

Kriterien zur Dimensionierung adaptiver Stahlbetonplatten mit integrierten fluidischen Aktoren

Markus Nitzlader¹, Matthias J. Bosch², Hansgeorg Binz², Matthias Kreimeyer², Lucio Blandini¹

¹Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren ILEK, Universität Stuttgart

²Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design IKTD, Universität Stuttgart

Zusammenfassung:

Um bei der Auslegung adaptiver Stahlbetonplatten mit integrierten fluidischen Aktoren den Lastfall „Aktuierung“ zu berücksichtigen, bedarf es zusätzlicher Kriterien für die Aktorplatzierung. Für die Diskussion derartiger Kriterien werden Finite Elemente Simulationen unter Verwendung eines bruchmechanischen Schädigungs-Plastizitätsmodell an einem Fallbeispiel durchgeführt und dem aufbrachten Aktordruck gegenübergestellt.

1 Einführung

1.1 Motivation

Die Bauindustrie ist für einen Großteil des weltweiten Ressourcenverbrauchs und der Treibhausgasemissionen verantwortlich [1, 2]. Geschossdecken verantworten bis zu 50 % der Tragwerksmasse in Gebäuden [3, 4]. Bei derartigen Plattentragwerken erfolgt der Lastabtrag vorwiegend über Biegung, wodurch das Material in der Nähe der neutralen Faser fast ungenutzt bleibt. Da die Biegesteifigkeit eines Tragwerks erheblich geringer ist als die Dehnsteifigkeit, wird bei Geschossdecken häufig die Einhaltung von Verformungsgrenzwerten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit maßgebend für die Dimensionierung [5].

Tragwerke werden in der Regel so ausgelegt, dass sie extremen Belastungsereignissen standhalten, um die Anforderungen an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu erfüllen [6]. Die meisten Plattentragwerke, z. B. Flachdächer, Geschossdecken in Parkhäusern, Stadien, Veranstaltungshallen usw. sind veränderlichen Belastungen ausgesetzt. Herkömmliche Methoden wie Vorspannung und Schalungsüberhöhung können jedoch nur

für einen Lastfall konzipiert werden. Wenn jedoch die Tragwerksmasse von Geschossdecken reduziert werden kann, sind auch weitere positive Einsparungseffekte für die darunterliegenden Bauteile wie Stützen und Fundamente zu erwarten.

Verschiedene Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass die Ausbildung von adaptiven Tragwerken und die damit verbundene Möglichkeit zur Manipulation des Lastabtrags eine wirksame Strategie ist, Material und Emissionen einzusparen [7–10]. Durch die Integration von Sensoren und Aktoren können Tragwerke zusammen mit einer Regelungseinheit auf konventionelle Lasten reagieren, um so Durchbiegungen und Spannungsspitzen zu reduzieren. Insbesondere bei steifigkeitsdominierten Problemstellungen bietet Adaptivität ein großes Potenzial für Material- und Emissionseinsparungen [11–13].

1.2 Wirkungsweise integrierter fluidischer Aktoren

Im Rahmen des Teilprojekts "Integrierte fluidische Aktoren" [14–17] des Sonderforschungsbereichs (SFB) 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ (Universität Stuttgart), wurden neuartige Aktoren zur lokalen Manipulation des Lastabtrags von Balken- und Platten entwickelt. Die sogenannten fluidischen Aktoren (vgl. Abb. 1) werden in die Druckzone von Stahlbetonbauteilen integriert. Bei adaptiven Tragwerken sind die drei Systemzustände aktiv, passiv und adaptiv zu unterscheiden. Der aktive Systemzustand entspricht der Tragwerksantwort bei ausschließlicher Beanspruchung durch Aktuierungslasten, der passive durch konventionelle Lasten und der adaptive entsprechend der Überlagerung von aktivem und passivem Systemzustand. Abb. 1 veranschaulicht das Aktuierungsprinzip für Plattentragwerke im aktiven Systemzustand. Die Ausdehnung der außenliegenden Druckkammern erzeugt jeweils ein Kräftepaar in horizontaler Richtung. Die innenliegenden Kraftkomponenten (schwarze Pfeile) werden in der Aktorstruktur selbst erzeugt, von der umgebenden Betonstruktur entkoppelt und durch eine Verbindungsstruktur des Aktors kurzgeschlossen (Kraftkomponenten heben sich gegenseitig auf). Die außenliegenden Kraftkomponenten werden in einer exzentrischen Lage, oberhalb der neutralen Faser in der umgebenden Betonstruktur erzeugt. Da nur die äußeren (roten) Kraftkomponenten im Beton wirken entsteht ein Momentenpaar, mit näherungsweise konstantem Momentenverlauf zwischen den äußeren Druckkammern. In Abhängigkeit des aufgebrachtten Aktordrucks bzw. der erzeugten Aktuierungskraft kann so den Momenten aus konventionellen Lasten entgegengewirkt werden.

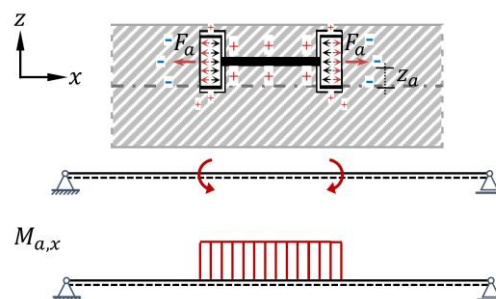


Abbildung 1: Aktuierungsprinzip mit qualitativer Darstellung der erzeugten Druck- (blaues Minuszeichen) und Zugspannungen (rotes Pluszeichen) sowie resultierendem Momentenverlauf.

1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Die optimale Integration von Aktoren in Stahlbetonplatten ist ein anspruchsvolles interdisziplinäres Entwurfsproblem, das viele Parameter umfasst. Für die Aktorplatzierung in der XY-Ebene wurde ein Prozess erarbeitet [17] wobei die verschiedenen Parameter berücksichtigt werden können. Die Aktorplatzierung in Dickenrichtung erfolgt bislang jedoch anhand von Abschätzungen auf Basis numerischer Simulationen mit linear-elastischem Materialverhalten.

In diesem Beitrag werden theoretische Grundlagen für die Aktorplatzierung in Dickenrichtung diskutiert. Es wird dabei der Frage nachgegangen welche Kriterien eine geeignete Wahl der Aktorplatzierung in Dickenrichtung beeinflussen. Es ist davon auszugehen, dass bei Verwendung eines linear-elastischen Materialverhaltens Spaltzugkräfte unterschätzt werden. Daher wird ein nichtlineares Materialmodell anhand gewonnener experimenteller Versuchsergebnisse aufgestellt, um die Auswirkung einer Veränderung der Aktorposition in Dickenrichtung hinsichtlich definierter Kriterien zu bewerten.

2 Numerische Simulationen

2.1 Geometrisches Modell

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Aktorplatzierung in Dickenrichtung (Z-Achse, vgl. Abb. 2), werden die numerischen Simulationen an einem Plattenausschnitt für einen einzelnen Aktor durchgeführt. Die gewählten Außenabmessungen entsprechen dabei der Aktorgröße (XY-Ebene, vgl. Abb. 2) eines bereits experimentell validierten Aktorprototyps zuzüglich der doppelten Abklinglänge der Hauptspannungen in X- und Y-Richtung nach [18]. Die geometrische Struktur des Plattenausschnitts mit integriertem Aktor ist in Abb. 2 dargestellt. Zur Reduktion des Simulationsaufwands werden Symmetriebedingungen gemäß Abb. 2 verwendet. Zusätzlich werden translatorische Verschiebungen in Z-Richtung über die nach unten ausgeführten Gewindestäbe (Lagesicherung während Betonage) sowie die Hydraulikleitung gehalten. Zur Berücksichtigung konventioneller Lasten wird eine Ersatzlast (lila Pfeile Abb. 2 (c)) auf den freien (ohne Symmetriebedingung) vertikalen Außenflächen appliziert. Die aufgebrachte Spannung entspricht einem idealisierten Biegespannungsverlauf einer quadratischen liniengelagerten Platte mit 10 x 10 m Spannweite, 18 cm Höhe unter Eigengewichts- und Nutzlastbeanspruchung von 5 kN/m² im Gebrauchszustand. Die Aktuierungslast wird auf den roten Flächen in Abb. 2 (Aktordruckkammer) als Flächenlastpaar appliziert (weiße Pfeile Abb.2 (d)). Auswirkungen zusätzlicher Spannungen infolge des Aktordrucks benachbarter Aktoren werden nicht berücksichtigt.

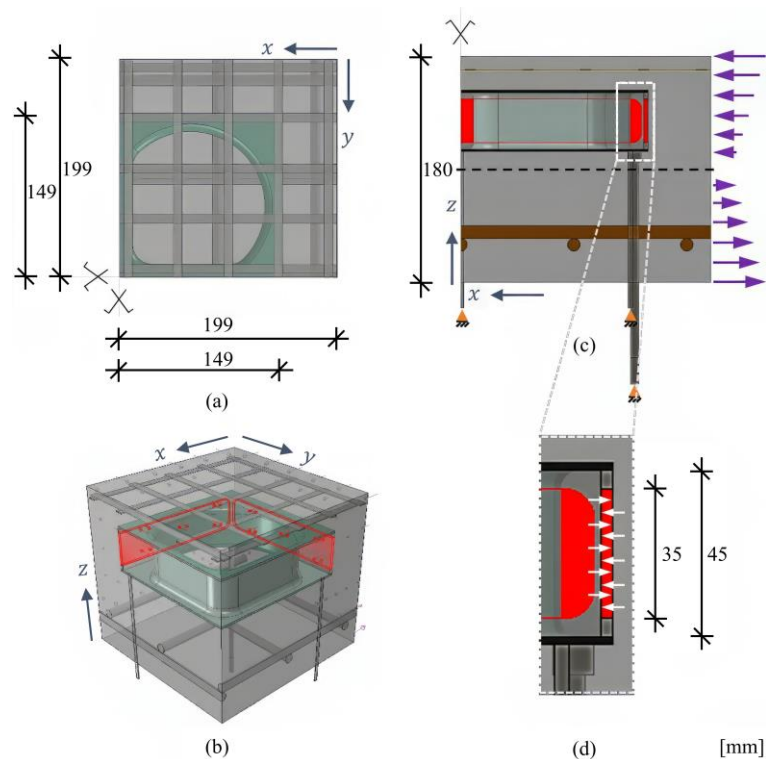


Abbildung 2: Geometriemodell: (a) Draufsicht, (b) Perspektive, (c) Frontansicht, (d) vergrößerte Darstellung der Druckkammer.

2.2 Materialmodell

Der Plattenausschnitt wird mit der Software ABAQUS unter Verwendung von C3D4 Volumenelementen modelliert. Bei dem Elementtyp C3D4 handelt es sich um Tetraeder-Elemente mit linearen Ansatzfunktionen und vier Knoten. Die Elementgröße beträgt ca. 2,7 mm im Aktorbereich und 4 mm an den Außenkanten.

Zur Abbildung des Materialverhaltens von Beton wird ein in ABAQUS implementiertes auf Plastizität basierendes Kontinuums-Schadensmodell verwendet (Concrete Damage Plasticity Modell, kurz CDP). Im Gegensatz zu Betonmodellen, die auf dem Ansatz von verschmierten Rissen beruhen, kennt das Schädigungsplastizitätsmodell keine Risse, die sich über die an den Integrationspunkten gespeicherten Materialzustände entwickeln [19]. Es ist jedoch möglich, eine effektive Rissrichtung über die Schädigungsparameter zu ermitteln und dadurch eine grafische Visualisierung der Rissmuster in der Betonstruktur zu erhalten [19]. Hierbei werden die Verfestigungsparameter (Zustandsvariablen) in der allgemeinen Form der klassischen Plastizität durch die plastische Schadensvariable ersetzt. Die Schadensvariable liegt zwischen den Werten Null und Eins, wobei Null für einen unbeschädigten Beton und Eins für einen vollständig geschädigten Beton steht [20]. Die Fließbedingungen des CDP Modells sind dabei nach den Rankine- und Drucker-Prager

Kriterien abgeleitet [19]. Die Entwicklung der Fließ- oder Versagensfläche wird durch zwei Verfestigungsvariablen gesteuert, die mit Versagensmechanismen unter Zug- bzw. Druckbelastung verknüpft sind [19]. Zeitabhängige Effekte werden im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung nicht berücksichtigt.

Im Vorfeld dieser Arbeit fand eine experimentelle Untersuchung an skalierten adaptiven Geschossdecken, mit einer lichten Spannweite von 2 x 2 m statt. Eine der getesteten Platten wurde dabei über den Auslegungsrahmen hinaus belastet und in den gerissenen Zustand 2 [6] überführt. Anhand der gewonnen Messdaten in Verbindung mit den ermittelten Materialeigenschaften werden in diesem Beitrag die daraus abgeleiteten Parameter für ein CDP Modell in den Tabellen 1 – 3 aufgeführt. Tabelle 1 zeigt alle im Plattenausschnitt verwendeten Materialkennwerte.

Material	E-Modul	Poissonzahl	Dichte
Beton (SVB 02)	39.000 N/mm ²	0,2	2.500 kg/m ³
Stahl (Aktor)	210.000 N/mm ²	0,3	7.800 kg/m ³
Stahl (Gewindestäbe)	210.000 N/mm ²	0,3	7.800 kg/m ³
Glasfaserbewehrung	60.000 N/mm ²	0,2	1,035E-3 kg/m ³
Bewehrungsstahl	200.000 N/mm ²	0,3	7.800 kg/m ³

Tabelle 1: Verwendete Materialkennwerte

Für die Verwendung des CDP Modells in ABAQUS sind zunächst die in Tabelle 2 aufgeführten Parameter erforderlich, welche weitestgehend der Literatur entnommen werden können.

Eingabeparameter	verwendeter Wert
Dilatanzwinkel	$\psi = 13^\circ$ [20]
Parameter der Potentialfunktion G	$\varepsilon = 0,1$ [20]
Verhältnis der zweiachsigen und einachsigen Druckfestigkeit	$\alpha_f = 1,16$ [20]
Invariantenverhältnis der Zug- und Druckmeridianen	$K_c = 0,6667$ [20]
Viskositätsparameter	$\mu = 0,0005$

Tabelle 2: Verwendete Parameter für das nichtlineare CDP-Materialmodell

Neben den allgemeinen Angaben sowie den Parametern zur Beschreibung der Fließfläche des mehraxialen Spannungszustandes, ist zusätzlich das Verhalten des Betons unter Zug- und Druckbeanspruchung zu definieren. Die entsprechenden Eingabe-Parameter sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Parameter wurden unter Verwendung der Formeln von [21] ermittelt.

Die Kalibrierung des Modells wird Anhand eines Plattenausschnitts der experimentell untersuchten adaptiven Geschossdecke vorgenommen. Beim Vergleich der Messwerte mit den Simulationsergebnissen liefert das aufgestellte CDP Modell eine gute Übereinstimmung und wird daher für die weitere Untersuchung herangezogen.

Nr.	σ_c	$\varepsilon_{c,in}$	d_c	Nr.	σ_c	$\varepsilon_{c,in}$	d_c	Nr.	σ_t	$\varepsilon_{t,ck}$	d_t
1	30	0,0	0	11	54,3	0,00683485	0	1	5,4	0	0
2	48,4	0,0060278	0	12	54,8	0,00692584	0	2	4,22	0,001148594	0,22
3	49,1	0,00611683	0	13	55,4	0,00701765	0	3	2,11	0,004135136	0,61
4	49,8	0,00620564	0	14	56	0,00710949	0	4	0,53	0,010459535	0,9
5	50,5	0,00629504	0	15	56,5	0,00720215	0				
6	51,1	0,00638445	0	16	57	0,00729548	0				
7	51,8	0,00647355	0	17	57,4	0,0073907	0				
8	52,4	0,00656343	0	18	56,4	0,00752196	0,02				
9	53	0,00665353	0	19	41,2	0,00802007	0,28				
10	53,7	0,00674383	0								

Tabelle 3: Eingabe-Parameter zur Beschreibung des Beton-Druck- und Zugverhaltens

2.3 Auswertungskriterien

Zur Bewertung der Aktorposition werden Simulationen durchgeführt, wobei der Aktor schrittweise von der Mittelebene bis zur oberen Bewehrungslage verschoben wird. Der Aktordruck wird jeweils in 2 bar Schritten von 0 bis 160 bar gesteigert. Die Ersatzlast wird gleichzeitig mit dem Aktordruck linear bis zu ihrem Maximalwert erhöht. Eine Auswertung der Ergebnisse erfolgt in Abhängigkeit des Aktordrucks anhand der nachstehenden Kriterien:

- Fortschritt der Kerbrisse im Bauteilinneren
- Betonnachgiebigkeit
- Generelle Limitierung der Betondruckspannungen

Der Rissfortschritt wird betrachtet da zu erwarten ist, dass das Einsparpotential am größten ist, wenn das Bauteil weitestgehend im Zustand 1 [6] verbleibt. Risse die unter Belastung überdrückt werden (Druckzone) können jedoch akzeptiert werden. Die Überprüfung der Betonnachgiebigkeit dient zur Begrenzung der Ausdehnung der Aktormembran, um nicht zu hohe Anforderungen an das Aktorikkonzept zu stellen. Außerdem sind im Sinne der Begrenzung der zulässigen Spannungen im Gebrauchszustand nach [6] die Betondruckspannungen zu limitieren.

2.4 Simulationsergebnisse

Abb. 3 zeigt die Simulationsergebnisse an fünf ausgewählten Bereichen. Die Auswertung der Zugschädigung (Abb. 3 (a-c)) erfolgt dabei über den Maximalwert in der jeweiligen Auswertungsebene (Abb. 3 (f)) und dient zur Beurteilung des Fortschritts der Kerbrisse. Die Betonnachgiebigkeit wird in Abb. 3 (d) über den max. Betrag der Verschiebungen in X-Richtung in Nähe der Lasteinleitung des Aktordrucks ausgewertet. In diesem Bereich werden auch die max. Betondruckspannungen in Abb. 3 (e) erfasst. Wie Abb. 3 entnommen werden kann, ergeben sich bei Annäherung des Aktors an die Mittelebene ungünstige Ergebnisse für alle Kriterien. Es zeigt sich auch das die Einhaltung eines Mindestabstands zur oberen Bewehrungslage vorteilhaft ist.

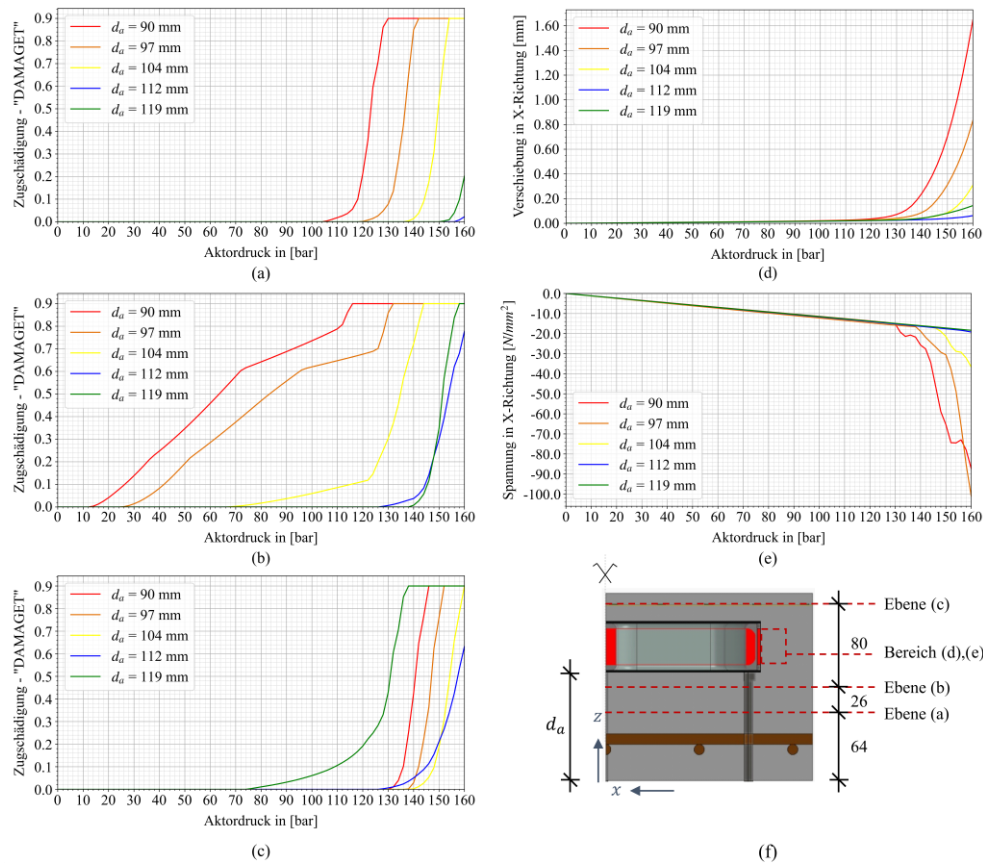


Abbildung 3: Simulationsergebnisse in Abhängigkeit des Aktordrucks sowie der Aktorposition d_a (Distanz zwischen Unterkante Aktor und Unterkante Plattenausschnitt): (a) Zugschädigung in Ebene 64 mm, (b) Zugschädigung in Ebene 90 mm, (c) Zugschädigung in Ebene 170 mm, (d) Verschiebung in X-Richtung im Bereich der Druckkammer, (e) Spannung in X-Richtung im Bereich der Druckkammer, (f) Darstellung der Auswertungsebenen.

3 Schlussfolgerung

Im vorliegenden Beitrag werden die Materialparameter eines ABAQUS CDP Modells vorgestellt, welche eine gute Übereinstimmung zu experimentellen Versuchsergebnissen der Autoren liefern. Die Erzielung eines größtmöglichen Aktuierungsmoments ist erstrebenswert für eine hohe Materialeinsparung. Das Aktuierungsmoment hängt von den Parametern Aktordruck, Hebelarm und Druckfläche ab [14] (vgl. Abb. 1). Wird eine veränderliche Höhe der Druckkammer (Druckfläche) berücksichtigt, hat die Höhe bei gleichbleibendem Aktordruck aufgrund der Wechselwirkung einen größeren Einfluss auf das Aktuierungsmoment als der Hebelarm. Bei ausschließlicher Berücksichtigung linear elastischer Materialeigenschaften wäre die Aktorhöhe folglich bis zur Mittelebene zu vergrößern. Wird das nichtlineare Materialmodell berücksichtigt, zeigt sich jedoch, dass ein

größerer Abstand zur Mittelebene aufgrund des dadurch möglichen größeren Aktordrucks zum maximalen Aktuierungsmoment führt.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 279064222 – SFB 1244. Die Autoren danken der DFG für die Unterstützung.

Literatur

- [1] UNEP. 2020 Global status report for buildings and construction: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. Nairobi, 2020.
- [2] SOBEK, W. Non nobis - über das Bauen in der Zukunft, Bd. 1: Ausgehen muss man von dem, was ist. Stuttgart: av edition, 2022.
- [3] NITZLADER, M., et al. Actuation of concrete slabs under bending with integrated fluidic actuators. 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII), July 31 to August 5, 2022.
- [4] BERGER, T.; PRASSER, P.; REINKE, H.G. Einsparung von Grauer Energie bei Hochhäusern. Beton- und Stahlbetonbau, Band 108 (2013) Heft 6, S. 395–403.
- [5] ZILCH, K.; ROGGE, A. Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen im Brücken- und Hochbau. Beton-Kalender, Band 93, 2 (2004) Heft 2, S. 281–283.
- [6] FINGERLOOS, F.; HEGGER, J.; ZILCH, K. (Hrsg.) Eurocode 2 für Deutschland. DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit nationalem Anhang : kommentierte und konsolidierte Fassung. Berlin, Wien, Zürich, Berlin: Beuth; Ernst & Sohn a Wiley brand, 2016.
- [7] BORSCHIEWSKI, D., et al. Ökobilanzierung adaptiver Hüllen und Strukturen. Bauphysik, Band 45 (2023) Heft 2, S. 107–121.
- [8] BLANDINI, L., et al. Der Demonstrator D1244: das weltweit erste adaptive Hochhaus. Bautechnik, Band 99 (2022) Heft 6, S. 452–462.
- [9] YAO, J.T. Concept of structural control. Journal of the Structural Division (ASCE), Band 98 (1972) ST7, S. 1567–1574.
- [10] DOMKE, H. Aktive Kontrolle von Tragwerken. Bauingenieur, Band 66 (1991), S. 205–213.
- [11] GEIGER, F., et al. A case study on design and optimization of adaptive civil structures. Frontiers in Built Environment, Band 6 (2020), S. 94.
- [12] SENATORE, G., et al. Adaptive structures for whole-life energy savings. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 4 December, 2011.

- [13] STEFFEN, S., et al. Actuation concepts for adaptive high-rise structures subjected to static wind loading. *Engineering Structures*, Band 267 (2022).
- [14] C. KELLETER. Untersuchungen zur Manipulation des Lastabtrages biegebeanspruchter Betonbauteile durch integrierte fluidische Aktoren, 2022.
- [15] BURGHARDT, T., et al. Investigations of a large-scale adaptive concrete beam with integrated fluidic actuators. *Civil Engineering Design*, Band 4 (2022).
- [16] BOSCH, M., et al. Design of integrated fluidic actuators for multi-axial loaded structural elements. 8th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, 5th - 9th Jun 2022.
- [17] NITZLADER, M., et al. Designing Actuation Concepts for Adaptive Slabs with Integrated Fluidic Actuators Using Influence Matrices. *CivilEng*, Band 3 (2022) Heft 3, S. 809–830.
- [18] BOSCH, M., et al. Effective range of integrated fluidic actuators in structural elements. 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII), July 31 to August 5, 2022.
- [19] SMITH, M. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9, 2009.
- [20] BAKHTI, R., et al. New approach for computing damage parameters evolution in plastic damage model for concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Band 16 (2022), e00834.
- [21] LUBLINER, J., et al. A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, Band 25 (1989) Heft 3, S. 299–326.