

ZUSAMMENFASSUNG ZUR PROMOTIONSSCHRIFT

**Qualität der Modellierung von Interaktionsphänomenen
zwischen Stahlbetonrahmen und
Mauerwerksausfachungen unter horizontaler zyklischer
Belastung**

Model quality of interaction phenomena between RC frame and
masonry infills under horizontal cyclic loading

vorgelegt von

Muhammad Hisham Al Hanoun

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. habil. C. Könke

Dr.-Ing. J. Schwarz

Status des Doktoranden: Intern

Weimar, Juni 2019

Problemstellung

1. Mehrgeschossige Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen sind eine weltweit dominante Bauweise für Wohn- und Geschäftsbauten sowie öffentliche Gebäude, wobei die Mauerwerksausfachungen eine oftmals unterschätzte Rolle im Trag- und Antwortverhalten der einzelnen primären und sekundären Tragelemente sowie der Gesamtkonstruktion im Falle von schädigenden Erdbebenintensitäten einnehmen.
2. Beobachtungen an infolge Erdbeben geschädigter und eingestürzter Stahlbetonrahmengebäude zeigen, dass der jeweilige Schadensgrad und das Schadensbild wesentlich durch das Verhalten und die Qualität der Mauerwerksausfachung geprägt wird.
3. Im Falle eines Erdbebens unterliegen Mauerwerksausfachungen einem dreidimensionalen Beschleunigungsfeld und werden somit gleichzeitig in der Ebene (*In-Plane* – IP) und senkrecht zur Ebene (*Out-of-Plane* – OoP) belastet. In Abhängigkeit von der Einwirkungsrichtung und den initiierten Beanspruchungen können die beobachteten Schäden als IP-, OoP-Versagen oder als eine Kombination aus beiden klassifiziert werden.
4. In der Literatur werden zur Abbildung des Verhaltens von Mauerwerksausfachungen in Stahlbetonrahmen verschiedene Makromodelle vorgeschlagen. Die konzeptionelle Vielfalt kann grundsätzlich in den Gruppen der 2D- und 3D-Makromodelle systematisiert werden. 2D-Makromodelle ermöglichen die Approximation des IP-Verhaltens einschließlich der Interaktion mit dem Rahmen. 3D-Makromodelle erfassen darüber hinaus auch das Verhalten senkrecht zur Ebene sowie die Interaktion zwischen den IP und OoP Komponenten.
5. Erfahrungen aus aktuellen Erdbeben verdeutlichen, dass Mauerwerksausfachungen in der Schadensprognose und den verhaltensbasierten Bemessungskonzepten berücksichtigt werden müssen. Für den Standardfall mehrgeschossiger Rahmentragwerke sind vereinfachte Modelle mit einer hohen Abbildegenauigkeit erforderlich.

Zielsetzung der Arbeit

6. Das Ziel ist es, anhand der in der Arbeit aufbereiteten Modelle und der numerischen Reinterpretation der in unterschiedlichem Maßstab vorhandenen Versuche (wie z.B. des FRAMA-Projektes) ein aufwandsreduziertes 3D-Makromodell vorzuschlagen, welches sowohl das IP- und OoP-Verhalten unter Berücksichtigung der Interaktionsbeziehungen zwischen Primär- (Stahlbetonrahmen) und Sekundärstruktur (Mauerwerksausfachungen) realitätsnah simuliert.
7. Der Nachweis der Leistungsfähigkeit ist auf der Grundlage einer Modellbewertung zu führen, die neben der Abbildbarkeit der Interaktionsphänomene auch die zuverlässige Wiedergabe der durch den zyklisch-horizontalen Lasteintrag generierten Reaktionskenngrößen ermöglicht. Verfügbare experimentelle Untersuchungen sind zur Validierung aufzubereiten sowie lokale und globale Kriterien für die Modellbewertung herauszuarbeiten.
8. Ein weiterer Schwerpunkt besteht in der Klassifikation von Stahlbetonrahmenkonstruktionen mit Mauerwerksausfachungen sowie der Einführung eines normentauglichen Nachweiskonzeptes, wobei insbesondere die Materialeigenschaften der primären und sekundären Tragelemente sowie daraus resultierende typische Schadensmuster zugrunde zu legen sind.

Stand der Wissenschaft

9. Für die Schadensprognose von Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen unter Berücksichtigung des Verhaltens in (IP) und senkrecht (OoP) zur Ebene liegen eine Vielzahl von mikroskaligen und makroskaligen Modellen unterschiedlicher Komplexität vor.

10. Mikroskalige – meist 2D oder 3D Finite Elemente – Modelle können das lokale Verhalten, typische Rissmuster, Last-Verformungskurven und Schädigungsmechanismen in vielen Fällen und unter Kenntnis umfanglicher Kennwerte mit einer für die praktische Anwendung ausreichenden Genauigkeit abbilden. Einer breiten Anwendung stehen jedoch der inhärente, hohe Rechenaufwand und die Vielzahl der notwendigen, oft erst nach Ereigniseintritt quantifizierbaren Eingabeparameter entgegen.
11. Makromodelle, welche typischerweise auf dem Ansatz bi-diagonaler Ersatzstreben beruhen, gewährleisten das erreichbare Optimum zwischen Genauigkeit und Modellierungsaufwand, und werden dahingehend als robust bewertet.
12. Für die Bewertung des Verhaltens von Mauerwerksausfachungen in der Ebene (IP) liegen in der Literatur umfangliche numerische und experimentelle Studien in verschiedenen Maßstäben vor. Hingegen stehen experimentelle Untersuchungen zum Verhalten senkrecht zur Ebene (OoP) und zur Interaktion mit der Primärstruktur aufgrund der Komplexität des notwendigen Versuchsaufbaus noch nicht in dem Umfang zur Verfügung, um eine Generalisierung für die vorhandene Breite von Ausführungsrealisationen in der Bestandsbebauung vornehmen zu können. Erfahrungswerte aus Erdbeben bieten einen Anhalt, wobei entsprechende Datenbanken noch nicht angeboten werden.

Eingesetzte Methoden und innovative Ansätze

13. Für die Entwicklung eines aufwandreduzierten 3D-Makromodells werden die publizierten Modelle aufbereitet; Unterschiede in den Modellparametern (Anzahl und Typ der Elemente, Erfassung der Interaktionsphänomene) werden bewertet und auf dieser Grundlage Modellierungsstrategien abgeleitet.
14. Im Ergebnis kann das Einstreben-Modell, welches die unterschiedlichen Druck- und Zugeigenschaften der Mauerwerksausfachung in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung mit geringem Fehler abbilden kann, als leistungsfähig herausgearbeitet werden. Ein dem Faserquerschnitt zugewiesenes „Pinching“ Materialmodell erfasst das zyklische Antwortverhalten in (IP) und senkrecht (OoP) zur Ebene.
15. Zur Ableitung von verlässlichen Modellparametern und zur Validierung sowie anschließenden Charakterisierung der Modelle werden die in verschiedenen Skalen verfügbaren experimentellen Untersuchungen von ein- und mehrgeschossigen Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen in einer Datenbank zusammengestellt.
16. Die Adaption von Modellparametern, Validierung und Diskussion zu den Modellqualitäten erfolgt vornehmlich an den Einfeld-Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen. Der Nachweis der Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Modells wird mit der Nachrechnung gut dokumentierter mehrgeschossiger Laborversuche anhand der Abbildbarkeit der Interaktionsphänomene und der Abbildgenauigkeit der Versuchsergebnisse geführt. Im Detail nachvollzogen werden der Versuch von Negro *et al.* (1996), Maßstab: 1:1, zur Validierung des Verhaltens in der Ebene und der Ergebnisse des FRAMA-Projektes 2014, Maßstab: 1:2.5, zur Überprüfung des Verhaltens in und senkrecht zur Ebene herangezogen. Im Rahmen des FRAMA-Projektes hat der Bearbeiter zudem am internationalen Blindtest-Wettbewerb teilgenommen.
17. Über die analytische Schadensprognose an verschiedenen konfigurierten Stahlbetonrahmen mit Mauerwerksausfachungen wird die einwirkungs- und untergrundabhängige Schädigung mit Schadensmustern und Versagensformen verbunden. Variiert werden neben der Anzahl der Geschosse (3, 5 und 7) und Anordnung der Ausfachungen auch die Erdbebenzeitverläufe zur Erfassung der untergrundspezifischen Einwirkungsmerkmale.

18. Für die Visualisierung der Schädigung werden die bauteilbezogenen Kriterien der EMS-98 übernommen und für die Beschreibung des Verhaltens von Mauerwerksausfachungen in und senkrecht zur Ebene weiterentwickelt.
19. Die Interpretation der Ergebnisse basiert auf zyklischen Verformungsgrößen, für die Grenzparameter vorgegeben werden. Dies ermöglicht die Identifikation der Reaktionskomponente, bei der in Verfolgung der sequentiellen Schadensprognose das primäre Versagen zu erwarten ist.
20. Die Beurteilung des Gebäudeverhaltens basiert auf klar definierten Schadensgraden und Antwortgrößen, die sich sowohl im globalen Verhalten als auch in ihrem lokalen Auftreten ableiten und an realen Schadensfällen spiegeln lassen. Darüber hinaus wird der Einfluss der Materialeigenschaften der primären und sekundären Tragelemente für die schnelle Prognose des zu erwartenden Schadensmusters herausgearbeitet.

Wesentliche Ergebnisse

21. Eine umfangreiche Datenbank von Versuchen an Stahlbetonrahmensystemen mit Mauerwerksausfachungen ohne Öffnung(en) wird vorgelegt und als Grundlage für die Modellkalibrierung sowie –verifizierung bereitgestellt.
22. Auf Grundlage der Datensätze kann eine Formel zur Bestimmung der maximalen Tragkraft für Mauerwerksausfachungen in Abhängigkeit von Länge, Dicke und Schubfestigkeit abgeleitet werden.
23. Die empirischen Ersatzstreben-Modelle zur Abbildung des Verhaltens von Mauerwerksausfachungen werden implementiert und anhand der Nachrechnung von Versuchen im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen bewertet.
24. Mit dem in dieser Promotionsschrift vorgestellten Einstreben-Modell wird ein wesentlicher Beitrag für die normentaugliche Modellierung und Analyse von Rahmen mit Mauerwerksausfachungen geleistet, um das Verhalten in und senkrecht zur Ebene adäquat zu erfassen und in der Bewertung von Gebäuden unter seismischen Einwirkungen zu berücksichtigen.
25. Die Re-interpretation verschiedener Versuche bestätigt die Anwendbarkeit des Modells:
 - Das Verhalten eines ausgefachten Rahmens in der Ebene (IP) kann am Maßstab der Reaktionskenngrößen und des Schadensbildes realitätsnah abgebildet werden.
 - Die numerische Simulation (für 10 Intensitätsstufen) liefert am Maßstab der experimentellen Untersuchungen (zur Schädigung der Ausfachungen IP und OoP) und im Vergleich zu den Nachrechnungen anderer Forschergruppen Ergebnisse mit einer fehlerminimierten Prognosequalität.
26. Die in den Anlagen bereitgestellten Parameterstudien verdeutlichen den Einfluss der Anzahl der Geschosse und Anordnung der Ausfachungen auf das prognostizierte Schadensverhalten in Abhängigkeit vom Frequenzgehalt der seismischen Einwirkung.
27. Die Klassifikation der Primär- und Sekundärstruktur auf Grundlage der Materialeigenschaften („*weak*“, „*strong*“) bestätigt den Einfluss des Einwirkungsniveaus auf das zu erwartende Schadensbild. Es kann gezeigt werden, dass „*strong*“-Rahmen gemischt mit verschiedenen Ausfachungstopologien über alle Intensitätsniveaus eine gleichmäßig verteilte Schadensverteilung zeigen. „*Weak*“-Rahmen profitieren hingegen von der zusätzlichen Tragkraft der Ausfachung bis zu einem Einwirkungsniveau von ca. 0.2g.
28. Auf Grundlage der durchgeführten Parameterstudien und eingeführten Klassifikation kann gezeigt werden, wie die Berücksichtigung von Mauerwerksausfachungen in der Bewertung von Stahlbetonrahmen und welche normative Änderungen abzuleiten sind.