

Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Bemessung des Außenwand-Decken-Knotens

<https://doi.org/10.14459/2023.1724792.mbs27.05>

Jonathan Schmalz, Detleff Schermer, Oliver Fischer



Jonathan Schmalz, M.Eng.

2014 B.Eng. Bauingenieurwesen; OTH-Regensburg
2017 M.Eng. Bauingenieurwesen; OTH-Regensburg
seit 05.2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Labor
für Konstruktiven Ingenieurbau, OTH-Regensburg



Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer

1991-1996 Studium Bauingenieurwesen, TUM
1996-1999 Dyckerhoff & Widmann AG, München
1999-2004 Wissenschaftlicher Assistent am
Lehrstuhl für Massivbau der TUM (Prof. Zilch),
Promotion 2004
seit 2004 Eigenes Büro für Tragwerksplanung
seit 2010 Prüflingenieur für Massivbau
seit 2014 Professor für Bauerwerke des Massivbaus
und Baustatik an der Ostbayerischen Technischen
Hochschule Regensburg



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer

Studium Bauingenieurwesen, TUM, Diplom 1988
1989-1995 Wissenschaftlicher Assistent, Universität der Bundeswehr München, Promotion 1994
1996-2009 Verschiedene Fach- und Führungspositionen in der Bauindustrie im In- und Ausland
2007 Diplomwirtschaftsingenieur, Univ. Hagen
seit 10.2009 Ordinarius für Massivbau, TUM
seit 2011 Prüflingenieur und EBA-Prüfer

Nach gegenwärtigem Wissensstand ist zu konstatieren, dass hinsichtlich der Schnittgrößenermittlung unter Berücksichtigung nichtlinearer Effekte sowie der un stetigen Spannungsverteilung auf Querschnittsebene keine zutreffenden Berechnungsmodelle und experimentellen Prüfvorgaben existieren, welche die Besonderheiten am Außenwand-Decken-Knoten bei monolithischem Planziegelmauerwerk adäquat widerspiegeln. Vor dem Hintergrund, dass die Knotenmomente mit der vereinfachten Rahmenberechnung nach EN 1996-1-1:2022 Anhang C.3 basierend auf der Elastizitätstheorie ermittelt werden, liegt der Fokus der nachfolgenden Untersuchung vor allem auf der Ermittlung und Quantifizierung der Querschnittstragfähigkeit sowie von nichtlinearen Einflüssen auf die Knotenmomente am Wandkopf und -fuß.

According to the current state of knowledge, it has to be noted that with regard to the determination of internal forces under consideration of nonlinear effects as well as the discontinuous stress distribution on the cross-section level, no adequate calculation models and experimental test standards exist that adequately reflect the special aspects at the exterior wall-floor joint of monolithic clay unit masonry. Against the background that the nodal moments are determined with the joint analysis method according to EN 1996-1-1:2022 Annex C.3 based on elastic material behaviour, the focus is mainly on the determination and quantification of the load-bearing capacity of the cross-section as well as the nonlinear effects on the nodal moments at the top and bottom of the wall.

Einleitung

Unter Abwägung bauphysikalischer und tragfähigkeitsbezogener Aspekte wird für die konstruktive Ausbildung des Außenwand-Decken-Knotens von monolithischem Ziegelmauerwerk die in Abb. 1 dargestellte Ausführungsvariante vorgeschlagen [1].

Aus statischen Gesichtspunkten geht mit der stirnseitigen Wärmedämmung effektiv eine rechnerische Querschnittsreduzierung einher. Die Außenwand erfährt auf diese Weise sowohl am Wandkopf als auch -fuß eine planmäßige exzentrische Teilflächenbelastung. Zusätzlich wird die lastabtragende Querschnittsfläche durch die Deckenrotation determiniert, wobei das Kontaktverhalten zwischen Decke und Außenwand als hochgradig nichtlinear einzustufen ist [2]. Aus der Gesamtbetrachtung resultiert demnach eine Interaktion zwischen der einwirkenden Wandnormalkraft, der Deckenrotation bzw. dem Deckeneinspannmoment und den dadurch bedingten Spannungskonzentrationen am Wandkopf- und -fußpunkt.

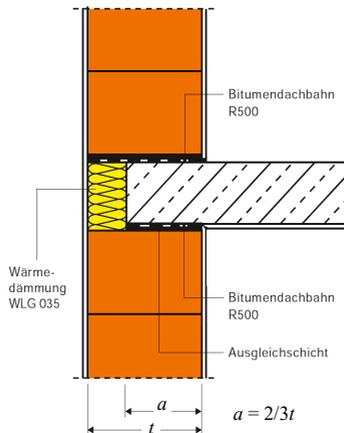


Abb. 1: Vorschlag für die konstruktive Ausbildung des Außenwand-Decken-Knotens von monolithischem Ziegelmauerwerk, aus [1]

Dementgegen bildet die normative Grundlage zur Berechnung der Schnittgrößen am Außenwand-Decken-Knoten eine vereinfachte linear-elastische Rahmenberechnung nach Anhang C.3 von EN 1996-1-1:2022 in Anlehnung an CROSS-KANI. Die Knotenmomente werden demnach an einem

Rahmenauschnitt mit biegesteifer Knotenausbildung ohne Beachtung der einwirkenden Wandnormalkraft ermittelt. Die Berücksichtigung des nichtlinearen Kontaktverhaltens erfolgt durch eine vereinfachte pauschale Abminderung der entsprechenden Knotenmomente in Abhängigkeit der Steifigkeitsverhältnisse des Außenwand-Decken-Knotens. Inwiefern dadurch die nichtlinearen Effekte auch bei monolithischem Planziegelmauerwerk abgebildet werden, ist aufgrund der stetig weiterentwickelten Produkte fraglich.

Zielsetzung der Arbeit ist es, die bei monolithischem Planziegelmauerwerk auftretenden Beanspruchungssituationen am Außenwand-Decken-Knoten realitätsnah zu untersuchen sowie die daraus resultierenden Besonderheiten zu charakterisieren.

Experimentelle und analytische Untersuchungen an Wandprüfkörpern

Aktuell werden im Zuge des Zulassungsverfahrens bei Planhochlochziegeln aufgrund mangels genauerer Erkenntnisse stellenweise sog. doppelt-exzentrische Druckversuche an geschosshohen Wandbauteilen durchgeführt. Mit diesem Prüfverfahren soll nach [3] die Beanspruchungssituation von Mauerwerkswänden unter stark außermittiger Beanspruchung, welche bei weitgespannten und biegeweichen Decken auftreten können, widergespiegelt werden. Demzufolge ist die Last am Wandkopf und -fuß mit einer entgegengesetzten bezogenen Lastausmitten von $e/t = 1/6$ einzuleiten.

In [4] wurde hierfür eine umfangreiche Datenbasis vorhandener zentrischer und doppelt-exzentrischer Druckversuche erstellt und ausgewertet. Um dabei auch die produktabhängigen Besonderheiten der Planhochlochziegel – bedingt durch verschiedene Lochbilder – zu erfassen, beinhaltet die Datenbasis sowohl Planhochlochziegel mit Kleinlochung (PHLz-Kl) als auch Großkammerlochung (PHLz-Gk). In Abb. 2, links sind hierzu mit Kennzeichnung der Streubreite die zentrischen Druckversuche f_m im direkten Vergleich zum zugehörigen doppel-exzentrischen Druckversuch $f_{m,de}$ als Mittelwerte dargestellt. Mit einer mittleren Reduktion der Tragfähigkeit von 41 % werden die durch die doppel-exzentrische Lasteinleitung einhergehenden Effekte offensichtlich.

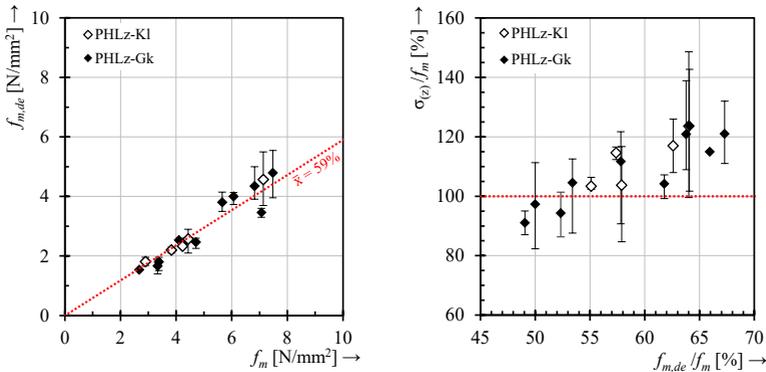


Abb. 2: Vergleich der zentrischen f_m und doppelt-exzentrischen $f_{m,de}$ Druckversuche (links). Vergleich der Randspannungsverhältnisse $\sigma_{(z)}/f_m$ zum doppelt-exzentrischen/zentrischen Verhältniswert $f_{m,de}/f_m$ (rechts), aus [4]

Vergleicht man hingegen die maximalen Randspannungen $\sigma_{(z)}$ unmittelbar im Lasteinleitungsbereich bei zentrischer und exzentrischer Beanspruchung $\sigma_{(z)}/f_m$, können teilweise erhebliche Spannungsumlagerungen festgestellt werden (vgl. Abb. 2, rechts). Hierfür liegt die Annahme zugrunde, dass die exzentrische Randspannung $\sigma_{(z)}$ auf die maximale Spannung bei zentrischer Beanspruchung limitiert ist. Demzufolge werden im Mittel die zentrischen Randspannungen im doppelt-exzentrischen Druckversuch bei Planhochlochziegeln mit Kleinlochung um 113 % bzw. bei Großkammerziegeln um 106 % überschritten.

Des Weiteren ist festzuhalten, dass der doppelt-exzentrische Wanddruckversuch die Beanspruchungssituation bei Außenwänden mit teilaufgelagerten Decken nur unzureichend widerspiegelt. Dies betrifft insbesondere die aus der Teilauflagerung am Wandfußquerschnitt resultierende Unstetigkeit im Spannungs- und Dehnungszustand.

Aus diesem Grund wurden ergänzende Teilflächenbelastungen an halbgeschosshohe Wandprüfkörper (sog. RILEM-Prüfkörper) durchgeführt, welche die Besonderheiten bei teilaufgelagerten Decken berücksichtigen sollen (siehe Abb. 3).

Die experimentellen Versuchsergebnisse sind in Abb. 4 getrennt nach Brutto- und Nettoquerschnittsebene dargestellt. Dabei werden die tatsächlichen Querschnittstragfähigkeiten mit den rechnerischen Tragfähigkeiten auf Basis der einaxialen Spannungs-Dehnungs-Beziehung N_R-M_R bzw.

ΦN_R - ΦM_R sowie dem linear-elastischen (bezogener Ursprungsmodul $k_0 = 1$), quasi-duktilen gemäß einer Parabel 2. Ordnung ($k_0 = 2$) und starrplastischen ($k_0 \rightarrow \infty$) Materialverhalten gegenübergestellt.

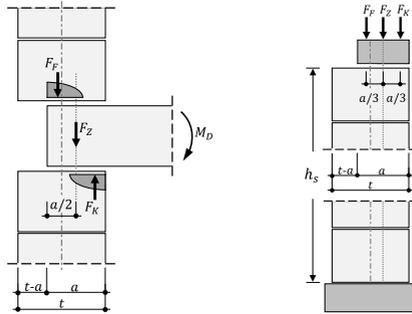


Abb. 3: Belastungssituationen am Außenwand-Decken-Knoten infolge teilaufliegender Decke und daraus abgeleitete Teilflächenbelastungen

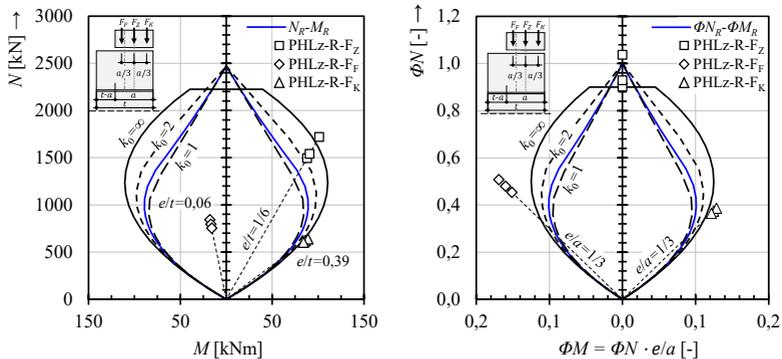


Abb. 4: Vergleich verschiedener Grenzlinsen der Querschnittstragfähigkeit mit den experimentellen Versuchsergebnissen (links: Bruttoquerschnittsebene mit $t =$ Wanddicke, rechts: Nettoquerschnittsebene mit $a =$ Auflagertiefe)

Demnach ergeben sich auf Nettoquerschnittsebene bei zentrischer Beanspruchung ($e/a = 0$) im Vergleich zum Spannungsblock ΦN_{pl} unter Berücksichtigung der normativen Mindestausmitte nach EN 1996-1-1:2022 von $e/a = 0,05$ eine um 6 % höhere Querschnittstragfähigkeit. Auch bei den exzentrischen Teilflächenbelastungen ist festzustellen, dass unabhängig

der Beanspruchungssituation höhere Querschnittstragfähigkeiten gegenüber der Tragfähigkeit auf Basis des Spannungsblocks ΦN_{pl} erreicht werden.

Versuche am Gesamtsystem des Außenwand-Decken-Knotens

Ziel der experimentellen Untersuchungen am Außenwand-Decken-Knoten war die Erfassung der Interaktion zwischen einwirkender Wandnormalkraft und der sich einstellenden Deckenrotation infolge definierter Deckeneinspannmomente. Im Fokus stand dabei der Einfluss des nichtlinearen Systemverhaltens bei unterschiedlichen Normalkraft-Momenten-Kombinationen bedingt durch das Klaffen der Lagerfugen als auch der Kontaktzone zwischen Decke und Mauerwerk.

Für die experimentelle Untersuchung am Gesamtsystem des Außenwand-Decken-Knotens – bestehend aus zwei halbgeschosshohen Wandprüfkörpern ($h = 1,25\text{m}$) – wurde aus eigenen weiterführenden Überlegungen auf der Basis von [5], [6], [7], [8] und [9] eine innovative Prüfvorrichtung konzipiert (siehe Abb. 5). Die wesentliche Weiterentwicklung stellen dabei die horizontalen Hydraulikzylinder am Wandkopf der oberen halbgeschosshohen Mauerwerkswand dar, mit welcher die Knotenmomente am Wandkopf- und -fußquerschnitt aktiv gesteuert werden können. Andernfalls würde sich das Einspannmoment ausschließlich infolge der vorliegenden Steifigkeitsverhältnisse aufteilen. Die horizontalen Hydraulikzylinder fungieren demnach als eine Art flexible Horizontalfeder, deren Federsteifigkeit und somit die Momentenverteilung am Außenwand-Decken-Knoten aktiv justiert werden kann. Um mit beiden Horizontalzylindern eine gleichmäßige Lasteinleitung zu gewährleisten, wurden diese mit einem Hydraulikverteiler gekoppelt.

Um die Interaktion zwischen einwirkender Wandnormalkraft und der sich einstellenden Deckenrotation eindeutig zu quantifizieren, erfolgte die Lastaufbringung in zwei Lastschritten (siehe Abb. 6). Zunächst wurde im ersten Schritt die Wandnormalkraft ohne Aktivierung der Horizontalzylinder bzw. Horizontalkraft bis zum vorgegebenen Belastungsniveau sukzessive zu gesteigert. Anschließend wurde in einem zweiten Lastschritt die Konsolkraft bis zum Erreichen des vorgegebenen Konsolmoments

Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Bemessung des Außenwand-Decken-Knotens

eingeleitet. Hierbei war entscheidend, dass parallel dazu die Horizontalkraft zeitsynchron entsprechend der vordefinierten Momentenverteilung gesteigert wurde.

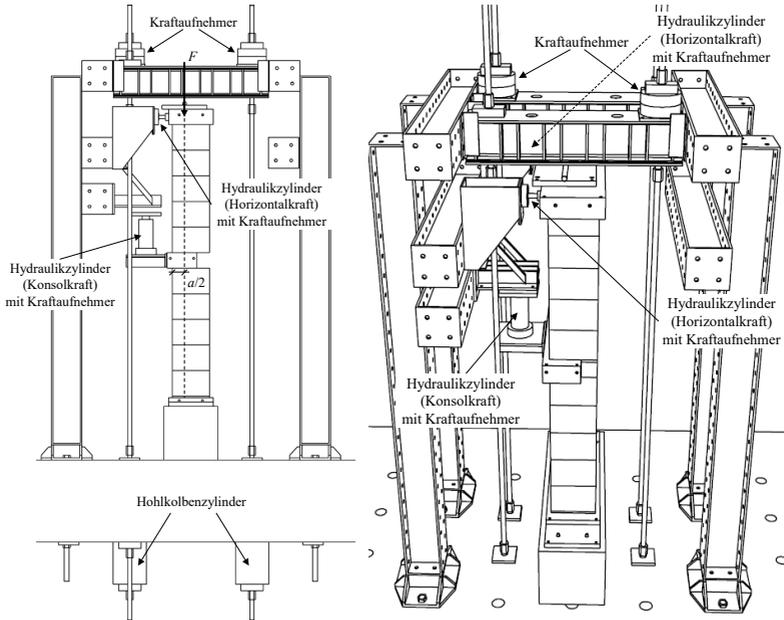


Abb. 5: Prüfstand für den Außenwand-Decken-Knoten an der OTH-Regensburg

Dabei wurde die einwirkende Wandnormalkraft sowie das entsprechende Konsolmoment unter der Prämisse gewählt, dass bezogen auf die Nettoquerschnittsebene zu keinem Zeitpunkt ein e/a -Verhältniswert von 0,33 überschritten wurde (siehe Abb. 6, rechts). Grund hierfür war, dass sich das Einspannmoment anders als bei einer tatsächlichen Stahlbetondecke, nicht auf Basis des Rotationssteifigkeitsverhältnisses von Mauerwerk zu Stahlbetondecke aufteilt. Somit tritt im Falle lokaler plastischer Verformungen des Mauerwerks – im Bereich der Konsoleinbindung – keine Momentumlagerung ein, da die Biegebeanspruchung über die Konsolkraft als Absolutwert in den Außenwand-Decken-Knoten eingeleitet wird.

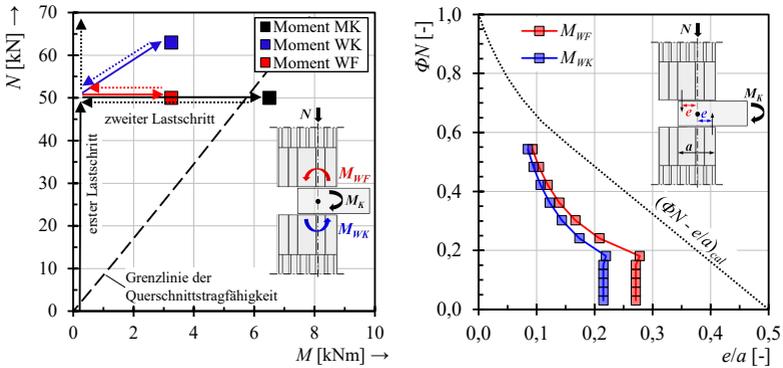


Abb. 6: Ablaufschema der Lastaufbringung (links). Exemplarisches Lastprogramm der Versuchsdurchführung als bezogene Lastausmitte e/a (rechts)

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass der dominierende nichtlineare Effekt im Wesentlichen durch das Klaffen der Lagerfugen im Außenwand-Decken-Knoten bedingt ist. Dies wurde durch die stufenweise Erhöhung des Auflastniveaus mit einhergehender Reduktion der Konsolrotation ϕ_K in den Moment-Rotations-Diagrammen in Abb. 7 deutlich.

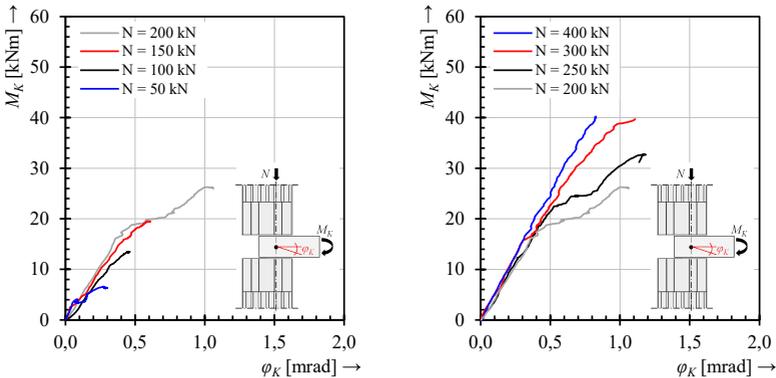


Abb. 7: Experimentelle Moment-Rotations-Diagramme in Abhängigkeit der Wandnormalkraft N und einer Aufteilung des Einspannmoments M_K von jeweils 50 % in Wandfuß- und Wandkopfschnitt

Abb. 8). Damit die Knotenmomente am Rahmenersatzsystem mit jenen am regelmäßigen Rahmensystem berechneten übereinstimmen, müssen die auftretenden Verschiebungen u_x sowie Rotationen φ_z am Wandfuß und Wandkopf des Ersatzsystems gleichgeschaltet werden.

Hierbei stellte sich heraus, dass die aus der teilaufgelagerten Decke resultierenden Besonderheiten nur unzureichend abgebildet werden (siehe Abb. 9). Dies betrifft insbesondere die Feststellung, wonach sich bei $a/t = 2/3$ in der FE-Berechnung am Wandkopf und -fuß mit zunehmendem Auflastniveau die Lastausmitte e asymptotisch der Bruttoquerschnittsachse $t/2$, normativ jedoch der Nettoquerschnittsachse $a/2$ annähert (vgl. Winkelhalbierende in Abb. 9 $(e_v/a)_{FEM} = (e_v/a)_{el}$). Hinsichtlich der Beanspruchungssituation am Wandfuß resultiert aus dem normativen Ansatz bei zunehmendem Auflastniveau eine auf der unsicheren Seite liegende Momentenbeanspruchung. Analog zur Beanspruchung am Wandfuß nähert sich die Lage der Resultierenden auf Querschnittsebene am Wandkopf der Bruttoquerschnittsachse bei $t/2$ an. Folglich ist zu konstatieren, dass mit zunehmender Auflast mehr Querschnittsbreite am Lastabtrag aktiviert als durch die vereinfachte Rahmenberechnung mit der Auflagertiefe a in Rechnung gestellt wird.

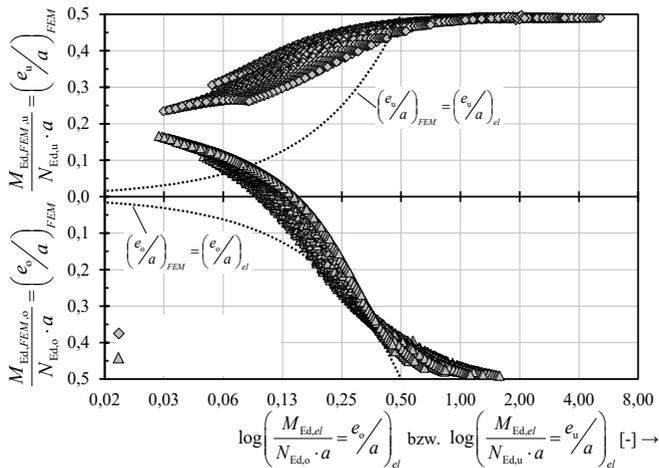


Abb. 9: Vergleich der numerischen und linear-elastischen bezogenen Lastausmitten am Wandkopf und Wandfuß bei Teilauf Lagerung mit $a/t = 2/3$ ($t = 365$ mm)

Fazit

In Hinblick auf die nichtlinearen Effekte erfolgt in [4] die Entwicklung semi-empirischer Approximationsgleichungen, mit welchen die numerisch ermittelten bezogenen Lastausmitteln erstmalig abgeschätzt werden können. Für eine normative Anwendung sind jedoch noch weiterführende Untersuchungen hinsichtlich tatsächlicher Umlagerungskapazitäten insbesondere auf Querschnittsebene am Wandfuß sowie die Weiterentwicklung nichtlinearer Berechnungsansätze zur Schnittgrößenermittlung erforderlich. Hierzu wird in [4] ein Prüfkonzept ausgearbeitet, mit welchem die lochbildabhängigen Effekte und vor allem die daraus resultierende Umlagerungskapazität quantifiziert werden können. In Bezug auf die Beanspruchungssituation am Wandkopf wird hier zudem ein analytischer Berechnungsansatz vorgestellt, mit welchem die experimentell festgestellten Tragfähigkeitsreserven im Zuge der Bemessung angesetzt werden können.

Literatur

- [1] Kranzler, T.: Zur Planung, Ausführung und Leistungsfähigkeit des Außenwand-Decken-Knotens von monolithischem Ziegelmauerwerk. In: Mauerwerk 18, Heft 2, 2014.
- [2] Schermer, D.: Schnittgrößenermittlung. In: Rast, Ronald; Graubner, Carl-Alexander (Hrsg.), Mauerwerksbau für Tragwerksplaner: Praxishandbuch, 2016.
- [3] Manns, W.; Schneider, H.: Einfluss der doppelt exzentrischen Belastung von Hohlblockstein-Mauerwerk auf die Wandtragfähigkeit. Forschungsbericht Nr. I.3-23252. MPA Baden-Württemberg, 1982.
- [4] Schmalz, J.: Beitrag zur Bemessung von monolithischem Planziegelmauerwerk im Außenwand-Decken-Knoten. Dissertation, eingereicht.
- [5] Lewicki, B.; Lechman, M.; Szczygielski, A.: A Method of Testing of Floor-Wall Joints. In: CIB W023 - Wall Structures. Proceedings of the 42nd Commission Meeting, Prague, 2005.
- [6] Baier, G.: Der Wand-Decken-Knoten im Mauerwerksbau – Verfahren zur realistischen Bestimmung der Lastexzentrizität in den Wänden. Dissertation, 2007.

- [7] Jäger, W.; Reichel, S.; Hammer, R.: Analyse des Tragverhaltens von bauphysikalisch optimierten Anschlussdetails einschaliger Wandkonstruktionen – Entwicklung eines passivhaustauglichen monolithischen Ziegelsystems für Österreich. In: Mauerwerk-Kalender 38, 2013.
- [8] Reitmayer, C.: Einfluss des Wand-Decken-Knotens auf die Tragfähigkeit und Bemessung von monolithischen Ziegelaußenwänden. Dissertation, 2014.
- [9] Reichel, S.: Untersuchungen zum Tragverhalten des thermisch optimierten Anschlusses der teilweise aufliegenden Deckenplatten an monolithische Wandkonstruktionen. Dissertation, 2017.