfreundlich gestaltet sein, so dass die Abmessungen und Eigenschaften des Entkopplungssystems für die gewählte Mauerwerksausfachung oder Trennwand schnell und einfach ermittelt werden können.

Schließlich müssen sowohl für Trennwände als auch für Ausfachungen die Feuerbeständigkeit und der Schallschutz weiter untersucht werden, da diese Eigenschaften auch für die praktische Anwendung von großer Bedeutung sind.

Das IGF-Vorhaben 20912 N der Forschungsvereinigung Ziegelindustrie e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Es handelt sich um ein Forschungsprojekt der Forschungsgemeinschaft der Ziegelindustrie e.V. (FGZ), das vom Institut für Ziegelforschung Essen e.V. (IZF) und von dem Center for Wind and Earthquake Engineering (CWE) durchgeführt wurde. (Schlussbericht vom 30.04.2023)