

Untersuchungen zur Manipulation des Lastabtrages biegebeanspruchter
Betonbauteile durch integrierte fluidische Aktoren

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Christian Kelleter
aus Aachen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Universität Stuttgart

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz
Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
Universität Stuttgart

Tag der mündlichen Prüfung: 07.03.2022

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart. Ich danke meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek von Herzen für die Möglichkeit an diesem einzigartigem Institut forschen zu dürfen. Er gab die Anregung zu dieser Arbeit und begleitete den Entstehungsprozess stets mit fruchtbaren Diskussionen.

Herrn Prof. Hansgeorg Binz danke ich für das aufrichtige Interesse, seine Zeit und die Übernahme des Mitberichtes.

Für die Unterstützung nach der Übernahme der Institutsleitung möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M.Arch. Lucio Blandini danken.

Die Untersuchungen für die vorliegende Arbeit entstanden im Rahmen des Forschungsprojektes „C02 - Integrierte fluide Aktoren“ des Sonderforschungsbereiches 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von Morgen“. Mein Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die mit diesem SFB eine hervorragende Forschungsmöglichkeit geschaffen hat. Bedanken möchte ich mich zudem bei den Projektpartnern vom Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) für die langjährige, kollegiale und interdisziplinäre Zusammenarbeit. Für die Realisierung der Regelung, der Inbetriebnahme des Hydraulikaggregats und die gemeinsame Durchführung der Versuche bedanke ich mich bei Herrn M.Sc. Timon Burghardt und Herrn M.Sc. Matthias Bosch, ohne die die anspruchsvollen experimentellen Untersuchungen nicht möglich gewesen wären.

Für die kritische Durchsicht dieser Arbeit und die vielen konstruktiven Verbesserungsvorschläge danke ich Herrn Dipl.-Bibliothekar Christian Assenbaum, Herrn M.Sc. Simon Steffen, Frau M.Sc. Rebecca Thierer und Herrn M.Sc. Florian Geiger herzlichst.

Kurzfassung

Biegebeanspruchte Tragwerke gehören zu den wichtigsten Konstruktionsformen in der gebauten Umwelt. Geschossdecken und Biegeträger machen den Großteil der verbauten Masse in Gebäuden aus. Die Lasten, die einer Bemessung zugrunde gelegt werden, treten selten bis nie auf. Adaptive Tragwerke können auf seltene und hohe externe Belastungen reagieren und mit weniger Material ausgeführt werden als herkömmliche passive Tragwerke.

Bisherige Untersuchungen zu adaptiven Tragwerken beschränken sich entweder auf Stabtragwerke oder auf Tragwerke, bei denen die Aktorik extern – meist an den Auflagern – hinzugefügt wird. In beiden Fällen besteht eine Trennung zwischen Tragwerk und Aktorik. Dies beschränkt die Bandbreite der möglichen Lastfälle, auf die reagiert werden kann. Ein Beispiel für diese Art der adaptiven Tragwerke stellt der „Stuttgarter-Träger“ dar, bei dem ein elektrischer Aktor eine Auflagerverschiebung hervorruft [96]. Durch diese Verschiebung wird die Durchbiegung unter einer Einzellast reduziert, da eine der externen Last entgegengesetzte Wölbung des Trägers erzeugt wird.

Adaptive Biegeträger, wie sie in der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden, integrieren die Aktoren vollständig in den Querschnitt. Dadurch kann auf eine große Bandbreite von Lasten optimal reagiert werden. Verformungen werden minimiert, da diese häufig bei der Bemessung maßgebend sind. Durch die aktive Reduktion der Verformungen kann das Steifigkeitsproblem in ein Festigkeitsproblem überführt werden und der Beton stärker ausgenutzt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Beantwortung der Frage, ob durch integrierte fluidische Aktoren die Verformungen von Betonträger aktiv reduziert werden kann und wie solche Aktoren ausgeführt und integriert werden müssen.

Es wird ein analytisches Berechnungsverfahren aufgestellt, das über die Biegemomente aus Aktorik und externer Belastung die notwendigen hydraulischen Drücke ermitteln kann. Auch die Verteilung der Drücke in den Aktoren entlang der Bauteilachse werden bestimmt. Eine Grenzwertbetrachtung von Einfeldträgern mit einem und mehreren Aktoren und unterschiedlichen hydraulischen Drücken verdeutlicht die Phänomenologie.

Erweitert werden die Untersuchungen durch Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode der unterschiedlichen Zustände (passiv, aktiv und adaptiv) eines Trägers. Gezeigt wird dadurch, dass sich die Durchbiegung vollständig und die Spannungen teilweise kompensieren lassen.

Die Aktuierungskonzepte werden mit zwei Aktortypen verwirklicht. Die Expansion der Aktorik wird über die thermische Ausdehnung eines eingeschlossenen Mediums und über die Zuführung eines Mediums über ein Hydraulikaggregat realisiert. Das komplexe Zusammenspiel aus Sensorik, Aktorik und Regelungseinheit mit dem Tragwerk wird in einem Regelkreis zusammengeführt und mehrfach experimentell getestet.

Die angestrebte Verformungsmanipulation kann in mehreren experimentellen Versuchen nachgewiesen werden. Sowohl zeitlich getrennt zur externen Belastung als auch direkt in abhängig dieser konnten die Durchbiegungen in Feldmitte vollständig kompensiert werden.

Abstract

Structures subjected to bending are one of the most important forms of construction in the built environment. Slabs and beams account for the majority of the mass used in buildings. The loads on which a design is based rarely if ever occur. Adaptive structures can respond to infrequent and high external loads and can be designed with less material than conventional passive structures.

Previous research on adaptive structures has been limited to trusses. For other structural elements, there is a separation between the structure and the actuator, which is added externally usually at the supports. This limits the range of possible load cases that can be responded to. An example of this type of adaptive structure is the „Stuttgart beam“, where an electric actuator causes a support displacement [96]. This displacement reduces the deflection under a concentrated load bending the beam opposite to the external load.

Adaptive beams, as presented in this paper, fully integrate actuators into the cross-section of concrete beams. This allows an optimal response to a wide range of loads. The aim here is to minimize deformations, since these are often decisive in the design. By actively reducing the deformations, the stiffness problem can be transformed into a strength problem and the concrete can be more fully utilized.

The aim of the presented work is to answer the question whether integrated fluidic actuators can actively reduce the deformations of concrete beams and how such actuators have to be designed and integrated.

For this purpose, an analytical calculation method is set up that can determine the necessary hydraulic pressures via the bending moments from actuators and external loads. The distribution of the pressures in the actuators along the component axis is also determined. A limit value analysis of single-span beams with one and several actuators and different hydraulic pressures illustrates the phenomenology.

The investigations are extended by simulations with the finite element method of the different states (passive, active and adaptive) of a beam. It is thereby shown that the deflection can be compensated completely and the stresses partially.

The actuation concepts were realized with two types of actuators. The actuators were newly developed. The expansion is realized via the thermal expansion of an enclosed medium and via the supply of a medium via a hydraulic power unit. The complex interaction of sensors, actuators and control unit with the structure was combined in a control loop and tested experimentally several times.

The desired deformation manipulation was demonstrated in several experimental tests. The midspan deflections could be fully compensated.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung	2
1.4 Gliederung	2
2 Adaptivität	5
2.1 Adaptivität in der Natur	5
2.2 Adaptive Tragwerke – Stand der Technik	7
2.3 Adaptive Biegeträger mit integrierter Aktorik	9
3 Strategien zur Bestimmung der Aktorkenndaten	15
3.1 Analytisches Berechnungsverfahren nach Balkentheorie	15
3.1.1 Mehrere Aktoren mit konstantem Druck	22
3.1.2 Mehrere Aktoren mit angepasstem Druck	26
3.2 Beispiel Vier-Punkt-Biegeversuch	30
4 Numerische Untersuchungen	33
4.1 Aufbau des numerischen Modells	33
4.1.1 Geometrie	33
4.1.2 Elemente	34
4.1.3 Lasten	38
4.1.4 Kontakt	39
4.1.5 Randbedingungen	39
4.1.6 Modellierung der Aktorik	41
4.1.7 Materialmodell	47
4.2 Bestimmung des Abstandes der Aktoren untereinander	50
4.3 Manipulation der Verformungen im Träger	52
4.4 Manipulation der Verformungen in den Aktoren	56
4.5 Manipulation der Spannungen im Träger	57
4.6 Nichtlineare Untersuchungen	65
4.6.1 Rissbilderzeugung an den inneren Aktoren	65
4.6.2 Rissbilderzeugung an den äußeren Aktoren	66

5 Konzeptrealisierung	67
5.1 Sensorik	67
5.2 Steuerungs- und Regelungseinheit	70
5.3 Aktorik	72
5.4 Druckerzeugung	73
5.4.1 Thermische Expansion	73
5.4.2 Ölzuführung	76
5.5 Stahlbeton	80
6 Experimentelle Untersuchungen	83
6.1 Versuchsablauf	84
6.2 Passiver Referenzbalken	85
6.3 Zeitlich versetzte Verformungsreduktion	87
6.3.1 Druckerzeugung in den Aktoren mittels thermischer Expansion eines eingeschlossenen Mediums	88
6.3.2 Druckerzeugung in den Aktoren mittels Zuführung eines Mediums	93
6.4 Verformungsmanipulation in Echtzeit mittels Zuführung eines Mediums	98
6.4.1 Geregelter Biegeträger R1	98
6.4.2 Geregelter Biegeträger R2	100
6.5 Überprüfung der Versagensmechanismen	105
6.5.1 Rissbildung im Bereich der inneren Aktoren	105
6.5.2 Rissbildung im Bereich der äußeren Aktoren	110
6.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Vergleich mit den Simulationen	113
7 Zusammenfassung und Ausblick	117
7.1 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse	117
7.2 Anregungen für weitere Arbeiten	118
Literaturverzeichnis	128
Abbildungsverzeichnis	135
Tabellenverzeichnis	137
Bezeichnungen und Symbole	139
A Anhang	141
A.1 Darstellung der Verformungen des Trägers	141
A.2 Darstellung der Spannungen des Trägers	144
A.2.1 Spannungen in Balkenlängsrichtung σ_z	144
A.2.2 Maximalwert der betragsmäßig größten Hauptspannung $\sigma_{1,2,3}$, programmintern <i>Max. principal absolut (mpa) σ_{mpa}</i>	147
A.2.3 Perspektivische Darstellung der Spannungen im adaptiven Zustand	149
A.3 Spannungsverteilungen entlang der Längskanten des Trägers	155
A.4 Darstellung der Verformungen des inneren Aktors	160
A.5 Dehnungen ϵ_z entlang der Längskanten des Trägers	163

B Anhang	165
B.1 Versuchsergebnisse des Referenzbalkens	165
B.1.1 Referenzbalken Ausschnitt von $t = 0$ s bis $t = 150$ s	167
B.2 Versuchsergebnisse des adaptiven Balkens R3	169
B.3 Versuchsergebnisse des adaptiven Balkens R4	172
B.4 Versuchsergebnisse des adaptiven Balkens U1	175
C Anhang	177
C.1 Überprüfung des Elastizitätsmoduls des verwendeten Betons	177
D Anhang	181
D.1 Kennlinien der Aktoren	181
E Anhang	185
E.1 Hörsaal im Regelbetrieb	185
E.2 Fußballstadion im Ligabetrieb	185

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Dringlichkeit, den Klimawandel zu bekämpfen, ist größer denn je. Deshalb hat die Präsidentin der Europäischen Kommission, Ursula von der Leyen, im Oktober 2020 die Bewegung „Neues Europäisches Bauhaus“ ins Leben gerufen, die den „Europäischen Grünen Deal“ weiter voranbringen soll [99]. Hierbei wird nichts weniger postuliert als ein systemischer Wandel im Bauwesen. Um die Bewegung zu gestalten, fordert Frau von der Leyen das aktive Mitwirken u. a. von Architekten, Designern, Forschern und Ingenieuren.

Dass das Bauwesen plötzlich eine derart prominente Rolle einnimmt, liegt an den kritischen Umweltwirkungen der Branche. Allein die Zementproduktion ist für ca. 6–8 % des weltweiten anthropogenen Kohlenstoffdioxid-Ausstoßes verantwortlich [81]. Die gesamten globalen Emissionen an Kohlenstoffdioxid durch menschliche Aktivitäten liegen bei ca. 37 Gt jährlich, von diesen verantwortet die Bauindustrie über 50 % [26, 30]. Des Weiteren steht das Baugewerbe für ca. 45 % des globalen Energiebedarfs [13] und in Deutschland für über die Hälfte, ca. 55 %, des Massenmüllaufkommens [92].

Es gilt ein generelles Gebot, die Treibhausgasemissionen, den Ressourcenverbrauch und das Massenmüllaufkommen zu reduzieren. Das Bauwesen und speziell der Werkstoff Beton bedarf einer besonderen Betrachtung. Dies hat mehrere Gründe. Beton ist der mit Abstand meistverwendete Werkstoff der Welt [42]. Es gibt zurzeit keinen anderen Werkstoff, der nachhaltig hergestellt werden kann und in den Mengen zur Verfügung steht. Im Jahr 2005 wurden ca. 60 Gt an Rohstoffen der Erde entnommen, von denen der größte Anteil, (23 Gt) mineralische Baustoffe ausmachen [52, 94]. Zur gleichen Zeit wurde beispielsweise Holz in der Größenordnung von lediglich 2,2 Gt gewonnen, allerdings nicht nur auf die Nutzung als Baumaterial begrenzt.

Mineralische Rohstoffe, wie Sand und Kies als die Hauptbestandteile von Beton, werden bereits in einigen Regionen der Erde knapp [98]. Der Verbrauch steigt jedoch weiter an und ist fast doppelt so groß wie die auf natürlichem Wege entstehende Menge [60]. Die wachsende Weltbevölkerung verstärkt die Problematik zusätzlich, da sie zu einer steigenden Bautätigkeit führt [103].

Bei Tragwerken aus Beton sind biegebeanspruchte Bauteile in Form von Balken und Platten besonders relevant, da sie nahezu überall in der gebauten Umwelt vorhanden sind. Zudem machen biegebeanspruchte Tragwerkselemente über die Hälfte der Masse der Tragstruktur aus und bieten deshalb einen großen Hebel bei der Einsparung von Ressourcen. Je nach Gebäudetyp und -höhe liegt der Anteil von Geschossdecken an der Gesamtmasse bei 50 % bis 75 % [7, 3].

1.2 Problemstellung

Adaptive¹ Tragwerke können auf externe Beanspruchungen reagieren und dadurch im Vergleich zu passiven Tragwerken mit deutlich weniger Material die gleiche Tragfähigkeit erreichen. Diese Reaktion erfolgt durch Einwirkung von Aktoren auf das Tragwerk. Bei bisherigen Untersuchungen handelt es sich bei adaptiven Tragwerken entweder um Stabtragwerke, bei denen einzelne Stäbe als Aktoren ausgebildet sind, oder um Tragwerke, bei denen die Aktorik extern angebracht wird. Letztere erlauben zwar eine Manipulation des Lastabtrages mit wenigen Aktoren, ihre Effektivität ist aber auf wenige Lastfälle – zum Teil auf einen Lastfall – beschränkt. Durch die Integration der Aktorik in das Bauteilinnere von Biegeträgern kann auf eine große Bandbreite von Lastfällen optimal reagiert werden. Weitspannende Biegeträger weisen üblicherweise kein Festigkeits-, sondern ein Steifigkeitsproblem auf. Das bedeutet, dass nicht die Spannungen, sondern die Verformungen die Bauteilabmessungen und somit auch den Materialeinsatz bei der Dimensionierung maßgebend bestimmen. Im Umkehrschluss folgt daraus, dass die Betonfestigkeit nicht vollständig ausgenutzt wird. Zudem ist bei nicht aufgelösten Querschnitten ohnehin lediglich die äußerste Faser des Betons vollständig ausgenutzt. Weiterhin treten die Lasten, die einer Dimensionierung zugrunde liegen, während der Lebenszeit eines Tragwerks selten bis gar nicht auf. All dies führt dazu, dass herkömmliche passive Tragwerke – insbesondere Biegeträger – zu großen Teilen überdimensioniert sind.

1.3 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die phänomenologische Betrachtung adaptiver Biegeträger aus Beton mit integrierten fluidischen Aktoren zur Verformungsmanipulation. Das Hauptaugenmerk liegt auf dem Nachweis der Verformungsreduktion mittels numerischer Simulationen und experimenteller Untersuchungen. Voraussetzung dafür ist, dass die Trennung zwischen Tragwerk und Aktorik aufgehoben und das Bauteil lokal aktuiert werden kann. Der Fokus der Betrachtungen liegt auf der Manipulation der Verformungszustände, genauer auf der Kompensation der Durchbiegung in Feldmitte. Hierfür muss sowohl ein Aktuierungs- als auch ein Aktorikkonzept erarbeitet und realisiert werden. Das Aktuierungskonzept soll die Frage beantworten, wo im Träger wann welche Kraft induziert werden muss, um die Adaptionzielgröße Durchbiegung positiv zu beeinflussen. Das Aktorikkonzept beantwortet die Frage, wie diese Kräfte erzeugt und ins Tragwerk eingeleitet werden. Darüber hinaus muss ein Analyse- und Berechnungsmodell aufgestellt werden, mithilfe dessen die notwendigen Aktorkräfte bestimmt werden können. Der Grad der Ausarbeitung muss so detailliert sein, dass eine Realisierung und experimentelle Validierung durchführbar wird.

1.4 Gliederung

Kapitel 2 handelt von adaptiven Systemen in Natur und Technik. Ein kurzer Abschnitt zu vergleichbaren Arbeiten verdeutlicht, worin die derzeitigen Beschränkungen adaptiver Tragwerke liegen. Das Kapitel endet mit konzeptionellen Betrachtungen von adaptiven Biegeträgern.

¹ von Lateinisch *adaptare*, zu Deutsch „anpassen“

In Kapitel 3 wird ein analytisches Berechnungsmodell aufgestellt, um die notwendigen Aktorkenndaten bestimmen zu können. Über eine Gleichsetzung der Biegemomente aus der externen Belastung und der Aktorik wird an Stabwerkmodellen gezeigt, dass auf beliebige Lastfälle optimal reagiert werden kann. Es werden mehrere Möglichkeiten der Reaktion auf unterschiedliche Lastfälle diskutiert.

Das erarbeitete Aktuierungskonzept wird in Kapitel 4 an einer Beispielgeometrie numerisch untersucht. Dazu erfolgt der Nachweis der angestrebten Verformungsmanipulation mittels Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM). Zugrunde gelegt werden die Aktorkenndaten aus Kapitel 3, sodass hier eine erste Überprüfung des aufgestellten Berechnungsmodells stattfindet. Es erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Verformungen und Spannungen im passiven, aktiven und adaptiven Zustand. Die Simulationen dienen weiterhin der Überprüfung des Superpositionsprinzips und der Quantifizierung des Potenzials adaptiver Biegeträger.

Kapitel 5 behandelt die Realisierung der betrachteten Beispielgeometrie. Hierzu zählen die Komponenten (Sensorik, Aktorik und Regelungseinheit) des adaptiven Betonträgers und dieser selbst. Da die Aktorik für Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit neu entwickelt wurde, liegt hierauf der Fokus. Zur Erzeugung des hydraulischen Druckes in den Aktoren werden zwei unterschiedliche Konzepte vorgestellt: die Druckerzeugung über thermische Expansion eines eingeschlossenen Mediums und die Druckerzeugung durch die Zuführung eines Mediums über ein Hydraulikaggregat.

In Kapitel 6 erfolgt, aufbauend auf den theoretischen Untersuchungen, die experimentelle Validierung der Aktuierungs- und Aktorikkonzepte und des analytischen Berechnungsmodells. Es werden mehrere adaptive Biegeträger getestet und im Hinblick auf die Realisierbarkeit der angestrebten Verformungsmanipulation untersucht. Die Ergebnisse werden im passiven und adaptiven Zustand mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Kapitel 7 dient der Zusammenfassung der Erkenntnisse dieser Arbeit. Darüber hinaus werden Anregungen für Folgeuntersuchungen gegeben.

2 Adaptivität

Adaptive Systeme sind anpassungsfähig und reagieren auf äußere Einwirkungen. In der Natur gibt es eine Vielzahl von Beispielen, in denen sich Systeme selbstständig an veränderte Einwirkungen anpassen. Dieses Grundprinzip konnte in technische Anwendungen in anderen Ingenieurdisziplinen, wie z. B. dem Maschinenbau, übertragen werden. Adaptivität im Bauwesen und adaptive Tragwerke sind bisher hauptsächlich in der Forschung zu finden. Eine kurze Abgrenzung zwischen bereits untersuchten Tragwerken und dem in dieser Arbeit vorgestellten adaptiven Biegeträgern wird in Abschnitt 2.2 vorgenommen.

2.1 Adaptivität in der Natur

In der Natur gibt es unzählige Beispiele von Systemen, die sich anpassen können [10]. Ein Blick in diese Vorgänge erscheint lohnenswert, da auch bei technischen Systemen bzw. Tragwerken daraus Nutzen gezogen werden kann. Es folgt eine kurze Betrachtung, die sich auf Bewegungen von Pflanzen beschränkt.

Pflanzen sind adaptive Systeme, die auf verschiedene Reize reagieren. Beispielsweise ändern Bäume ihre Wachstumsrichtung, was als Beispiel für eine langfristige Adaption gilt [58]. Eine kurzzeitige, in nahezu Echtzeit verlaufende Adaption ist z. B. die Änderung der Neigung von photosynthetischen Organismen (positive Photonastie¹), sodass sie für einen möglichst langen Zeitraum zur Sonne hin ausgerichtet sind [37]. Eine durch einen Reiz (z. B. Strahlung) ausgelöste Bewegung von Pflanzen ist eine Nastie. Diese wird über die Veränderung im osmotischen Potenzial der Zellen gesteuert. Der Druck in diesen Zellen wird als Turgordruck oder Wasserstress bezeichnet [38]. Abbildung 2.1 zeigt eine Zelle im druckbehafteten, turgeszenten Zustand (oben) und im erschlafften Zustand (unten). Durch einen Wechsel des Turgordruckes in den Zellen kommt es zu Bewegungen, die Turgorbewegungen genannt werden. Diese Turgorbewegungen sind reversibel und können relativ schnell, im Bereich von Minuten bei Druckzunahme und Sekunden bei Druckabnahme, stattfinden [80]. Durch eine Art Vorspannung kann bei Bedarf noch schneller Energie in Form von Bewegung freigesetzt werden [74]. Die Klappbewegungen einiger Pflanzen dauern dadurch nur 10 bis 30 ms [95]. Bei der Venusfliegenfalle (*Dionaea muscipula*) dauert dieser Bewegungsvorgang beispielsweise ca. 100 ms und erfolgt unmittelbar, nachdem ein mechanischer Kontakt den Vorgang ausgelöst hat [70]. Hier kann von einer Anpassung der Geometrie in Echtzeit gesprochen werden.

Ein weiteres Beispiel für eine Turgorbewegung liefert die Mimose (*Mimosa pudica*). Auf Berührungsreize reagiert die Mimose durch Turgordruckänderungen innerhalb weniger Sekunden mit einem Einklappen der Fiederblättchen und dem Absenken ihrer Blattstiele [35, 72]. Abbildung 2.2 zeigt eine Mimose im gereizten und ungereizten Zustand. Besonders interessant ist

¹ von Altgriechisch *phos*, zu Deutsch „Licht“ und von Altgriechisch *nastos*, zu Deutsch „festgedrückt“

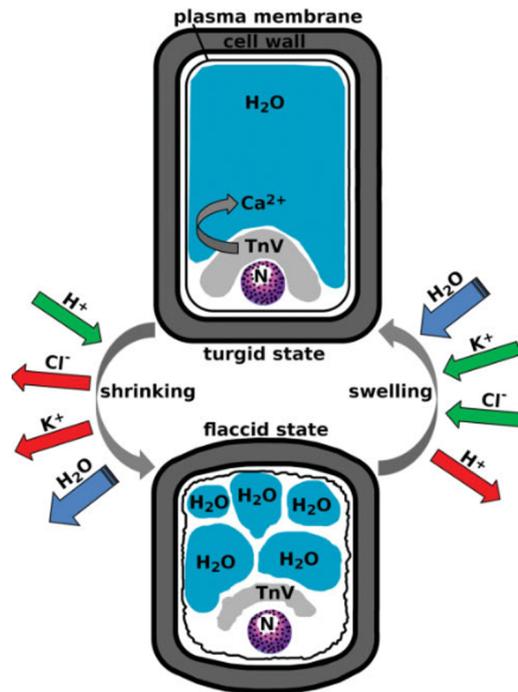


Abb. 2.1: Schematische Darstellung einer Zelle und deren Veränderung bei Druckzunahme (oben) und Druckabnahme (unten) aus [70] (nach [80])

der Mechanismus, der zur Bewegung der Pflanzen führt. Wasseraufnahme innerhalb der Zellen aufgrund von Osmose durch die semipermeablen Zellwände bewirkt einen Überdruck, der eine Ausdehnung hervorruft. Durch unterschiedliche Turgordruckniveaus in den Zellen können nicht nur Stabilität bei nichtverholzten Pflanzen erzeugt, sondern zum Teil komplexe Bewegungen hervorgerufen werden. Die Zellen, die durch Turgorzunahme eine Senkung in den Pflanzenteilen erzeugen, werden in der Pflanzenkunde auch Flexoren² genannt [75]. Extensor ist die Bezeichnung für eine Zelle, deren Druckzunahme eine Aufrichtung der Pflanze erzeugt. Diese häufig paarweise einseitig angeordneten Zellen erzeugen durch die Druckzunahme bzw. -abnahme eine Biegung von Blättern oder Stielen. Der Turgordruck erreicht bei Pflanzen einen Wert von bis zu 7 bar [75].

Pflanzen sind also durch die Regulierung des Turgordruckes in den Zellen in der Lage, auf äußere Reize zu reagieren und komplexe Bewegungen auszuführen. Die Biegung von Pflanzenstielen durch exzentrisch angeordnete Zellen ist interessant und eignet sich für die Übertragung auf Tragwerke. In dieser Arbeit sollen jedoch keine komplexen Bewegungen erzeugt werden, vielmehr soll das Prinzip auf die Minimierung von Verformungen angewandt werden. Dies wird in Abschnitt 2.3 umgesetzt.

² von Lateinisch *flexio*, zu Deutsch „Biegung“

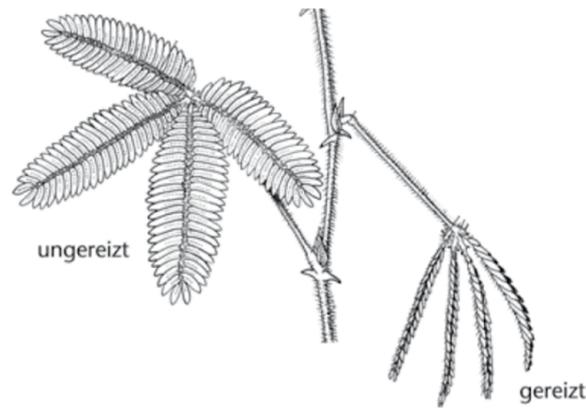


Abb. 2.2: Turgorbewegung der *Mimosa pudica* im ungeritzten und gereizten Zustand (aus [95])

2.2 Adaptive Tragwerke – Stand der Technik

Durch die Erkenntnisse über Turgorbewegungen in Pflanzenzellen hat sich in den letzten Jahren ein neues Feld der Forschung eröffnet. Die biologischen Prinzipien wurden auf technische Systeme zur Bewegung von biegsamen Robotern, sogenannten „Soft Robotics“, übertragen [97]. „Soft Robotics“ umfasst alle weiche, biegsame technische Systeme [100]. Sie bestehen gewöhnlich aus Elastomeren oder ähnlichen Materialien, in denen über einen pneumatischen Überdruck in einer oder mehreren Druckkammern (Zellen) Bewegungen hervorgerufen werden. Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig, beispielsweise können damit flexible Greifarme für empfindliche Gegenstände [40] oder Fingerprothesen hergestellt werden [62]. In anderen technischen Bereichen sind adaptive Systeme ebenfalls weit verbreitet. Eine umfangreiche Auflistung ist unter anderem in [51] gegeben.

Wandelbare Dächer oder bewegliche Brückenbauwerke sind schon länger Teil der gebauten Umwelt. Diese ändern ihre Geometrie bzw. Form bei Bedarf, um die Funktionalität zu erhöhen. Eine Optimierung des Tragverhaltens, indem Kräfte bzw. Spannungen manipuliert werden, findet nicht statt.

Die Definition von adaptiven Tragwerken, wie sie in der vorliegenden Arbeit betrachtet werden, basiert auf [85, 86]. Adaptive Tragwerke beruhen auf dem Zusammenspiel von Aktorik, Sensorik und Regelungseinheit. Sie manipulieren ihren Lastabtrag und passen sich an externe Einwirkungen an. Das Ziel ist eine Optimierung des Tragverhaltens, was zu einem ressourcenminimalen und emissionsarmen Tragwerk führt. Sensoren erkennen, wenn seltene hohe Lasten auf das Tragwerk einwirken und leiten diese Informationen an eine Regelungseinheit weiter. Diese wertet die Sensorsignale aus und übergibt, falls notwendig, die Befehle an die Aktorik. Das Zusammenspiel wurde erstmals in [104] formuliert. Abbildung 2.3 zeigt die Interaktion der Komponenten mit dem Tragwerk und untereinander.

Das Adaptionsziel ist abhängig vom Tragwerk und kann Kräfte bzw. Spannungen, Verformungen oder Schwingungen etc. umfassen. Eine Kombination von mehreren Zielgrößen mit entsprechenden Nebenbedingungen ist denkbar. Die Adaption kann am gesamten Tragwerk oder an einzelnen Tragwerkselementen erfolgen.

Realisierte Beispiele beschränken sich in weiten Teilen auf die Schwingungsreduktion von Hochhäusern bei Erdbeben- und Windanregungen. Dieser Aspekt wurde vor allem im letzten

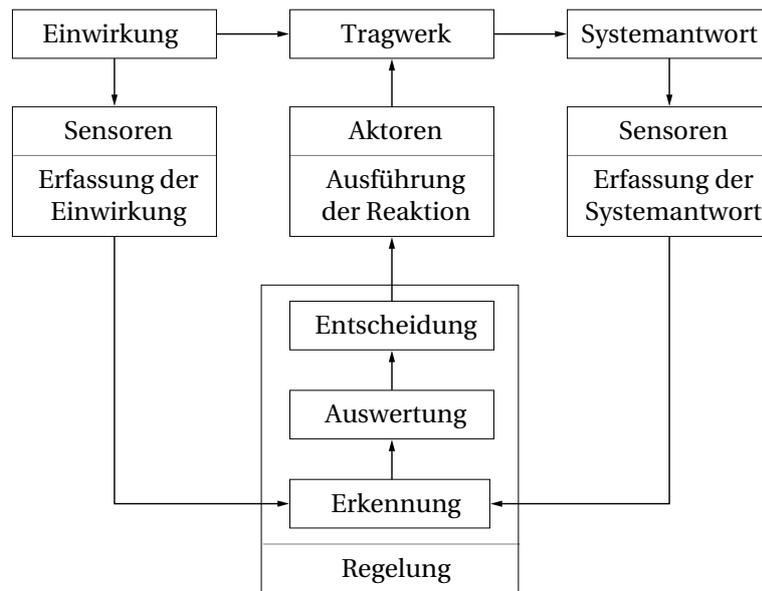


Abb. 2.3: Regelkreis eines adaptiven Tragwerks nach [104] (aus [96])

Jahrhundert sehr gut erforscht und in der Baupraxis umgesetzt. Übersichten sind u. a. in [1, 9, 27, 28, 44, 76, 88, 89] gegeben. Definitionen von passiven, semi-aktiven, hybriden und aktiven Systemen zur Schwingungsreduktion sind z. B. in [9, 39] zu finden. Umgesetzt wurde weiterhin in [6] eine Spannbandbrücke, bei der die Schwingungen aktiv durch zwei pneumatische Linearaktoren reduziert werden. Die oben aufgeführten Beispiele beschränken sich auf die Manipulation von Schwingungen. Ob dadurch ressourceneffizienter gebaut werden kann, wird nicht untersucht.

In der Forschung lassen sich wenige Beispiele finden, die den Lastabtrag bei quasi-statischen Belastungen manipulieren und die Adaptionszielgröße nicht auf Schwingungen beschränken. In [47] wird zwischen externer und interner Aktuierung unterschieden. Bei bisherigen Forschungsvorhaben zu adaptiven Tragwerken handelt es sich entweder um Stabtragwerke, bei denen einzelne Stäbe aktulierbar sind, oder um eine externe Aktuierung, bei der die Aktorik additiv, z. B. an den Auflagern, hinzugefügt wird. In diesem Fall liegt eine klare Trennung zwischen Tragwerk und Aktorik vor.

In [82, 84] wird ein auskragender Fachwerkträger aus Stahl untersucht, der über elektrische Linearaktoren in den Diagonalen verfügt. Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Verformungen aufgrund einer externen Belastung minimal gehalten werden können. Darüber hinaus wird nachgewiesen, dass durch die Adaptivität nicht nur Material, sondern auch Energie eingespart wird [83]. Bei der Bilanzierung wird die eingesparte graue Energie der Betriebsenergie für die Aktuierung gegenübergestellt. Zum gleichen Ergebnis kommen die Autoren in [77], die diese Untersuchungen für ein adaptives Hochhaus durchführen. Dieses modular aufgebaute Hochhaus aus Stahl besitzt Hydraulikzylinder in den Stützen und in den aussteifenden Diagonalen und wird aktuell im Maßstab 1:1 als Forschungsbau realisiert [93, 101].

Der Vorteil einer externen Aktuierung liegt in der Möglichkeit, mit wenigen Aktoren den Lastabtrag des Tragwerks zu manipulieren. Im einfachsten Fall reicht bei statisch bestimmten Tragwerken ein einziger Aktor. Bei dem Aluminiumträger in [96] können mit nur einem Aktor am

Auflager die Verformungs- und Beanspruchungszustände im gesamten Träger manipuliert werden. Das durch die Aktorik induzierte Moment erzeugt einen konstanten Momentenverlauf zwischen den Auflagern. Die Charakteristik kann nicht verändert werden, lediglich die Höhe des konstanten Moments ist variierbar. Der Träger lässt sich entweder als Ganzes beeinflussen oder gar nicht. Eine abschnittsweise Manipulation, von zum Beispiel den am meisten beanspruchten Bereichen, ist nicht möglich. Auf unterschiedliche Lastfälle kann somit nur stark begrenzt reagiert werden. Dies stellt den größten Nachteil der externen Aktuierung dar.

Ein weiteres Beispiel einer externen Aktuierung ist die adaptive punktgestützte Holzschale aus [63, 87]. Drei der vier Auflagerpunkte sind in alle Raumrichtungen beweglich. Dadurch können der Spannungszustand in der Schale manipuliert und Spannungsspitzen bei asymmetrischen Lasten abgebaut werden. Gleichzeitig ist es durch die Auflagerverschiebungen möglich, Schwingungen aktiv zu dämpfen.

In [64] wird die Steifigkeit eines Biegeträgers aus glasfaserverstärktem Kunststoff in Abhängigkeit von einer externen Last gesteuert. Der Träger ist mittels Stahlstangen unterspannt. Die vertikale Verbindung zwischen Unterspannung und Träger stellt ein Hydraulikzylinder dar, der bei Bedarf ausgefahren wird. Ähnlich gehen die Autoren in [23, 24] vor. Hier werden Betonträger mittels verstellbaren Unterspannungen manipuliert. Im Fokus der Untersuchungen steht die Steigerung der Tragfähigkeit bei gleichbleibenden Querschnittsabmessungen.

Bei dem Spannbetonträger aus [79] ist die Vorspannkraft nicht vorher definiert und eingebracht, sondern ändert sich in Abhängigkeit von der äußeren Belastung. An der Stirnseite des Balkens sind Hydraulikpressen angebracht, die die Spannglieder bei einer Belastung verkürzen. In [68, 69] wird ein ähnlicher Ansatz verfolgt. Hier werden Verformungen ebenfalls über hydraulische Pressen an den Verankerungspunkten von Spannlitzen reduziert. Realisiert wurde das Konzept bei einem Fachwerkträger, der als Schalhautunterstützung dient. Bei beiden Untersuchungen liegt eine Trennung von Tragwerk und der am Rand angebrachten Aktorik vor. Auf unterschiedliche Laststellungen kann nicht reagiert werden, da der Verlauf der induzierten Spannungen über die Tragwerkslänge nicht variierbar ist.

Eine interne Aktuierung im Inneren eines Bauteils, wie sie in dieser Arbeit untersucht wird, ist bisher noch nicht Gegenstand der Forschung gewesen. Der Vorteil dieses Ansatzes ist die Möglichkeit, den Lastabtrag lokal im Bauteil zu manipulieren. Diese abschnittsweise Aktuierung ist gerade bei häufig wechselnden Lastfällen von Nutzen.

2.3 Adaptive Biegeträger mit integrierter Aktorik

Weitspannende Tragwerke, deren Lastabtrag überwiegend über Biegung erfolgt, unterliegen in den meisten Fällen einer steifigkeitsdominierten Bemessung. Die Begrenzung von Verformungen ist häufig maßgebend bei der Auslegung bzw. Dimensionierung von Biegeträgern und Platten. Deshalb wird die Verformung (Durchbiegung in Feldmitte u_{mitte}) als Adaptionszielgröße gewählt. Die Verformungsgrenzen $l/200$ bzw. $l/500$ sind Richtwerte für den üblichen Hochbau [21]. Durch die Begrenzung der Verformung in den sogenannten Gebrauchstauglichkeitsnachweisen biegebeanspruchter Bauteile wird die Funktionalität sichergestellt und Schäden an angrenzenden Bauteilen (z. B. nichttragenden Zwischenwänden) werden vermieden. Durch die aktive Durchbiegungsreduktion kann das Steifigkeitsproblem in ein Festigkeitsproblem über-

führt werden.

Die veränderlichen Lasten, die im Bauwesen zur Dimensionierung von Tragwerken verwendet werden, sind mit einer geringen Auftretenswahrscheinlichkeit behaftet. Der Bezugszeitraum, in dem die Lasten statistisch gesehen einmal auftreten, liegt für die genormten Schnee- und Windlasten bei 50 Jahren [19, 20]. Das entspricht einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2 %. Bei Erdbebenlasten sind es 475 Jahre, was einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,2 % entspricht [22]. Bei den üblichen Nutzlasten ist eine Quantifizierung der Auftretenswahrscheinlichkeit nur schwer möglich, da diese stark von der Nutzung und dem jeweiligen Einzelfall abhängt. Zwei Fallbeispiele zeigen, dass eine geringe zeitliche Ausnutzung realistisch ist (vgl. Anhang E). Hörsäle werden im Regelbetrieb pro Jahr lediglich 34 % der Zeit genutzt. Bei einem standardmäßigen Fußballstadion liegt der Ausnutzungsgrad bei einem normalen Spielbetrieb bei nur 0,8 % des Jahres. Auch wenn diese Abschätzungen mit einer Unschärfe versehen sind, zeigen sie, wie selten die angesetzten Nutzlasten auftreten können.

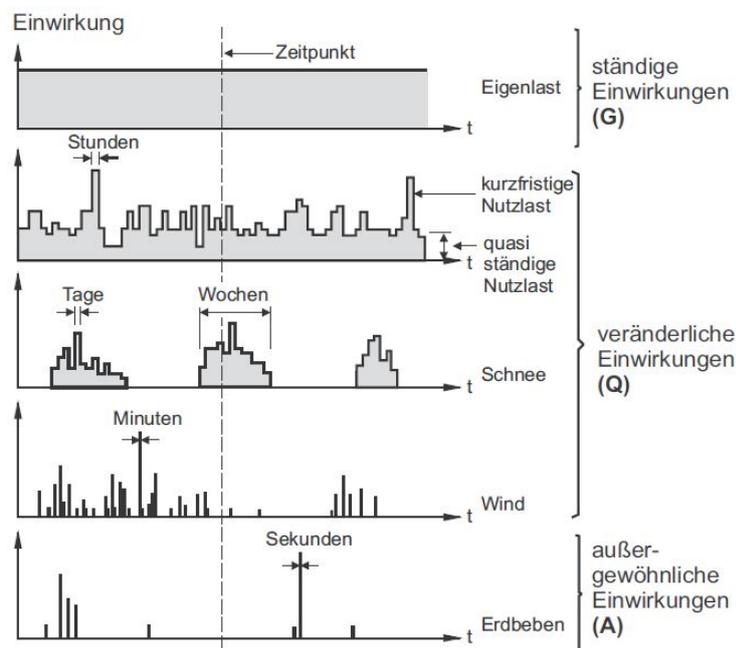


Abb. 2.4: Schematische Einwirkungsdauer unterschiedlicher Lasten im Bauwesen (aus [105])

Neben der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit ist die Dauer der veränderlichen Last ebenfalls begrenzt und in Relation zur Lebensdauer des Tragwerks gering. In Abbildung 2.4 sind das Auftreten und die Einwirkungsdauer von veränderlichen Lasten schematisch dargestellt. Viele herkömmliche Tragwerke sind für den Großteil ihrer Lebensdauer überdimensioniert und werden nur kurzzeitig belastet. Adaptive Tragwerke können auf diese seltenen kurzzeitigen, aber hohen Lasten reagieren.

Biegeträger sind in nahezu jedem Gebäude zu finden. Üblicherweise wird von einem Biegeträger oder Balken gesprochen, wenn die Breite b und die Höhe h im Verhältnis zur Länge l klein sind. Bei Biegeträgern handelt es sich um lineare Tragwerke, die leicht überhöht realisiert werden können, um kriechbedingte Durchbiegungen auszugleichen. Ab welcher Krümmung k von einem Bogen gesprochen wird, ist nicht definiert. Die Querschnitte von Biegeträgern sind

vielfältig. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich rechteckige Querschnitte betrachtet, ohne dadurch die Allgemeingültigkeit der Aussagen zu gefährden, da die Querschnittsform keinen nennenswerten Einfluss auf die Aktuierung hat. Die analytische Schnittgrößenbestimmung von Biegeträgern ist seit vielen Jahren bekannt, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird. Nachschlagewerke sind u. a. [34, 65, 90, 91, 105].

Im passiven Zustand biegt sich ein Biegeträger infolge äußerer Einwirkungen in Eigengewichtsrichtung durch. Während des Adaptionsvorgangs soll sich der Biegeträger in die entgegengesetzte Richtung verformen (aktiver Zustand). Eine Superposition dieser beiden Zustände soll im adaptiven Zustand eine Nullverformung erreichen (vgl. Abbildung 2.5).

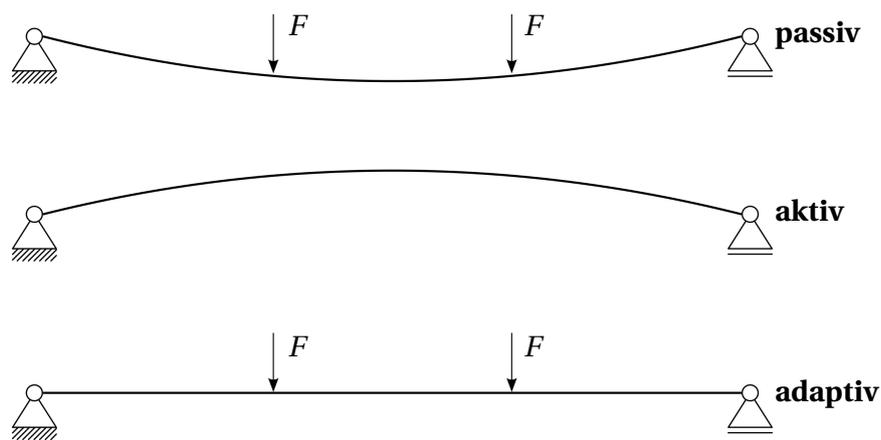


Abb. 2.5: Prinzip der Superposition bei adaptiven Biegeträgern

Die Superposition von aktivem und passivem Zustand wurde für Stabtragwerke in [96] erörtert. Das Konzept, passive und aktive Zustände zu überlagern, wurde in [86] bereits für Spannungsfelder dargestellt und für ein Schalentragerwerk umgesetzt. Da bei Biegeträgern häufig die Verformungen maßgebend bei der Bemessung und Dimensionierung sind, wird das Prinzip erweitert und auf die Durchbiegung u angepasst:

$$u_{\text{passiv}} + u_{\text{aktiv}} = u_{\text{adaptiv}}. \quad (2.1)$$

Bei herkömmlichen passiven Biegeträgern ist die Verschiebung u_{passiv} abhängig von der externen Last F , die auf das Tragwerk einwirkt. Die Verschiebungen bei den hier vorgestellten Biegeträgern werden aktiv manipuliert. Beim Einsatz von Aktoren, die mit einem hydraulischen Druck p arbeiten, ist die aktive Verformung $u_{\text{aktiv}}(p)$ abhängig von diesem. Daraus folgt, dass die Durchbiegung im adaptiven Zustand von F und von p abhängt:

$$u_{\text{passiv}}(F) + u_{\text{aktiv}}(p) = u_{\text{adaptiv}}(F, p). \quad (2.2)$$

Gleichung 2.2 zeigt den generellen Zusammenhang der verschiedenen Zustände und die Abhängigkeit der Durchbiegung von der externen Last F und vom hydraulischen Druck p . Sie zeigt, dass der Druck abhängig von der äußeren Last ist. Erhöht sich die äußere Last, so muss auch der hydraulische Druck steigen, um die gewünschte Verformungskompensation aufrecht-

zuerhalten. Deshalb wird Gleichung 2.2 um die Abhängigkeit $p(F)$ erweitert:

$$u_{\text{passiv}}(F) + u_{\text{aktiv}}(p(F)) = u_{\text{adaptiv}}(F, p(F)). \quad (2.3)$$

Um eine möglichst sinnvolle Manipulation zu erzielen, sollte die superponierte Durchbiegung möglichst klein sein³. Es gilt folgende Bedingung:

$$u_{\text{adaptiv}}(F, p(F)) \stackrel{!}{\approx} 0. \quad (2.4)$$

Die bisher angestellten Überlegungen sind allgemeingültig und unabhängig vom Aktuierungskonzept. Um den in Abbildung 2.5 gezeigten aktiven Verformungszustand zu erzeugen, werden Aktoren integriert, die mit hydraulischen Drücken arbeiten. Möglich ist – bezogen auf den passiven Zustand – entweder ein kontrahierender Aktor in der Zugzone oder ein expandierender in der Druckzone [48]. Zur Expansion eignet sich ein Überdruck, zur Kontraktion ein Unterdruck. Ein Überdruck lässt sich jedoch deutlich einfacher erzeugen als ein Unterdruck. Alternativ kann über eine Kraftumlenkung aus einem Überdruck eine Kontraktion erzeugt werden. Dies ist beispielsweise über *Pneumatic Artificial Muscles* (PAM) möglich, wird aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt, da die erzeugbaren Kräfte zu gering sind [29]. Alle weiteren Aussagen in dieser Arbeit beziehen sich auf expandierende Aktoren, die sich aufgrund eines hydraulischen Überdrucks verformen. Die expandierenden hydraulischen Aktoren in der Druckzone ähneln den Pflanzenzellen, die ebenfalls außermittig angeordnet sind und durch einen hydraulischen Überdruck Turgorbiegungen in Blättern erzeugen. In Abbildung 2.6 sind analog zu Abbildung 2.5 die drei Zustände eines Biegeträgers (passiv, aktiv und adaptiv) dargestellt, die durch expandierende Aktoren in der Druckzone erreicht werden können.

In Kapitel 3 wird auf die Zusammenhänge zwischen dem hydraulischen Druck und den Reaktionen innerhalb des Biegeträgers näher eingegangen. Die Realisierung des oben aufgeführten Konzeptes ist Gegenstand von Kapitel 5. Die Nachweise der angestrebten Verformungskompensation erfolgen in Kapitel 4 numerisch und in Kapitel 6 experimentell.

³ Der jeweilige Grenzwert der Durchbiegung sollte abhängig vom Tragwerk und dessen Einsatz individuell festgelegt werden. Hierauf wird deshalb nicht weiter eingegangen.

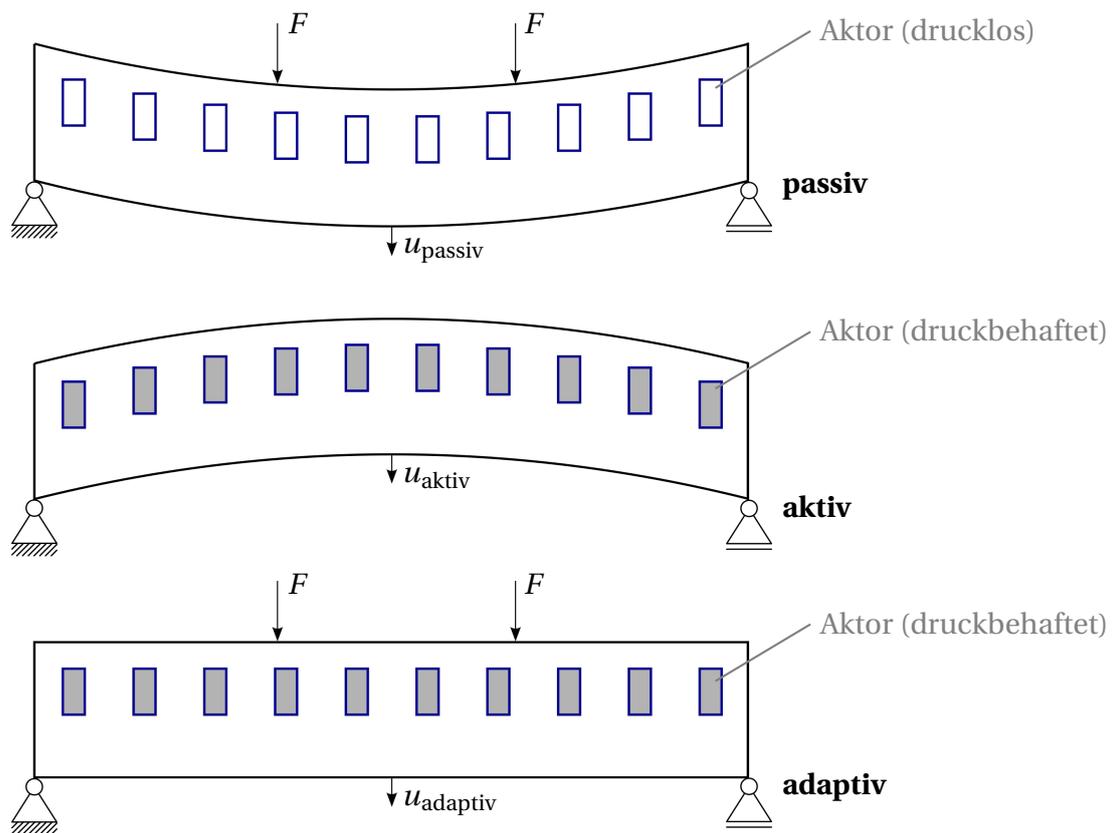


Abb. 2.6: Prinzip der Zustandsüberlagerung bei adaptiven Biegeträgern mittels integrierter fluidischer Aktoren (nach [49])

3 Strategien zur Bestimmung der Aktorkenndaten

In diesem Kapitel wird auf die grundlegenden Zusammenhänge zwischen dem hydraulischen Innendruck und den daraus resultierenden Kräften innerhalb des Balkens eingegangen. Die zentralen Fragen, die sich bei adaptiven Biegeträgern ergeben, werden beantwortet. Diese sind:

- Wo müssen Aktoren platziert werden?
- Wie viele Aktoren müssen verwendet werden?
- Wie hoch muss der hydraulische Druck innerhalb der Aktoren sein, um die passive Durchbiegung zu kompensieren?

Zur Beantwortung der Fragen wird ein analytisches Berechnungsverfahren auf Grundlage der Balkentheorie vorgestellt (vgl. Abschnitt 3.1), das gleichzeitig die Zusammenhänge zwischen hydraulischem Innendruck und resultierenden Kräften herstellt. Darauf aufbauend wird aufgezeigt, dass durch das Aktuierungskonzept auf eine große Bandbreite von Lastfällen optimal reagiert werden kann. Hierzu finden mehrere Grenzwertuntersuchungen statt: zunächst mit einem Aktor in Feldmitte, danach mit mehreren Aktoren, die den gleichen Druck aufweisen, und zuletzt mit mehreren Aktoren, die ein an den äußeren Lastfall angepasstes Druckniveau aufweisen.

3.1 Analytisches Berechnungsverfahren nach Balkentheorie

Die Berechnungen erfolgen anhand eines einfachen Einfeldträgers. Hierbei handelt es sich um theoretische Schnittkraftverläufe, die sich im realen Biegeträger so nicht einstellen. Trotzdem ist es eine gute Möglichkeit, Aktorkenndaten, wie z. B. den benötigten hydraulischen Druck, zu bestimmen. Darüber hinaus können mit den durchgeführten Berechnungen die Simulationen mit der FEM auf ihre Plausibilität hin überprüft werden (vgl. Kapitel 4).

Durch den hydraulischen Druck p_A innerhalb eines Aktors werden über die Flächenpressung Kräfte in den Querschnitt des Biegeträgers eingeleitet. Die zur Verfügung stehende Fläche A_A , auf der der anliegende Druck p_A wirkt, bestimmt die resultierende Kraft F_A . Der Zusammenhang ist in Abbildung 3.1 dargestellt und berechnet sich wie folgt:

$$F_A = A_A \cdot p_A. \tag{3.1}$$

Da im Aktor der Druck senkrecht auf alle Seiten wirkt, erzeugt jeder Aktor i ein entgegengesetztes Kräftepaar mit jeweils dem Betrag $F_{A,i}$. Durch dieses Kräftepaar dehnt sich ein Biegeträger

in seiner Bauteillängsachse aus bzw. es entstehen Normalspannungen bei behinderter Längsdehnung.

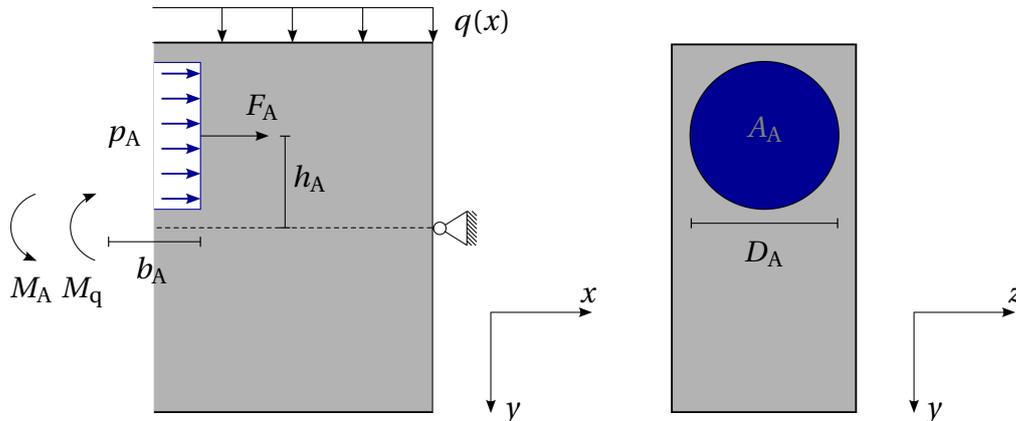


Abb. 3.1: Schnitt durch einen integrierten Aktor mit der resultierenden Kraft F_A und dem Moment M_A

Auf diese Normalkräfte wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen. Da für die Verformung bei Biegeträgern die Biegebeanspruchung maßgebend ist, sieht das verwendete Aktuierungskonzept die aktive Induzierung von gegenläufigen Momenten vor, um die Durchbiegung zu manipulieren. Deshalb werden die Aktoren nicht mittig im Querschnitt platziert, sondern die resultierenden Kräfte $F_{A,i}$ mit einer Ausmitte $h_{A,i}$ zur Schwerelinie des Biegeträgers angeordnet (siehe Abbildung 3.1). Dadurch wird ein Momentenpaar $M_{A,i}$ erzeugt, das sich wie folgt berechnet:

$$M_{A,i} = F_{A,i} \cdot h_{A,i} = A_{A,i} \cdot p_{A,i} \cdot h_{A,i}. \quad (3.2)$$

Wird die Gleichung nach dem hydraulischen Druck $p_{A,i}$ im Aktor umgestellt

$$p_{A,i} = \frac{M_{A,i}}{A_{A,i} \cdot h_{A,i}}, \quad (3.3)$$

kann dieser in Abhängigkeit des Momentes $M_{A,i}$ berechnet werden. Es gilt: je größer das Biegemoment sein soll, desto größer muss der hydraulische Druck sein. Je größer der Durchmesser $D_{A,i}$ bzw. die Fläche $A_{A,i}$ und der Hebelarm $h_{A,i}$, desto größer ist die resultierende Kraft $F_{A,i}$ und das resultierende Moment $M_{A,i}$ bei gleichem Druck $p_{A,i}$. Ziel ist es, die Momente M_q aus den äußeren Lasten durch ein Aufzwingen entgegengesetzter gleich großer Momente $M_{A,i}$ aus der Aktorik zu kompensieren:

$$M_A + M_q = 0. \quad (3.4)$$

Diese Zusammenhänge sind bezogen auf die Trägerlängsachse nur an den Positionen der Aktoren x_i gültig. Da ein Aktor vollständig von Beton umgeben ist, schließen sich die Kräfte bei seiner Ausdehnung kurz. Deshalb wirken die Kräfte nur in einem kleinen Bereich um den Aktor. Abbildung 3.2 zeigt den Verlauf der Normalkraft an einem statisch bestimmt gelagerten Träger. Zugkräfte sind in Rot und Druckkräfte in Blau dargestellt.

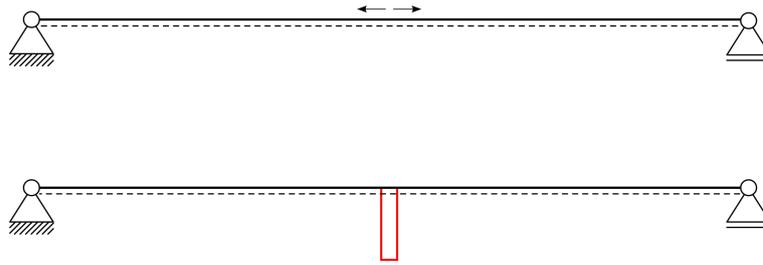


Abb. 3.2: Normalkräftepaar, das durch einen Aktor erzeugt wird, und der dazugehörige Normalkraftverlauf für einen statisch bestimmt gelagerten Biegeträger

Ist die Ausdehnung des Biegeträgers behindert, indem z. B. ein zweiwertiges Auflager an beiden Enden angebracht ist, ändert sich der Normalkraftverlauf wesentlich. Da es aufgrund der statisch unbestimmten Lagerung zu Zwängungen kommt, wird der Biegeträger links und rechts vom Aktor überdrückt, auf Höhe des Aktors herrschen hingegen Zugkräfte, wie in Abbildung 3.3 ersichtlich wird.

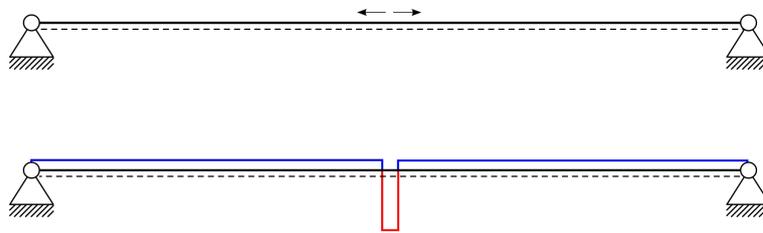


Abb. 3.3: Normalkräftepaar, das durch einen Aktor erzeugt wird, und der dazugehörige Normalkraftverlauf für einen statisch unbestimmt gelagerten Biegeträger

Der Momentenverlauf, den ein Aktor mit seinem resultierenden Momentenpaar M_A erzeugt, ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Für den Verlauf des Biegemomentes macht es keinen Unterschied, ob der Biegeträger statisch bestimmt gelagert ist oder nicht, solange die Auflager keine Momente aufnehmen können. Hier ist der Bereich, in dem der Aktor einen Einfluss auf den Momentenverlauf hat, auf die Breite b_A des Aktors beschränkt.

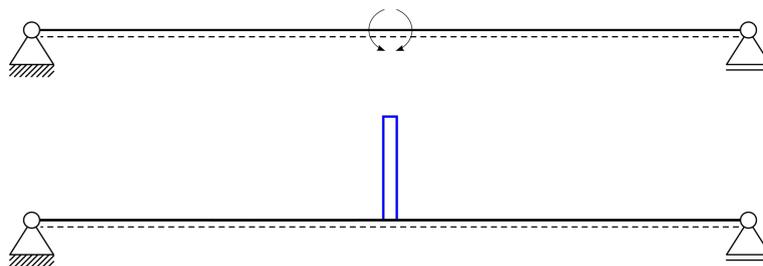


Abb. 3.4: Momentenpaar, das durch einen Aktor erzeugt wird, und der dazugehörige Momentenverlauf für einen statisch bestimmt gelagerten Biegeträger

Die Normalkraft- und Momentenverläufe zeigen, dass nach Balkentheorie nur der Bereich, in dem der Aktor liegt, beeinflusst wird. Ausnahme bildet der Normalkraftverlauf des statisch unbestimmten Biegeträgers durch die behinderte Ausdehnung des Trägers in Längsrichtung. Der sprunghafte Verlauf wird sich in Realität jedoch so nicht einstellen, da die Modellierung

der Aktorwirkung als Einzellasten und -momente eine für die Anwendung der Balkentheorie notwendige Idealisierung darstellt. Trotzdem ist es ein geeigneter Ansatz, um die notwendigen hydraulischen Drücke zu bestimmen. Mit lediglich einem Aktor werden die hydraulischen Drücke leicht unterschätzt, da sie zu keiner vollständigen Momentenkompensation an jeder Stelle des Trägers führen. Dies liegt an der im Vergleich zur Balkenlänge l kleinen Aktorenbreite b_A und an der begrenzten Anzahl an Aktoren. Das Moment aus der äußeren Last wirkt – in den allermeisten Lastfällen – über die gesamte Balkenlänge (vgl. Abbildung 3.8). Zudem ist ersichtlich, dass ein einziger Aktor voraussichtlich nicht zu einer befriedigenden Manipulation der Spannungen und Verformungen des Biegeträgers führen wird. Es kann zwar mit einem Aktor in Feldmitte die gewünschte Verformungsmanipulation des Biegeträgers erfolgen, allerdings nur bei einer inhomogenen Ausnutzung des Biegeträgers, wie die folgenden Betrachtungen zeigen. Die Biegelinie, die ein Aktor in Feldmitte (vereinfachend wird ein Momentenpaar von 1 kNm bzw. -1 kNm angesetzt) erzeugt, ist in Abbildung 3.5 für einen Biegeträger (Länge = 1 m; E-Modul = 0,001 MPa; Flächenträgheitsmoment = 1 m^4 ; Querschnittsfläche = 1 m^2) dargestellt. Die Aktorbreite und somit der Abstand der beiden angesetzten Momente liegt bei 0,1 m. Die Momentenverläufe und Biegelinien werden mit dem Programm Stab2D (Version 5.78) erzeugt.

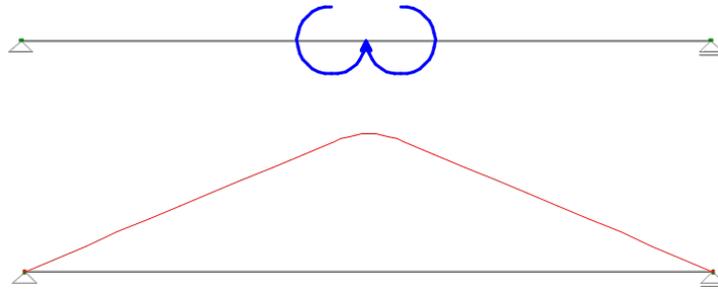


Abb. 3.5: Momentenpaar M_A , das durch einen Aktor erzeugt wird, und die dazugehörige Biegelinie

Auf den Einfeldträger in Abbildung 3.5 wirkt weder eine äußere Belastung noch sein Eigengewicht. Da immer eine der Aktorik entgegenwirkende Kraft vorherrscht, meist eine Nutz- oder Verkehrslast, in jedem Fall aber das Eigengewicht, wird zusätzlich zum Momentenpaar eine Streckenlast q auf den Balken aufgebracht. Die Streckenlast wird mit 1 kN/m angesetzt, daraus folgt ein Moment M_q in Feldmitte von $0,125 \text{ kNm}$ (siehe Abbildung 3.6).

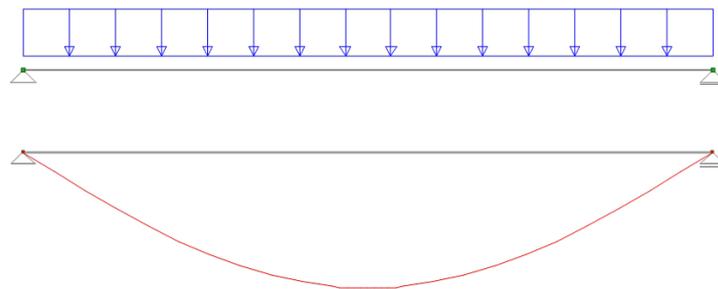


Abb. 3.6: Streckenlast q , die ein Moment erzeugt, das dem Moment aus dem Aktor entgegenwirkt, und die dazugehörige Biegelinie

Zur Verdeutlichung des Einflusses eines Aktors auf die Biegelinie wird die Größe des Momen-

tenpaares aus dem Aktor M_A variiert. Von der in Gleichung 3.4 aufgestellten Momentengleichheit wird bewusst abgewichen. Sie wird in Abschnitt 3.2 angewandt. In Tabelle 3.1 sind die Verhältnisse des aufgebrachten Momentenpaares M_A zum Moment M_q aus der äußeren Last q aufgeführt. Die Momente sind so gewählt, dass ein möglichst breites Spektrum an Verhältniswerten generiert wird.

Tab. 3.1: Momente für die Studie zur Biegelinie

Betrag des Momentenpaares M_A	Moment aus Streckenlast in Feldmitte M_q	Verhältnis $\frac{M_A}{M_q}$	Bezeichnung
0,0 kNm	0,125 kNm	0,0	
0,1 kNm	0,125 kNm	0,8	i)
0,5 kNm	0,125 kNm	4,0	ii)
1,0 kNm	0,125 kNm	8,0	iii)

Mit den Verhältniswerten aus Tabelle 3.1 sind drei Biegelinien berechnet und in Abbildung 3.7 dargestellt.

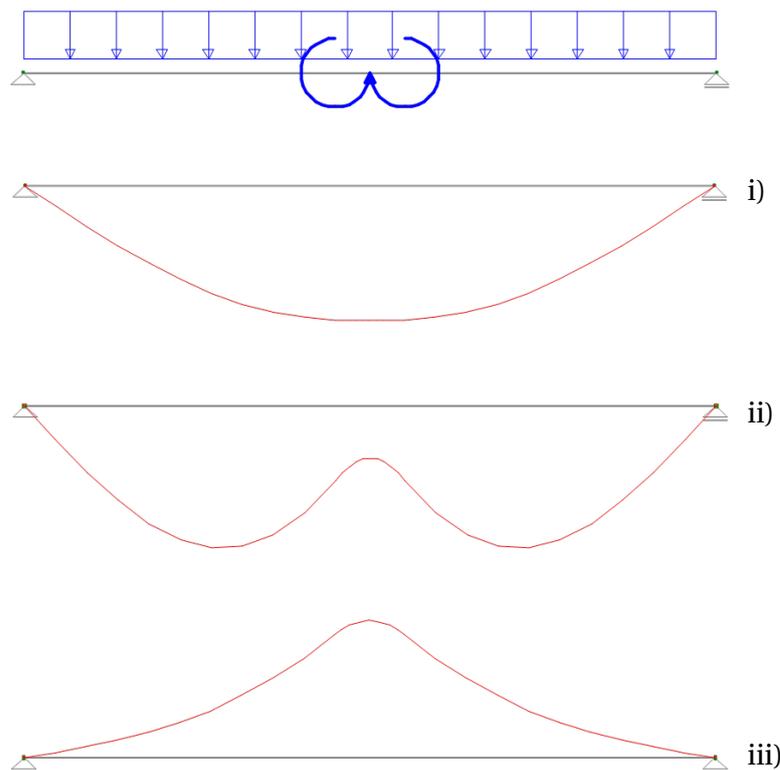


Abb. 3.7: Aufgebrachtes Momentenpaar M_A und Streckenlast q mit den Biegelinien für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii), und 8 iii)

In Fall i) dominiert die äußere Belastung, in Fall ii) herrscht ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Moment aus Aktor und Moment aus äußerer Belastung und in Fall iii) ein dominantes Moment aus dem Aktor. Biegelinie i) ähnelt der aus Abbildung 3.6 stark. Der Aktor hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Charakteristik der Biegelinie, die keinen Wendepunkt besitzt.

Bei der Biegelinie ii) ändert sich die Charakteristik hingegen stark. Es ist zu erkennen, dass der mittlere Abschnitt sich nach oben wölbt, der Verformung aus der äußeren Last entgegen.

Biegelinie iii) ähnelt der aus Abbildung 3.5, da der Einfluss der Streckenlast deutlich nachlässt und das Momentenpaar aus dem Aktor dominiert. Dieser Verlauf ist ebenfalls nicht erstrebenswert, da sich der Biegeträger nach oben biegt.

Die Momentenverläufe, die sich bei diesem Beispiel durch eine Überlagerung des Moments M_q aus der äußeren Streckenlast q und des Momentenpaars M_A aus dem Aktor ergeben, sind in den Abbildungen 3.8 und 3.9 dargestellt. Abbildung 3.8 zeigt zunächst die beiden Grenzverläufe, in denen links $q = 0$ und somit auch $M_q = 0$ und rechts $M_A = 0$ gilt.

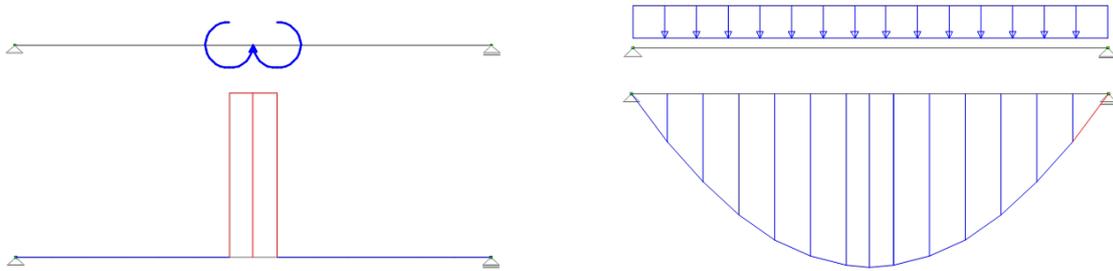


Abb. 3.8: Aufgebrachtes Momentenpaar M_A (links) und Streckenlast q (rechts) mit den entsprechenden Momentenverläufen

Wie bei den Biegelinien, lassen sich drei wesentliche Charakteristika der Momentenverläufe detektieren. Je nach Verhältnis zwischen Momentenpaar M_A und dem Moment aus der äußeren Last M_q stellt sich ein unterschiedlicher Momentenverlauf ein. In Abbildung 3.9 sind drei markante Verläufe für ein Verhältnis $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii) und 8 iii) dargestellt.

Mit einem Aktor in Feldmitte kann die Verformung eines Biegeträgers manipuliert werden, allerdings führt dies nicht zu einem homogenen Verlauf des resultierenden Moments bzw. der Biegelinie. Das Konzept wird deshalb auf mehrere Aktoren erweitert. In den folgenden Kapiteln werden die Schnittkraftverläufe mit mehreren Aktoren über die Bauteillängsachse verteilt vorgestellt. In Abschnitt 3.1.1 ist der Druck in allen Aktoren gleich. In Abschnitt 3.1.2 wird der Druck individuell angepasst.

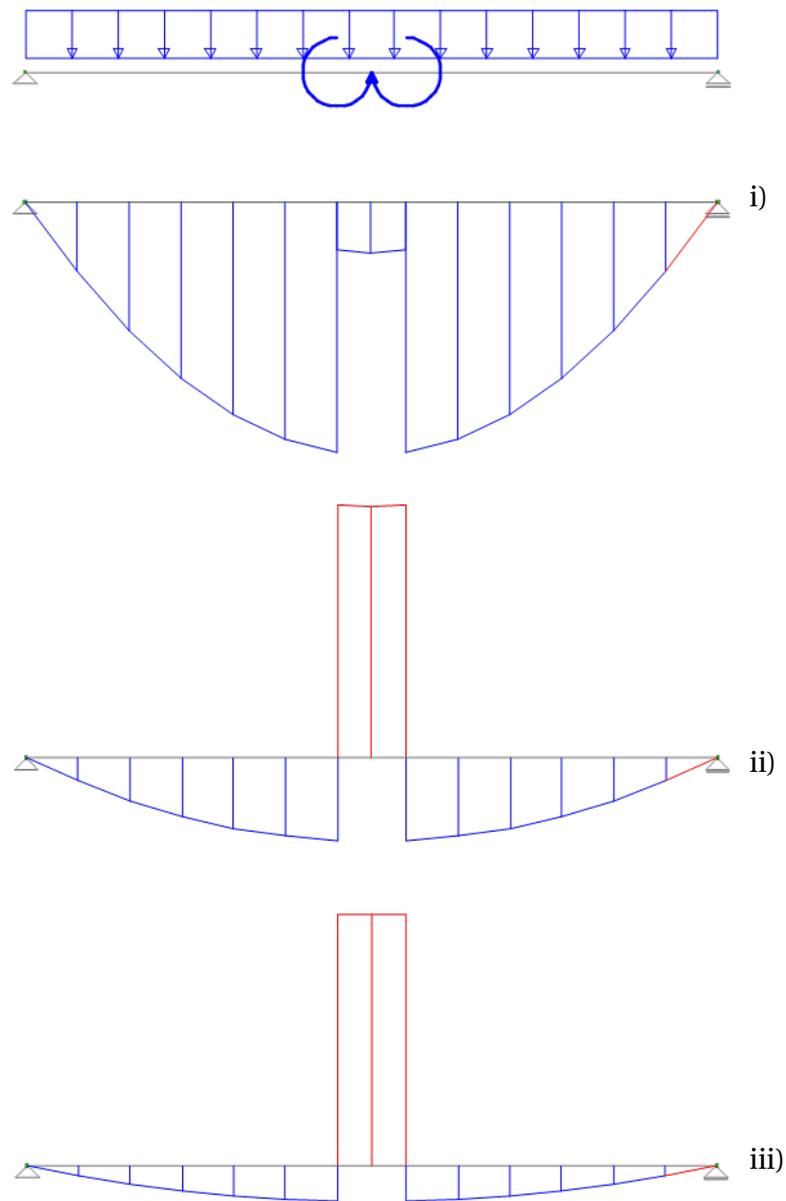


Abb. 3.9: Aufgebrachtes Momentenpaar M_A und Streckenlast q mit den theoretischen Momentenverläufen für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii), und 8 iii)

3.1.1 Mehrere Aktoren mit konstantem Druck

In diesem Abschnitt werden die Schnittkraftverläufe und die Biegelinien mit mehreren Aktoren vorgestellt. Der Druck wird vereinfacht in allen Aktoren gleich gewählt. Beispielhaft werden 10 Aktoren über die Balkenlänge gleichmäßig verteilt.

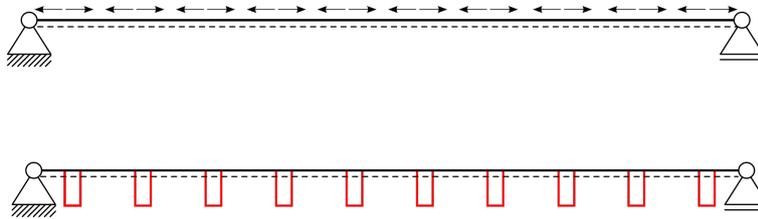


Abb. 3.10: Statisch bestimmt gelagerter Biegeträger mit 10 Aktoren und dazugehöriger Normalkraftverlauf

Abbildung 3.10 zeigt den Normalkraftverlauf eines Biegeträgers mit zehn Aktoren bei einer statisch bestimmten Lagerung, die eine Längenänderung des Balkens zulässt. Durch die nicht behinderte Ausdehnung in Bauteillängsrichtung entsteht, wie beim Beispiel mit einem Aktor, kein Zwang. Es entstehen Zugkräfte (rot), die über die Breite des jeweiligen Aktors b_A konstant sind. Zwischen den Aktoren ist der Biegeträger theoretisch normalkräftefrei. Ist der Biegeträger statisch unbestimmt gelagert und in seiner Ausdehnung in Längsrichtung behindert, entstehen zwischen den Aktoren Druckkräfte (blau) (siehe Abbildung 3.11).

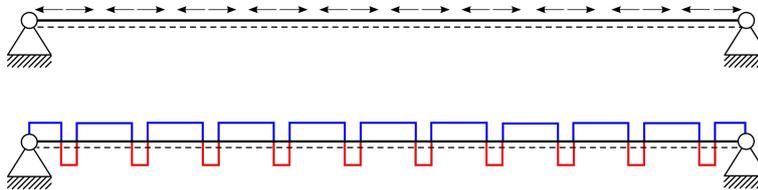


Abb. 3.11: Statisch unbestimmt gelagerter Biegeträger mit 10 Aktoren und dazugehöriger Normalkraftverlauf

Die statische Bestimmtheit hat keinen Einfluss auf den Momentenverlauf, solange die Auflager keine Momente aufnehmen können. Der hydraulische Druck ist in allen zehn Aktoren gleich groß. Folglich sind die Momentenpaare gleich groß und der theoretische Momentenverlauf stellt sich, wie in Abbildung 3.12 dargestellt, ein.

Die Biegelinie, die sich ergibt, wenn zehn Aktoren mit einem Momentenpaar aus ± 1 kNm wirken, ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

Wie bei dem obigen Beispiel mit einem Aktor durchgeführt, werden die Biegelinien und Momentenverläufe äquivalent mit zehn Aktoren erstellt. Es werden die Verhältnisse zwischen dem Moment aus den Aktoren M_A und dem maximalen Moment M_q aus der Streckenlast q ebenfalls zu 0,8 i), 4 ii) und 8 ii) gesetzt. Abbildung 3.14 zeigt die drei Biegelinien, die bei einer Überlagerung der Streckenlast q und der 10 Momentenpaare aus der Aktorik erzeugt werden.

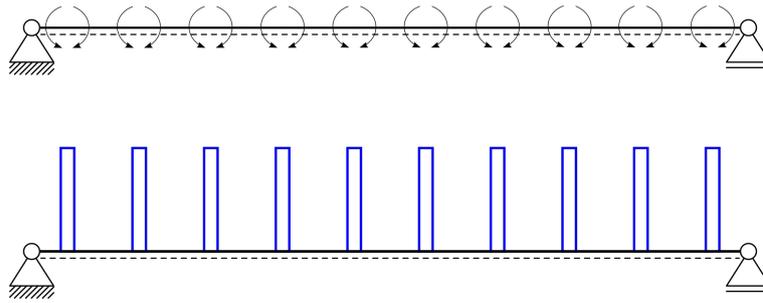


Abb. 3.12: Statisch bestimmt gelagerter Biegeträger mit 10 Aktoren und dazugehöriger Momentenverlauf

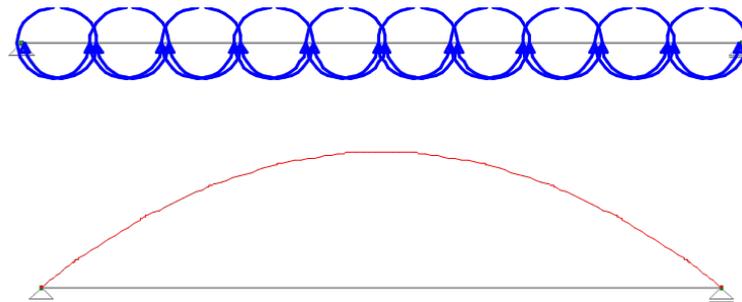


Abb. 3.13: Zehn Momentenpaare M_A , die durch zehn Aktoren erzeugt werden, und die dazugehörige Biegelinie

Die Biegelinie wird mit steigendem Aktormoment deutlich in ihrer Charakteristik verändert. Hier kann die Verformung in Feldmitte zu null gesetzt werden. Verlauf iii) in Abbildung 3.14 zeigt jedoch einen nicht erstrebenswerten Verlauf der Biegelinie.

Analog werden für die gewählten Verhältnisse die theoretischen Momentenverläufe bestimmt und in Abbildung 3.15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich je nach Größe der Momentenpaare der Momentenverlauf signifikant verändern lässt. Es passen die Momentenverläufe aus der Streckenlast und aus der Aktorik jedoch nicht zusammen. Die Streckenlast erzeugt einen quadratischen Momentenverlauf, der in Feldmitte sein Maximum besitzt. Der Momentenverlauf aus der Aktorik ist hingegen konstant über die Bauteilachse. So kann bei einer Überlagerung nur abschnittsweise das resultierende Moment annähernd null sein. Dies ist noch kein zufriedenstellendes Ergebnis.

Gäbe es für das gezeigte Beispiel einen einzigen Lastfall, der einen Momentverlauf erzeugt, der ebenfalls konstant zwischen den Auflagern ist und entgegengesetzt gerichtet, wäre ein konstanter Druck in den Aktoren akzeptabel. Im Bauwesen ist eine exakte Vorhersage der vielen unterschiedlichen Lasten wegen der großen Variation schwierig. Infolge des kombinierten Auftretens dieser unterschiedlichen Lasten entsteht im Träger wahrscheinlich nie ein konstanter Biegemomentenverlauf. Die logische Schlussfolgerung ist eine Anpassung des Druckes in den Aktoren an die äußeren Last. Dies ist Gegenstand des nächsten Unterkapitels (vgl. Abschnitt 3.1.2).

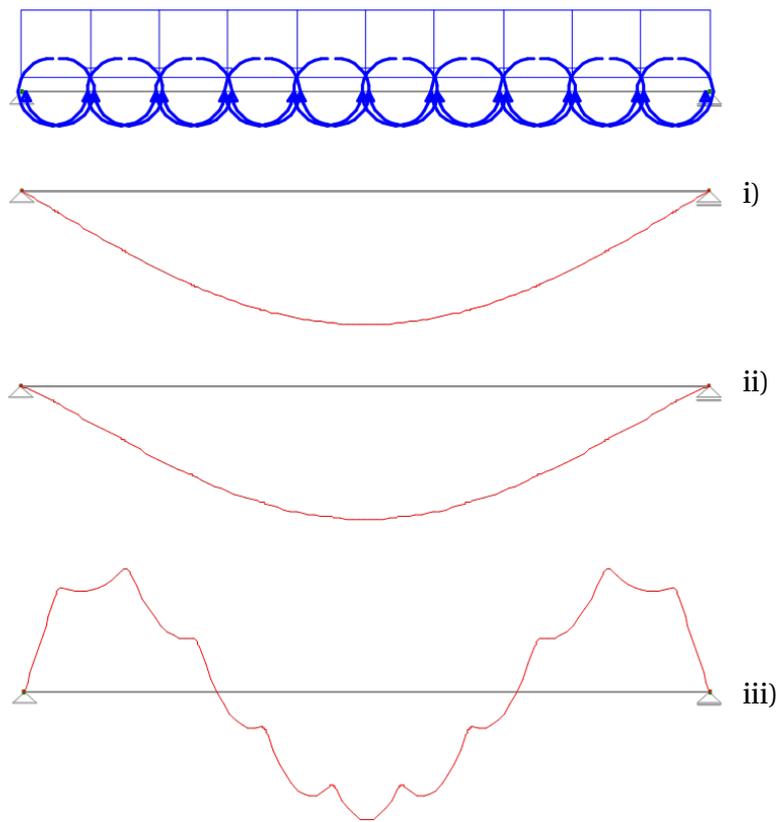


Abb. 3.14: Zehn aufgebrachte Momentenpaare M_A und Streckenlast q mit den Biegelinien für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii) und 8 iii)

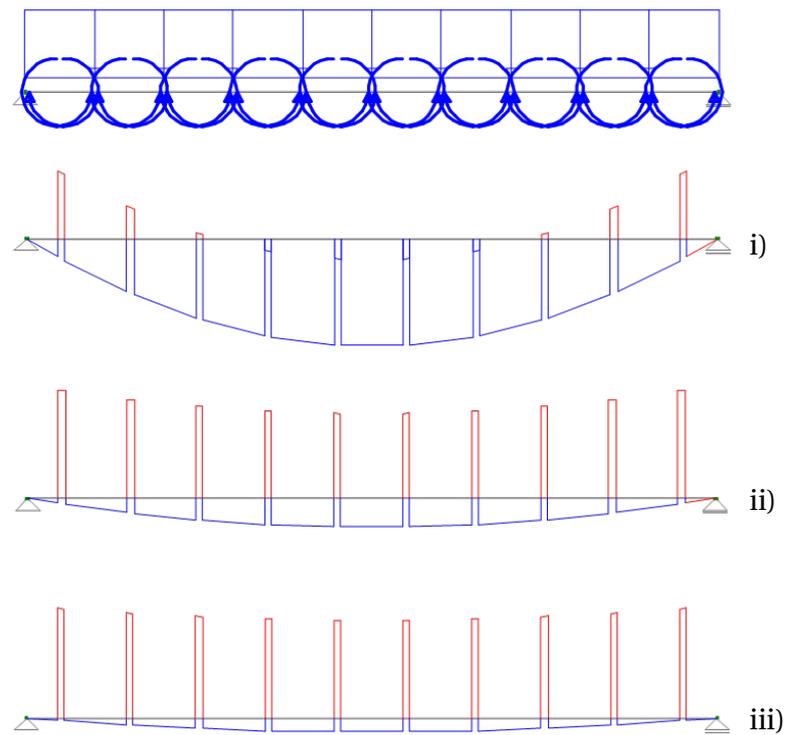


Abb. 3.15: Zehn aufgebrauchte Momentenpaare M_A und Streckenlast q mit den theoretischen Momentenverläufen für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii) und 8 iii)

3.1.2 Mehrere Aktoren mit angepasstem Druck

Um flexibel auf unterschiedliche äußere Lasten reagieren zu können, ist ein angepasster Verlauf des induzierten Biegemomentes erstrebenswert. Im Gegensatz zu einer äußeren Aktuierung ist es ein Vorteil integrierter Aktoren, Spannungen und Verformungen bereichsweise zu manipulieren. Dies ist umso sinnvoller, je größer die Bandbreite an unterschiedlichen Lastfällen ist. Deshalb ist im Bauwesen eine möglichst große Flexibilität wichtig, da anders als beispielsweise im Maschinenbau eine exakte Prognose der auftretenden Lasten häufig nicht möglich ist.

Aus Gleichung 3.2 wird ersichtlich, dass die Beträge der eingeleiteten Kräftepaare $F_{A,i}$ und Momentenpaare $M_{A,i}$ über folgende Parameter angepasst werden können:

- Abstand zwischen resultierender Kraft $F_{A,i}$ und Schwerelinie des Balkens $h_{A,i}$
- Abstand der Aktoren untereinander x_i
- Fläche des jeweiligen Aktors $A_{A,i}$
- Hydraulischer Druck im jeweiligen Aktor $p_{A,i}$

Mit dem Hebelarm $h_{A,i}$ kann zwar die Größe des Momentenpaares variiert werden, die Resultierende $F_{A,i}$ jedoch nicht. Zusätzlich sind die Fläche $A_{A,i}$, der Hebelarm $h_{A,i}$ und der Abstand x_i durch den Entwurf final festgelegt, sodass sie nicht geeignet sind, auf unterschiedliche Lasten zu reagieren. Nur der hydraulische Druck $p_{A,i}$ kann beliebig oft auf unterschiedliche Lastfälle angepasst werden – entsprechende technische Umsetzung vorausgesetzt. Gäbe es ein Tragwerk, das nur durch eine dominante veränderliche Last belastet wird und das nicht an beliebige veränderliche Lastfälle angepasst werden muss, so wären alle oben aufgelisteten Anpassungsmöglichkeiten als gleichwertig zu betrachten. Wie in den vorherigen Abschnitten werden auch für die angepassten hydraulischen Drücke die qualitativen Momentenverläufe und Biegelinien ermittelt und vorgestellt.

Abbildung 3.16 zeigt die resultierenden Momentenverläufe für einen Biegeträger, der mit 10 Momentenpaaren belastet wird. Die Beträge der eingebrachten Momente variieren und sind an den Momentenverlauf, der aus der äußeren Belastung (hier: Streckenlast q) entsteht, angepasst. Die Aktoren in Feldmitte haben die größten Drücke, zu den Auflagern hin nehmen diese ab. Die Momentengleichheit wird für jeden Aktor zur Druckbestimmung individuell herangezogen. In Abbildung 3.17 sind die dazugehörigen Biegelinien dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass die Aktorik eine Biegelinie erzeugt, die von der Charakteristik her der Biegelinie aus der externen Last entspricht.

Über die Anpassung des Druckes p_i kann beliebig oft auf eine große Bandbreite von Lastfällen reagiert werden kann. Beispielhaft wird neben einer Streckenlast q ein Lastfall mit zwei Einzellasten untersucht (vgl. Abschnitt 3.2).

Das Verhältnis des maximalen Momentes M_q in Feldmitte und des größten Momentes aus der Aktorik M_A wird als Referenz angegeben. Die Verhältnisse der Momente, die nicht in Feldmitte liegen, sind aber gleich, da die Beträge des Aktormomentes an den Verlauf der Momentenlinie aus der Streckenlast angepasst sind. Für die Verhältnisse $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii) und 8 iii) sind die Biegelinien in Abbildung 3.19 dargestellt.

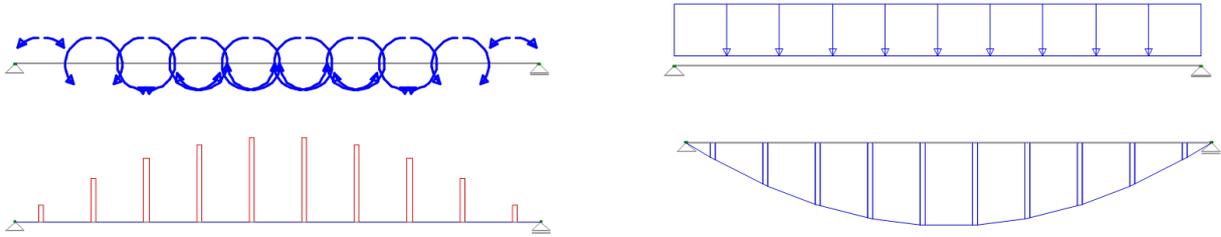


Abb. 3.16: Zehn im Betrag angepasste Momentenpaare $M_{A,i}$ mit dem theoretischen Momentenverlauf (links) und Streckenlast q mit Momentenverlauf (rechts)

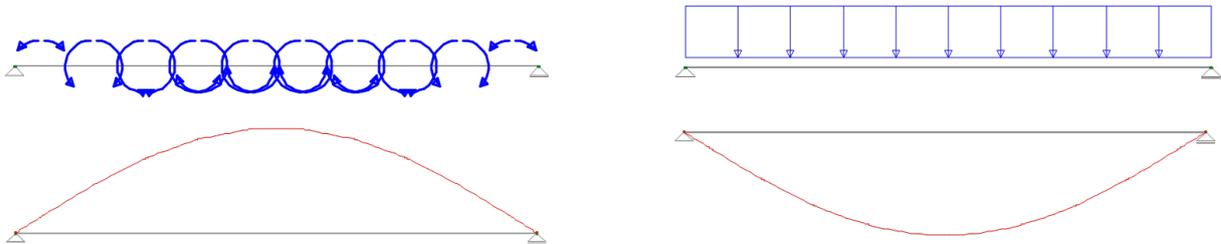


Abb. 3.17: Zehn im Betrag angepasste Momentenpaare $M_{A,i}$ und die Biegelinie (links) und Streckenlast q mit Biegelinie (rechts)

In Abbildung 3.18 sind die theoretischen Momentenverläufe, die nach Balkentheorie durch eine Überlagerung der Aktormomente und der Streckenlast entstehen, abgebildet. Bei einem kleinen Verhältnis von $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i) ähnelt der Momentenverlauf dem aus der äußeren Last, da die erzeugten Momentenpaare zu klein sind. Wird das Verhältnis größer, so ändert sich die Charakteristik des Momentenverlaufes, wie in Abbildung 3.18 iii) ersichtlich ist.

Um diesen Effekt noch deutlicher darzustellen, zeigt Abbildung 3.20 den Momentenverlauf und die Biegelinie für einen adaptiven Biegeträger mit einem Verhältnis $\frac{M_A}{M_q}$ von 10. Der Biegeträger ist über die gesamte Länge nach oben gewölbt und hat im Vergleich zu einem passiven Biegeträger eine signifikant andere Biegelinie.

Wie bereits erwähnt, wirkt das Moment, das durch die Aktoren erzeugt wird, konstant über die Breite b_A des jeweiligen Aktors. Um eine möglichst große Überlagerung der Momentenverläufe aus M_A und M_q zu generieren, könnte die Breite der Aktoren erhöht werden. Dies widerspricht dem Ziel, eine lokale Manipulation zu erzeugen und eine beliebig häufige Anpassung des generierten Momentenverlaufes an unterschiedliche Lastfälle zu gewährleisten. Zudem sind die gezeigten Momentenverläufe anhand von idealisierten Balkenmodellen erzeugt. In einem realen dreidimensionalen Bauteil würden sich keine Sprünge einstellen, wie in den weiteren Kapiteln der vorliegenden Arbeit gezeigt wird. Der Bereich, in den ein Aktor wirkt, ist in Realität breiter als der Aktor selbst. Dadurch wird die Auslastung des Biegeträgers deutlich homogener, die vielen Wendepunkte in der Biegelinie reduzieren sich.

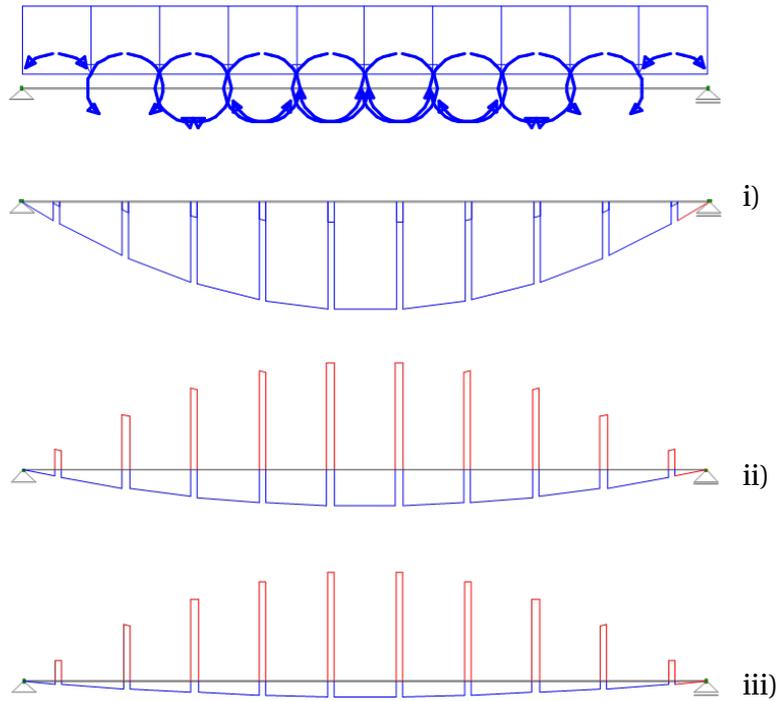


Abb. 3.18: Zehn aufgebrachte Momentenpaare $M_{A,i}$ und Streckenlast q mit den theoretischen Momentenverläufen für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii), und 8 iii)

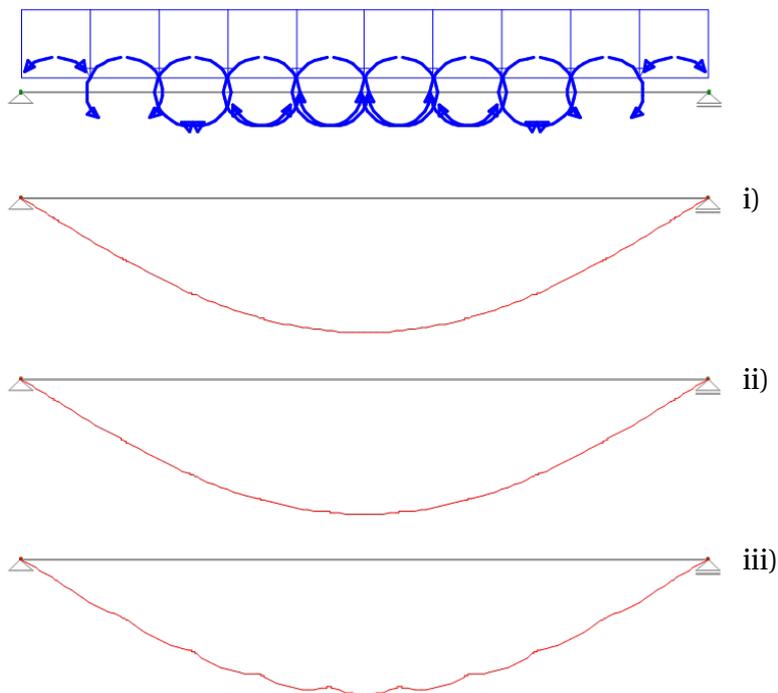


Abb. 3.19: Zehn aufgebrachte Momentenpaare $M_{A,i}$ und Streckenlast q mit den Biegelinien für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii), und 8 iii)

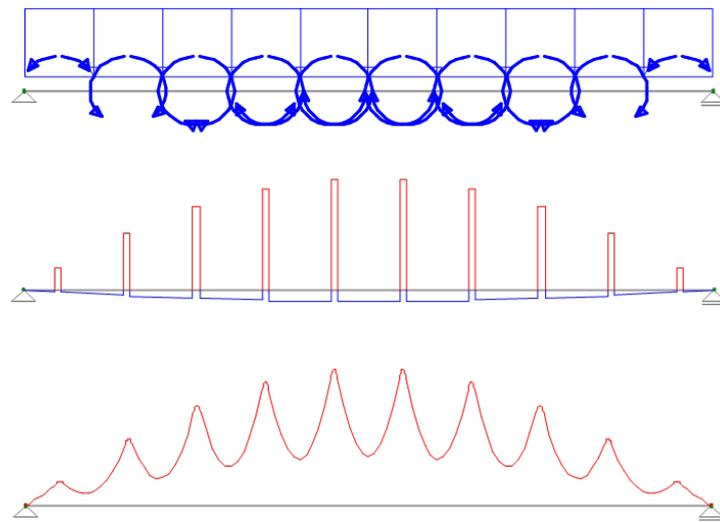


Abb. 3.20: Zehn aufgebrauchte Momentenpaare $M_{A,i}$ und Streckenlast q mit dem Momentenverlauf und Biegelinie für $\frac{M_{\Delta}}{M_q} = 10$

3.2 Beispiel Vier-Punkt-Biegeversuch

Da bei den in Kapitel 6 folgenden experimentellen Untersuchungen die externe Last in Form zweier Einzellasten aufgebracht wird, wird dieses Beispiel hier mit den gleichen Abmessungen analysiert. Für das Beispiel eines Vier-Punkt-Biegeversuchs werden die notwendigen hydraulischen Drücke über die Momentengleichheit (Gleichung 3.4) bestimmt.

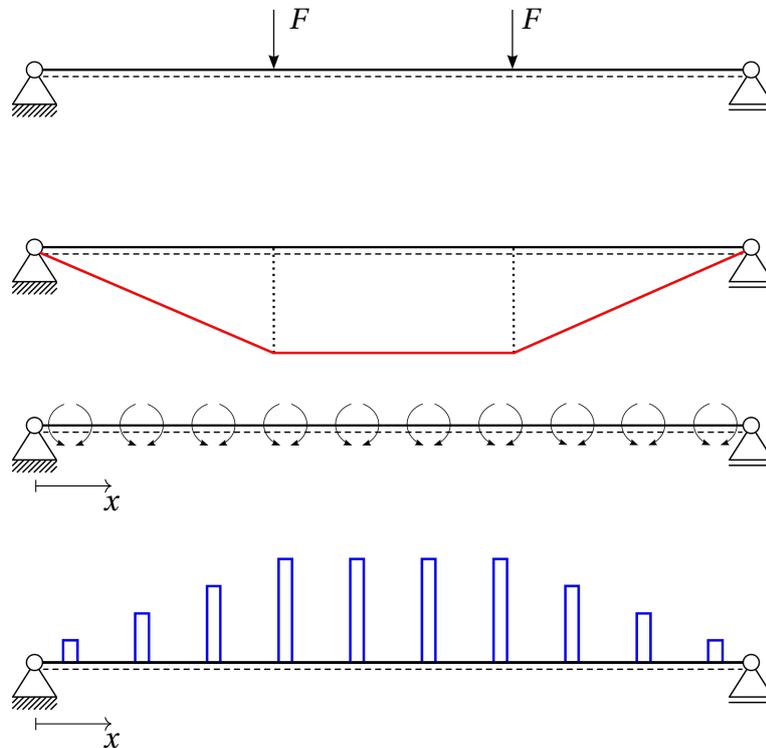


Abb. 3.21: Biegeträger mit zwei Einzellasten, der dazugehörige Momentenverlauf (rot) und der durch die Aktoren erzeugte, angepasste Momentenverlauf (blau)

In Abbildung 3.21 ist der Biegeträger mit zwei Einzellasten und mit dem Momentenverlauf dargestellt. Es werden 10 Aktoren mit entsprechenden Momentenpaaren angesetzt. Die Höhe der eingebrachten Momente (blau) sind dem Verlauf aus der äußeren Last angepasst. Da das Moment zwischen den beiden Einzellasten konstant ist, sind die Momentenpaare innerhalb dieses Bereiches gleich groß. Durch die Symmetrie der Belastung reduziert sich die Anzahl der einzustellenden hydraulischen Drücke auf vier.

Für das Beispiel eines Einfeldträgers mit den Abmessungen $1000 \times 200 \times 100 \text{ mm}^3$ mit zehn Aktoren werden die benötigten hydraulischen Drücke $p_{A,i}$ nach Gleichung 3.3 berechnet und in Tabelle 3.2 dargestellt. Die beiden äußeren Einzellasten F werden mit 4 kN angesetzt, sodass sich ein maximales Biegemoment aus der äußeren Last M_q von $1,33 \text{ kNm}$ einstellt. Die Aktoren werden als Kreise mit einem Durchmesser D_A von 80 mm und demzufolge mit einer Fläche A_A von $5.026,5 \text{ mm}^2$ berücksichtigt. Die Aktoren werden mittig in der oberen Querschnittshälfte platziert, sodass ein innerer Hebelarm h_A von 50 mm vorliegt. Der Abstand der Aktoren untereinander x_A wird auf 100 mm festgelegt. Der Abstand der äußersten Aktoren zum jeweiligen Auflager beträgt 50 mm .

Tab. 3.2: Hydraulische Drücke in den Aktoren, die über die Momentengleichheit bestimmt wurden

Aktor i	x_i in mm	$M_{Q,i}$ kNm	$p_{A,i}$ in bar
1	50	0,20	8,0
2	150	0,60	23,9
3	250	1,00	39,8
4	350	1,33	53,1
5	450	1,33	53,1
6	550	1,33	53,1
7	650	1,33	53,1
8	750	1,00	39,8
9	850	0,60	23,9
10	950	0,20	8,0

Die Biegelinien für dieses Beispiel werden mit der Finite-Elemente-Methode im Kapitel 4 berechnet und ausgewertet. Hierbei werden der passive, aktive und adaptive Zustand betrachtet. Grundlage für die in der Simulation angesetzten Aktorkräfte sind die in Tabelle 3.2 dargestellten und mit Gleichung 3.4 bestimmten hydraulischen Drücke.

4 Numerische Untersuchungen

Die Untersuchungen mithilfe der Balkentheorie werden durch Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) erweitert. Dies dient zum einen zur Überprüfung des aufgestellten Berechnungsverfahrens über die Momentengleichheit aus Kapitel 3.1 und zum anderen zur eventuellen Anpassung der hydraulischen Drücke in den Aktoren. Die Validierung der FEM-Modelle erfolgt in Kapitel 6. Für die numerischen Untersuchungen wird das FEM-Programm ABAQUS/CAE 2017 verwendet.

4.1 Aufbau des numerischen Modells

Zunächst wird das FEM-Modell mit den verwendeten Elementen vorgestellt. Hierbei wird auf die Berücksichtigung der Aktorik besonders eingegangen. In den Abschnitten 4.3 und 4.5 werden die Ergebnisse der Simulationen dargestellt und diskutiert.

4.1.1 Geometrie

Bei der Modellierung des Biegeträgers ($1200 \times 200 \times 100 \text{ mm}^3$) wird die Symmetrie ausgenutzt, um die Rechenzeit zu verkürzen. Dies ist möglich, da nicht nur der Biegeträger doppelsymmetrisch ist, sondern auch der untersuchte Lastfall mit zwei symmetrisch angeordneten Einzellasten, der zu einer symmetrischen Verteilung der Drücke in den Aktoren führt. Es wird nur ein Viertel ($600 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$) des Biegeträgers modelliert und mit den entsprechenden Randbedingungen versehen (vgl. Abschnitt 4.1.5). Daraus folgt, dass nur eine Auflager- bzw. eine Lasteinleitungsplatte modelliert wird. Beide werden mit einer Grundfläche von $50 \times 50 \text{ mm}^2$ und einer Dicke von 20 mm erstellt. Das verwendete Modell ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Der Bewehrungstahl (*embedded region*) wird direkt in den Betonquerschnitt (*host region*) integriert. Es wird von einem vollständigem Verbund ausgegangen, was für die durchgeführten Untersuchungen hinreichend genau ist. Die Bewehrung wird als Fachwerkstab in das Volumenmodell des Trägers integriert. Dieses Vorgehen entspricht den Empfehlungen des Softwareherstellers [12].

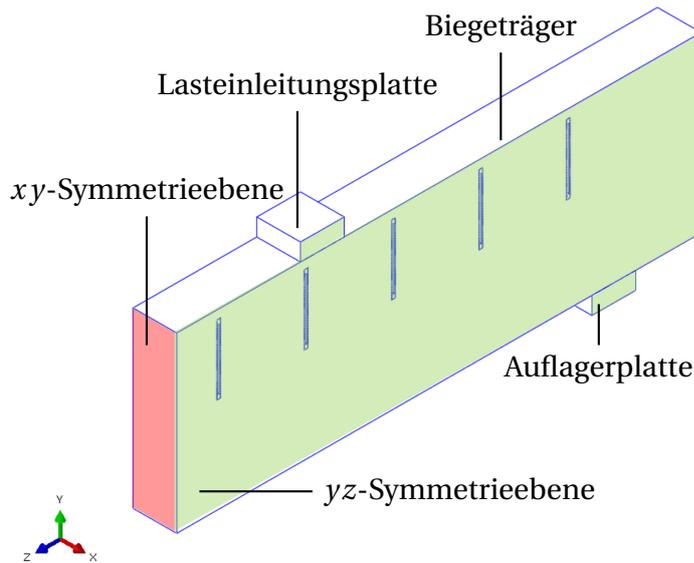


Abb. 4.1: Geometrie des modellierten Biegeträgers mit fünf Aktoren, der Lasteinleitungs- und Auflagerplatte und den beiden Symmetrieebenen (xy -Ebene rot eingefärbt) und (yz -Ebene grün eingefärbt)

4.1.2 Elemente

Um die dreidimensionalen Spannungszustände zu ermitteln, werden für den Biegeträger, die Aktoren und die Auflager- bzw. Lasteinleitungsplatten Volumenelemente verwendet. Für die Platten werden Hexaeder mit 8 Knoten, einem Integrationspunkt und aktiver Null-Energie-Verformungsunterdrückung verwendet (programminterne Bezeichnung: C3D8R). Die Platten werden mit einer Elementgröße von 10 mm vernetzt.

Die Aktoren werden als eigenständiges Bauteil modelliert (vgl. Abschnitt 4.1.6). Hierfür werden Tetraeder mit 10 Knoten (C3D10) benutzt. Die Elementgröße wird zu 1 mm gewählt, da dies der Blechdicke des Aktors entspricht (siehe Abbildung 4.2).

Für die Diskretisierung des Biegeträgers werden ebenfalls Tetraeder-Elemente mit 10 Knoten verwendet (C3D10). Die Elementgröße wird über eine Netzkonvergenzstudie ermittelt. Dafür wird der passive Referenzbalken mit den Elementgrößen zwischen 100 mm und 2,5 mm diskretisiert und simuliert. Die maximalen Spannungen in Balkenlängsrichtung σ_z und die Durchbiegung in Feldmitte u_y werden ausgewertet und mit den analytischen Ergebnissen verglichen.

Die Auswertung des Modells erfolgt am Elementknoten Nr. 48. Dieser befindet sich an der innen liegenden Unterkante der Schnittpunkte der beiden Symmetrieebenen, dies entspricht der unterseitigen Mitte des Biegeträgers (siehe Abbildung 4.3). Zur Plausibilitätskontrolle dienen die analytisch bestimmten Werte der Durchbiegung in Feldmitte $u_{\text{analytisch}}$ und die Biegezugspannung $\sigma_{\text{analytisch}}$ an der äußersten Faser des Trägers. Die Durchbiegung in Feldmitte

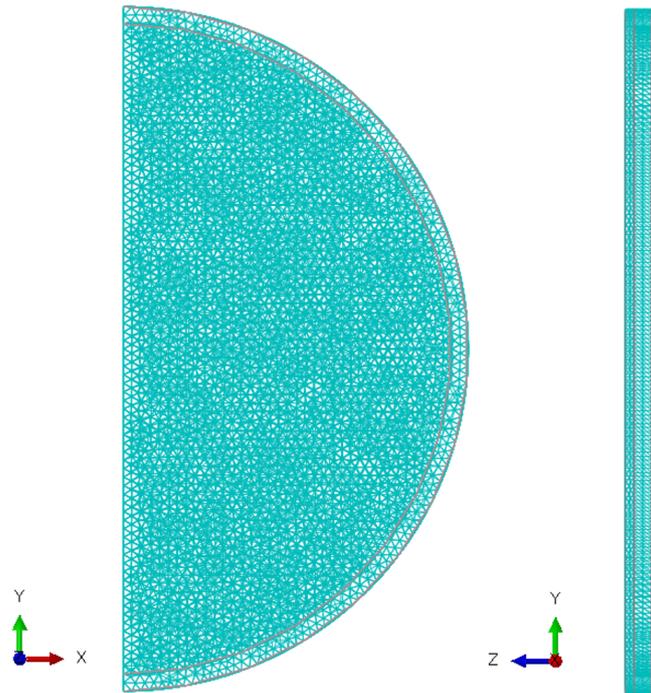


Abb. 4.2: FEM-Modell des Aktors nach Vernetzung mit Volumenelementen

$u_{\text{analytisch}}$ bestimmt sich nach [78] zu:

$$u_{\text{analytisch}} = \frac{3Fl^3}{76,8EI} \cdot \left(1 - \frac{0,8}{3^2} - \frac{0,2}{3^4} \right). \quad (4.1)$$

Mit $E = 34000$ MPa, $I = 66.666.666,67$ mm⁴, $F = 4$ kN und $l = 1000$ mm wird Gleichung 4.1 gelöst und bestimmt sich zu $u_{\text{analytisch}} = 0,0758$ mm. Die Spannungen an der Unterseite lassen sich wie folgt berechnen:

$$\sigma_{\text{analytisch}} = \frac{M_{\text{max}}}{\frac{b \cdot h^2}{6}}. \quad (4.2)$$

Mit $M_{\text{max}} = 1,33$ kNm, $b = 100$ mm und $h = 200$ mm ergibt sich $\sigma_{\text{analytisch}} = 1,99$ MPa.

Tab. 4.1: Netzkonvergenzstudie

Elementgröße	Maximale Spannung in Balken- längsrichtung σ_z	Durchbiegung in Feldmitte u_y
100 mm	2,11227 MPa	$7,22136 \cdot 10^{-2}$ mm
50 mm	2,11542 MPa	$7,25022 \cdot 10^{-2}$ mm
25 mm	2,11528 MPa	$7,25505 \cdot 10^{-2}$ mm
10 mm	2,11512 MPa	$7,26212 \cdot 10^{-2}$ mm
5 mm	2,11499 MPa	$7,26369 \cdot 10^{-2}$ mm
2,5 mm	2,11501 MPa	$7,26358 \cdot 10^{-2}$ mm
Analytische Lösung	1,99 MPa	$7,5862 \cdot 10^{-2}$ mm

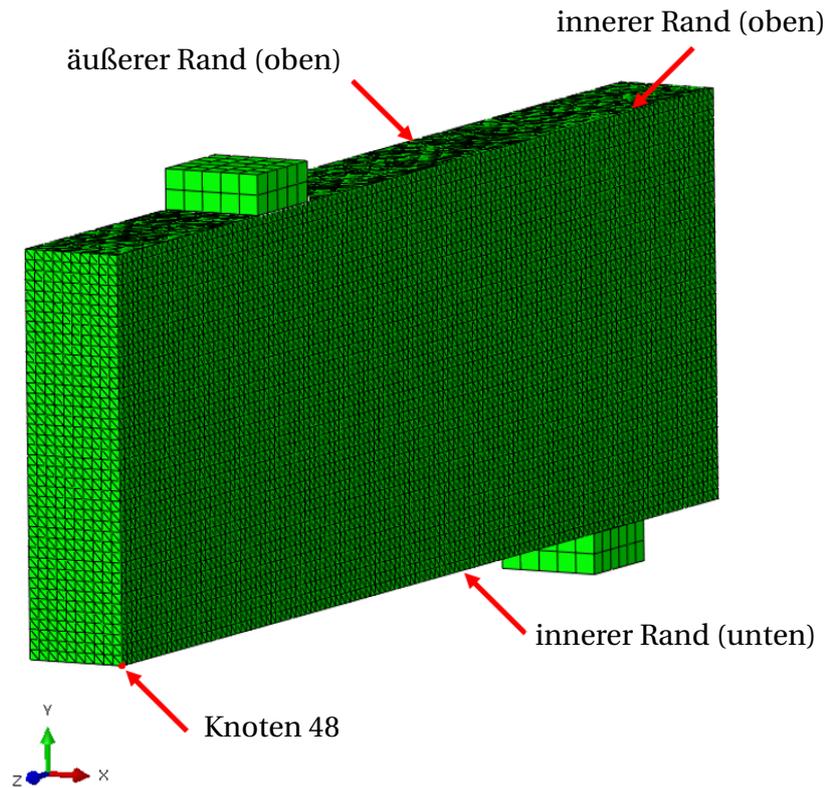


Abb. 4.3: FEM-Modell des passiven Referenzträgers mit Auswertungspunkt (rot hervorgehoben) und den Bezeichnungen der Ränder

Tabelle 4.1 zeigt die Ergebnisse der Netzkonvergenzstudie und die analytischen Vergleichswerte. Die Simulationsergebnisse stimmen mit den analytischen Ergebnissen gut überein. Die Abweichung der Durchbiegung liegt mit 5 % im vertretbaren Bereich. Die Durchbiegung wird leicht unterschätzt, die Spannungen leicht überschätzt. Die Abweichung der Spannung liegt mit ca. 6 % im tolerierbaren Bereich. Die Elementgröße von 2,5 mm bringt keine nennenswerte Verbesserung, da sich die Spannung einer Asymptote annähert und die Durchbiegung wieder leicht abfällt (siehe Abbildung 4.4). Andere Volumenelemente, wie beispielsweise Hexaeder, die eventuell eine noch bessere Näherung ergeben, kommen aufgrund der Geometrie der kreisrunden Aktoren nicht in Frage. Es wird eine Elementgröße von 5 mm gewählt, sodass Bereiche um den Aktor herum fein genug diskretisiert sind. Die Diskretisierung erfolgt nach dem programm-internen Algorithmus und kann, falls notwendig, von der gewählten Elementgröße abweichen. Dies stellt sicher, dass keine zu stark verzerrten Elemente erstellt werden. Der Biegeträger nach der Diskretisierung ist in Abbildung 4.5 zu erkennen. Die Abbildung zeigt den Biegeträger, die Lasteinleitungs- und Auflagerplatte. Die integrierten Aktoren sind nicht erkennbar.

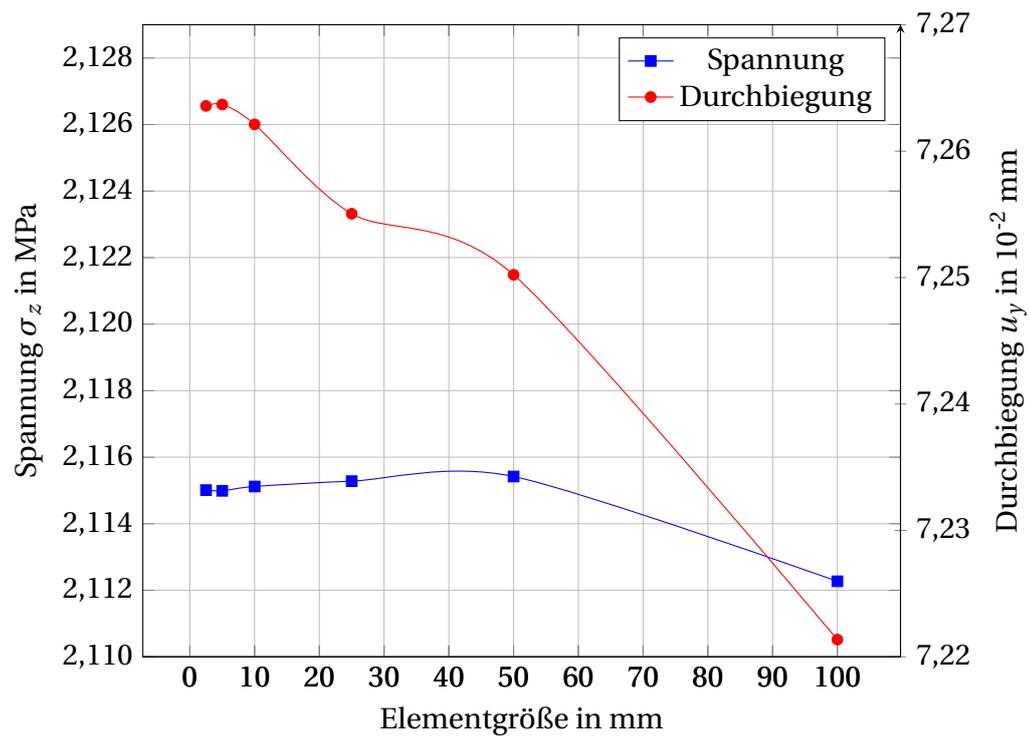


Abb. 4.4: Netzkonvergenzstudie zur Auswahl der Elementgröße des Tetraeder-Elements mit 10 Knoten

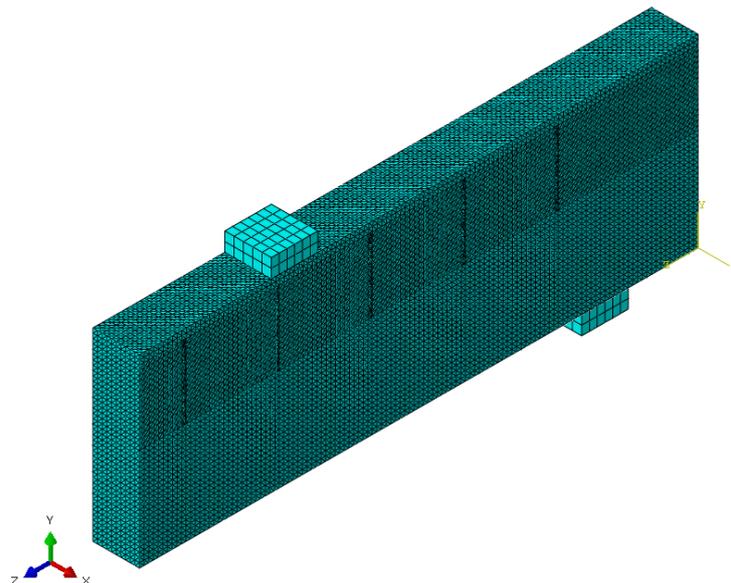


Abb. 4.5: FEM-Modell des Biegeträgers mit den Stahlplatten nach der Diskretisierung

4.1.3 Lasten

Die externe Last wird nicht direkt auf den Balken aufgebracht, sondern über eine Lasteinleitungsplatte. Dies entspricht dem späteren Versuchsaufbau, bei dem die Last ebenfalls über Stahlplatten eingeleitet wird. Die Gesamtlast von $2F = 8 \text{ kN}$ reduziert sich aufgrund der ausgenutzten Symmetriebedingungen auf $\frac{1}{2}F = 2 \text{ kN}$. Sie wird auf den Viertelbalken über eine Flächenlast von $0,8 \text{ N/mm}^2$, die auf der Grundfläche der Lasteinleitungsplatte ($50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$) wirkt, aufgebracht.

Das Eigengewicht der einzelnen Bauteile wird programmintern über die Angabe der Materialdichten und der Erdbeschleunigung berücksichtigt. Die Erdbeschleunigung wirkt in Richtung der y -Achse mit -9.810 mm/s^2 (siehe Abbildung 4.6).

Die hydraulischen Drücke innerhalb der Aktoren werden über Flächenlasten idealisiert. Die Flächenlast kann entweder direkt auf den Beton oder auf die eingesetzte Aktorik aufgebracht werden (vgl. Abschnitt 4.1.6). Die Flächenlast wirkt nur auf die senkrecht zur Trägerlängsachse stehenden Flächen, da durch die Form des Aktors eine Ausdehnung in radialer Richtung weitestgehend behindert wird (vgl. Abschnitt 5.4.2).

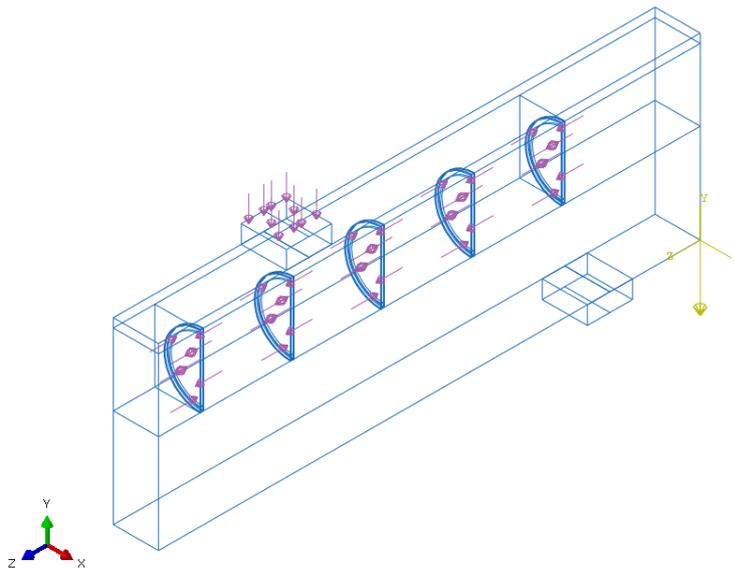


Abb. 4.6: FEM-Modell des Biegeträgers mit den angesetzten Lasten

Im passiven Zustand wirkt kein hydraulischer Druck in den Aktoren, sodass keine Flächenlast angesetzt wird und die Aktoren sich frei verformen können. Dies entspricht den offenen Ventilen in den experimentellen Untersuchungen (siehe Kapitel 5.4.2). Da sich die Aktoren bei einer externen Belastung stauchen, würde ein abgeschlossenes Volumen zu einer Druckerhöhung führen und ein eingeschlossenes Medium einen Widerstand liefern, ähnlich einer elastischen Flächenbettung. Dies ist nicht der Fall. Lediglich zur numerischen Stabilität wird im passiven Zustand eine geringe Flächenpressung von $0,01 \text{ N/mm}^2$ auf die inneren Aktorwände aufgebracht.

4.1.4 Kontakt

Kontaktbedingungen werden an mehreren Stellen ins Modell integriert. Ein Kontakt besteht zwischen den Stahlplatten und dem Betonträger. Die Kontaktformulierung wird als Oberflächenkontakt modelliert und setzt sich aus einem tangentialen und einem senkrechten Bestandteil zusammen. Da bei den experimentellen Untersuchungen Beschichtungen aus Polytetrafluorethylen zur Minimierung der Reibung zwischen Stahlplatte und Halbzylinder verwendet werden, wird der tangentielle Kontakt mit einem Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,001$ gewählt [67]. Der Träger kann sich durch den niedrigen Reibungskoeffizienten nahezu zwängungsfrei entlang seiner Längsachse ausdehnen. In Normalenrichtung wird ein *penalty based*-Kontakt definiert, der bei einer versuchten Penetration der Kontaktflächen Einzelkräfte an den Knoten erzeugt, die dieser entgegenwirken [12]. Die deutlich steiferen und grober vernetzten Stahlplatten werden als *master* und der Betonträger als *slave* definiert. Dies entspricht der Empfehlung des Programmherstellers [12].

Die Aktoren werden ebenfalls über Kontaktbedingungen in den Biegeträger integriert. Die Kontaktformulierung ist ähnlich der bereits oben beschriebenen. Lediglich das Verhalten in tangentialer Richtung wird hier vereinfacht reibungsfrei gewählt, sodass die Aktoren sich relativ zur Trägeroberfläche frei verschieben können.

4.1.5 Randbedingungen

Für die durchgeführten Simulationen werden drei Randbedingungen definiert:

- Halterung der Auflagerplatte,
- Lagerbedingungen, die aus der Symmetrie der xy -Ebene resultieren,
 - an der innen liegenden Stirnseite des Betonträgers,
- Lagerbedingungen, die aus der Symmetrie der yz -Ebene resultieren,
 - an der innen liegenden Längsseite des Trägers,
 - an der Schnittfläche der Aktoren,
 - an den Schnittflächen der Auflager- bzw. Lasteinleitungsplatte.

Abbildung 4.7 zeigt das FEM-Modell des Balkens mit allen Randbedingungen, die aufgrund der ausgenutzten Symmetrie resultieren. Die Stirnseite des Trägers in der xy -Ebene wird entsprechend den Symmetriebedingungen gehalten. Als Bedingungen werden die Verschiebung in z -Richtung und die Verdrehung um die x - und y -Achse ($u_z = u_{r_x} = u_{r_y} = 0$) blockiert. Äquivalent ist die Symmetrieebene yz mit drei blockierten Freiheitsgraden versehen ($u_x = u_{r_y} = u_{r_z} = 0$). Dies gilt für die Trägerlängsseite, die beiden Stahlplatten und die Aktoren.

Die Auflagerplatte ist entlang einer senkrecht zur Trägerlängsachse verlaufenden Linie in der Mitte der Platte in y - und z -Richtung gehalten. Eine Detailansicht mit der gehaltenen Linie (rot) ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Dies erlaubt, anders als ein Halten der gesamten Plattenunterseite, eine freie Verdrehung der Platte. Da bei den experimentellen Untersuchungen Halbzylinder aus Stahl, die sich ebenfalls frei verdrehen können, verwendet werden, entspricht dies eher

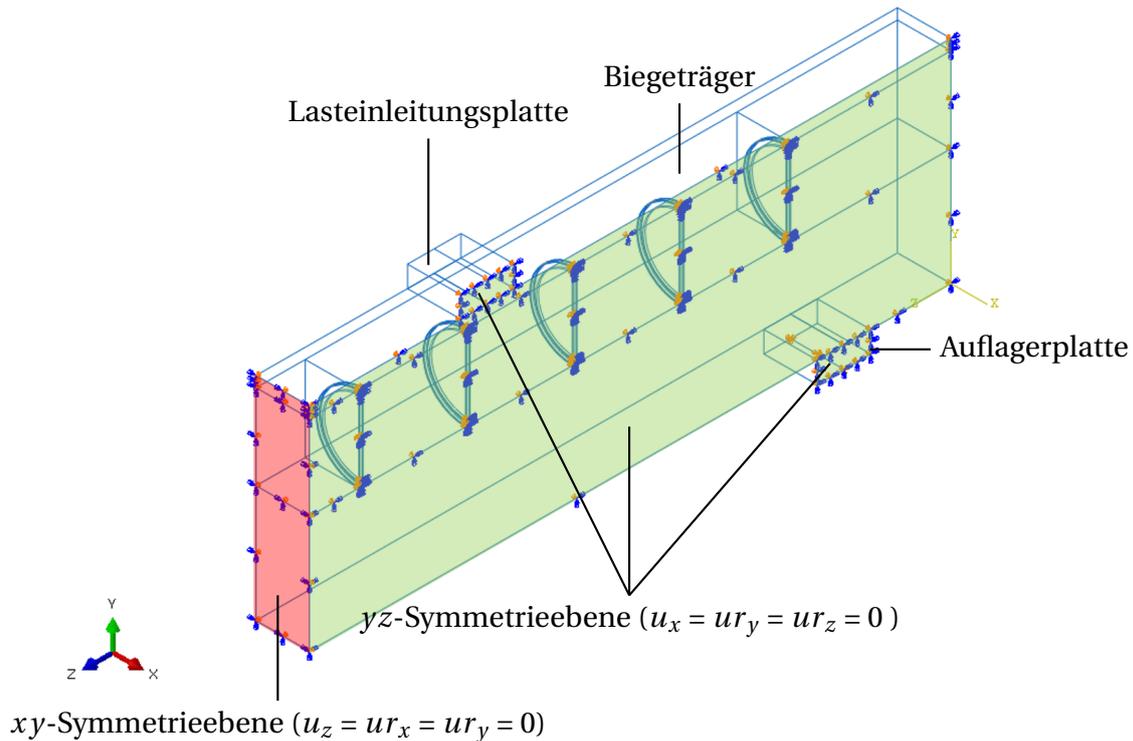


Abb. 4.7: Randbedingungen für die Berechnung des Biegeträgers, die aus der ausgenutzten Symmetrie resultieren

der Realität. Ein Halten in x -Richtung ist bei der Auflagerplatte nicht notwendig, da durch die Symmetriebedingungen dieser Freiheitsgrad ohnehin zu null gesetzt wird.

Die Kontaktfläche zwischen Biegeträger und Auflagerplatte ist mit einem Reibungskoeffizienten von lediglich $\mu = 0,001$ definiert (vgl. Abschnitt 4.1.4). Dadurch kann der Träger sich weitestgehend ohne Zwängung in Längsrichtung ausdehnen. Das Auflager ist, obwohl die Platte in alle drei Raumrichtungen gehalten, als einwertig zu betrachten. Das vereinfachte statische System ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

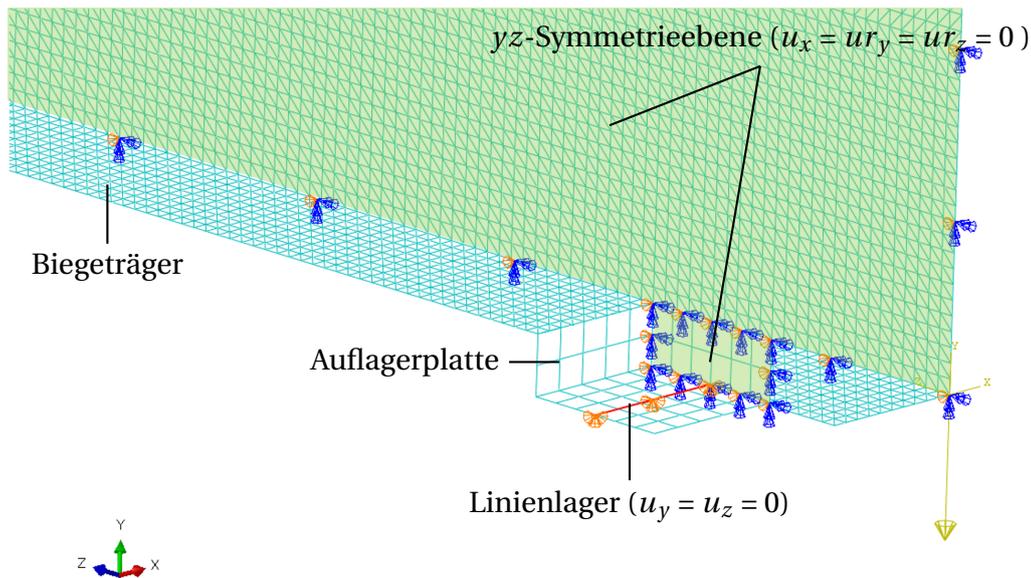


Abb. 4.8: Detailansicht der modellierten Auflagerplatte. Die Knoten entlang der roten Linie sind gehalten ($u_y = u_z = 0$). Die yz -Symmetrieebene ($u_x = u_{r_y} = u_{r_z} = 0$) ist grün eingefärbt.

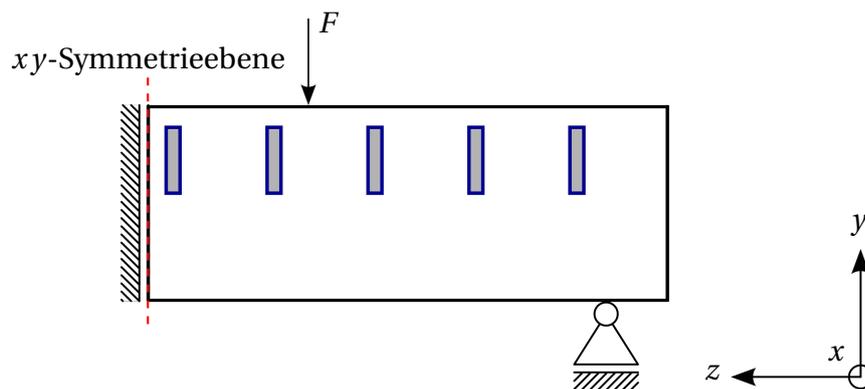


Abb. 4.9: Vereinfachtes statisches System nach Ausnutzung der Symmetrie und unter Berücksichtigung der Kontaktformulierung

4.1.6 Modellierung der Aktorik

Der Berücksichtigung der Aktorik kommt eine zentrale Rolle bei der Erstellung der Simulationsmodelle zu. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die sich in Aufwand (primär Rechenzeit) und Genauigkeit unterscheiden. Zwischen einem Hohlraum in Form eines Zylinders, eines Zylinders mit abgerundeten Ecken und einer Modellierung des Aktors als eigenständiges Stahlbauteil mit entsprechenden Kontaktbedingungen wird eine Voruntersuchung durchgeführt. Für die Voruntersuchung innerhalb dieses Unterkapitels wird die Anzahl integrierter Aktoren auf zwei reduziert. Einen Einfluss auf die Adaptionszielgröße, die Durchbiegung in Feldmitte des Biegeträgers, gibt es nicht. Eine rechteckige Kavitation führt jedoch zu Singularitäten und somit zu unverhältnismäßig großen Spannungen im Bereich der Aktoren.

Bei allen drei untersuchten Modellierungsmöglichkeiten wird der hydraulische Druck über Flächenlasten idealisiert. Die Flächenlast wird nur auf den beiden Flächen, die senkrecht zur

Balkenlängsachse liegen aufgebracht. Trotz des vorherrschenden hydrostatischen Innendruckes in den Aktoren ist diese Vereinfachung möglich und sinnvoll, da über konstruktive Maßnahmen eine Ausdehnung des Aktors in radialer Richtung weitestgehend verhindert wird (vgl. Abschnitt 5.4.2).

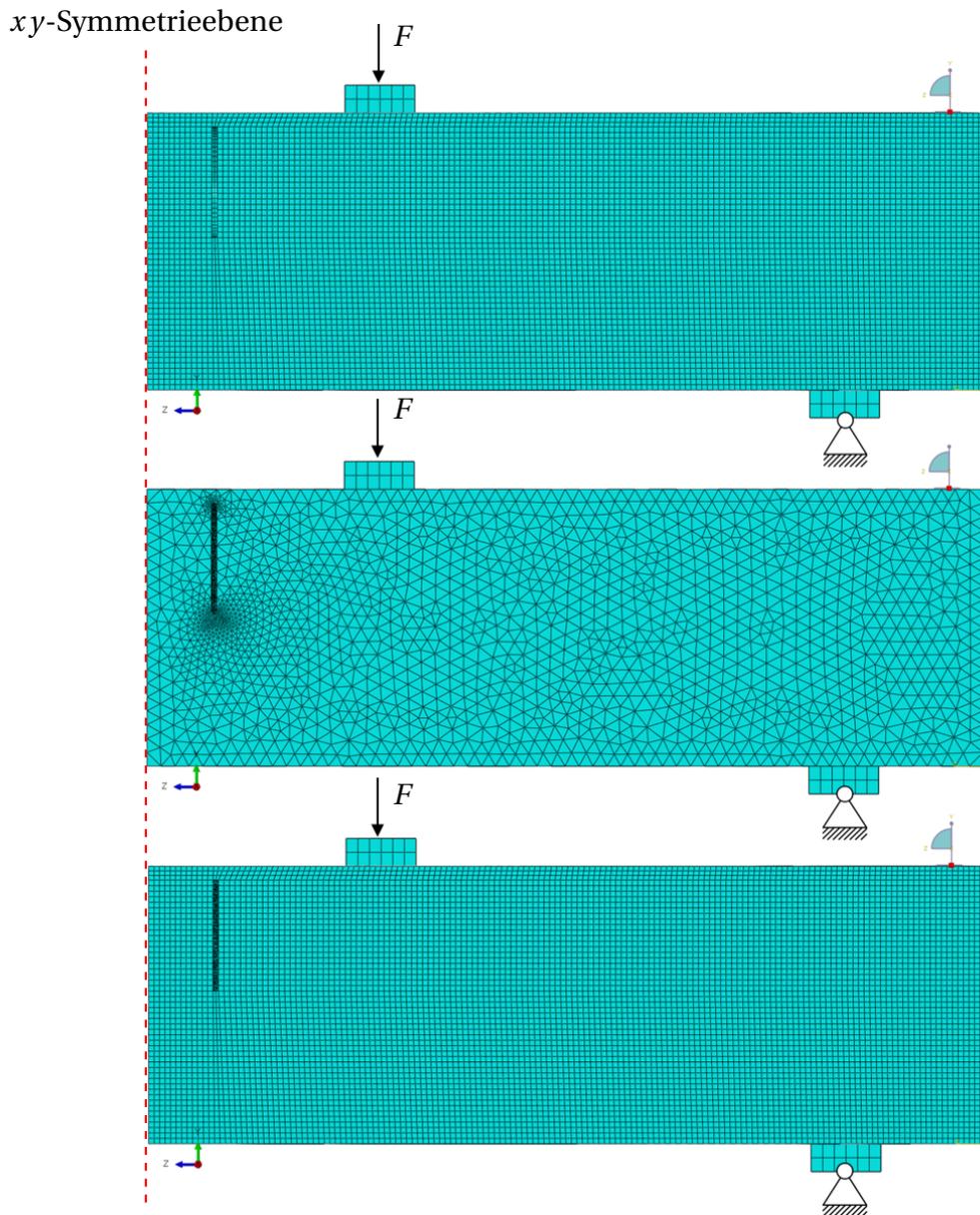


Abb. 4.10: Die drei FEM-Modelle zur Berücksichtigung der Aktorik: zylinderförmige Aussparung (oben), mit abgerundeten Ecken (Mitte) und mit modelliertem Aktor (unten).

Die einfachste Berücksichtigung der Aktorik stellt die Aussparung eines geraden Kreiszylinders und konstanter Flächenlast, die auf den beiden Grundflächen des Biegeträgers aufgebracht wird, dar. Der Übergang von Grundfläche zu Mantelfläche ist als rechter Winkel ausgebildet, sodass bei einem Schnitt entlang der Trägerlängsachse eine eckige Kavitation entsteht (siehe Abbildung 4.10).

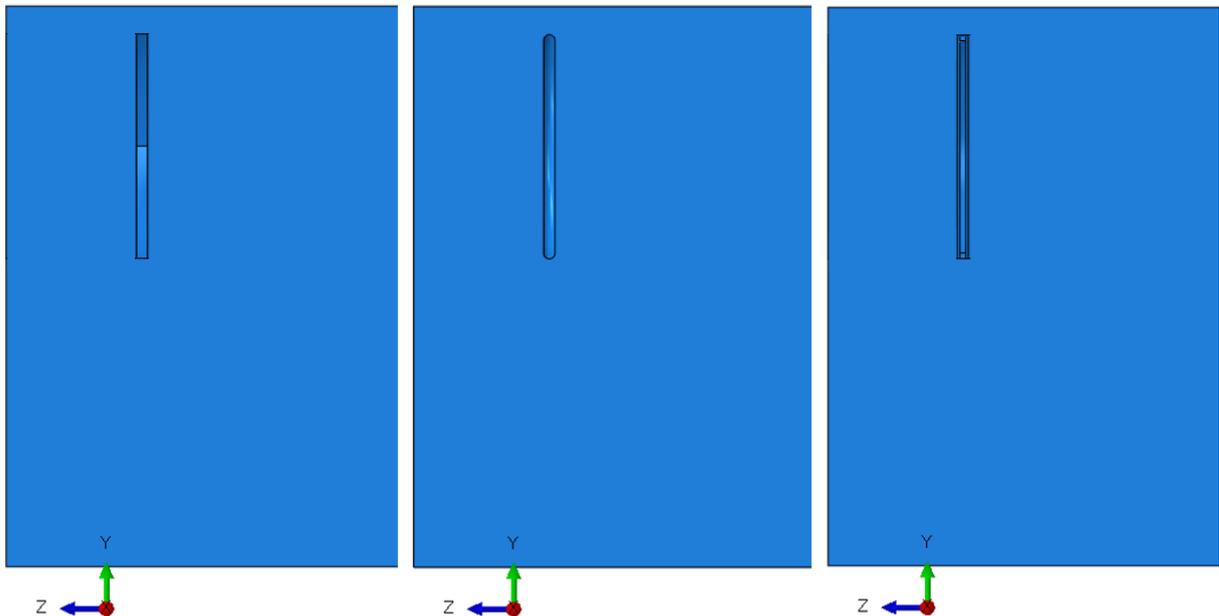


Abb. 4.11: Vergrößerung der FEM-Modelle: zylinderförmige Aussparung (links), zylinderförmige Aussparung abgerundet (Mitte) und Aktor modelliert (rechts).

Um die Singularitäten an den rechteckigen Übergängen zu vermeiden, werden diese mit einem Radius vom 2 mm abgerundet. Bei dieser Aussparung wird der Druck über zwei Flächenpressungen auf die beiden Grundflächen idealisiert (siehe Abbildung 4.11).

Die Verteilung der Flächenlast im realen Betonquerschnitt ist erheblich komplexer, da sich der Aktor zur Mitte hin deutlich stärker verformt als an den verschweißten Randbereichen. Die Steifigkeit des innen liegenden Stahlringes ist um ein Vielfaches höher, als die der äußeren Bleche. Abbildung 4.12 zeigt einen Aktor unter hydraulischem Druck, der sich innerhalb des Balkens verformt. Deshalb wird in einer dritten Simulation untersucht, wie sich ein modellierter Aktor, der in den Biegeträger integriert ist, verhält. Durch die Integration der Aktorik steigt die Rechenzeit, die Spannungsspitzen im Beton sind reduziert.

Abbildung 4.10 (unten) zeigt das FEM-Modell des Balkens mit integriertem Stahlaktor. Dieser wird wie oben beschrieben mit Volumenelementen diskretisiert und über Kontaktbedingungen mit dem Beton verbunden. Der Durchmesser D_A beträgt 80 mm bei einer Gesamtdicke von 4 mm (vgl. Kapitel 5). Bei dieser Untersuchung ist die Flächenlast, die den hydraulischen Druck abbildet, nicht nur auf die Stirnseiten, die senkrecht zur Balkenlängsachse stehen, aufgebracht, sondern auch auf den Ring, der den Aktor gegen eine radiale Ausdehnung versteift. Dadurch wird der hydrostatische Druck weitestgehend realitätsnah berücksichtigt.

Bei allen drei Modellen herrscht ein hydraulischer Innendruck von $p = 53$ bar, der über eine Flächenlast von $5,3 \text{ N/mm}^2$ berücksichtigt wird. Im Biegeträger ($1200 \times 200 \times 100 \text{ mm}^3$) befinden sich zwei Aktoren in Feldmitte. Da nur ein Viertel des Balkens erstellt wird, wird nur ein Aktor, der von der Feldmitte 50 mm entfernt ist, modelliert. Der Biegeträger ist in einem

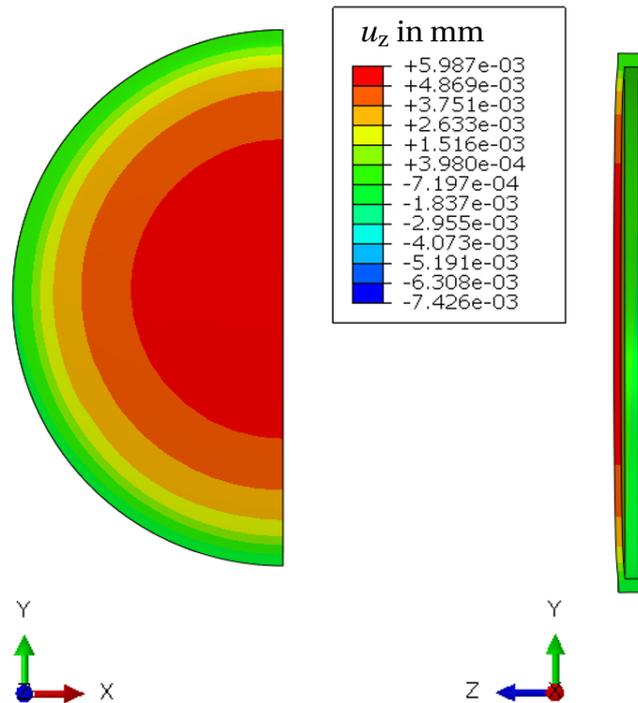


Abb. 4.12: Verformung des Aktors in Balkenlängsrichtung u_z bei der Variante mit modelliertem Aktor (Darstellung in 100-facher Überhöhung)

Vier-Punkt-Biegeversuch mit zwei Einzellasten von je 4 kN belastet. Die maximal auftretenden Spannungen in Balkenlängsrichtung, die um den Aktor herum auftreten, werden ausgewertet und sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Tab. 4.2: Spannungsspitzen der untersuchten Modellierungsmöglichkeiten

Art der Modellierung	Max. Spannungen in Balkenlängsrichtung im Beton σ_z	Durchbiegung in Feldmitte u_{mitte}
Zylinderförmige Aussparung	17,58 MPa	$4,40 \cdot 10^{-2}$ mm
Zylinder mit abgerundeten Ecken	22,95 MPa	$4,64 \cdot 10^{-2}$ mm
Aktor modelliert	9,51 MPa	$5,10 \cdot 10^{-2}$ mm

Da bei der Generierung der Aussparung des Aktors in ABAQUS eine Kurve über einen Polygonzug approximiert wird, ist auch bei den abgerundeten Ecken eine sprunghafte Geometrieänderung vorhanden. Im Vergleich zur zylinderförmigen Aussparung erhöhen sich die Spannungen dadurch von 17,58 MPa auf 22,95 MPa. Durch eine Variation des Radius kann dies noch angepasst werden. Allerdings wird die Variante mit einem modellierten Aktor präferiert, sodass dies nicht weiter verfolgt wird. Zudem treten die Spannungsspitzen nur innerhalb eines Elementes auf. Die angrenzenden Elemente besitzen erheblich geringere Spannungen. Durch die Modellierung des Aktors und die Integration in den Betonquerschnitt über Kontaktformulierungen reduzieren sich die Spannungen auf 9,51 MPa, da die Singularitäten vermieden werden.

Die Flächenlast wird nicht direkt auf den Beton, sondern auf die beiden Stahlbleche des Aktors aufgebracht. Durch die deutlich höhere Steifigkeit des Aktors sind in diesem auch höhere Spannungen als im Beton vorhanden. Die Spannungen im Beton sind deutlich reduziert. Nachteilig ist der erhöhte Rechenaufwand, der aber in Kauf genommen wird. Die Spannungen sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der Verlauf der Spannungen innerhalb des Balkens nicht ändert, sondern lediglich die Maximalwerte. Deshalb wird bei den weiteren Untersuchungen diese Art der Modellierung angewandt. Des Weiteren erhöht sich die Durchbiegung in Feldmitte von $4,64 \cdot 10^{-2}$ mm auf $5,10 \cdot 10^{-2}$ mm. Dies ist auf zwei Effekte zurückzuführen. Erstens wird das Eigengewicht programmintern über die Angabe der Dichte und der Erdbeschleunigung berücksichtigt. Werden die Aktoren modelliert, wirkt das Eigengewicht der Aktoren zusätzlich und die Durchbiegung erhöht sich. Zweitens steht der angesetzten Flächenpressung von $5,3 \text{ N/mm}^2$ durch die Aktorgeometrie eine kleinere Fläche A_A zur Verfügung als bei Varianten, bei denen die Flächenlasten direkt auf den Beton aufgebracht wird (siehe Abbildung 5.12). Bei den weiteren Untersuchungen wird die reduzierte Fläche deshalb berücksichtigt (vgl. Tabelle 4.3).

Durch den 5 mm starken, aussteifenden inneren Ring des Aktors (vgl. Kapitel 5) reduziert sich der Durchmesser von $D_A = 80$ mm auf einen Innendurchmesser $D_{A,\text{innen}}$ von 70 mm. Folglich reduziert sich die Fläche A_A von $5.026,5 \text{ mm}^2$ auf $3.848,4 \text{ mm}^2$. Deshalb muss der notwendige Druck in den Aktoren $p_{A,i}$ erhöht werden. Tabelle 4.3 zeigt die angepassten Drücke $p_{A,i,\text{angepasst}}$, die in den folgenden FEM-Simulationen mit 10 Aktoren verwendet werden.

Tab. 4.3: Angepasster Druck in den Aktoren $p_{A,i,\text{angepasst}}$

Aktor i	Position x_i in mm	$M_{q,i}$ in kNm	$p_{A,i,\text{angepasst}}$ in bar
1	50	0,20	11,5
2	150	0,60	34,6
3	250	1,00	57,7
4	350	1,33	76,9
5	450	1,33	76,9

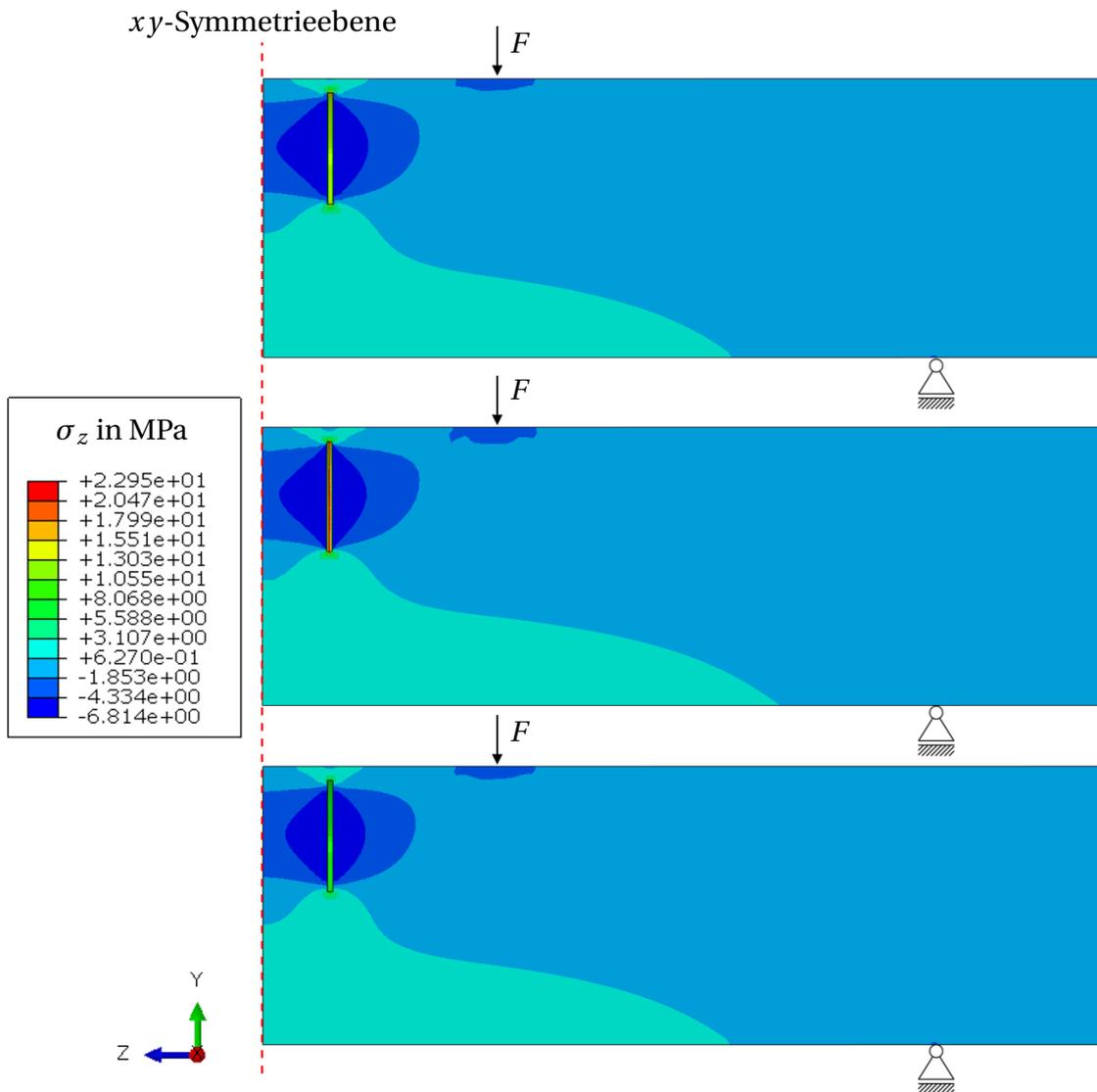


Abb. 4.13: Spannungen in Balkenlängsrichtung σ_z für die zylinderförmige Aussparung (oben), die zylinderförmige Aussparung mit abgerundeten Ecken (Mitte) und dem modellierten Aktor (unten)

4.1.7 Materialmodell

Für die numerischen Untersuchungen der Verformungskompensation werden zwei isotrope linear-elastische Materialmodelle verwendet. Über die Angabe des E-Moduls und der Poissonzahl ν sind diese Materialmodelle ausreichend definiert. Sowohl die Aktoren als auch die Auflager- bzw. Lasteinleitungsplatten sind mit den Kenndaten eines S235-Stahls modelliert. Die Kennwerte der verwendeten Materialien sind in Tabelle 4.4 aufgelistet. Der E-Modul des verwendeten Betons wurde experimentell ermittelt und weicht nur unwesentlich (maximale gemessene Abweichung: 4,18 %) vom verwendeten Wert ab (vgl. Anhang C.1). Die Kennwerte des Stahls wurden aufgrund der meist geringen Streuung des Materials und des geringen Einflusses auf die Simulations- und Versuchsergebnisse nicht überprüft.

Tab. 4.4: Verwendete linear-elastische Materialkennwerte

Material	E-Modul	Poissonzahl ν	Dichte ρ
Beton C35/45	34.000 MPa	0,20	2,5 t/m ³
Stahl S235	210.000 MPa	0,30	7,85 t/m ³

Die zeitabhängigen Verformungsanteile bei nicht kurzzeitig wirksamen Spannungen werden nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass nicht über einen längeren Zeitraum aktuiert wird. Es gilt der folgende Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen im Beton:

$$\sigma_c = \epsilon_c \cdot E_{cm} \quad (4.3)$$

Wird über einen längeren Zeitraum aktuiert, müssen die zeitabhängigen Verformungsanteile eventuell berücksichtigt werden. Dies ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Es werden zusätzlich Simulationen mit einem nichtlinearen Materialmodell für Beton durchgeführt. Über die Simulationen kann überprüft werden, ob ein Versagen des Biegeträgers wie erwartet erfolgt. Hierzu wird in Abschnitt 4.6 eine Rissbildung simuliert und in Kapitel 6.5 mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Es gibt eine Vielzahl von Materialmodellen, die dem komplexen Verhalten des Werkstoffes Beton mit unterschiedlichem Genauigkeitsgrad gerecht werden. Ziel der Untersuchung ist es, die phänomenologischen Effekte zu überprüfen, also die Frage zu beantworten, wo und wann Risse im Biegeträger auftreten und ob dies mit den zuvor aufgestellten Berechnungsverfahren übereinstimmt. Die exakte Rissverteilung bzw. die Rissweiten sind von untergeordneter Bedeutung. Deshalb wird ein stark vereinfachtes Materialmodell verwendet, das z. B. zeitabhängige Effekte nicht berücksichtigt, aber in der Lage ist, plastische Verformungen und mehraxiale Festigkeiten abzubilden. Verwendet wird das *Concrete Damage Plasticity* (CDP)-Materialmodell des FEM-Programmes ABAQUS.

Das CDP-Materialmodell ist ein elastisch-plastisches Schädigungsmodell. Die verschmierte Rissbildung wird über plastische Dehnungen einzelner Elemente simuliert [12]. Der Rissvorgang wird vereinfachend als isotrope Steifigkeitsminderung und über eine skalare Schädigungsvariable berücksichtigt. Das Materialmodell wurde in [54, 55] entwickelt. Die Formulierungen der Fließbedingungen sind nach den Rankine- und Drucker-Prager-Kriterien abgelei-

Tab. 4.5: Verwendete Parameter für das nichtlineare CDP-Materialmodell

Eingabeparameter	verwendeter Wert
Dilatanzwinkel	$\psi = 31^\circ$
Parameter der Potentialfunktion G	$\epsilon = 0,1$
Verhältnis der zweiachsigen und einachsigen Druckfestigkeit	$\alpha_f = 1,16$
Invariantenverhältnis der Zug- und Druckmeridianen	$K_c = \frac{2}{3}$
Viskositätsparameter	0,0001

tet [56]. Neben den allgemeinen Angaben zur Plastizität, zur Beschreibung der Bruchfläche des mehraxialen Spannungszustandes, wird zusätzlich das Verhalten des Betons unter Zug- und Druckbeanspruchungen definiert.

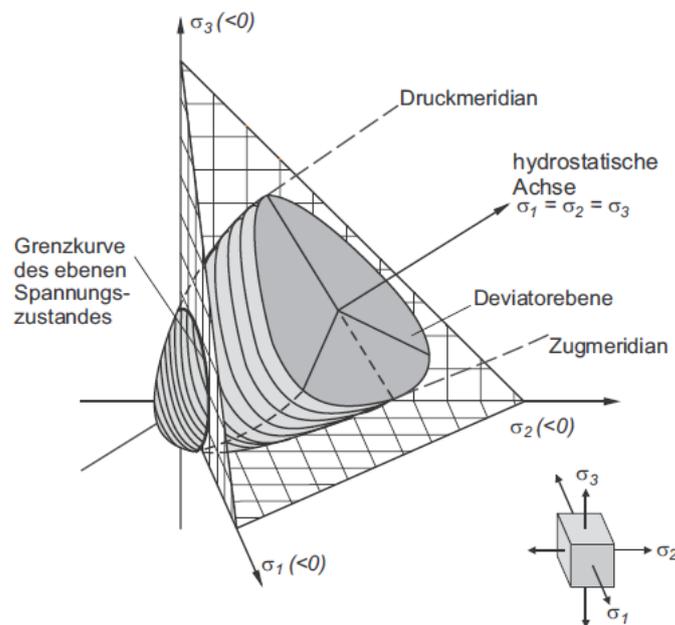
**Abb. 4.14:** Bruchspannungsfläche des Betons im Hauptspannungsraum (nach [105])

Tabelle 4.5 listet die verwendeten Parameter für das CDP-Modell auf. Die Festlegung der Bruchspannungsfläche geschieht – neben den Parametern für das linear-elastische Materialmodell – zusätzlich über den Dilatanzwinkel ψ , die Abweichung in der Deviatorebene K_c und die Potentialfunktion G [11, 66] (vgl. Abbildung 4.14) sowie über das Verhältnis zwischen einaxialer und biaxialer Druckfestigkeit α_f (vgl. Abbildung 4.15). Die numerische Stabilität kann über einen Viskositätsparameter verbessert bzw. Konvergenzprobleme vermieden werden. Der Viskositätsparameter und seinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse ist beispielsweise in [14] erläutert. Ausführlich beschrieben wird das CDP-Modell u. a. in [11, 31, 57].

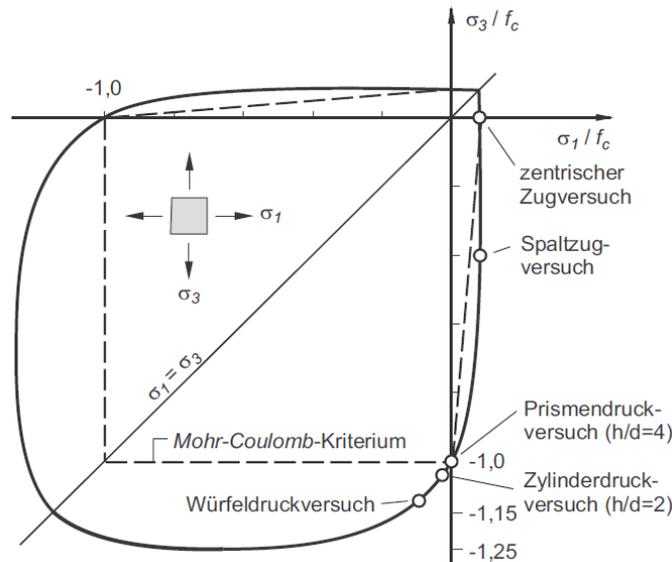


Abb. 4.15: Festigkeiten im ebenen Spannungszustand (aus [105])

Neben den allgemeinen Angaben zur Bruchspannungsfläche wird für den verwendeten Beton C35/45 das Verhalten unter Druck- und Zugbeanspruchung definiert. Hierbei wird die Spannungs-Dehnungs-Beziehung im FEM-Programm hinterlegt. Die verwendeten Kennwerte sind in den Tabellen 4.6 und 4.7 aufgelistet.

Tab. 4.6: Eingabeparameter zur Beschreibung des Beton-Druckverhaltens

σ_c	ϵ_c
17,2 MPa	0
43 MPa	0,00098
43 MPa	0,0035

Tab. 4.7: Eingabeparameter zur Beschreibung des Beton-Zugverhaltens

σ_{ct}	ϵ_{ct}
3,2 MPa	0
0,032 MPa	0,000999

Das Materialverhalten des duktilen Bewehrungsstahls wird über einen bilinearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf idealisiert, bei dem die Verfestigung als isotrop angenommen wird. Bis zum Erreichen der Fließgrenze wird demnach ein einfaches linear-elastisches Materialmodell berücksichtigt (vgl. Tab. 4.4). Wird das Material weiter beansprucht, so wird das nichtlineare Verhalten über die in Tabelle 4.8 angegebenen Fließspannungen $\sigma_{s,i}$ und plastischen Dehnungen $\epsilon_{s,i}^{pl}$ als ideal-plastisch berücksichtigt.

Tab. 4.8: Eingabeparameter zur Beschreibung des nichtlinearen Verhaltens des Bewehrungsstahls

Fließspannung σ_s	Plastische Dehnung e_s^{pl}
$\sigma_{s1} = 500 \text{ MPa}$	$e_{s1}^{pl} = 0$
$\sigma_{s2} = 525 \text{ MPa}$	$e_{s2}^{pl} = 0,0225$
$\sigma_{s3} = 525 \text{ MPa}$	$e_{s3}^{pl} = 0,05$

4.2 Bestimmung des Abstandes der Aktoren untereinander

Nach dem Prinzip von Saint-Venant kommt es trotz konzentrierter Krafteinleitung durch die Aktoren zu einer Homogenisierung der Spannungen [2, 61]. Allerdings schließen sich die durch die Aktorik induzierten Spannungen um den Aktor kurz. Abbildung 4.16 zeigt den qualitativen Verlauf der Hauptspannungstrajektorien um einen Aktor im Träger, auf den keine externe Last einwirkt. Die induzierten Druckspannungen links und rechts des Aktors schließen sich mit den Zugspannungen über und unter dem Aktor kurz. Durch eine externe Last wird in der oberen Querschnittshälfte eine Druckspannung hervorgerufen, die sich mit den Spannungen aus dem Aktor überlagert. Dadurch werden die Zugspannungen kompensiert und Druckspannungen erhöht. Da der Aktor vollständig von Beton umgeben ist, kann hier von einer Aktuierung mit parallelem Charakter gesprochen werden. Werden die Kräfte nicht kurzgeschlossen, wird von einer seriellen Aktuierung gesprochen. Ausführlich werden diese beiden Aktuierungsmöglichkeiten in [93] beschrieben. Jeder Aktor besitzt zwei Lasteinleitungsstellen, bei denen zwischen dem Spannungszustand in unmittelbarer Nähe des Aktors und in größerer Entfernung dazu unterschieden werden muss. Dieses Abklingverhalten ist mit einfachen Balkenmodellen nicht ermittelbar, deshalb wird hierfür ein weiteres FEM-Modell erstellt [33].

Der Abstand der Aktoren untereinander wird mithilfe der Finite-Elemente-Methode bestimmt. Zum einen sollen möglichst wenige Aktoren verwendet werden, zum anderen soll der Biegeträger eine möglichst homogene Beanspruchung erfahren bzw. jeder Bereich des Trägers manipulierbar sein. Bei der durchgeführten Simulation herrscht keine äußere Last, sodass nach Definition aus Kapitel 2.3 ein aktiver Zustand herrscht. Es wird ein Träger betrachtet, der lediglich einen Aktor in Feldmitte besitzt.

Im Aktor herrscht ein Druck von $p = 53 \text{ bar}$, der über zwei Flächenlasten in der Höhe von $5,3 \text{ N/mm}^2$ berücksichtigt wird. Der Druck ergibt sich aus den analytischen Berechnungen nach Balkentheorie über die Momentengleichheit aus Abschnitt 3.2. Die Flächenlast greift vereinfachend an den beiden Stirnseiten einer Aussparung mit Durchmesser 80 mm an. In Abbildung 4.17 ist die Spannung in Balkenlängsrichtung σ_z dargestellt.

Es wird der Abstand ermittelt, bei dem von den induzierten Flächenlasten in Höhe von $5,3 \text{ MPa}$ noch 50 % der Spannung in z -Richtung, also $2,65 \text{ MPa}$, vorhanden sind. Das ist in diesem Beispiel bei $49,8 \text{ mm}$ Entfernung von der Außenkante des Aktors der Fall. Der Abstand wird auf 100 mm festgelegt, da sich die Spannungsfelder von zwei benachbarten Aktoren überschneiden. Bei einer Spannweite von 1000 mm und einer äquidistanten Anordnung ergeben sich somit 10 Aktoren für den gesamten Biegeträger. Da die Drücke in den Aktoren sich in Ab-

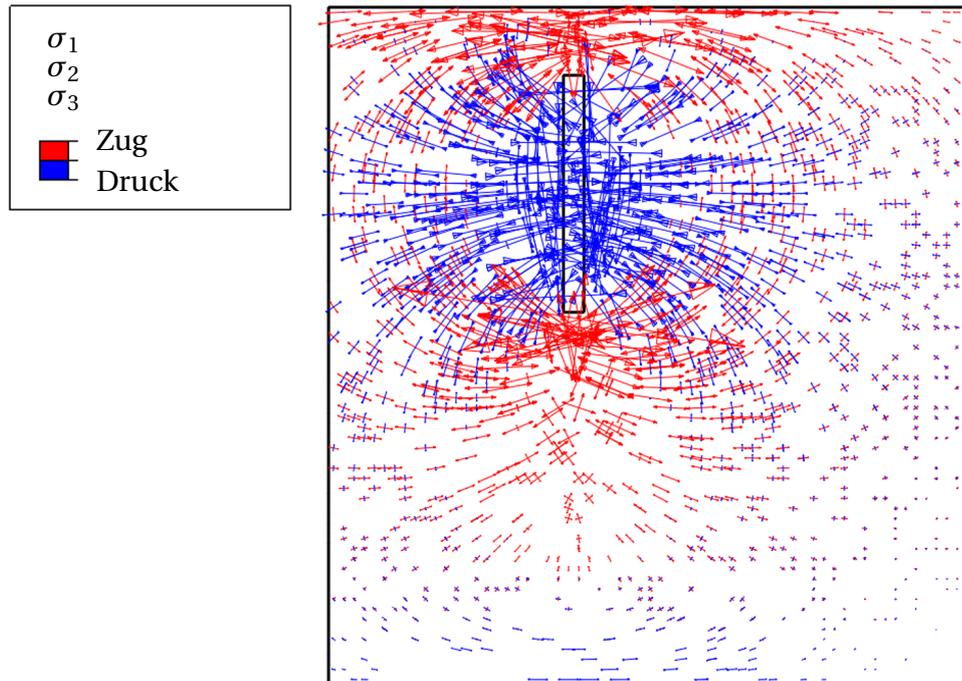
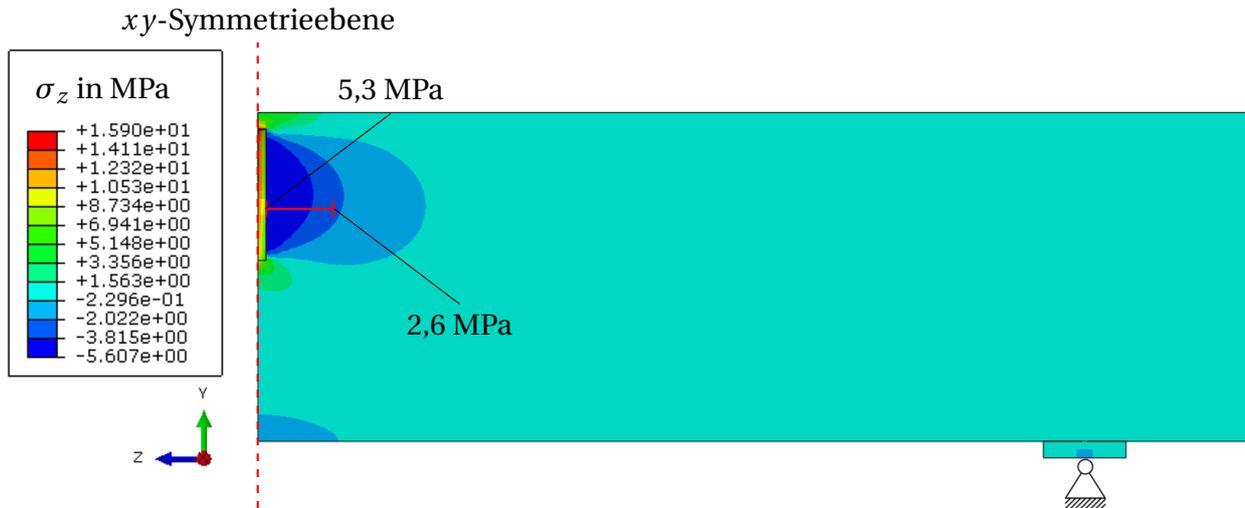


Abb. 4.16: Hauptspannungstrajektorien eines Biegeträgerschnittes mit einem druckbehafteten Aktor (qualitativ)

hängigkeit der äußeren Belastung anpassen, stellt die oben dargestellte Lösung nur eine Näherung dar.



4.3 Manipulation der Verformungen im Träger

In Tabelle 4.9 sind die Durchbiegungen für den passiven, aktiven und adaptiven Zustand aufgelistet. Zudem wird der unbelastete Balken, bei dem nur das Eigengewicht wirkt, ausgewertet. Ausgelesen wird die Durchbiegung an Knoten Nr. 48 (vgl. Abbildung 4.3), da sie hier am größten ist. Verformungen in Eigengewichtsrichtung besitzen ein negatives Vorzeichen. Unter Eigengewicht verformt sich der Balken mit einer Durchbiegung von $u_{EG} = -3,54 \cdot 10^{-3}$ mm. Nach Aufbringung der äußeren Last erhöht sich die Durchbiegung auf $u_{passiv} = -8,13 \cdot 10^{-2}$ mm. Im aktiven Zustand, in dem keine äußere Last, jedoch das Eigengewicht und der Druck in den Aktoren wirkt, verformt sich der Träger erwartungsgemäß in die entgegengesetzte Richtung um $u_{aktiv} = 5,21 \cdot 10^{-2}$ mm. Bei der Überlagerung des passiven und aktiven Zustandes heben sich die Durchbiegungen gegenseitig auf. Es bleibt im adaptiven Zustand eine geringe Durchbiegung in Eigengewichtsrichtung von $u_{adaptiv} = -2,45 \cdot 10^{-2}$ mm (vgl. Tabelle 4.9). Die Durchbiegung reduziert sich vom passiven zum adaptiven Zustand somit um ca. 70 %.

Tab. 4.9: Durchbiegung in Feldmitte in den verschiedenen Zuständen des Biegeträgers

Zustand des Trägers	Durchbiegung u_y
Eigengewicht	-0,00353392 mm
passiv	-0,0812596 mm
aktiv	0,0521062 mm
adaptiv	-0,0245808 mm

Abbildung 4.18 zeigt die Verformungen in den einzelnen Zuständen in einer 200-fach überhöhten Darstellung. Wie zu erwarten war, wölbt sich der Träger im passiven Zustand nach unten (in Eigengewichtsrichtung) und im aktiven Zustand nach oben (entgegen der Eigengewichtsrichtung). Im adaptiven Zustand ergibt sich eine deutlich reduzierte Durchbiegung in Eigengewichtsrichtung. Es ist gut zu erkennen, dass durch die Überlagerung des passiven und

des aktiven Zustandes die Durchbiegung trotz äußerer Last im adaptiven Zustand auf das Niveau im Eigengewichtszustand reduziert wird.

Eine „Restdurchbiegung“ ist auch im adaptiven Zustand vorhanden, da die Druckberechnung aus Kapitel 3.2 über die Gleichheit der Momente lokal an den Stellen der Aktoren durchgeführt wird. Hieraus ergibt sich eine leichte Überschätzung der Durchbiegungskompensation, die anhand der Simulationsergebnisse deutlich wird. Die vergleichsweise geringe Durchbiegung im adaptiven Zustand ist vertretbar. Zum einen braucht die Sensorik im Regelkreis (vgl. Kapitel 5) eine Mindestauslenkung des Trägers, um eine Verformung und somit eine äußere Last zu detektieren. Zum anderen wird keine Wölbung entgegen der Eigengewichtsrichtung angestrebt, sodass eine minimale Auslenkung in Eigengewichtsrichtung tolerabel ist. Deshalb wird eine Anpassung des Drucks in den Aktoren nicht weiter verfolgt. Die Reduktion der Durchbiegung um ca. 70 % wird als ausreichend bewertet.

Die numerischen Simulationen zeigen, dass das Ziel, die Verformungen des Trägers zu manipulieren, erreicht werden kann. Die Adaptionzielgröße, die Durchbiegung in Feldmitte, kann wie erwartet deutlich reduziert werden. Die einzelnen Zustände verhalten sich ebenfalls erwartungsgemäß. Gut erkennbar ist die Verformungskompensation in Abbildung 4.19. Die Reduktion ist gleichmäßig über die Trägerlänge verteilt. Daraus kann geschlossen werden, dass 10 Aktoren ausreichend sind. Ausgewertet werden von Knoten Nr. 48 bei $z = 0$ ausgehend alle Knoten, die sich am unteren inneren Rand des Trägers befinden.

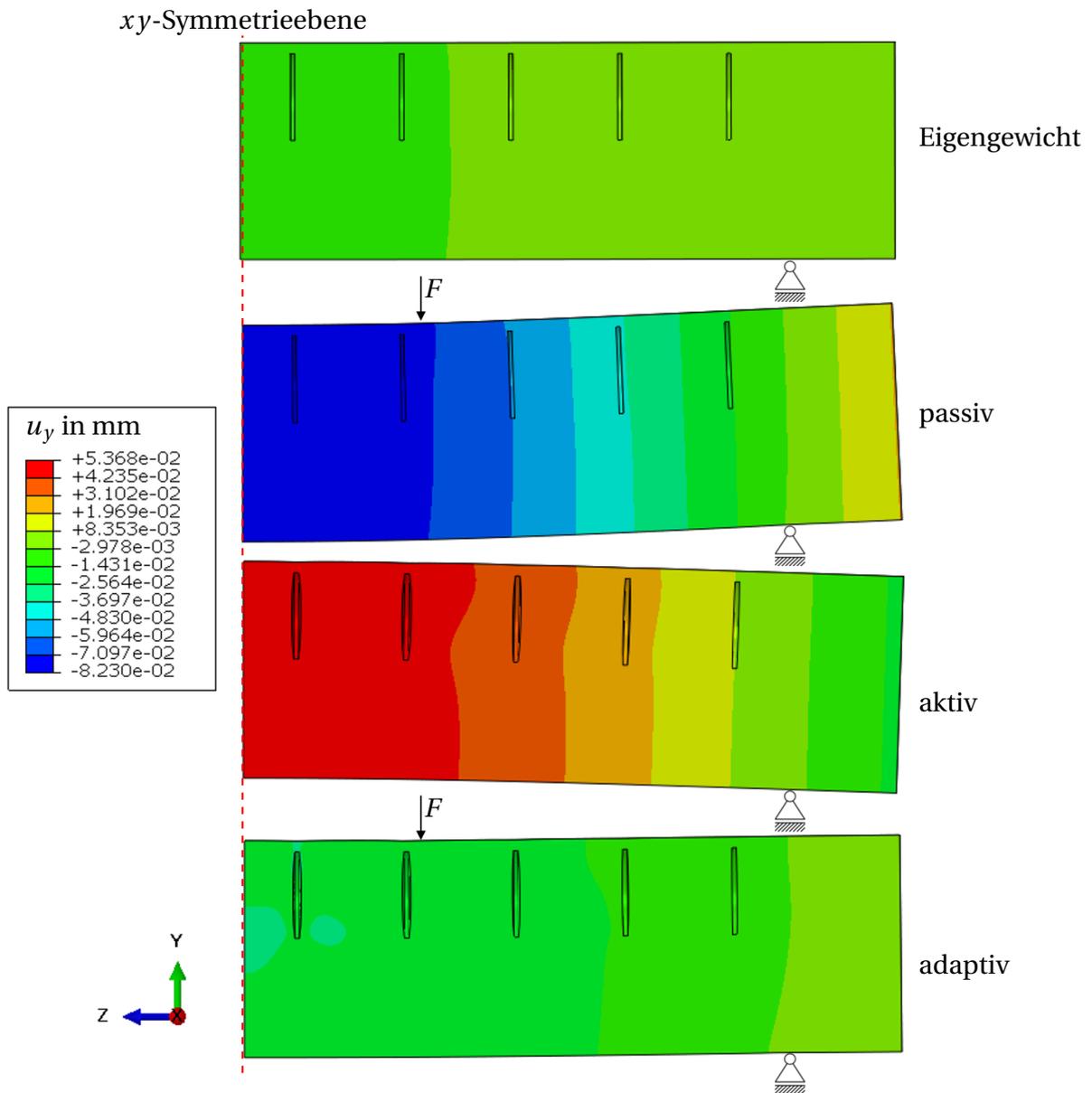


Abb. 4.18: Durchbiegung u_y für den passiven, aktiven und adaptiven Zustand (200-fach überhöhte Darstellung)

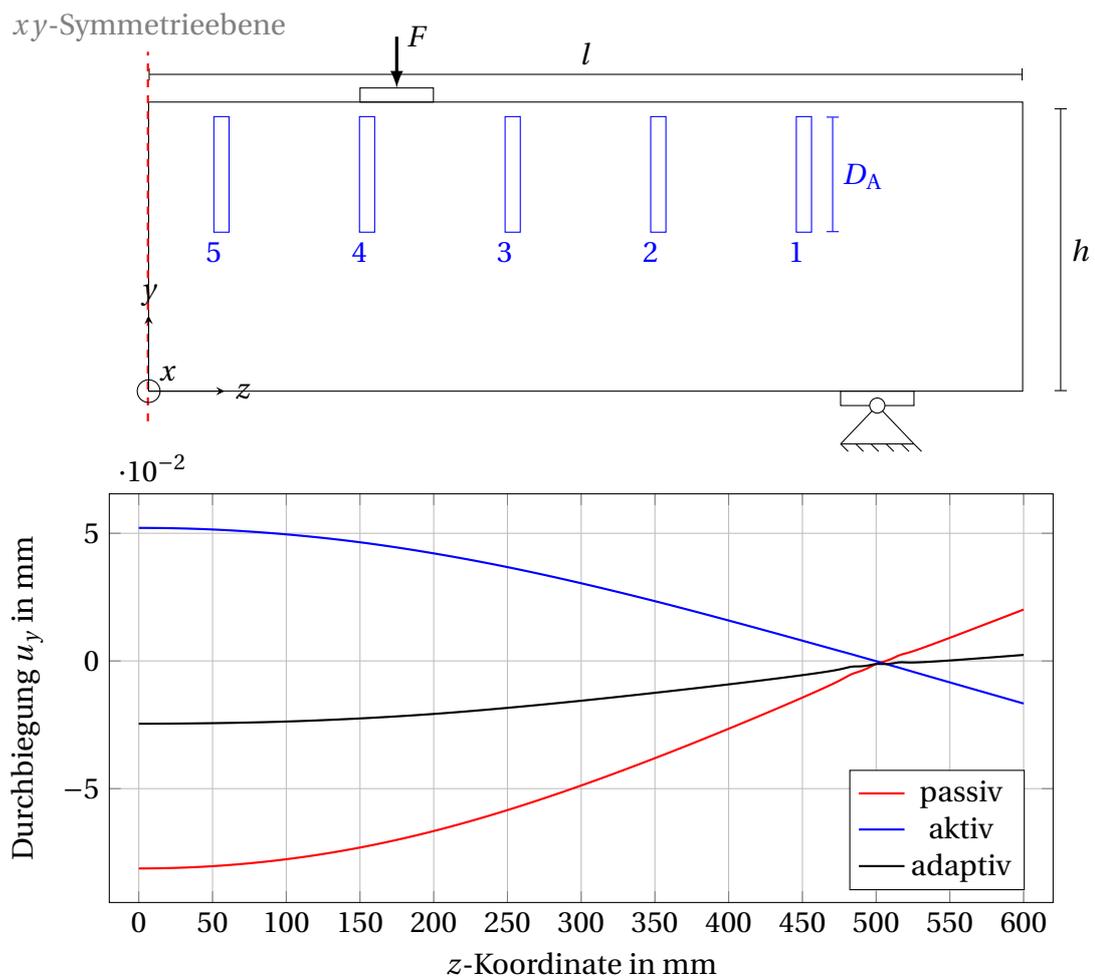


Abb. 4.19: Durchbiegung u_y entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am unteren inneren Rand ausgewertet

4.4 Manipulation der Verformungen in den Aktoren

Die Verformungen der Aktoren verhalten sich äquivalent zu den Zuständen des Trägers. Auch hier heben sich der passive und der aktive Zustand weitestgehend gegenseitig auf und eine Überlagerung führt zum erwarteten adaptiven Zustand. Betrachtet wird im Folgenden lediglich der Aktor, der der Feldmitte am nächsten ist, da hier die größten Verformungen und Spannungen vorhanden sind. Im passiven Zustand wird der Aktor gestaucht, es erfolgt eine Verformung der Bleche hin zur Aktorenmitte von $u_{z,\text{passiv}} = \pm 3,82 \cdot 10^{-4}$ mm erfolgt. Im aktiven Zustand expandiert der Aktor und die Bleche verformen sich nach außen. Die Bleche erfahren eine maximale Auslenkung in Trägerlängsrichtung von $u_{z,\text{aktiv}} = \pm 8,3 \cdot 10^{-3}$ mm.

Im adaptiven Zustand ist der Maximalwert der Verformung mit $u_{z,\text{adaptiv}} = \pm 8,0 \cdot 10^{-3}$ mm im Vergleich zum aktiven Zustand nur minimal reduziert. Allerdings ist die Größe des Bereichs der maximalen Verschiebung in die Wirkungsrichtung deutlich reduziert (vgl. Abbildung 4.20). In Abbildung 4.20 sind zudem die drei Zustände des innersten Aktors in 300-facher Überhöhung dargestellt. Es sind die Stauchung im passiven Zustand sowie die Expansion im aktiven bzw. adaptiven Zustand zu erkennen. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Verformungen im adaptiven Zustand deutlich geringer und symmetrischer über die Aktorhöhe verteilt sind als im passiven und aktiven Zustand. Dies liegt daran, dass im passiven und aktiven Zustand der Träger eine deutliche Biegeverformung erfährt, im adaptiven Zustand aber, wie gewünscht, nahezu keine Durchbiegung aufweist (vgl. Abschnitt 4.3). Durch die geringe Absolutverschiebung wird die Verformung der Bleche im adaptiven Zustand symmetrisch und zur Aktormitte hin maximal.

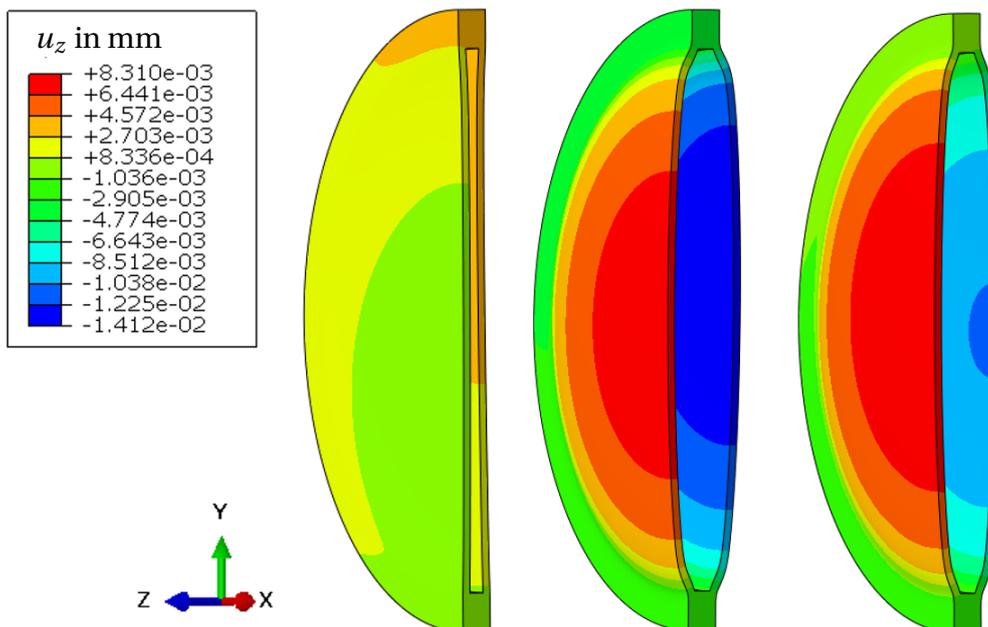


Abb. 4.20: Verformungen u_z für den passiven (links), aktiven (Mitte) und adaptiven Zustand (rechts) (Darstellung in 300-fach Überhöhung).

4.5 Manipulation der Spannungen im Träger

Obwohl die Durchbiegung die Zielgröße der Adaption ist, werden die Spannungen innerhalb des Trägers ebenfalls ausgewertet. Damit soll überprüft werden, ob diese positiv beeinflusst werden und wenn ja, an welchen Stellen des Trägers und wie stark. Der Fokus liegt auf den Biegespannungen in Trägerlängsrichtung σ_z , da diese maßgebend für die Dimensionierung des Trägers und die Berechnung der Bewehrungsmenge sind. Im besten Fall können die Zugspannungen im unteren Bereich des Querschnitts, der Zugzone bei herkömmlichen Biegeträgern, deutlich reduziert und Stahlbewehrung eingespart werden. Die Spannungen in die anderen beiden Raumrichtungen sind im Anhang A dargestellt.

Unbelastet verformt sich der Träger, wie jeder herkömmliche Biegeträger, in Eigengewichtsrichtung und weist eine maximale Zugspannung an der untersten Faser in Feldmitte auf. Die maximale Druckspannung ist im Bereich des inneren Aktors und nicht an der äußersten Faser des Querschnitts. Abbildung 4.21 zeigt den Träger und die Positionen der maximalen Zug- und Druckspannungen. Die Spannungen sind mit 0,09 MPa bzw. $-0,405$ MPa im Vergleich zur Festigkeit gering. Der Träger kann sein Eigengewicht ohne hydraulische Drücke in den Aktoren abtragen. In Tabelle 4.10 sind die maximalen und minimalen Spannungen σ_z der einzelnen Zustände zusammengefasst.

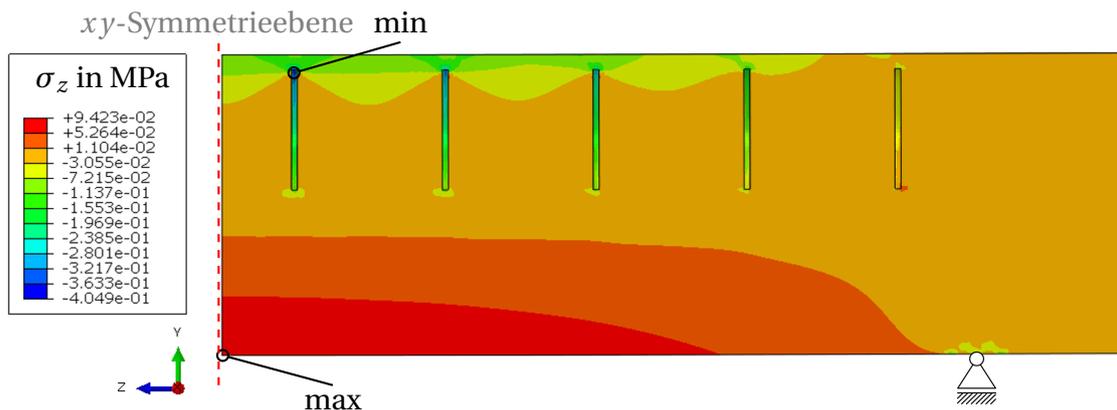


Abb. 4.21: Spannungen $\sigma_{z,EG}$ des Trägers unter Eigengewicht (Darstellung in 300-facher Überhöhung)

Im passiven Zustand erhöhen sich die Spannungen und die Druckzone ist weiterhin im oberen Bereich des Trägers. Die Position der maximalen Druckspannung ist gleich der im unbelasteten Zustand, der Wert hat sich durch die externe Belastung auf $-9,5$ MPa erhöht. In der Zugzone erhöht sich die Spannung auf $2,172$ MPa und ist um ca. 10 cm in Richtung Auflager versetzt (siehe Abbildung 4.22). Am Knoten Nr. 48 in Feldmitte ist die Spannung mit $2,1719$ MPa nahezu identisch.

Die Spannungsverteilung innerhalb des Trägers ändert sich im aktiven Zustand grundlegend (siehe Abbildung 4.23). In der eigentlichen Zugzone herrscht aufgrund der Wölbung entgegen der Eigengewichtsrichtung eine Druckspannung in Höhe von $-0,52$ MPa. Die maximale Zugspannung von $21,3$ MPa tritt am oberen Rand des Aktors in Feldmitte auf. Durch die Expansion des Aktors wird hier innerhalb eines kleinen Bereiches Zug übertragen. Die maximalen Druckspannungen von $-9,94$ MPa treten am Rand der Aktoren in der Nähe des Mittelpunktes des

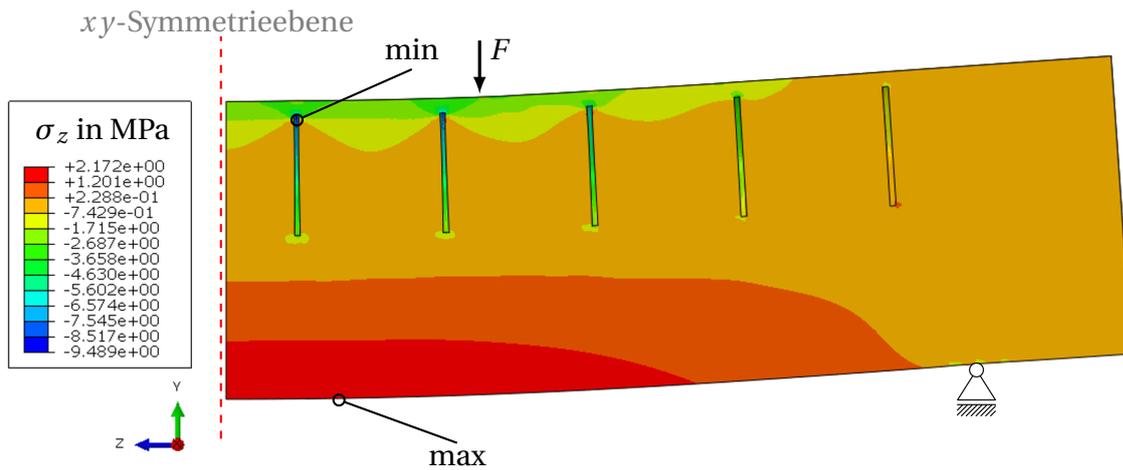


Abb. 4.22: Spannungen $\sigma_{z,\text{passiv}}$ des Trägers im passiven Zustand (Darstellung in 300-facher Überhöhung)

Blech auf. Der tatsächliche Maximalwert liegt zwar nicht am Aktor in Balkenmitte, sondern am benachbarten, die Druckspannung ist dort mit $-9,54$ MPa nur unwesentlich geringer.

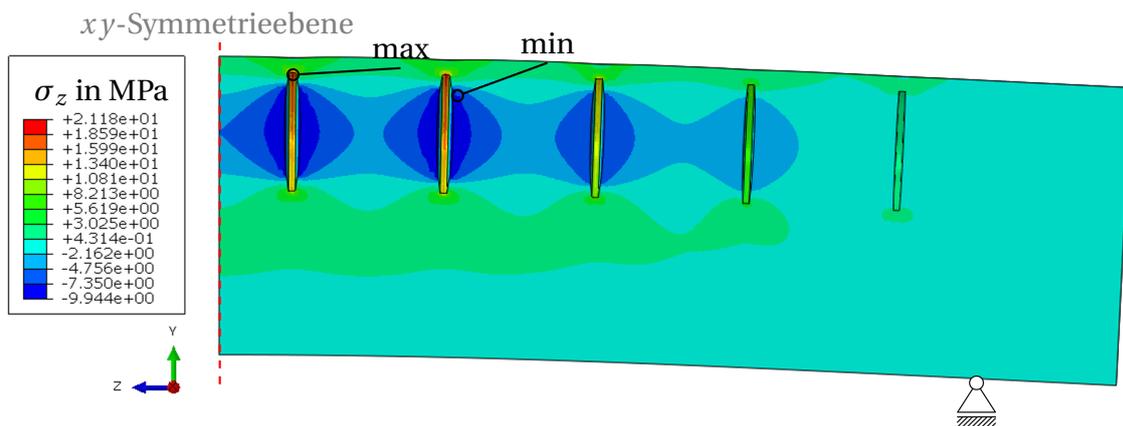


Abb. 4.23: Spannungen $\sigma_{z,\text{aktiv}}$ des Trägers im aktiven Zustand (Darstellung in 300-facher Überhöhung)

Abbildung 4.24 zeigt die Spannungen $\sigma_{z,\text{adaptiv}}$ des adaptiven Zustandes. Durch die Überlagerung der hydraulischen Drücke in den Aktoren und der äußeren Last verringern sich die maximalen und minimalen Spannungen. In der Charakteristik der Spannungsverteilung entspricht der adaptive Zustand weitestgehend dem aktiven. Die Verformungen sind im Vergleich zum passiven Zustand weitestgehend vollständig reduziert.

Am Auswertungspunkt (Knoten Nr. 48) sinkt die Zugspannung von $\sigma_{z,\text{passiv}} = 2,2$ MPa auf $\sigma_{z,\text{adaptiv}} = 1,5$ MPa. Dies entspricht einer Reduktion von 32 % und erlaubt es, den Träger mit weniger Stahlbewehrung an dieser Stelle auszuführen. Die Zugspannungsspitzen, die im aktiven Zustand rund um die Aktoren auftreten, überlagern sich mit den Druckspannungen aus der äußeren Last, sodass diese sich um ca. 40 % von $\sigma_{z,\text{aktiv}} = 21,2$ MPa auf $\sigma_{z,\text{adaptiv}} = 13,3$ MPa reduzieren. Dies entspricht gleichzeitig der maximalen Spannung, die im adaptiven Zustand auftritt. Sie ist nur in einem kleinen Bereich am oberen Rand der inneren Aktoren vorhanden

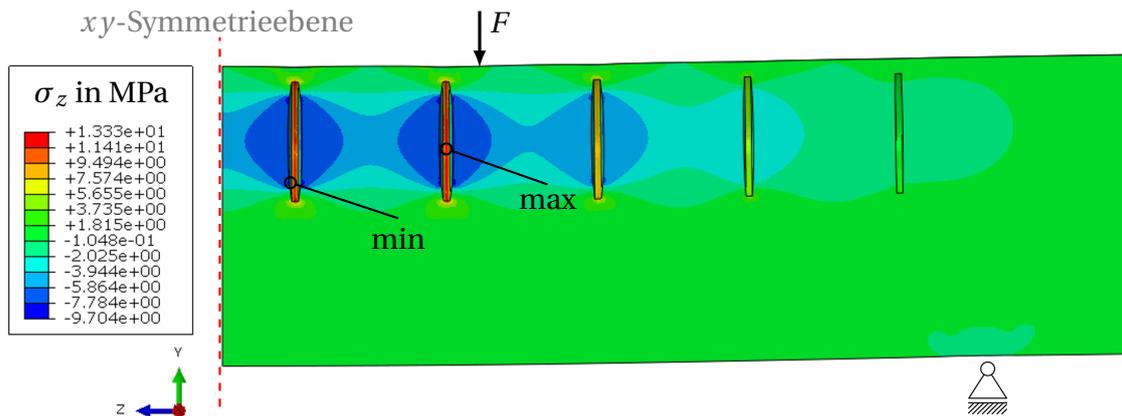


Abb. 4.24: Spannungen $\sigma_{z,\text{adaptiv}}$ des Trägers im adaptiven Zustand (Darstellung in 300-facher Überhöhung)

und baut sich bis zur Oberfläche des Trägers auf $-0,6$ MPa ab. Abbildung 4.25 fasst die Spannungsplots σ_z für die vier Zustände zusammen.

In Abbildung 4.26 wird in der Darstellung nur zwischen Zug- und Druckspannungen in Trägerlängsrichtung im adaptiven Zustand $\sigma_{z,\text{adaptiv}}$ unterschieden. Der Einfluss der Aktoren auf die Spannungsverteilung ist gut zu erkennen. Zwischen den Aktoren ist ähnlich wie im aktiven Zustand das zu erwartende Druckband deutlich ausgebildet.

Tab. 4.10: Maximale und minimale Biegespannungen σ_z in den verschiedenen Zuständen des Biegeträgers

Zustand des Trägers	$\sigma_{z,\text{max}}$	$\sigma_{z,\text{min}}$
nur Eigengewicht	0,09423 MPa	-0,4049 MPa
passiv	2,172 MPa	-9,489 MPa
aktiv	21,18 MPa	-9,944 MPa
adaptiv	13,33 MPa	-9,704 MPa

Die unterschiedlichen Spannungsverläufe σ_z über die Trägerhöhe werden in Abbildung 4.27 dargestellt. Die Auswertung findet an der Schnittlinie der beiden Symmetrieebenen statt, im realen Balken in der Mitte des Trägers parallel zur y -Achse. Der Verlauf der Spannungen im passiven Zustand (blau) ähnelt dem eines herkömmlichen Biegeträgers. Er ist annähernd linear, hat jedoch auf Höhe des Aktors ($y = 110$ mm bis $y = 190$ mm) eine erkennbare Abweichung. Diese ist auf die Aussparung für die Aktoren zurückzuführen. Die Maximalwerte von $\pm 2,1$ MPa an den Oberflächen stimmen, wie bereits bei der Konvergenzstudie gezeigt, mit der analytischen Lösung gut überein (vgl. Abschnitt 4.1.2). Erwartungsgemäß wirkt am oberen Rand eine Druck- und am unteren eine Zugspannung. Im aktiven Zustand (rot) herrscht an der Oberseite eine Zugspannung von 2,1 MPa und an der Unterseite eine Druckspannung von $-0,6$ MPa. Der Verlauf ist, anders als bei der passiven Konfiguration, deutlich nichtlinear und durch eine markante Spitze der Druckspannung von $-4,8$ MPa bei $y = 150$ mm geprägt. Dies verwundert nicht, da hier

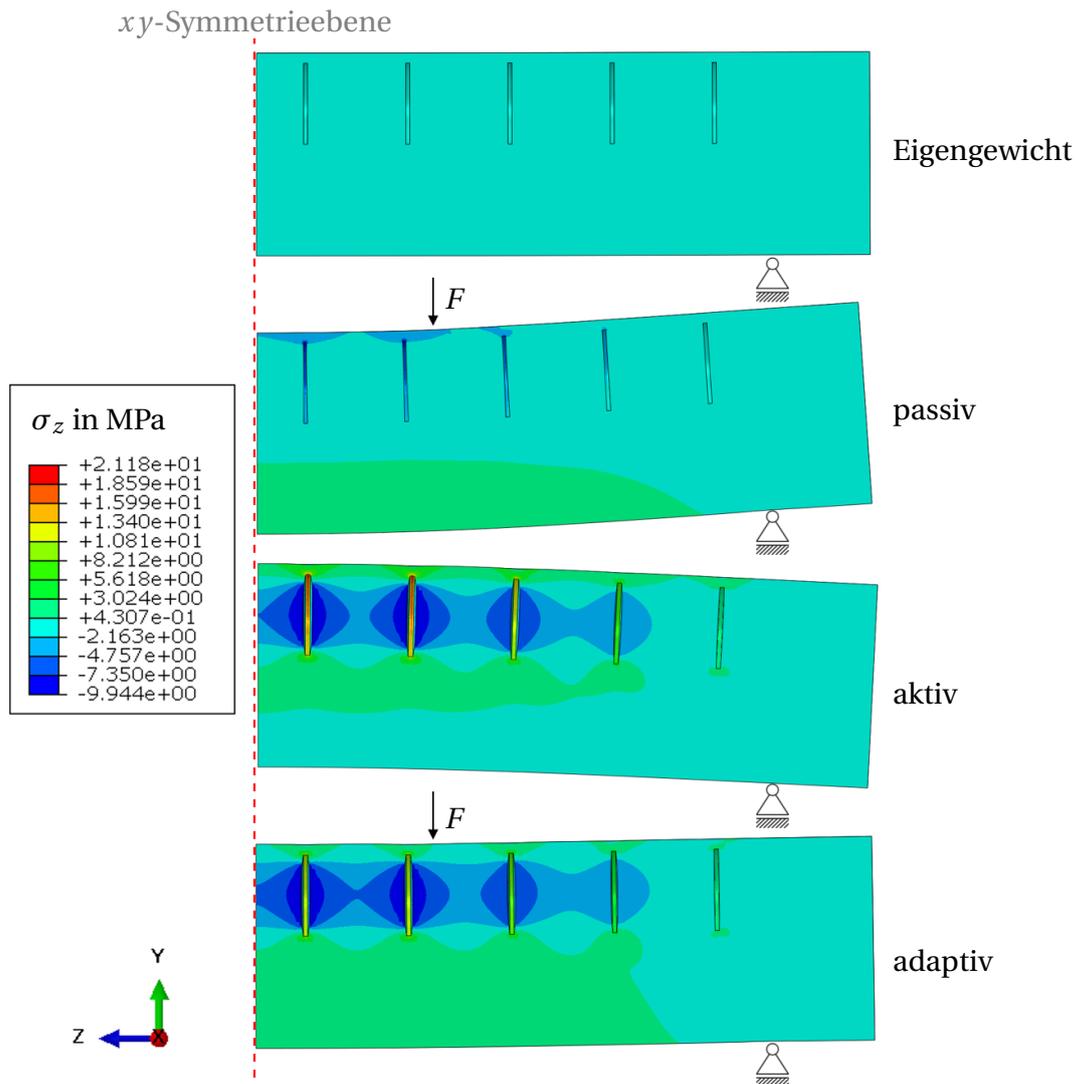


Abb. 4.25: Spannungen σ_z in den untersuchten Zuständen (Darstellung in 300-facher Überhöhung)

der Mittelpunkt des Aktorbleches und somit die resultierende Kraft des hydraulischen Druckes liegt. Darunter fällt die Spannung wieder ab und erreicht bei ca. $y = 80$ mm einen zweiten Wendepunkt bei einer Zugspannung von 0,9 MPa. Hier ist der Effekt der expandierenden Aktoren, die dadurch unterhalb der Aktorik eine Zugspannung induzieren, größer als der Effekt aus der nach oben gerichteten Biegeverformung des Trägers, die im unteren Bereich eine Druckspannung erzeugt. Bis zum unteren Ende des Trägers kehrt sich dieses Verhältnis um und es herrscht im aktiven Zustand eine Druckspannung von ca. $-0,5$ MPa. Im adaptiven Zustand (schwarz) ähnelt der Verlauf der Spannungen eher dem Verlauf im aktiven als im passiven Zustand, obwohl sich der adaptive Zustand aus der Überlagerung des aktiven und passiven Zustandes zusammensetzt, wie bei der ausgeprägten Druckspannung bei $y = 150$ mm gut ersichtlich wird. In einigen Bereichen weist die Höhe der Spannung doch einen vorteilhafteren Wert auf, da vor allem die Zugspannungen im adaptiven Zustand im Vergleich zum passiven Zustand reduziert sind. Am oberen Rand ist die Spannung nahezu null. Die maximale Druckspannung ist mit

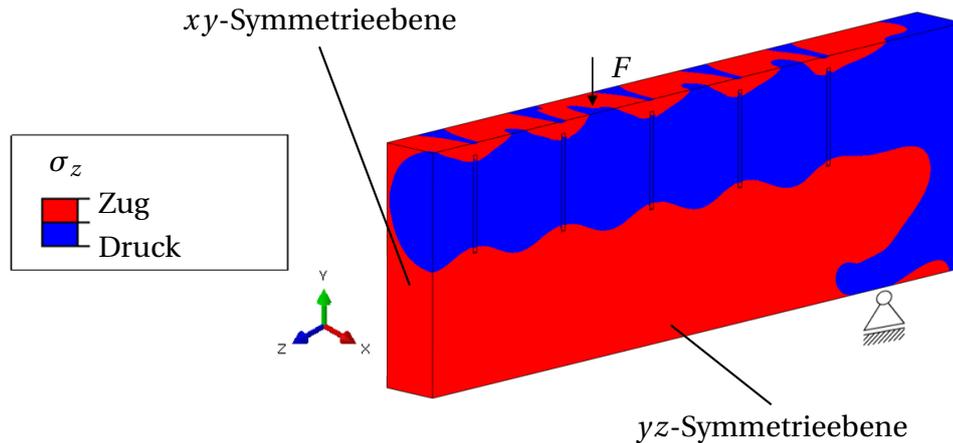


Abb. 4.26: Spannungen $\sigma_{z,\text{adaptiv}}$ im adaptiven Zustand

–5 MPa leicht erhöht, wird aber nicht kritisch. Wie gewünscht, verhält sich die Manipulation werkstoffgerecht, da Zugspannungen größtenteils reduziert und dafür unkritische Druckspannungen induziert werden. Am unteren Rand ist gut zu erkennen, dass die Druckspannungen im aktiven und die Zugspannungen im passiven Zustand sich teilweise aufheben. Der Spannungsverlauf im adaptiven Zustand liegt nicht exakt in der Mitte der beiden Ausgangszustände. Dies liegt an mehreren Effekten: Zum einen ist der berechnete Druck aus der Momentengleichheit leicht unterschätzt, sodass hier tendenziell keine vollständige Aufhebung der Spannungen stattfinden kann (vgl. Kapitel 3.2). Zum anderen bewirkt die Expansion des Aktors nicht nur ein Moment, das zu einer Druckspannung führt, sondern auch eine Normalkraft, die den Träger in seiner Längsrichtung ausdehnt, was zu Zugspannungen führt. Die Zugspannung ist im Bereich $y = 75 \text{ mm}$ mit 1,2 MPa leicht höher als im aktiven Zustand (0,9 MPa) und deutlich höher als die passive Spannung (0,2 MPa). Dies ist nicht kritisch und beschreibt den Zustand einer fast vollständigen Verformungskompensation. Leicht erhöhte Spannungen werden in Kauf genommen, solange diese unkritisch sind, da der Mehrwert der minimalen Durchbiegung überwiegt.

Abbildung 4.28 zeigt die Spannungen in Trägerlängsrichtung σ_z entlang des oberen inneren Randes für die unterschiedlichen Zustände. Wie erwartet, ist der Träger im passiven Zustand (blau) gestaucht, sodass hier eine reine Druckspannung herrscht. Im aktiven Zustand (rot) erfährt der Träger durch seine entgegengesetzte Verformung eine Zugbeanspruchung am oberen Rand. Bei der Überlagerung hin zum adaptiven Zustand (schwarz) treten sowohl Zug- als auch Druckspannungen auf. Die Schwächung des Querschnittes durch die Aktoren ist in allen drei Zuständen sichtbar, jedoch im aktiven am ausgeprägtesten. Die Verläufe im aktiven und adaptiven Zustand ähneln sich stark, die Spannungen im adaptiven Zustand sind jedoch deutlich geringer. In Feldmitte des Trägers ($z = 0 \text{ mm}$) heben sich die Druckspannungen von ca. –2 MPa im passiven Zustand und die Zugspannungen im aktiven Zustand von 2 MPa auf, sodass der Träger im adaptiven Zustand spannungsfrei ist. Im aktiven und adaptiven Zustand steigen die Spannungen hin zum ersten Aktor auf ca. 5 MPa bzw. 2,1 MPa an und sinken auf Höhe des Aktors auf 1,8 MPa bzw. –0,6 MPa, um danach wieder auf den Spitzenwert anzusteigen. Im passiven Zustand verhält sich der Spannungsverlauf ähnlich, da auch hier die Störstelle der Aussparung vorhanden ist, allerdings mit umgekehrtem Vorzeichen. In allen drei Zuständen verhalten sich

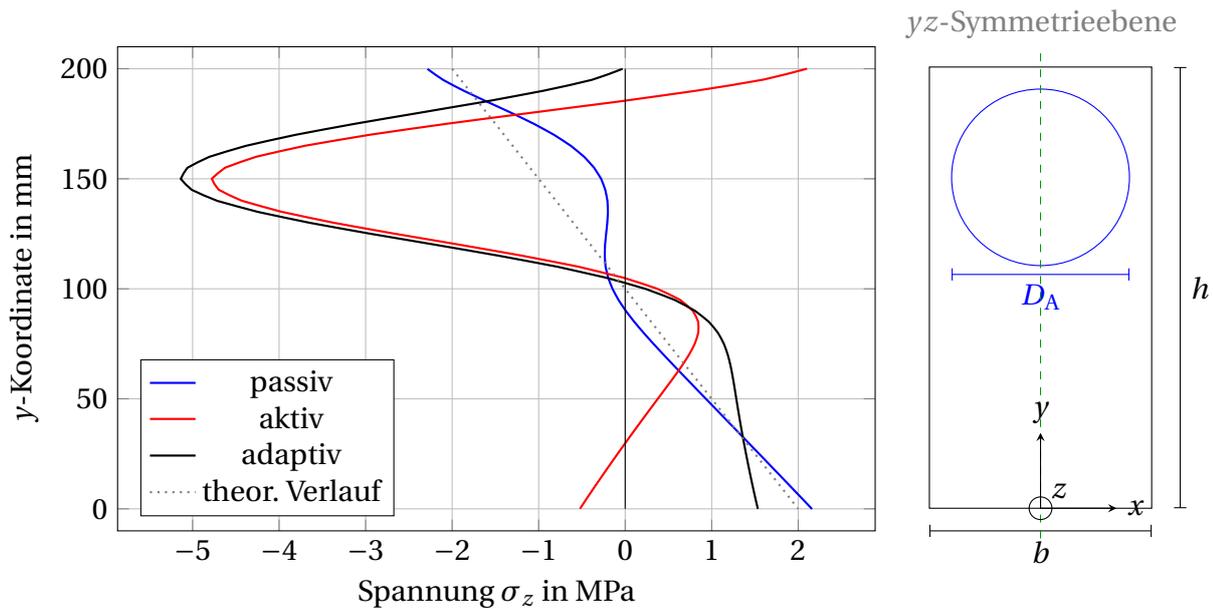


Abb. 4.27: Spannungsverteilung σ_z über die Trägerhöhe im aktiven, passiven und adaptiven Zustand an der Schnittlinie der beiden Symmetrieebenen

die anderen Aktoren äquivalent, jedoch sind die Spannungen bei den Aktoren 3, 2 und 1 geringer, da hier ein kleinerer hydraulischer Druck wirkt bzw. da im passiven Zustand das Moment aus der äußeren Last geringer ist. Aktor 4 ist nahezu identisch zum inneren Aktor 5, da hier der gleiche Druck herrscht. Im passiven Zustand kommt es hier zu einem sichtbaren Einfluss der Lasteinleitung, die sich an dieser Stelle befindet. Dieser Effekt ist im aktiven nicht und im adaptiven Zustand nur leicht erkennbar.

Abbildung 4.28 bestätigt die Erkenntnisse der vorangegangenen Untersuchungen. Das Prinzip der Superposition der Zustände ist gut sichtbar. Die Druckberechnung über die Momentengleichheit (vgl. Kapitel 3) führt zu der gewünschten Manipulation. Die Untersuchungen mithilfe der Balkentheorie bilden den Verlauf des Biegemomentes in stark vereinfachter Weise ab. Die Simulationsergebnisse stimmen mit den Ergebnissen aus dem Balkenmodell überein. Der theoretische Momentenverlauf aus der Balkentheorie im adaptiven Zustand entspricht eher dem Spannungsverlauf aus der Simulation. Die Sprünge im Momentenverlauf stellen sich im dreidimensionalen Körper nicht ein. Die Spannungen entlang der drei anderen Ränder zeigen ein ähnliches Ergebnis (siehe Anhang A).

Zu bedenken gilt es, dass die Auflagerbedingungen als frei verschieblich in Trägerlängsrichtung angenommen werden können. Das führt zu einer freien Ausdehnung des Trägers. Bei einer Zwängung des Trägers würden sich die Zugspannungen im adaptiven Zustand noch weiter verringern. Da das Aktuierungskonzept bereits mit der gewählten Auflagerkonfiguration nachgewiesen ist, wird auf diese zusätzliche Untersuchung verzichtet.

Eine weitere Möglichkeit, das FEM-Modell und die Ergebnisse daraus zu verifizieren, sind

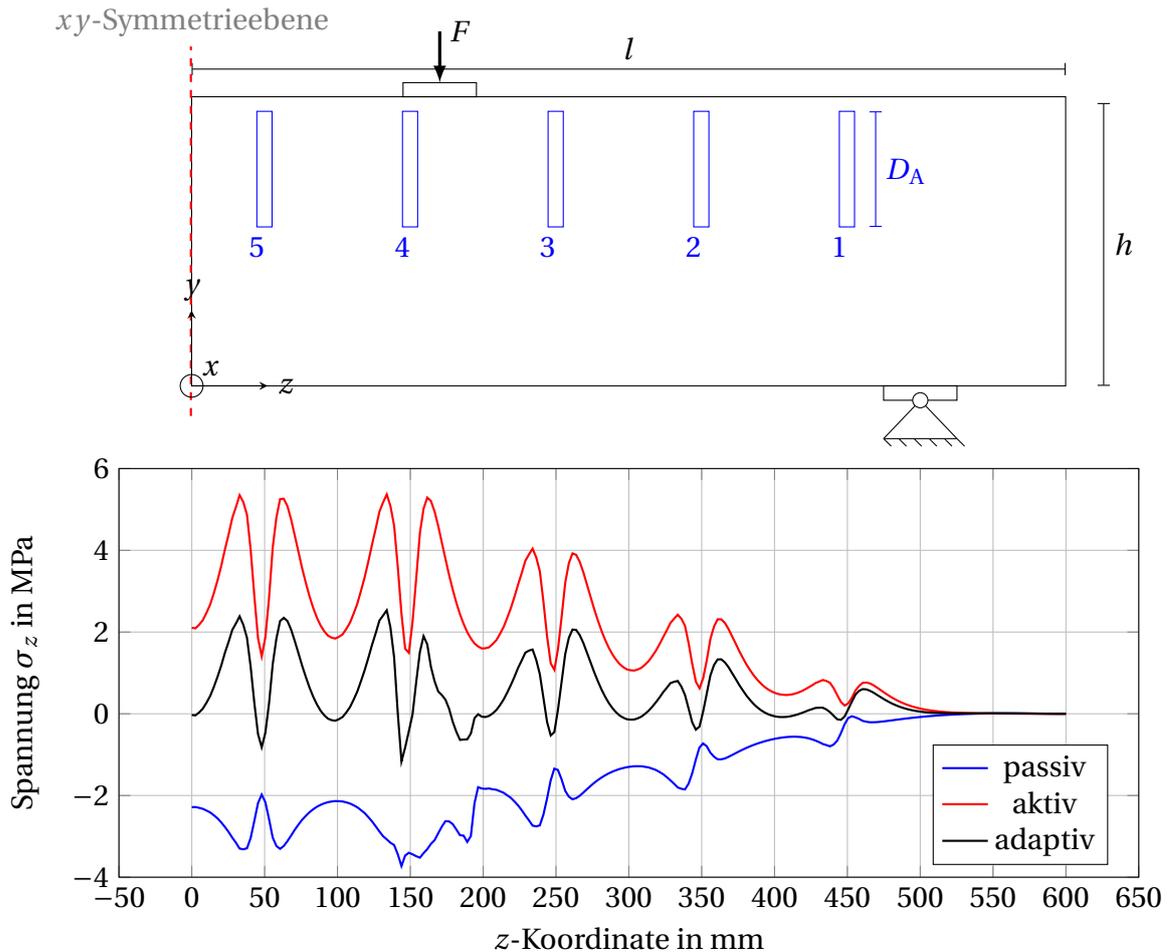


Abb. 4.28: Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen inneren Rand

die berechneten Dehnungen. Hier können die Dehnungen in Trägerlängsrichtung ϵ_z später mit den Werten der Dehnungsmessstreifen (DMS), die auf den Betonträger geklebt sind, verglichen werden (vgl. Kapitel 5.1). Dadurch lässt sich für den Bereich der DMS eine Überprüfung der Simulationsergebnisse erreichen. Obwohl dies nur lokal an den DMS-Stellen möglich ist, wird die Dehnung in Abbildung 4.29 entlang des gesamten Trägers am oberen inneren Rand dargestellt. Im Anhang A.5 sind die Dehnungen auch für den unteren inneren Rand dargestellt.

Durch die Betrachtung der Dehnungen wird zusätzlich das Konzept der Zustandsüberlagerung bestätigt. Wie auch bei den untersuchten Verformungs- und Spannungsverläufen heben sich die Dehnungen des passiven und des aktiven Zustandes weitestgehend auf und die Dehnungen im adaptiven Zustand sind im Vergleich geringer. Der Verlauf der Dehnungen ähnelt stark dem der Spannungen, da die Berechnung mit der FEM über ein lineares Werkstoffgesetz erfolgt. Die Dehnungen im adaptiven Zustand schwanken um den Nullpunkt und erreichen eine maximale Dehnung von $0,6 \cdot 10^{-4}$ vor und hinter den mittleren beiden Aktoren 4 und 5. Die minimale Dehnung beträgt $-0,2 \cdot 10^{-4}$ und tritt in Feldmitte sowie unmittelbar an den Aktoren auf (siehe Abbildung 4.29). Die größten Dehnungen sind im aktiven Zustand zu finden, diese betragen $1,4 \cdot 10^{-4}$ vor und unmittelbar hinter den Aktoren. Im Aktorbereich liegen die Dehnun-

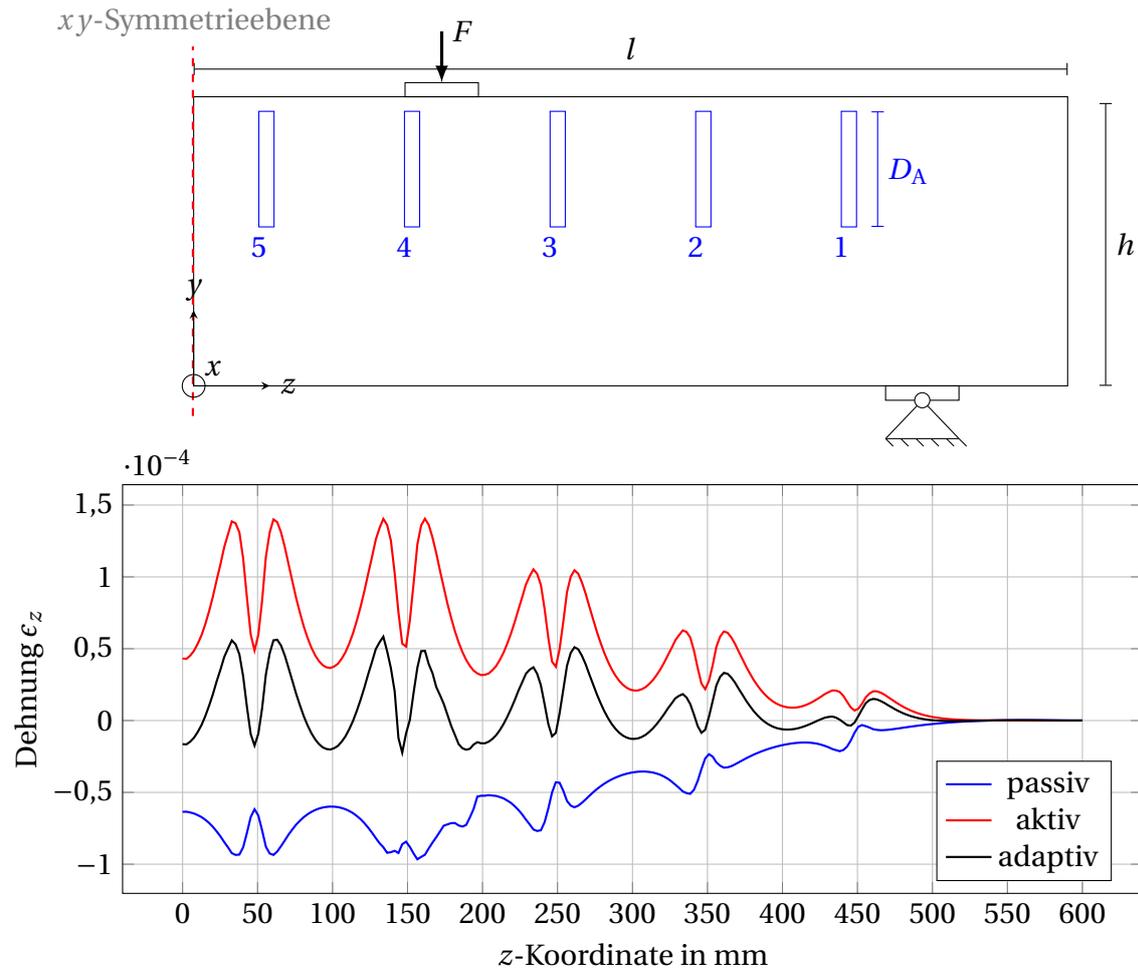


Abb. 4.29: Verlauf der Dehnungen ϵ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen inneren Rand

gen bei ca. $0,5 \cdot 10^{-4}$. Im aktiven Zustand liegen alle Dehnungen im positiven Bereich, da durch die Biegeverformung des Trägers entgegen der Eigengewichtsrichtung der obere Rand auf Zug belastet ist und somit gedehnt wird. Beim passiven Zustand ist dies umgekehrt, alle Dehnungen liegen im negativen Wertebereich, da alle Elemente am oberen Rand gestaucht werden. Die maximale Stauchung liegt bei ca. $-0,8 \cdot 10^{-4}$ vor und unmittelbar nach den ersten beiden Aktoren. Der adaptive Zustand zeigt am oberen Rand sowohl Bereiche, in denen die Elemente gestaucht werden, als auch Bereiche, in denen sie gedehnt werden.

4.6 Nichtlineare Untersuchungen

Um die Rissbildung im Betonquerschnitt vorhersagen zu können, werden zwei Biegeträger mit nichtlinearem Materialverhalten simuliert (vgl. Abschnitt 4.1.7). Diese Untersuchungen dienen zum Abgleich mit den Versuchen aus Kapitel 6.5 und zur Überprüfung des Verfahrens aus Kapitel 3.1, das eine Vorhersage der Rissposition erlaubt. Hierzu wird in einem Modell der Druck in den Aktoren und zusätzlich die externe Belastung auf den Träger erhöht. Im zweiten Modell wird der Druck in allen Aktoren gleichgesetzt und die externe Belastung konstant gehalten. Über die Momentengleichheit in Gleichung 3.4 sollte es bei der ersten Simulation zu Rissen in den beiden mittleren Aktoren und bei der zweiten zu Rissen im Aktor in Auflagernähe kommen. Eine ausführliche Auswertung der Spannungen, Verformungen und Dehnungen wird nicht durchgeführt.

4.6.1 Rissbilderzeugung an den inneren Aktoren

Diese Untersuchung entspricht weitestgehend den vorangegangenen, lediglich die externe Belastung und die hydraulischen Drücke werden erhöht. Die Verteilung der Aktordrücke über die Balkenlänge bleibt gleich. Die externe Last wird auf 17 kN erhöht, das entspricht einer Flächenlast auf die Lasteinleitungsplatte im FEM-Modell von $1,7 \text{ N/mm}^2$. Die Drücke in den Aktoren werden auf $2,9 \text{ N/mm}^2$ in Aktor 1 und $8,8 \text{ N/mm}^2$ in Aktor 2 gesteigert. Aktor 3 wird mit $14,5 \text{ N/mm}^2$ beaufschlagt, die Aktoren 4 und 5 in Feldmitte mit 19 N/mm^2 . Die Belastung und die hydraulischen Drücke entsprechen denen aus dem Experiment (vgl. Kapitel 6.5.1).

Abbildung 4.30 zeigt die Dehnungen in Trägerlängsrichtung ϵ_z auf der Rückseite des viertelseitigen FEM-Modells. Bereiche, in denen die Grenzdehnung von 2‰ überschritten ist, sind rot eingefärbt. Gut zu erkennen sind die roten Bereiche bei den mittleren Aktoren 4 und 5. Die Aktoren sind mit dem höchsten Druck von 19 N/mm^2 beaufschlagt. Da es durch die gleichzeitig erhöhte externe Belastung nicht zu einer Wölbung des Trägers kommt (vgl. Kapitel 6.5.1), liegt der Rissursprung nicht am oberen Rand des Trägers. Vielmehr erstreckt sich der Bereich über die Höhe des Aktors.



Abb. 4.30: Dehnungen in Trägerlängsrichtung ϵ_z

4.6.2 Rissbilderzeugung an den äußeren Aktoren

Diese Untersuchung weist eine andere Charakteristik auf, da die Drücke in den Aktoren nicht an die externe Belastung angepasst sind. Der hydraulische Druck ist in allen Aktoren gleich und beträgt 100 bar, er wird über eine Flächenlast von 10 N/mm^2 berücksichtigt. Die externe Belastung beträgt 8 kN. Bei der Superposition der Momente aus externer Last und aus der Aktorik überwiegt bei Aktor 1 in Auflagernähe der Anteil aus der Aktuierung, da das Moment aus der externen Last am Auflager null ist. Der dominante aktive Beanspruchungszustand führt wie erwartet zu einer deutlichen Verformung des Trägers entgegen der Eigengewichtsrichtung (vgl. Kapitel 6.5.2). Dadurch liegt es nahe, dass es an Aktor 1 zur Rissbildung kommt, die ihren Ursprung in der oberen Querschnittshälfte hat.

Die Dehnungen in Trägerlängsrichtung ϵ_z sind in Abbildung 4.31 dargestellt. Rote Bereiche zeigen eine Überschreitung der Grenzdehnung von 2 ‰. Gut zu erkennen sind die roten Bereiche in der oberen Querschnittshälfte an den Aktoren 1 und 2 – den beiden Aktoren, die dem Auflager am nächsten sind. Der Bereich an Aktor 1 ist ausgeprägter als der an Aktor 2.

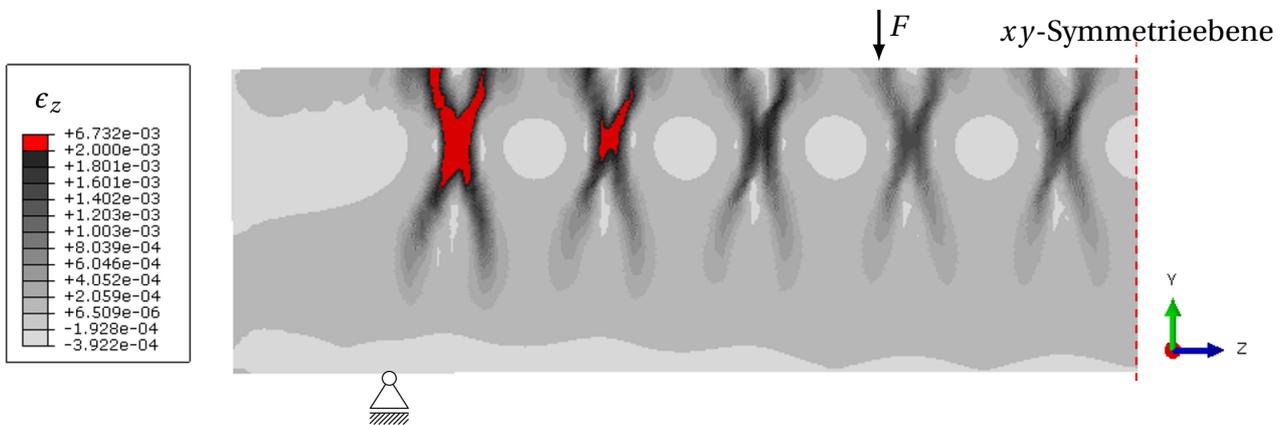


Abb. 4.31: Dehnungen in Trägerlängsrichtung ϵ_z

5 Konzeptrealisierung

Die bisherigen Untersuchungen fanden auf der Theorie- und Simulationsebene statt, haben aber das Potenzial adaptiver Biegeträger aufgezeigt. Für die experimentellen Validierungen müssen die Konzepte zunächst realisiert werden. In diesem Kapitel wird auf die einzelnen Komponenten adaptiver Biegeträger eingegangen. Die Abhandlungen zur Sensorik und Regelungseinheit sind verkürzt, da hier auf fertige Produkte zurückgegriffen werden kann. Die beiden Aktortypen sind Neuentwicklungen und werden vertieft beschrieben (vgl. Abschnitt 5.4.1 und 5.4.2).

5.1 Sensorik

Um den Zustand des Tragwerks beurteilen zu können, müssen Informationen über die äußeren Belastungen und die Tragwerksreaktionen gesammelt werden. Hierfür werden Sensoren¹ verwendet. Mithilfe der Sensoren soll zudem überprüft werden, ob die gewünschte Manipulation erfolgreich ist, sodass ggf. über die Aktorik korrigiert werden kann. Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren. Die Auswahl der Sensorik für die vorgestellte Messaufgabe basiert unter anderem auf [71, 5, 36]. Es werden die Sensoren vorgestellt, die in dieser Arbeit verwendet werden:

- Dehnungsmessstreifen (DMS)
- Induktive Wegaufnehmer
- Laser-Distanzsensoren
- Hydraulische Drucksensoren
- Thermoelemente Typ „K“

Die Dehnungsmessstreifen bestehen aus einer Trägerschicht aus Polyester und einem darauf aufgedampften Widerstandsdraht. Sie werden mit der Betonoberfläche verklebt und messen über eine elektrische Widerstandsänderung im gestreckten bzw. gestauchten Draht indirekt die Dehnung des Betons an der Applikationsstelle [46]. In den Versuchen werden DMS vom Typ PL-60-11-5LJC-F (Hersteller: Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., Gitterlänge: 60 mm, Widerstand: $R_D = 120\Omega$, Proportionalitätsfaktor: $k_D = 2,13$) als Vollbrücken verwendet. Die DMS sind mit einem Einkomponenten-Cyanacrylatklebstoff Typ CN-E (Hersteller: Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.) an der Betonoberfläche fixiert. Zur Kompensation von Temperatureinflüssen sind zwei DMS in der Vollbrücke nicht verklebt, sondern dienen rein zum

¹ von Lateinisch *sentire*, zu Deutsch „fühlen“

Abgleich bei eventuell auftretenden Temperaturschwankungen. Es wird jeweils ein DMS an der Ober- und an der Unterseite des Biegeträgers mittig platziert. Die Ausrichtung erfolgt parallel zur Trägerlängsachse. Abbildung 5.1 zeigt einen DMS, der nach der Aushärtung des Betons auf dessen Oberfläche geklebt wurde. Die Leiter sind bereits angelötet. Die DMS dienen der Messung der Dehnungen in Feldmitte an der Ober- und Unterseite des Biegeträgers. Im passiven Zustand kann dadurch auf die Durchbiegung geschlossen werden. In den vorgestellten Versuchsreihen ist nur ein DMS pro Seite verklebt, da die Art der Belastung (zwei symmetrische Einzellasten) bekannt ist. Um beispielsweise die Position einer asymmetrisch angreifenden Last zu bestimmen, können entlang der Bauteillängsachse mehrere DMS angebracht werden. Mit der Auswertung von mehreren DMS können die hydraulischen Drücke innerhalb der Aktoren entsprechend dem Lastfall angepasst werden.

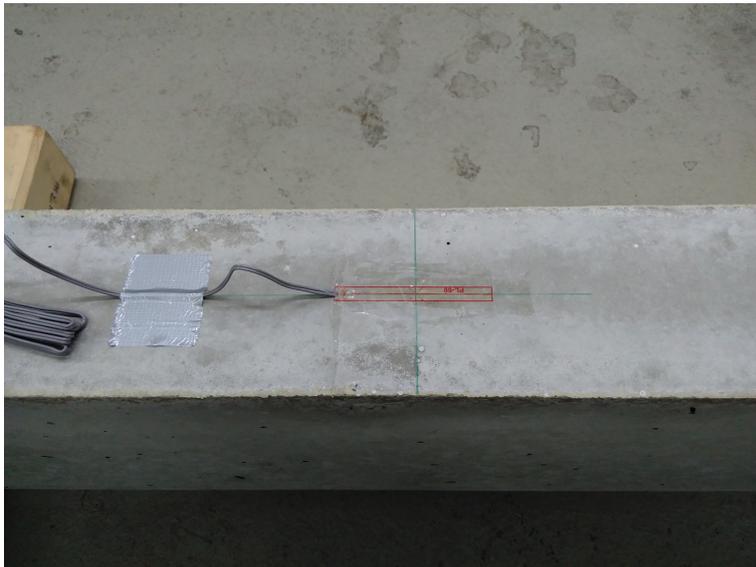


Abb. 5.1: Applizierter DMS auf der Betonoberfläche

Für die direkte Bestimmung der Durchbiegung werden sowohl induktive Wegaufnehmer (Hersteller: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Typ: WA-T, Tauchlänge: 20 mm) als auch Laser-Distanzsensoren (Hersteller: SICK AG, Typ: OD 30-05t1, Wiederholgenauigkeit: 1 μm , Messbereich: 10 mm) verwendet. Induktive Wegaufnehmer arbeiten mit der Permeabilität von Spulen. Je nach Eintauchtiefe eines ferromagnetischen Kerns in eine Spule ändert sich die Permeabilität messbar. In Abbildung 5.2 ist ein adaptiver Balken mit einem induktiven Wegaufnehmer in Feldmitte zu erkennen. Da die Durchbiegung in Feldmitte die Adaptionszielgröße und auch die direkte Regelgröße ist, werden hierfür zwei Sensortypen verwendet. Der Regelkreis wird mit dem Laser-Distanzsensor aufgestellt, der induktive Wegaufnehmer dient zur Überprüfung und als Ersatz bei etwaigem Ausfall des erstgenannten Sensors.

Der verwendete Laser-Distanzsensor arbeitet nach dem Lasertriangulationsprinzip. Der Sensor sendet und empfängt einen Laserstrahl unter einen bestimmten Winkel. Bei einer Änderung des Abstandes zum Messobjekt ändert sich folglich der Winkel. So kann über eine Dreiecksbeziehung die Entfernung berechnet werden. Lasertriangulation zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit, aber durch einen beschränkten Messbereich aus. Für die Untersuchungen in der

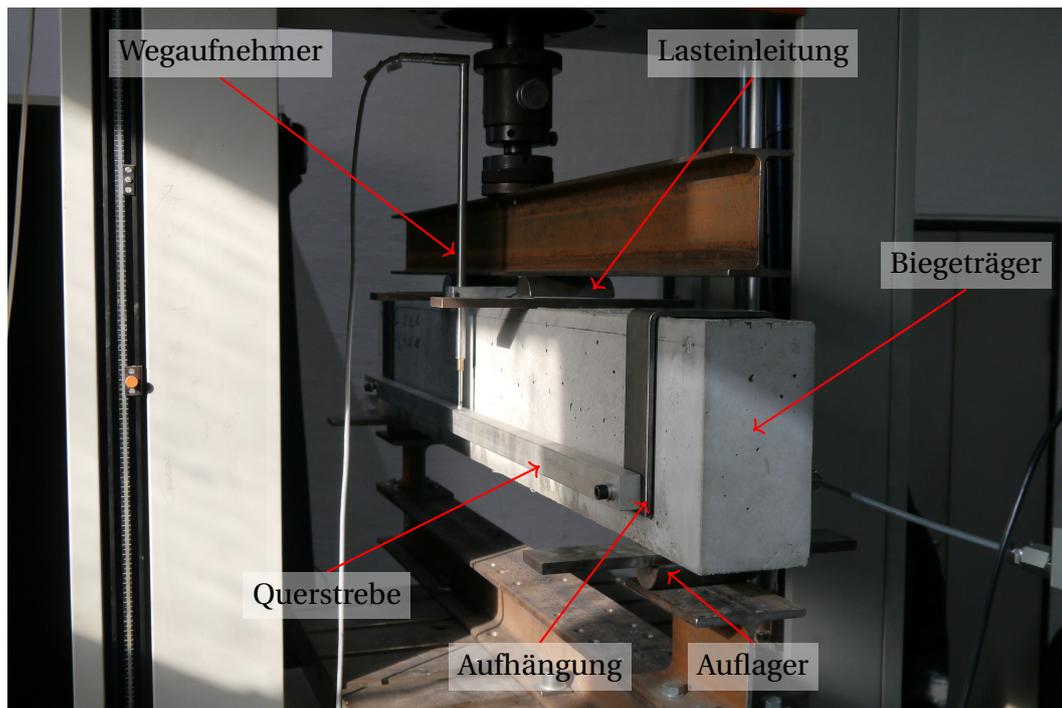


Abb. 5.2: Vier-Punkt-Biegeversuch mit induktivem Wegaufnehmer zur Durchbiegungsbestimmung in Feldmitte

vorliegenden Arbeit ist der Messbereich von 10 mm ausreichend groß. Abbildung 5.3 zeigt einen auf einer Querstrebe angebrachten Distanzsensor in Feldmitte des Biegeträgers. Die Prüfmaschine kann zwar ebenfalls den Weg der Traverse messen, allerdings ist diese Messgröße nicht bereinigt, da der Schlupf mitgemessen wird. Hierzu zählen unter anderem die Verformungen des Prüfaufbaus, wie sie z. B. die Polytetrafluorethylen-Schichten an den Lasteinleitungs- und Auflagerpunkten vollziehen. Deshalb wird die Durchbiegung an Querstreben, die über den Auflagern aufgehängt werden, gemessen. Der Sensorstrahl trifft auf ein Blech, das am oberen Trägertrand aufliegt und per Klebung in seiner Lage fixiert ist (siehe Abbildung 5.3).

Um den Druck in den Aktoren einzustellen und zu überprüfen, werden hydraulische Drucksensoren (Hersteller: SICK AG, Typ: PBT-RB400AG1SSNVMC0V, Messbereich: 0 bar bis 400 bar) verwendet. Die elektrischen Relativdrucksensoren bestimmen den Druck über die Verformung einer sensorinternen Membran. Da der Druck in den Aktoren individuell eingestellt werden soll, werden 4 Drucksensoren verwendet. Darüber hinaus wird zur Einstellung des Vordruckes aus dem Hydraulikaggregat (vgl. Abschnitt 5.4.2) ein analoges Rohrfedermanometer verwendet.

Zur Bestimmung der Temperaturen an der Oberfläche des Betons kommen Thermoelemente zum Einsatz (vgl. Abschnitt 5.4.1). Thermoelemente bestehen aus zwei unterschiedlichen metallischen Leitern, die am Punkt der Temperaturmessung miteinander verbunden sind. Bei einer Temperaturänderung zwischen Messstelle und Vergleichsstelle am Anschlusspunkt kann in einem Stromkreis eine Thermospannung gemessen werden. Die Thermospannung kann aufgrund der unterschiedlichen Metalle als elektrische Spannung gemessen werden. Dieser Vorgang wird als Seebeck-Effekt bezeichnet und ist u. a. detailliert in [59] erläutert. Unterschieden werden die Thermoelemente nach ihren metallischen Paarungen. Der verwendete Typ „K“ be-

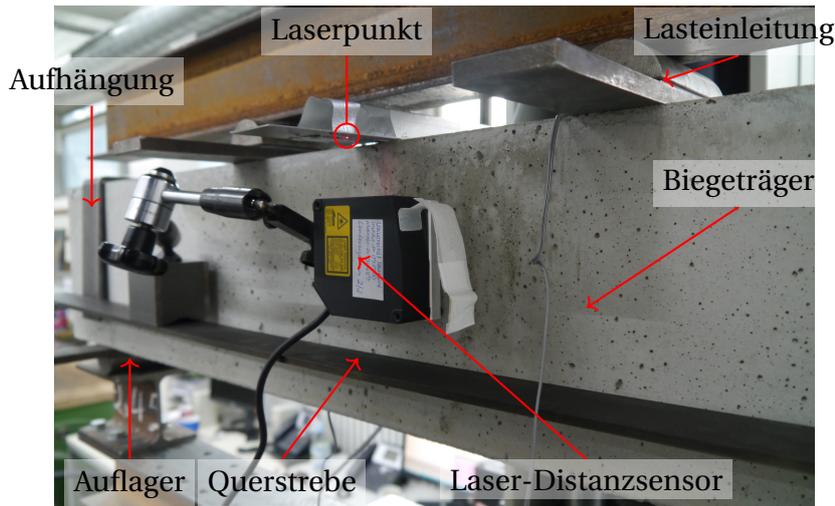


Abb. 5.3: Laser-Distanzsensor zur Durchbiegungsbestimmung in Feldmitte

steht aus einem Materialpaar aus Chrom und Nickel [4].

Die einzelnen Sensoren geben zum Teil redundante Informationen, sodass die Messergebnisse untereinander verglichen und Messfehler ausgeschlossen werden können. Die Abtastrate liegt bei allen Sensoren bei 5 Hz, d. h. alle 200 ms wird ein Messwert pro Sensor abgespeichert.

5.2 Steuerungs- und Regelungseinheit

Im Rahmen dieser Arbeit gilt es, einen funktionierenden Regelkreis aufzustellen, um die Durchbiegung stets minimal zu halten. Als Zwischenschritt wird hierzu zunächst eine Steuerung realisiert. Bei einer Steuerung wird das Ergebnis nicht zurückgeführt und eine eventuelle Korrektur findet nicht statt. Der Vorteil einer Steuerung ist die gute Beobachtbarkeit der unterschiedlichen Zustände, da zwischen passivem Zustand, in dem die Steuerung nicht aktiv ist, und dem adaptiven Zustand unterschieden werden kann. Diese beiden Zustände treten nacheinander auf und sind somit getrennt voneinander untersuchbar. Hingegen kann bei einem geregelten Tragwerk nur der adaptive Zustand beobachtet werden.



Abb. 5.4: Bachmann-Regelungseinheit zur Regelung der Durchbiegung und der hydraulischen Drücke

Realisiert werden für die experimentellen Untersuchungen mehrere Regelkreise. Zum einen wird ein globaler Regelkreis zur Durchbiegungsreduktion aufgestellt. Es wird entsprechend der Definition der Zustand des Biegeträgers über den Laser-Distanzsensor überprüft und bei einer detektierten Durchbiegung der Druck in den Aktoren erhöht, sodass die Durchbiegung durchgehend minimal ist. Diese Durchbiegungsregelung wird im Folgenden als globale Regelung bezeichnet. Die Sammlung und Auswertung der Sensorinformationen erfolgt in einer Regelungseinheit, die gleichzeitig die entsprechenden Befehle an die Aktorik übermittelt. Die Adaptionszielgröße Durchbiegung wird über den Laser-Abstandssensor überprüft. Es könnten auch die vorgestellten DMS oder der induktive Wegaufnehmer zur indirekten bzw. direkten Regelung der Durchbiegung verwendet werden. Zum anderen werden die hydraulischen Drücke in den Aktoren geregelt. Dies geschieht über die Regelung der Magnet-Proportionalventile am Steuerblock des Hydraulikaggregates mithilfe der hydraulischen Drucksensoren.

Die Regelungseinheit, mit der auch die Steuerung vorgenommen wird (Hersteller: Bachmann electronic GmbH), ist aus mehreren Modulen in einem Schaltschrank zusammengefasst und übernimmt verschiedene Aufgaben neben der globalen Regelung der Durchbiegung (siehe Abbildung 5.4). In dieser Einheit werden alle Sensoren angeschlossen und die Messdaten erfasst und abgespeichert.

Für die Ansteuerung der Heizpatrone wird eine eigene, vereinfachte Steuereinheit gebaut und verwendet. Diese ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Verwendet wird ein Netzteil in Verbindung mit einem Temperaturregler (Hersteller: JUMO, Bezeichnung: JUMO di eco). Als Regelgröße dient die Temperatur in der verwendeten Heizpatrone, die über ein integriertes Thermoelement gemessen wird.



Abb. 5.5: Netzteil zur Stromversorgung in Verbindung mit einer Temperaturregelungseinheit zur Ansteuerung der Heizpatrone

Auf die komplexe Regelungsstrategie, die Umsetzung und die Implementierung in die vorgestellte Hardware wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen. Das Zusammenspiel der Komponenten des adaptiven Biegeträgers für die Konfiguration mit dem Hydraulikaggregat ist in Abbildung 5.6 schematisch dargestellt.

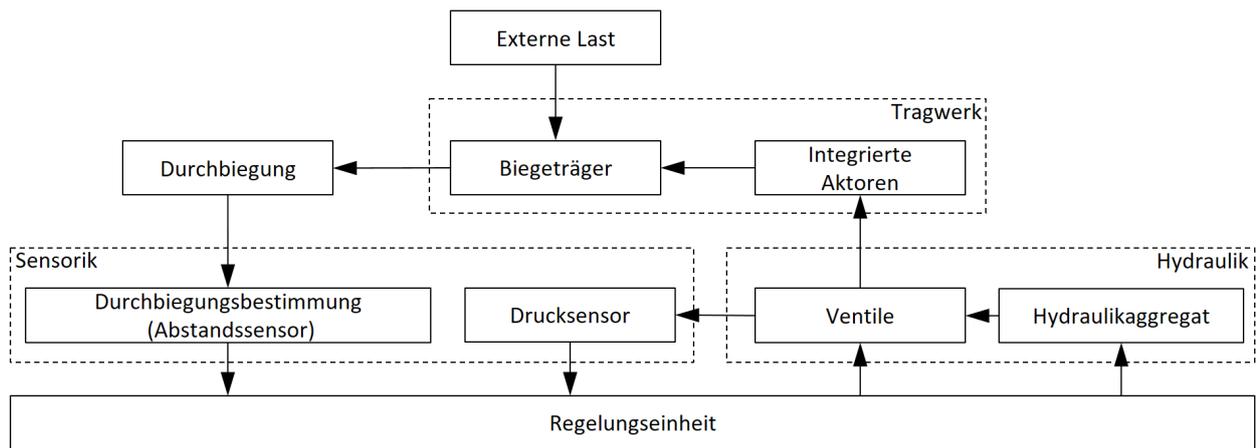


Abb. 5.6: Schematische Darstellung des Regelkreises eines adaptiven Biegeträgers mit Druckerzeugung durch ein Hydraulikaggregat

5.3 Aktorik

Aktoren sind eine Kombination aus Energiesteller und Energiewandler [44]. Der Großteil der Aktoren wandelt eine Energieform in mechanische Energie um. Es gibt mehrere Möglichkeiten, Aktoren zu kategorisieren. Eine Einteilung nach der Energiequelle (auch Hilfsenergie genannt), die verwendet wird, ist am weitesten verbreitet (vgl. Abbildung 5.7). Es wird zwischen elektrischer, fluidischer, thermischer und chemischer Hilfsenergie unterschieden [41]. Eine weitere Einteilung erfolgt über die Art der Bewegung, die hervorgerufen wird. Unterschieden wird zwischen Linear- und Rotationsaktoren [73]. Der bekannteste Vertreter für einen Rotationsaktor ist der klassische Elektromotor, bei dem eine elektrische Energie in eine Rotation (mechanische Energie) umgewandelt wird. Ein weit verbreiteter Linearaktor mit einer fluidischen Hilfsenergie ist der Hydraulikzylinder.

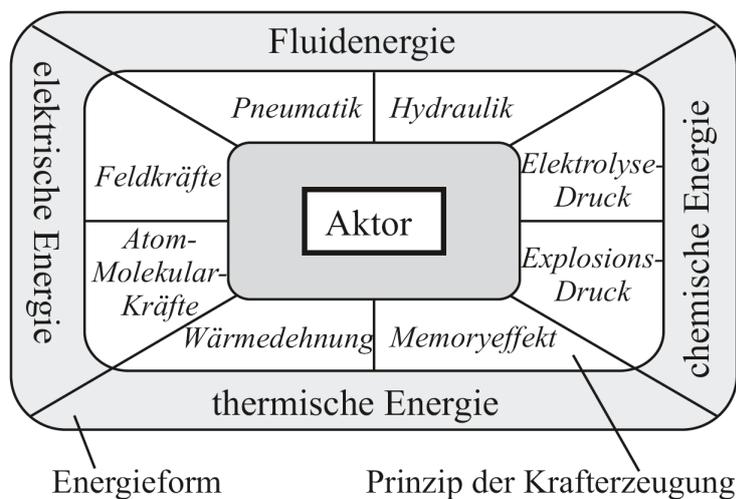


Abb. 5.7: Verschiedene Arten der Hilfsenergie für die Umwandlung in Aktoren (aus [41])

Darüber hinaus gibt es die sogenannten Unkonventionellen Aktoren, die sich nicht in die oben aufgeführte Klassifizierung einteilen lassen. Hierzu zählen unter anderem Aktoren aus Thermobimetallen [41]. Die Stellkräfte dieser Aktoren sind so gering, dass sie sich nicht für den Einsatz in adaptiven Biegeträgern eignen [45].

Ein Vergleich der unterschiedlichen Aktoren ist in [43] zu finden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird sich auf fluidische Aktoren beschränkt, da diese aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte, großen Stellkräfte und hohen Stellfrequenz für den Einsatz in adaptiven Betonbiegeträgern geeignet sind. Unter dem Oberbegriff der fluidischen oder fluidtechnischen Aktoren sind die pneumatischen und hydraulischen Aktoren zusammengefasst [32]. In der Pneumatik² ist das Fluid ein Gas, meistens Luft, in der Hydraulik³ ist das zur Energieübertragung verwendete Fluid eine Flüssigkeit. Wegen der höheren Kompressibilität von Luft gegenüber Öl können pneumatische Aktoren für die vorgestellte Biegeträger nicht verwendet werden. Der Kompressionsmodul K von Öl ist um den Faktor 10^4 höher als der von Luft [102]. Durch das Komprimieren wird Energie gespeichert, die bei einer Leckage schlagartig frei wird. Neben diesem Sicherheitsaspekt sind pneumatische Kompressoren meist auf einen Druckbereich bis 10 bar limitiert. In der Hydraulik sind Drücke bis 400 bar problemlos realisierbar [41]. Begrenzend sind bei Hydraulikpumpen häufig die Volumenströme, allerdings werden in dieser Arbeit nur kleine Volumenänderungen notwendig, sodass problemlos in Echtzeit aktuiert werden kann.

Die Hydraulik erzeugt in den Aktoren einen hydrostatischen Druck. Durch die Form des Aktors muss erreicht werden, dass der hydraulische, richtungsunabhängige Druck nur in die Trägerlängsachse wirkt. Es werden zwei Aktuierungsmöglichkeiten vorgestellt, für die jeweils Aktoren realisiert und getestet werden. In Abschnitt 5.4.1 wird ein eingeschlossenes Medium erwärmt und so der Druck in den Aktoren erzeugt. Abschnitt 5.4.2 beschreibt das verwendete Hydraulikaggregat, das den Druck durch Mediumzuführung erzeugt.

5.4 Druckerzeugung

5.4.1 Thermische Expansion

Die meisten Werkstoffe haben einen positiven Wärmeausdehnungskoeffizienten, d. h. das Volumen nimmt mit steigender Temperatur zu. Üblicherweise wird im Bauwesen versucht, diese Volumenzunahme nicht zu behindern, damit keine ungewollten Zwangsspannungen auftreten. So werden beispielsweise bei vielen Brückentragwerken Dehnungsfugen eingebaut, die eine zwängungsfreie Expansion der Brücke bei Sonneneinstrahlung ermöglichen.

In anderen technischen Anwendungen wird die thermische Ausdehnung gezielt genutzt, um eine Bauteilaktuierung durchzuführen. Mikrotome sind Schneidgeräte, die zur Herstellung von dünnen ($0,01\ \mu\text{m}$ bis $60\ \mu\text{m}$) Gewebeschnitten verwendet werden [53]. In die Geräte werden präparierte Gewebeproben eingespannt und eine Messerklinge trennt dünne Schnitte davon ab. Der Vorschub der Messerklinge bzw. des Präparates erfolgt je nach Art des Mikrotoms auf unterschiedliche Weise. Die präzisesten Schnitte (Dicke: $0,01\ \mu\text{m}$ bis $0,5\ \mu\text{m}$) lassen sich mit sogenannten Ultramikrotomen erstellen, der Vorschub erfolgt über die thermische Ausdehnung

² von Altgriechisch *pneuma*, zu Deutsch „Hauch“

³ von Altgriechisch *hydor*, zu Deutsch „Wasser“. Da zur Anfangszeit der Hydraulik Wasser als Energieträger benutzt wurde. Heute wird überwiegend mit Öl gearbeitet. Der Begriff Hydraulik blieb trotzdem bestehen.

eines Haltearmes, an dessen Ende das Präparat befestigt ist [25].

Dieses Prinzip kann bei adaptiven Biegeträgern angewandt werden, indem die Ausdehnung der Aktoren durch eine Erwärmung hervorgerufen wird. Eine direkte Erwärmung der Druckzone des Betons erzeugt zwar den gewünschten Verformungszustand, der dem aus Eigengewicht und äußerer Belastung entgegenwirkt. Die zunächst lokal begrenzte Erwärmung bzw. Ausdehnung des Betons würde sich über den gesamten Querschnitt verteilen, sodass dieser Effekt nach einer Zeit nachlässt. Durch die Erwärmung eines Aktors, der in der Druckzone integriert ist, kann eine dauerhafte Verformungsmanipulation erreicht werden.

Tab. 5.1: Wärmeausdehnungskoeffizienten ausgewählter Werkstoffe

Werkstoff	Wärmeausdehnungskoeffizient α bei 20 °C
Beton	$13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Stahl	$13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Hydrauliköl (HLP 32)	$700 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Wasser	$206,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Die Wärmeausdehnungskoeffizienten ausgewählter Werkstoffe sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Der Ausdehnungskoeffizient des gelisteten Hydrauliköls ist mit $700 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ deutlich größer als der der anderer Werkstoffe, weshalb dieses verwendet wird. Schließlich ist eine möglichst große Ausdehnung bei kleinem Energieeintrag (Erwärmung) erstrebenswert.

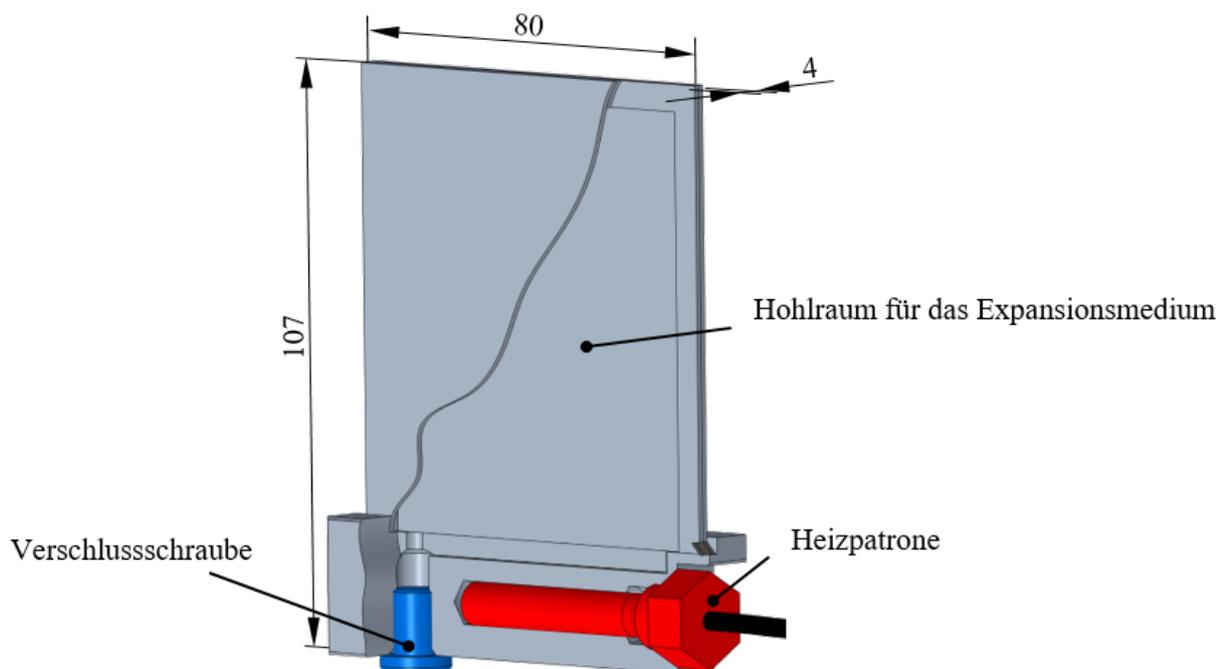


Abb. 5.8: Thermoaktor mit Verschlusschraube und Heizpatrone (Angaben in mm) (nach [8])

Ein Aktor, bei dem ein eingeschlossenes Hydrauliköl erwärmt wird, ist in Abbildung 5.8 darge-

stellt. Über eine Heizpatrone wird durch einen elektrischen Widerstand das Stahlgehäuse und somit das eingeschlossene Hydrauliköl in der Druckkammer erwärmt. Heizpatronen sind umschlossene Widerstandsdrähte, die sich bei einem Stromfluss erwärmen. Die verwendete Heizpatrone (Hersteller: Maxi watt, Leistungsaufnahme: 100 W, Bezeichnung: 8D50L230V100W1000 TLS+T+T8+T1W+TC"K"+TF AC) hat einen Durchmesser von 8 mm und ist 50 mm lang. In der Patrone ist ein Temperatursensor (Thermoelement Typ „K“), der zur Regelung verwendet wird, integriert.

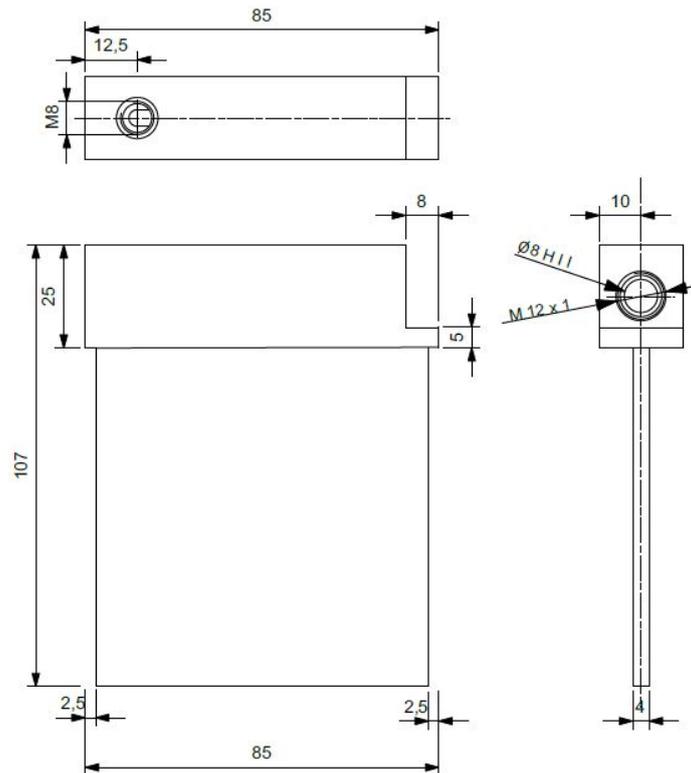


Abb. 5.9: Thermoaktor: Zeichnungen Frontansicht (links), Seitenansicht (rechts) (Angaben in mm)

Die Heizpatrone hat keinen Kontakt zum Öl, sondern heizt über das Stahlgehäuse das Öl indirekt auf (vgl. Abbildung 5.9). Dadurch wird eine potentielle Fehlerquelle, bei der es zu Leckage kommen kann, vermieden. Die einzige mögliche Austrittsquelle ist die Verschlusschraube, die nach dem Einfüllen des Öls die Hülle abschließt. Weiterhin muss die Wärmeübertragung der Heizpatrone auf das Medium betrachtet werden. Eine direkte Erwärmung des Öls führt zu ungewollten Temperaturspitzen, bei denen die maximale Temperatur der Heizpatrone überschritten wird und diese ausfällt. Der Übertrag auf eine anliegende Stahlmasse umgeht dieses Problem. Leckage wird vermieden, allerdings kann der Druck nicht direkt gemessen werden, da die Form der verwendeten Aktoren keinen Drucksensor erlaubt. Bei Versuchen mit integrierten Drucksensoren kam es an der Verbindungsstelle zwischen Ölkammer und Sensor zu Leckage, was einen rapiden Druckabfall zur Folge hatte. Zum Nachweis des Konzeptes der Verformungsmanipulation reichen die vorgestellten Aktoren aus.

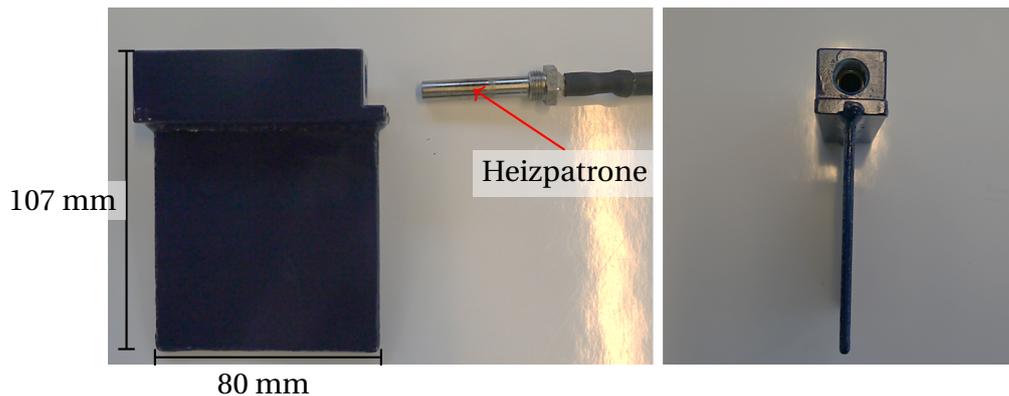


Abb. 5.10: Thermoaktor: Frontansicht (links), und Seitenansicht (rechts)

Die Stahlhülle besteht aus drei Blechen, die an den Rändern verschweißt werden (vgl. Abbildung 5.10). Um die Heizpatrone aufnehmen zu können, wird ein Stahlblock an der Unterseite der drei Stahlschichten angeschweißt. Die innere Stahlschicht ist ein Rahmen, der einerseits zur Bildung des Hohlraumes dient und andererseits eine Versteifung darstellt. Durch die Versteifung wird erreicht, dass die Ausdehnung nur in Balkenlängsrichtung erfolgt.

Der große Vorteil dieses Aktuierungsprinzipes ist die einfache dezentrale Ansteuerung und Integration der Aktoren in den Betonträger. Pro Thermoaktor ist nur eine Stromleitung aus dem Querschnitt zu führen. Um die einzelnen Aktoren ansteuern zu können, muss nur der entsprechende Stromkreis geschlossen bzw. getrennt werden. Außerdem lassen sich die notwendigen Ausdehnungen bzw. die gewünschten Drücke exakt einstellen.

Ein Nachteil ist die Trägheit des Systems, die es nur erlaubt, auf vergleichsweise langsam auftretende Lasten (z. B. Schnee) oder Kriechverformungen zu reagieren. Eine Reaktion auf schnell auftretende Lasten ist nur mit mehr Aufwand (z. B. mit leistungsstärkeren Heizpatronen) zu realisieren. Auch wenn ein schnelles Aufwärmen gelingt, so ist das aktive Abkühlen des Öls weiterhin problematisch. Eine Kompensation von Schwingungen durch schnelle Zustandswechsel scheint mit derzeitigen Technologien somit nicht möglich. Ein zweiter Nachteil ist die Gefahr einer Leckage. Nach einer solchen ist es nicht mehr möglich, einen Druck aufzubauen. Das Volumen vergrößert sich unbehindert, sodass kein Druck aufgebaut werden kann. Der Aktor ist deshalb mit nur einer potentiellen Fehlstelle, der Verschlusschraube, die nach Befüllen des Aktors dauerhaft verschlossen wird konstruiert. Hier wird über eine flüssige Schraubensicherung die Gefahr einer Leckage auf ein Minimum reduziert. Die Dichtheit der Schweißnähte wurde vor Betonage getestet und sichergestellt. Trotz dieser Begrenzung überwiegen die oben genannten Vorteile.

5.4.2 Ölzuführung

Eine weitere Möglichkeit, einen hydraulischen Druck zu erzeugen, ist die Zuführung eines Mediums mittels Hydraulikpumpe. Eine Einheit aus Hydraulikpumpe, Vorratstank, Ventilen und Verteilerblock wird als Hydraulikaggregat bezeichnet. Ein solches Aggregat wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet, um den hydraulischen Druck zu erzeugen und in die Aktoren

zu transportieren. Das Hydraulikaggregat (Hersteller: HYDAC INTERNATIONAL GmbH) kann einen maximalen Druck von 310 bar erzeugen und besitzt einen Verteilerblock, an den 10 Leitungen mit jeweils individuell einstellbarem Druck angeschlossen werden können.

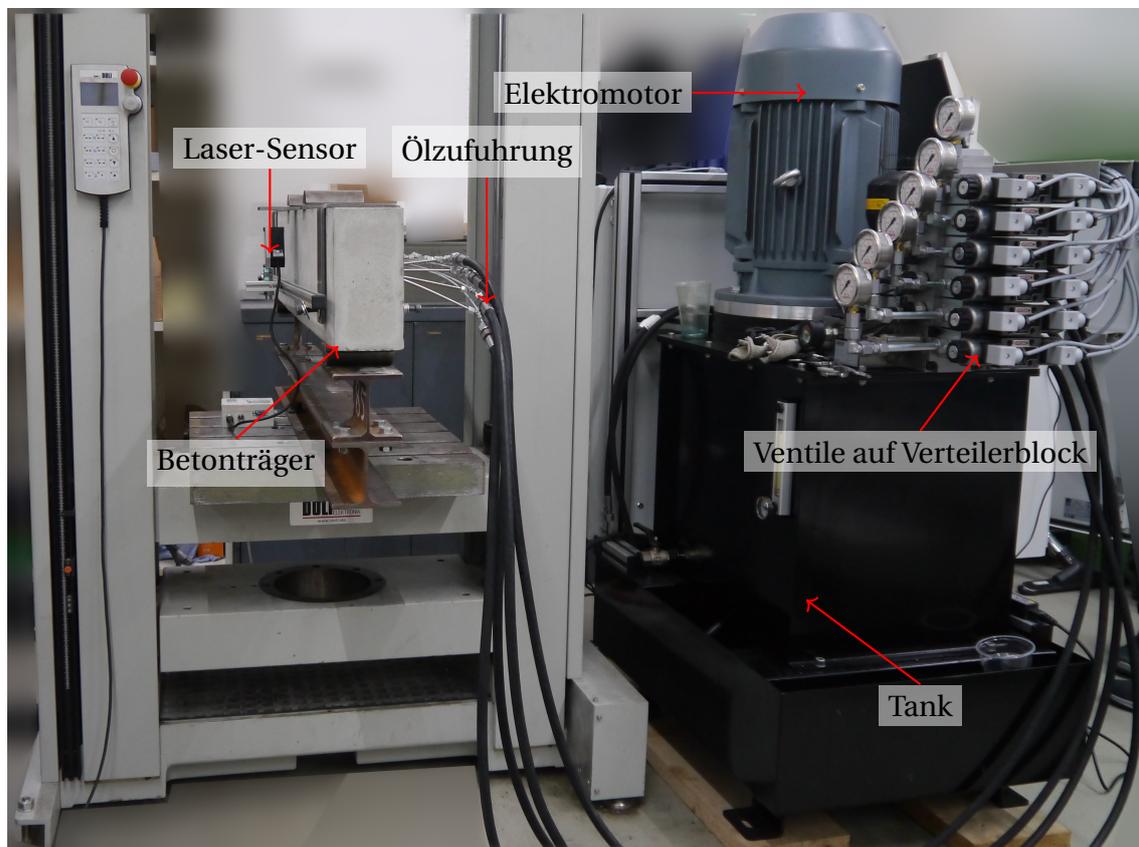


Abb. 5.11: Hydraulikaggregat mit Verteilerblock, Proportionalventilen und angeschlossenem Biegeträger

Der Druck wird über elektrische Magnet-Proportionalventile individuell eingestellt. Im Verteilerblock des Hydraulikaggregates sind 6 Ventile vorhanden. Abbildung 5.11 zeigt das Hydraulikaggregat mit dem Ventilblock und den Proportionalventilen im Vordergrund. Die Leitungen, die zu den Aktoren führen, werden direkt mit dem Ventilblock verbunden. Die zeitliche Dauer der Ventilsteuerung ist gleichzeitig die Begrenzung der Aktuierungsgeschwindigkeit. Da die Ventile nahezu in Echtzeit bewegt werden können, ist eine Aktuierung in Echtzeit möglich. So kann im Gegensatz zur thermischen Aktuierung (vgl. Abschnitt 5.4.1) auf alle Belastungsgeschwindigkeiten adäquat reagiert werden. Auch eine dynamische Aktuierung in Form einer Schwingungsreduktion ist möglich. Im Falle einer Leckage kann der Druck durch eine weitere Zuführung des Öls aufrecht erhalten werden. Nachteilig ist der leicht erhöhte Aufwand während der Bauphase, da jeder Aktor mit einer eigenen Leitung versehen werden muss, die vom Aktor zum Aggregat führt.

Der Aktor, also die Druckkammer innerhalb des Biegeträgers, besteht aus zwei Stahlblechen und einem Distanzring. Die Blechdicken ergeben sich aus der Tatsache, dass die Aktoren von

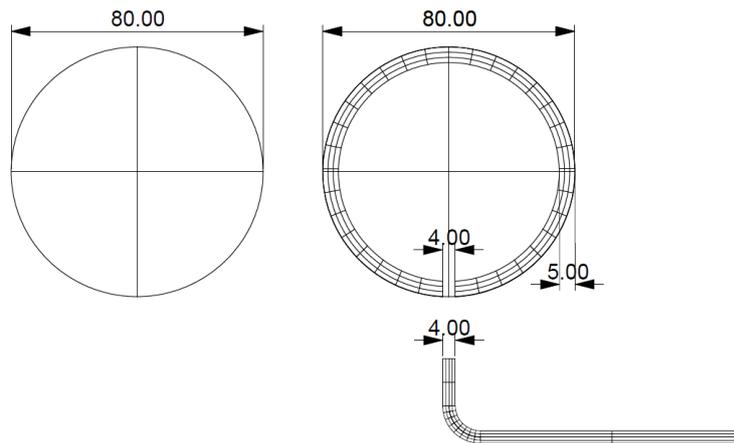


Abb. 5.12: Abmessungen des Deckbleches (links), des Aussteifungsrings (rechts) und der Leitung (unten). Alle Angaben in mm.

Hand geschweißt werden. Bei einer industriellen Fertigung mit einem Schweißroboter kann die Dicke der Bleche weiter reduziert werden. Die beiden äußeren Bleche haben eine Dicke von 1 mm, der innen liegende Ring ist 2 mm dick. Das innere Blech ist ringförmig und hat eine Flanschhöhe von 5 mm, die eine Ausdehnung in radialer Richtung verhindert (vgl. Abbildung 5.12). Da der innere Ring in radialer Richtung deutlich steifer ist als die beiden außen liegenden Bleche senkrecht zur Blechebene resultiert ein hydrostatischer Innendruck überwiegend in einer Expansion quer zum Aktor, also entlang der Bauteillängsachse des Balkens. Eine Expansion des Aktors in Richtung der Biegeträger-Oberkante ist nicht erwünscht. Eine weitere Funktion des inneren Rings ist die Erzeugung eines definierten Hohlraumes. Die drei Stahlbleche werden, nach Anbringung einer Leitung mit einem Außendurchmesser von 4 mm aus dem gleichen Material, am Rand verschweißt. Ohne Leitung ist der Aktor kreisrund und besitzt einen Außendurchmesser von $D_A = 80$ mm. Der Innendurchmesser beträgt aufgrund des aussteifenden Rings $D_{A,\text{innen}} = 70$ mm. Die Kreisform hat mehrere Vorteile: Erstens werden Spannungsspitzen in den Eckbereichen vermieden. Zweitens erlaubt sie das Verlegen von Bewehrungsstangen im oberen Bereich des Trägers. Der verschweißte und lackierte Aktor vor Einbau in den Biegeträger ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

Die Kraftübertragung erfolgt über die elastische Verformung der äußeren Stahlbleche, die über Kontaktpressung die Kräfte in den Beton einleiten. Der Zusammenhang zwischen Druck und resultierender Kraft wurde in experimentellen Untersuchungen ermittelt und als linear vereinfacht (vgl. Kapitel D.1). Die maximale Verformung des Bleches liegt in den FEM-Simulationen bei $u_z = 0,014$ mm (vgl. Kapitel 4.4). Es sind kleine Stellwege des Aktors erforderlich, um den Betonbiegeträger zu aktivieren. Die elastische Verformung des dünnen Aktorbleches reicht dafür aus. Zudem wird der Aktor im unverformten Zustand einbetoniert, sodass er bei einer äußeren Belastung auf dem Biegeträger zunächst zusammengedrückt wird. Beim Aktivierungsvorgang (Durchbiegungskompensation des Biegeträgers) wird zunächst diese Stauchung ausgeglichen, bevor es zur Expansion des Aktors kommt. Der notwendige Stellweg des Aktors reduziert dadurch noch weiter. Der Bereich der plastischen Verformung des Aktorbleches wird dadurch nicht erreicht.

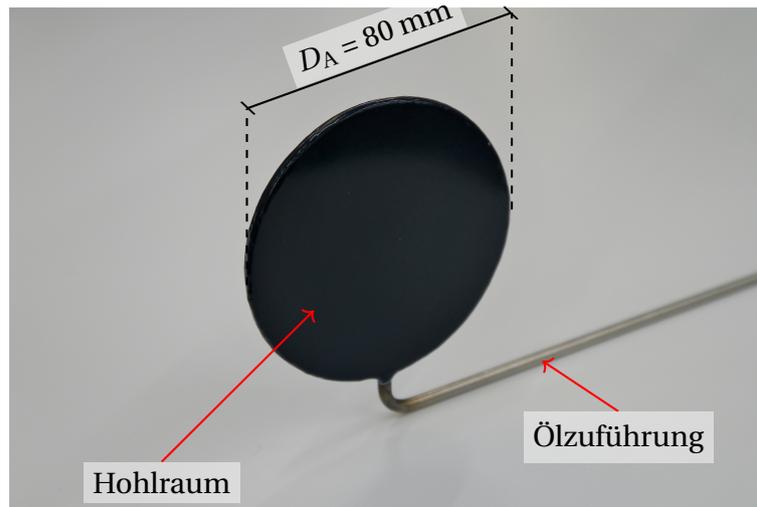


Abb. 5.13: Aktor mit angeschweißter Leitung zum Anschluss an das Hydraulikaggregat

Ein Vorteil der Aktuierung im elastischen Verformungsbereich des Aktors liegt darin, dass keine Reibung entsteht, die zu Verschleiß führt. Durch die vollständige Integration der Aktoren sind diese nachträglich nicht zugänglich für Wartungsarbeiten, Reparaturen oder Austausch. Konventionelle hydraulische Aktoren wie z. B. Hydraulikzylinder, müssen aufgrund des Verschleißes durch Reibung regelmäßig gewartet werden.

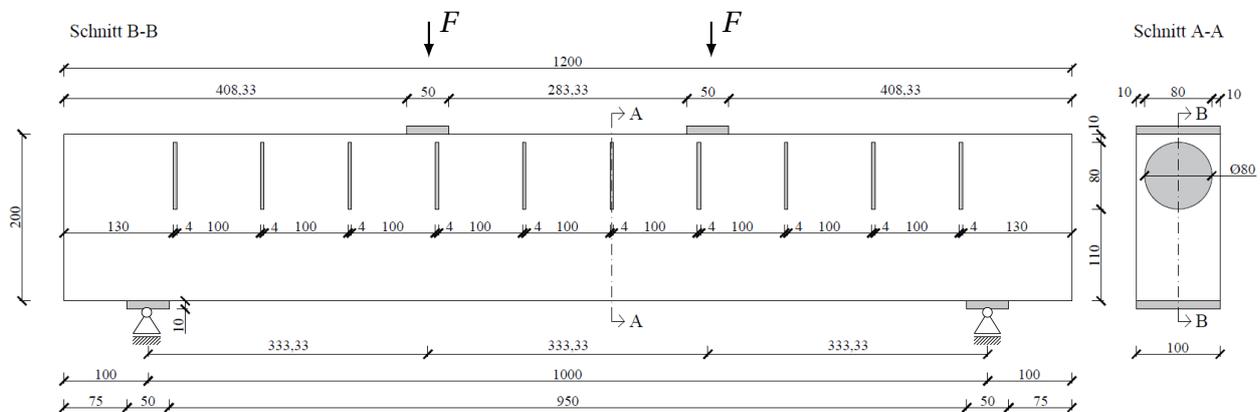


Abb. 5.14: Anordnung der Aktoren innerhalb eines Biegeträgers (Alle Angaben in mm)

Die Position der 10 Aktoren entlang des Biegeträgers ist in Abbildung 5.14 dargestellt, dazu die Lasteinleitungs- und Auflagerplatten für die Vier-Punkt-Biegeversuche. Abbildung 5.15 zeigt den Träger vor der Betonage. Die Aktoren werden über die Leitungen in ihrer Position fixiert. Um die Lagesicherung besser zu bewerkstelligen, wird der Träger um 180 Grad gedreht betoniert. Dadurch hängen die Aktoren in der Schalung und die Betonierrichtung ist verdreht. In der dargestellten Konfiguration sind die Leitungen seitlich aus dem Querschnitt geführt. Denkbar sind auch Leitungen, die parallel zur Trägerlängsachse an den Stirnseiten herausführen. Dies ist im Funktionsmuster (vgl. Abbildung 5.16) realisiert. Nachteilig ist die größere Leitungs-

länge der Aktoren in Feldmitte.

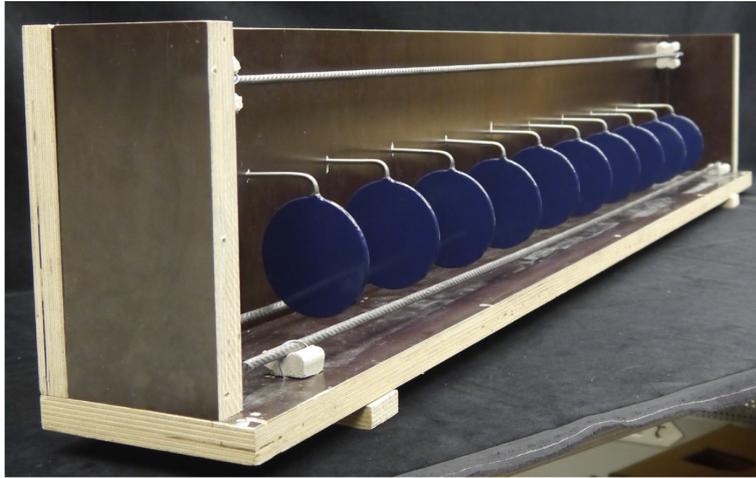


Abb. 5.15: Geöffnete Schalung des um 180° gedrehten Trägers mit 10 ausgerichteten Aktoren und den Bewehrungsstäben.

Abbildung 5.16 zeigt einen fertigen Biegeträger ($1200 \times 200 \times 50 \text{ mm}^3$) mit 10 integrierten Aktoren. Betoniert ist nur der halbe Träger, um das Innere des Trägers darzustellen. Die Leitungen innerhalb des Trägers sind nicht sichtbar, sondern an den Stirnseiten des Balkens zu erkennen, da sie hier aus dem Querschnitt hinausgeführt werden.



Abb. 5.16: Als Funktionsmuster nur bis zur senkrechten Mittelebene betonierter Biegeträger mit 10 integrierten Aktoren

5.5 Stahlbeton

Die adaptiven Biegeträger und die passiven Referenzträger werden aus einem selbstverdichtenden Beton (SVB) der Festigkeitsklasse C35/45 hergestellt. Der Beton hat ein Größtkorn von 8 mm, um bei den Probekörpern im Labormaßstab eine reibungslose Betonage zu ermöglichen und einer Entmischung vorzubeugen. Bei experimentellen Untersuchungen im realitätsnahen Maßstab kann auf diese Einschränkung verzichtet werden. Verwendet wird neben Wasser ein Portlandkalksteinzement der Festigkeitsklasse 42,5 R mit einer hohen Anfangsfestig-

keit⁴. Weiterhin kommen die beiden Zuschläge in Form von Sand (0 mm bis 2 mm) und Kies (2 mm bis 8 mm) zum Einsatz. Zur besseren Verarbeitbarkeit wird ein Fließmittel (Hersteller: Sika Deutschland GmbH, Typ: XC1020-X) und Flugasche (Hersteller: Powerment GmbH & Co. KG) verwendet. Die Betonrezeptur ist in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tab. 5.2: Betonrezeptur C35/45

Art	Bezeichnung	kg/m ³
Zement	CEM II/A-LL 42,5 R SCH	390
Wasser	Wasser	180
Zusatzstoff	Flugasche Powerment	20
Zusatzmittel	Sika ViscoCrete XC1020-X	5,07
Zuschlag 1	Sand 0/2	773
Zuschlag 2	Kies 2/8	959
		Σ 2.327,07

Vor Betonage werden jeweils alle Ausgangsstoffe und die Schalung (Siebdruckplatten mit einer Stärke von 20 mm) über einen Zeitraum von 24 Stunden bei 20 °C gelagert. Bei der Betonage wird das Mischregime aus Tabelle 5.3 eingehalten. Verwendet wird ein Zwangsmischer (Hersteller: Ammann Group, Typ: CEM 60 s) mit einem maximalen Nenninhalt an Frischbeton von ca. 60 l. Dadurch ist es bei der Herstellung der Probekörper (ca. 24 l pro Biegeträger) möglich, mit einer Charge zwei Biegeträger zu betonieren.

Tab. 5.3: Mischregime des Betons

Zeit in s	Schritt
0 bis 15	Trockenmischen: Gesteinskörnung, Zusatzstoffe, Zement
15 bis 30	Zugabe Anmachwasser
30 bis 75	Nassmischen ohne Zusatzmittel
75 bis 90	Zugabe des Fließmittels
90 bis 120	Nassmischen
bei 120	Aufkratzen evtl. trockener Anhaftungen an Mischpaddel und Trommel
bis 300	Nassmischzeit

Abbildung 5.17 zeigt das Ergebnis eines Ausbreitversuches, bei dem ein Ausbreitmaß von ca. 630 mm gemessen wird. Die Kriterien der angestrebten Fließklasse F6 (sehr fließfähig) sind damit eingehalten [15], auf Verdichtungsmaßnahmen kann verzichtet werden. Dies ist ein Vorteil, da so die Lage und Ausrichtung der Aktorik innerhalb des Trägers nicht gefährdet wird.

Es werden pro Biegeträger zwei Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6 mm (BSt 500, $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$, $A_{s1} = 0,57 \text{ cm}^2$) in der Zugzone einbetoniert. Die Stäbe werden mit Abstandshaltern aus Beton in ihrer Lage fixiert und weisen einen Abstand zum unteren Rand und

⁴ R = rapid; rasche Festigkeitsentwicklung



Abb. 5.17: Bestimmung des Ausbreitmaßes (im vorliegenden Fall 630 mm) während der Betonage der adaptiven Biegeträger

zum jeweiligen Seitenrand von 20 mm auf. Bei den Versuchsreihen mit dem Hydraulikaggregat und dem passiven Referenzträger werden analog zusätzlich zwei Stäbe in der Druckzone verbaut. Um eine Kollision zwischen Aktorik und Bewehrung zu verhindern, wird der Abstand zwischen Schalung und Stäben auf 10 mm reduziert.

6 Experimentelle Untersuchungen

Die Ergebnisse aus den Simulationen mit der FEM werden experimentell validiert. Dies dient gleichzeitig der Überprüfung der Aktuierungs- bzw. der Aktorikkonzepte. Obwohl auf eine große Bandbreite von Lasten optimal reagiert werden kann, beschränken sich die experimentellen Untersuchungen auf einen Vier-Punkt-Biegeversuch. Kann die Funktionsweise des Konzepts bei dieser Lastanordnung nachgewiesen werden, ist es auch für andere Lasten gültig. Das maximale Moment ist konstant zwischen den beiden Lasteinleitungspunkten und fällt linear zu den Auflagern hin ab. Die äußere Belastung wird über eine Universalprüfmaschine (Hersteller: Zwick, Typ: 1474) aufgebracht. Die Traverse der Prüfmaschine ist an einen Stahlträger angeschlossen, der die Last auf zwei Halbzylinder verteilt. Die Halbzylinder liegen auf Lasteinleitungsplatten aus Stahl, die wiederum auf dem Beton aufliegen. Durch die Halbzylinder ist eine freie Rotation um die Lasteinleitung möglich. Zwischen Lasteinleitungsplatte und Halbzylinder befinden sich zwei Schichten aus Polytetrafluorethylen (PTFE), die einen beinahe reibungsfreien Verbund herstellen. Der gleiche Aufbau, bestehend aus Stahlplatten, Polytetrafluorethylen-schichten und Halbzylindern, ist an den beiden Auflagern vorhanden. Der gesamte Prüfaufbau, bis auf die dünnen Schichten aus PTFE, ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

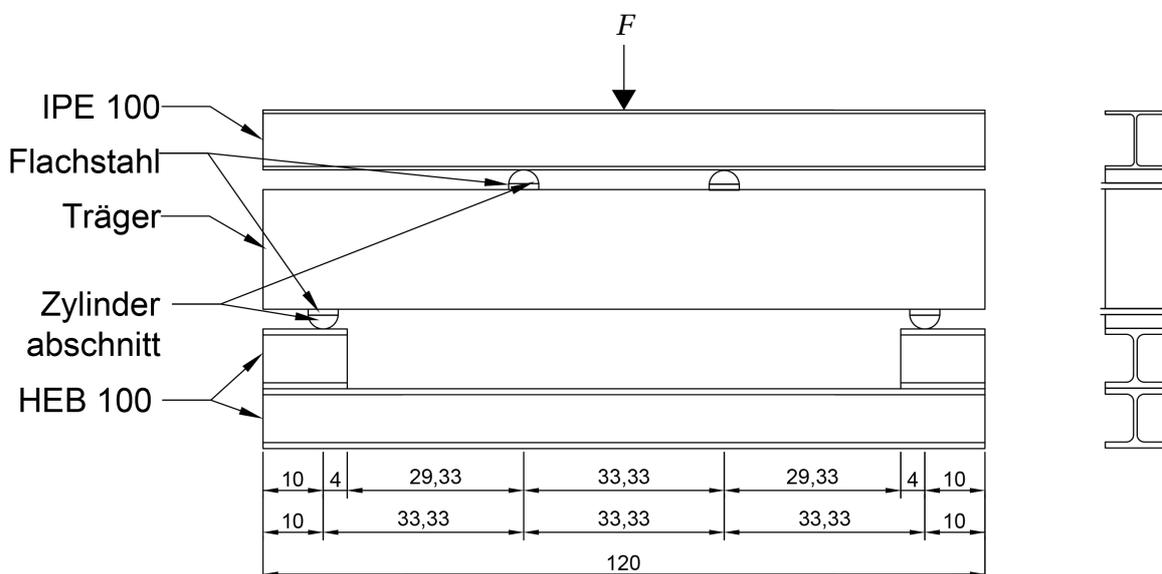


Abb. 6.1: Versuchsaufbau für die Vier-Punkt-Biegeversuche. Alle Angaben in cm. (nach [49])

Die Versuche werden auf zwei unterschiedliche Arten durchgeführt. Im Abschnitt 6.3 wird die Aktuierung beschrieben, die zeitlich versetzt zur externen Lastaufbringung stattfindet. Eine Aktuierung abhängig von der äußeren Last, sodass die Verformung stets minimal ist, wird in

Abschnitt 6.4 vorgestellt. Bei beiden Versuchsabläufen wird eine Last von $F = 8 \text{ kN}$ gewählt, da bei diesem Lastniveau zum einen eine ausreichend große, also messbare Verformung generiert wird und zum anderen der Biegeträger im ungerissenen Zustand I verbleibt. Darüber hinaus wird ein passiver Referenzbalken getestet sowie zwei Versuche zur Rissbilderzeugung durchgeführt. Tabelle 6.1 listet die durchgeführten Versuche und deren Ziele auf.

Tab. 6.1: Übersicht über die durchgeführten Versuche

Bezeichnung	Durchbiegungskompensation	Aktorik	Maximale externe Last	Dargestellter Effekt
Referenzbalken	-	-	8 kN (Steigerung auf 36 kN)	Passive Durchbiegung
T1	Gesteuert Thermische Expansion	1 Aktor in Feldmitte	8 kN	Verformungskompensation
S1	Gesteuert Mediumzuführung	10 Aktoren mit individuellem Druck	8 kN	Verformungskompensation
R1	Geregelt Mediumzuführung	10 Aktoren mit individuellem Druck	8 kN	Regelung der Durchbiegung
R2	Geregelt Mediumzuführung	10 Aktoren mit individuellem Druck	8 kN	Regelung der Durchbiegung
R3	Geregelt Mediumzuführung	10 Aktoren mit individuellem Druck	8 kN	Regelung der Durchbiegung
R4	Geregelt Mediumzuführung	10 Aktoren mit individuellem Druck	8 kN	Regelung der Durchbiegung
M1	Geregelt Mediumzuführung	10 Aktoren mit individuellem Druck	17,4 kN	Rissbildung
U1	Gesteuert Mediumzuführung	10 Aktoren mit gleichem Druck	8 kN	Rissbildung

Alle dargestellten Kräfte werden mit der Kraftmessdose der Prüfmaschine gemessen und nachfolgend als Maschinenkraft bezeichnet. Die Messung der Durchbiegung erfolgt in Feldmitte mittels Laser-Distanzsensor¹. Verformungen in Eigengewichtsrichtung besitzen ein positives Vorzeichen. Für die Bestimmung der Dehnungen werden die DMS in Feldmitte ausgewertet. Die hydraulischen Drücke werden über die Drucksensoren am Ventilblock gemessen. In Kapitel 5.1 wurde die eingesetzte Sensorik ausführlich beschrieben.

6.1 Versuchsablauf

Die Prüfung der Betonträger orientiert sich an der DIN EN 12390-5 [18]. Die aufgebrachten Laststufen sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Zunächst wird in Laststufe 0 ein Kontakt zwischen

¹ Bei Versuchen mit den induktiven Wegaufnehmern dienen diese zur Überprüfung. Auf die Messergebnisse wird nur eingegangen, falls es zu signifikanten Abweichungen kommt.

Traverse und Prüfkörper hergestellt. Um einen Spalt auszuschließen, wird Kontakt definiert, wenn eine Kraft von 10 N übertragen wird. In dieser Laststufe wird weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von $v_0 = 1 \text{ mm/min}$ gefahren. In Laststufe 1 wird der Träger kraftgesteuert mit einer Geschwindigkeit von $v_1 = 240 \text{ N/s}$ belastet, bis eine maximale Maschinenkraft von $F = 8 \text{ kN}$ erreicht ist.

Tab. 6.2: Laststufen der Vier-Punkt-Biegeversuche der geregelten Biegeträger

Laststufe n	Maschinenkraft F_n	Traversengeschwindigkeit v_n	Haltezeit t_n
0	0,01 kN	1 mm/min	-
1	8 kN	240 N/s	-
2	8 kN	Regelung mit 50 N/s	60 s
3	0 kN	240 N/s	-

Die Belastungsgeschwindigkeit v_1 bestimmt sich nach [18] über die Formel 6.1. Es wird für die Spannungszunahme s der Wert $0,06 \text{ MPa/s}$ gewählt. Nach [18] und [106] kann s zwischen den Grenzen $0,04$ und $0,06$ gewählt werden. Die Abmessungen des Trägers, die Breite b , die Höhe h und die Stützweite l , werden in mm in Gleichung 6.1 eingesetzt. Daraus ergibt sich eine Belastungsgeschwindigkeit von $v_1 = 240 \text{ N/s}$.

$$v_1 = \frac{s \cdot b \cdot h^2}{l} \quad (6.1)$$

Laststufe 2 dient der Aufrechterhaltung des definierten Lastniveaus von 8 kN . Das Niveau wird kraftgeregelt gehalten, die Prüfmaschine arbeitet mit einer Geschwindigkeit von $v_2 = 50 \text{ N/s}$. Das Lastniveau wird bei den Versuchen, bei denen die Belastung und die Adaption in zwei separaten Schritten erfolgen, für 30 Minuten gehalten. Diese Zeitspanne ist so gewählt, dass ausreichend Zeit bleibt, den Adaptionsvorgang (mehrmals) durchzuführen. Bei den geregelten Versuchen liegt die Haltezeit bei 60 Sekunden. Abweichend wird die Haltezeit der Laststufe 2 beim passiven Referenzbalken auf 300 Sekunden erhöht. Zur Entlastung des Trägers wird in Laststufe 3 die Kraft mit einer Geschwindigkeit von $v_3 = 240 \text{ N/s}$ auf null reduziert. Hier wird die gleiche Geschwindigkeit wie bei der Belastungsstufe 1 gewählt.

6.2 Passiver Referenzbalken

Zur Validierung der Ergebnisse des FEM-Modells und zur Verifizierung der Materialkennwerte wird ein Biegeträger ohne Aktorik hergestellt. Dieser passive Referenzbalken wird im gleichen Prüfaufbau getestet. Die Belastungsgeschwindigkeiten sind ebenfalls identisch. Allerdings wird die maximale Last von $F = 8 \text{ kN}$ 300 Sekunden lang gehalten und der Biegeträger im Anschluss weiter belastet, bis der Versuch bei 36 kN manuell abgebrochen wird. Abbildung 6.2 zeigt den Verlauf der Maschinenkraft über die Zeit in einem Bereich von $t = 0 \text{ s}$ bis 150 s . Der Kraftverlauf des gesamten Versuches ist in Abbildung B.1 aufgezeigt (vgl. Anhang B).

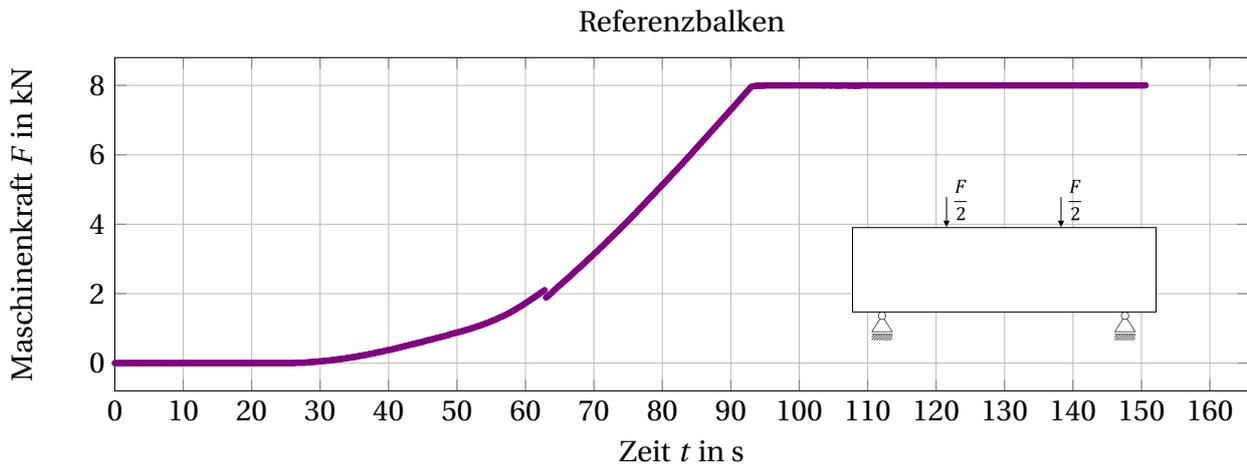


Abb. 6.2: Belastung in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren (Ausschnitt von $t = 0$ s bis 150 s)

Die Durchbiegung verhält sich wie erwartet: Sie steigt ab $t = 28$ s an und erreicht bei $t = 93$ s ihr Maximum von $u_{\text{mitte}} = 0,062$ mm. Der Verlauf der Durchbiegung ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Während der Haltezeit der Maschinenkraft ist die Durchbiegung konstant und erhöht sich nicht. Dies bestätigt, dass die Maschinenkraft von 8 kN nicht zu groß gewählt ist. Alle Durchbiegungsänderungen in den folgenden Versuchen sind somit vollständig auf die Manipulation durch die Aktorik zurückzuführen. Die gemessenen Verformungen sind geringer als von den Simulationen prognostiziert. Im passiven Zustand ist eine Durchbiegung von $u_{\text{mitte}} = 0,081$ mm vorhergesagt. Allerdings bezieht sich dieser Wert auf einen Träger, dessen Querschnitt durch die integrierten Aktoren geschwächt ist.

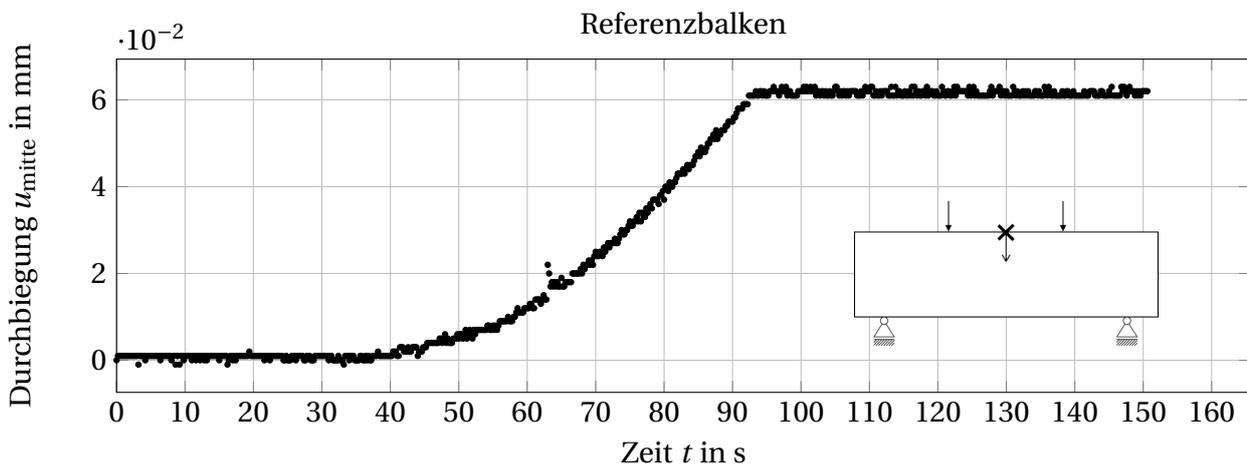


Abb. 6.3: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren (Ausschnitt von $t = 0$ s bis 150 s)

Die Dehnungen des Referenzträgers werden in Abbildung 6.4 für den oberen und den unteren DMS gezeigt. Da die Dehnungen sich in einem kleinen Bereich von 0 % bis ca. 0,0065 % bewegen, ist ein leichtes Rauschen der Messwerte zu erkennen. Trotzdem können der Verlauf der

Dehnung und die Maximalwerte gut abgelesen werden. Die Dehnungen an der Unterseite sind mit ca. 0,0065 % höher als der maximale Wert des oberen DMS, der ca. $-0,005$ % beträgt. Aus der Simulation ist in Feldmitte ein Wert von $-0,00635$ % an der Oberseite bzw. $0,00635$ % an der Unterseite hervorgegangen. Die Werte aus der Simulation und aus dem Experiment stimmen an der Unterseite gut überein. An der Oberseite ist die Dehnung in Realität geringer als in der Simulation. Allerdings wurde beim Prüfkörper keine Aktorik verbaut, die Werte aus der Simulation basieren dagegen auf dem Modell mit den Störstellen der Aktorik. An der Oberseite des Trägers haben die Aktoren einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse, wie in den Verläufen der Spannungen, Dehnungen und Verformungen sichtbar ist (vgl. Kapitel 4). Trotzdem kann in Anbetracht der Messungenauigkeiten und der Streuung der Materialparameter des Betons eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden.

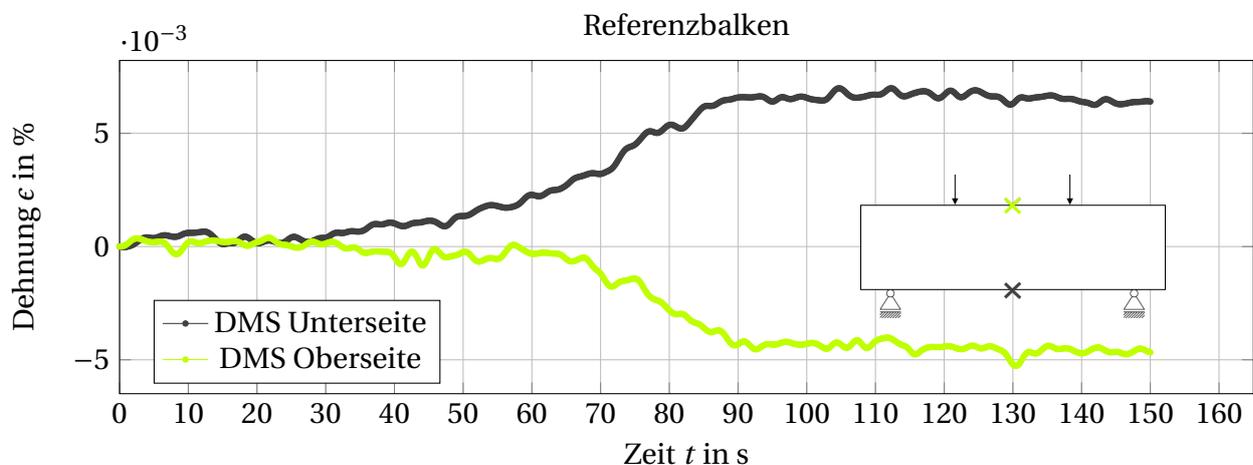


Abb. 6.4: Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren (Ausschnitt von $t = 0$ s bis 150 s)

6.3 Zeitlich versetzte Verformungsreduktion

Die Untersuchungen in diesen Versuchsreihen bestehen aus zwei Schritten. Zunächst wird die Last über die Prüfmaschine kontinuierlich auf 8 kN gesteigert und auf diesem Lastniveau kraftgeregelt gehalten. In einem zweiten Schritt wird die dadurch erzeugte Durchbiegung in Feldmitte u_{mitte} über die Aktuierung kompensiert. Die Trennung dieser beiden Zustände ist nicht notwendig, da eine direkte Kompensation in Echtzeit möglich ist (vgl. Abschnitt 6.4). Die versuche zeigen aber die unterschiedlichen Effekte in den einzelnen Zustände (passiv und adaptiv) und erlauben ein besseres Verständnis des Aktuierungsvorganges. Für die Aktuierung wird sowohl die thermische Expansion eines eingeschlossenen Mediums (vgl. Abschnitt 6.3.1) als auch die Zuführung eines Mediums über ein Hydraulikaggregat (vgl. Abschnitt 6.3.2) verwendet.

6.3.1 Druckerzeugung in den Aktoren mittels thermischer Expansion eines eingeschlossenen Mediums

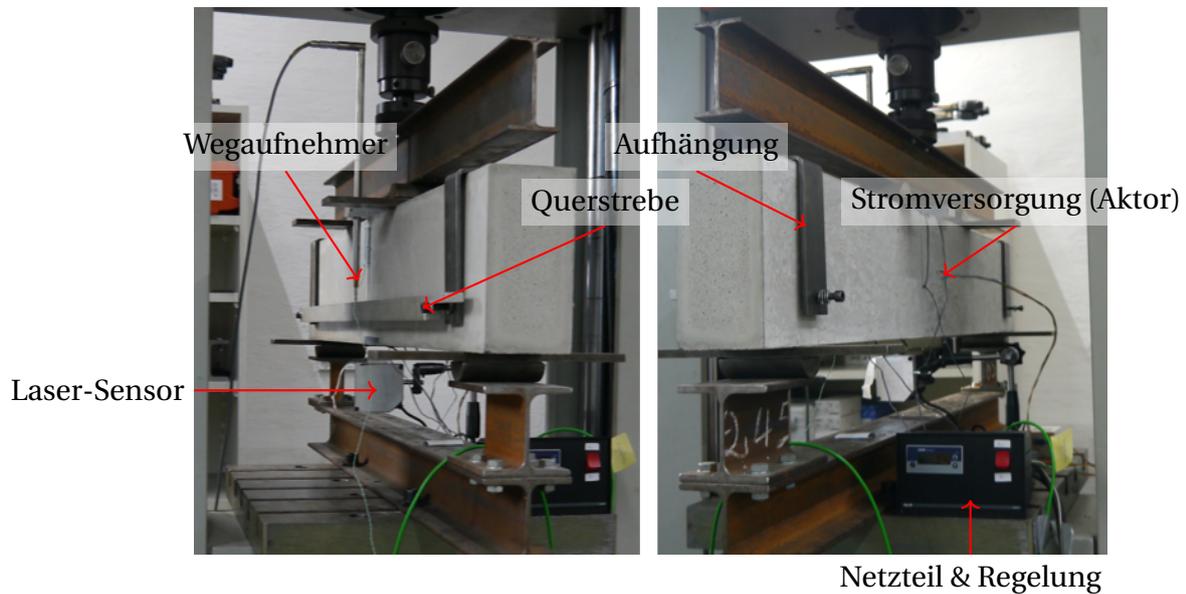


Abb. 6.5: Zwei Ansichten des adaptiven Biegeträgers T1 im Vier-Punkt-Biegeversuch (nach [8])

Bei dem Versuch mit thermischer Aktuierung werden die Aktoren aus Kapitel 5.4.1 verwendet. Der Versuchsaufbau des adaptiven Biegeträgers T1 ist in Abbildung 6.5 abgebildet. Die Versuche unterscheiden sich von den anderen Untersuchungen in mehreren Punkten. Der adaptive Biegeträger ist mit einem Aktor in Feldmitte ausgeführt. Zudem dauert der Versuch mit ca. 50 Minuten länger, da die bereits erläuterte Trägheit des Adaptionsvorganges berücksichtigt wird. Darüber hinaus findet kein Vergleich mit den FEM-Ergebnissen statt. Dieser Versuch dient nur zur Validierung des Aktorikkonzeptes. Die Maschinenkraft des Versuches ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

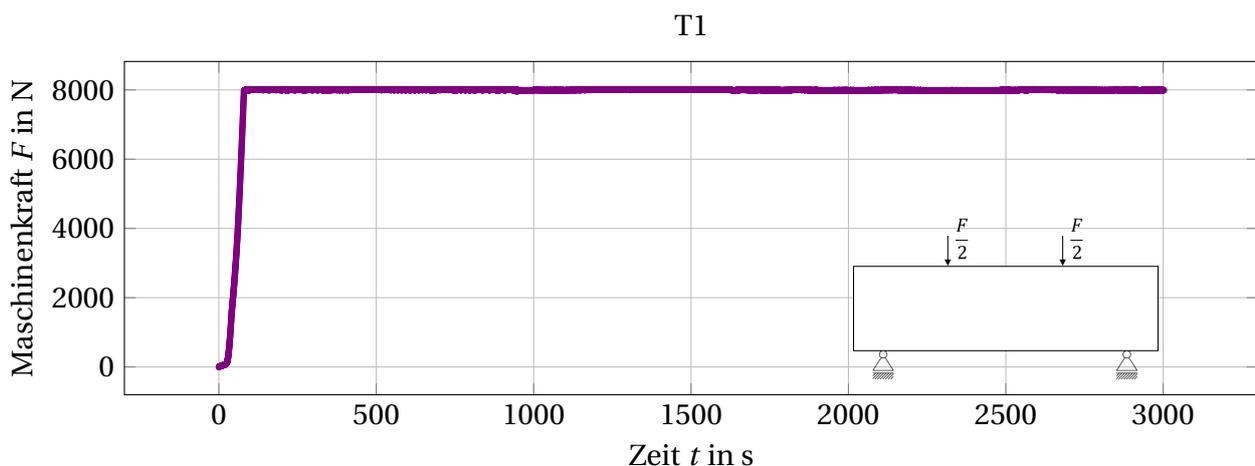


Abb. 6.6: Belastung in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1

Abbildung 6.7 zeigt den Durchbiegungsverlauf über die Zeit für die Dauer von $t = 0$ s bis 500 s.

Durch die externe Last von $F = 8 \text{ kN}$ erfährt der Biegeträger im passiven Zustand eine Durchbiegung in Feldmitte von $u_{\text{passiv}} \approx 0,066 \text{ mm}$, die im Zeitraum $t = 82 \text{ s}$ bis 183 s nahezu konstant ist. Der Beginn der Aktuierung, also der Erwärmung der Heizpatrone und des Öles, liegt bei $t = 180 \text{ s}$. Die erste messbare Reduktion der Durchbiegung ist bei $t = 183 \text{ s}$, ca. 3 Sekunden nach Aktuierungsbeginn, zu erkennen. Danach sinkt die Durchbiegung stetig, bis sie zum Zeitpunkt $t = 472 \text{ s}$ vollständig ausgeglichen ist. Der gesamte Adaptionsvorgang dauert somit 292 Sekunden. Der Verlauf der Durchbiegungsreduktion ist annähernd linear, zeigt jedoch bei $t = 250 \text{ s}$ ein Plateau. Hier ist es eventuell zu Umlagerungen innerhalb des Querschnittes oder zu einer temporären Leckage an der Verschlusschraube gekommen. Auch eine Volumenzunahme des Aktors durch Stauchungen der elastomeren Dichtringe im Bereich der Schraube ist möglich. Eine Rissbildung an der Betonoberfläche konnte durch stetige visuelle Überprüfung bis zum Zeitpunkt $t = 472 \text{ s}$ und darüber hinaus nicht festgestellt werden.

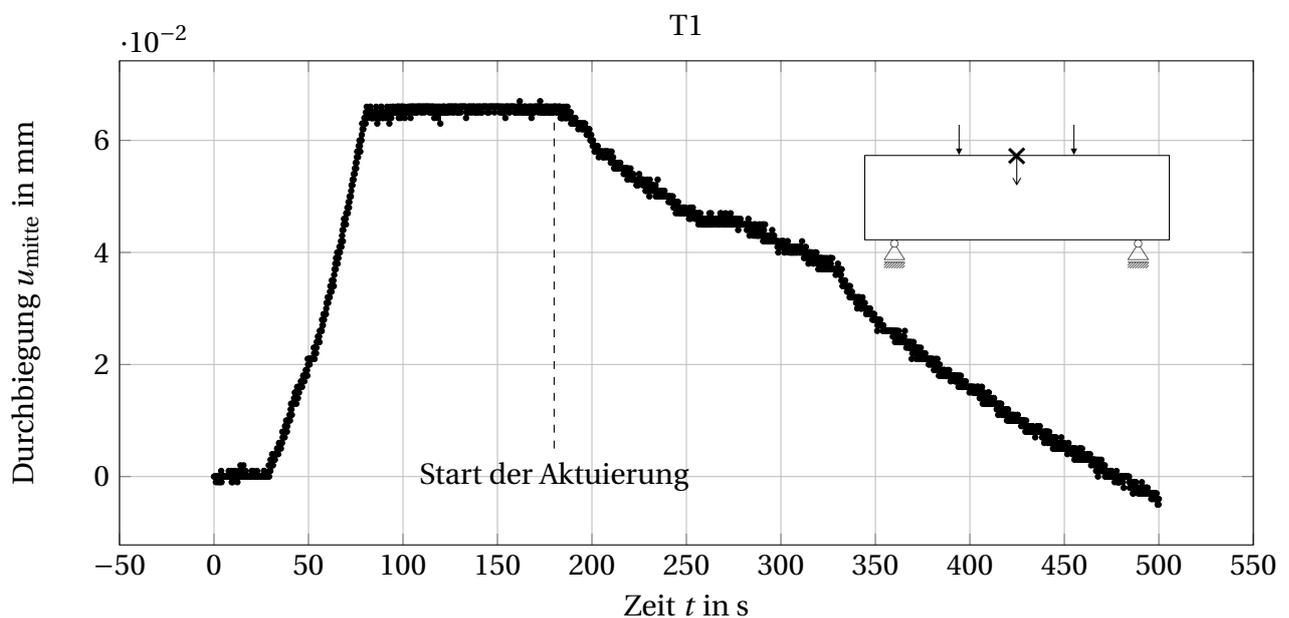


Abb. 6.7: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1 im Zeitraum $t = 0 \text{ s}$ bis 500 s

Obwohl bei $t = 472 \text{ s}$ das Aktuierungs- und Aktorikkonzept mit $u_{\text{adaptiv}} = 0 \text{ mm}$ validiert ist, wird der Versuch nicht abgebrochen, sondern die Heizpatrone weiter erwärmt. Hierdurch kann die Vorhersage des Versagens zusätzlich überprüft werden. Der Verlauf der Durchbiegung für die gesamte Versuchsdauer von ca. 50 Minuten ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Die Aktuierung über die Heizpatrone dauert von $t = 180 \text{ s}$ bis $t = 1.646 \text{ s}$. Die maximale Verformung des Trägers entgegen der Eigengewichtsrichtung tritt bei $t = 944 \text{ s}$ auf und beträgt $u \approx -0,058 \text{ mm}$. Hier kommt es zu einer schlagartigen Durchbiegungsveränderung, bei der der Träger um 71 % auf $u \approx -0,017 \text{ mm}$ absackt.

Durch die große Verformung entgegen der Eigengewichtsrichtung kommt es zu einem Riss, der seinen Ursprung an der Oberseite des Trägers hat. In der eigentlichen Druckzone des Querschnitts, die jetzt auf Zug belastet ist, ist keine Bewehrung vorhanden. Durch den Riss in Feldmitte wird dem Aktor weniger Widerstand entgegengesetzt und dieser expandiert stark.

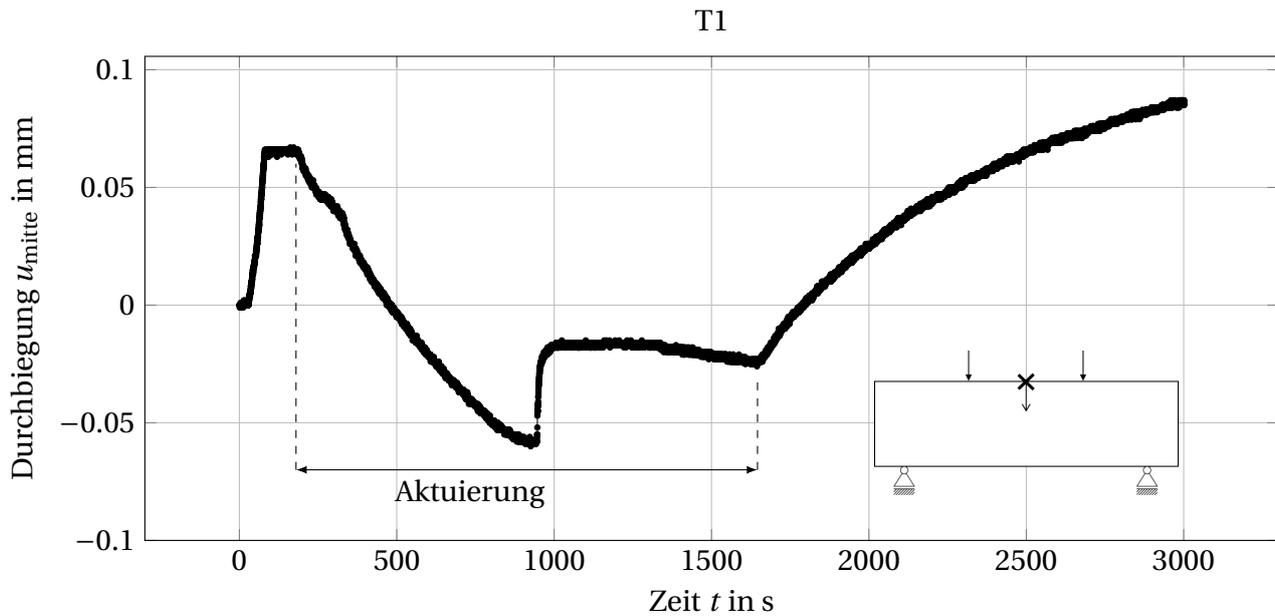


Abb. 6.8: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1

Es kommt zu einem sichtbarem Austritt von Öl, was auf ein größeres Leck der Ölkammer im Aktor zurückzuführen ist. Zunächst ist die Durchbiegung konstant und ändert sich bis $t \approx 1.300$ s nicht merklich, danach findet jedoch eine erneute Vergrößerung der Verschiebung auf $u \approx -0,025$ mm bei $t = 1.646$ s statt. Dies ist wahrscheinlich auf die Volumenzunahme des Betons zurückzuführen, der zu diesem Zeitpunkt ebenfalls lokal erwärmt ist (vgl. Abbildung 6.9).

Nach Abschaltung der Aktuierung vergrößert sich die Durchbiegung um 31,8 % auf den neuen Maximalwert von $u_{\text{passiv}} = 0,087$ mm bei Versuchsende $t = 3.000$ s. Vor der Aktuierung lag die Durchbiegung im passiven Zustand bei $u_{\text{passiv}} = 0,066$ mm. Dies ist auf die Risse im Querschnitt zurückzuführen. Allerdings sind die Risse – da sie ihren Ursprung an der Oberseite, der eigentlichen Druckzone des Trägers haben – bei Versuchsende überdrückt und visuell nicht mehr wahrnehmbar.

Die Temperatur im Inneren des Aktors wird nicht mit dem Messdatensystem erfasst, da der Temperaturwert des Thermoelements für die Ansteuerung genutzt wird. Die Heizpatrone wird auf 100 °C erhitzt. Ist diese Temperatur erreicht, wird über das Netzteil die Stromzufuhr unterbrochen. Sinkt die Temperatur auf 99 °C, beginnt eine neue Heizperiode. Die Temperatur des Öles und die Temperaturverteilung innerhalb des Aktors sind nicht bekannt. Die Temperatur an der seitlichen Oberfläche des Balkens wird in Feldmitte auf halber Trägerhöhe ($h = 100$ mm) während der gesamten Versuchsdauer gemessen. Der Verlauf der Temperatur ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Bei Versuchsbeginn hat der Betonträger eine Temperatur von $21,2$ °C. Nach dem Start der Aktuierung steigt die Temperatur annähernd linear und erreicht ihr Maximum von $37,6$ °C kurz nach Stopp der Aktuierung bei $t \approx 1.900$ s. Bei Versuchsende beträgt die Temperatur noch 33 °C. Zum Zeitpunkt des Nulldurchgangs der Durchbiegung ($t = 472$ s) ist die Oberflächentemperatur um $2,4$ °C gestiegen und liegt bei $23,6$ °C.

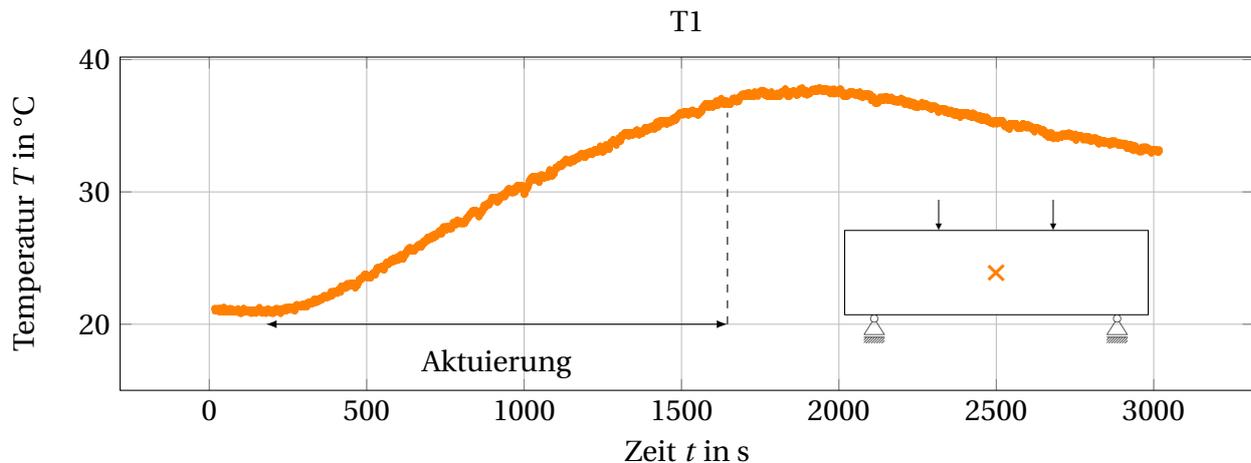


Abb. 6.9: Temperatur in Feldmitte auf halber Trägerhöhe ($h = 100$ mm) in Abhängigkeit der Zeit des Thermoelements an der Oberfläche des adaptiven Biegeträgers T1

Die Messdaten der beiden DMS sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Die Verläufe der beiden Dehnungen an der Unter- und Oberseite ähneln sich hinsichtlich der Zeitpunkte der Änderungen. Die Stauchung an der Oberseite ist jedoch betragsmäßig deutlich größer als die Dehnung an der Unterseite und erfährt darüber hinaus einen Vorzeichenwechsel. Abbildung 6.10 zeigt den Verlauf der Dehnungen bis $t = 500$ s. Die Messdaten des unterseitig applizierten DMS sind bei Versuchsbeginn positiv, der Beton wird an dieser Stelle auf Zug beansprucht. Durch die externe Belastung wird diese Dehnung erhöht und beträgt bis zum Beginn der Aktuierung 0,0051 %. An der Oberseite wird der DMS zunächst gestaucht. Die Stauchung wird durch die externe Belastung verstärkt und liegt mit einem Maximum von $-0,0062$ % betragsmäßig höher als an der Unterseite des Trägers. Bis zum Aktuierungsbeginn ($t = 180$ s) verhalten sich beide Dehnungsverläufe wie erwartet: Der obere DMS wird gestaucht, der untere gedehnt. Danach reduzieren sich die Stauchungen an der Oberseite und sind zum Zeitpunkt $t = 200$ s gleich null, erfahren einen Vorzeichenwechsel und steigen kontinuierlich bis zur Rissbildung bei $t = 944$ s, bei der die Dehnung an der Oberseite 0,161 % beträgt (vgl. Abbildung 6.11). Aufgrund der weiteren Erwärmung des Querschnittes steigt die Dehnung nach dem sprunghaften Abfall weiter an, bis die Aktuierung bei $t = 1.646$ s beendet wird. Ab diesem Zeitpunkt fällt die Dehnung an der Oberseite ab, nähert sich einer Asymptote an und zeigt bei Versuchsende einen Wert von 0,003 %. Diese Restdehnung an der Oberseite ist wahrscheinlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Oberflächentemperatur bei Versuchsende noch 33°C beträgt.

Die Dehnungen an der Unterseite des Trägers sind über den gesamten Versuchszeitraum positiv. Nach Beginn der Aktuierung erhöht sich die Dehnung weiter. Es findet, anders als bei der Oberseite, kein Vorzeichenwechsel statt. Hier ist der Einfluss der Temperaturdehnung größer, als die Durchbiegungsreduktion. Jedoch beträgt der Maximalwert der Dehnung vor dem Aufreißen 0,025 % und danach 0,085 % ($t = 944$ s).

Die Ergebnisse dieses Versuches sind eindeutig. Es konnte gezeigt werden, dass die vollstän-

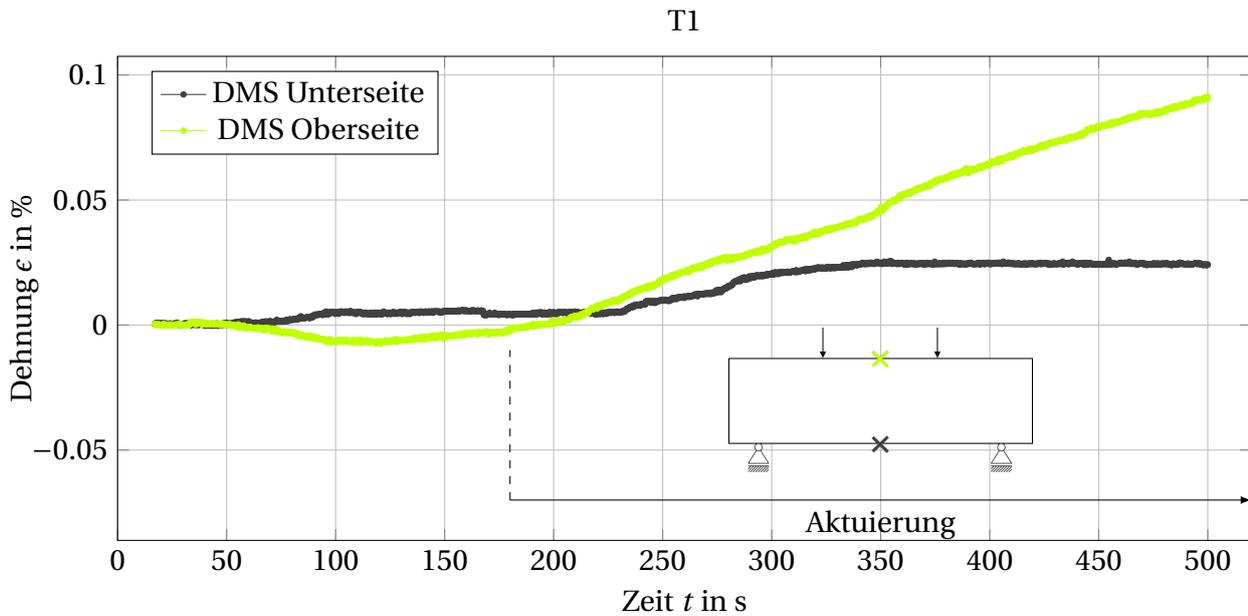


Abb. 6.10: Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1 von $t = 0$ s bis 500 s

dige Kompensation der Durchbiegung in Feldmitte erreichbar ist. Selbst eine deutliche Verformung entgegen der Eigengewichtsrichtung ist trotz zusätzlicher externer Belastung möglich. Der Träger versagt erwartungsgemäß mit einer Rissbildung, ausgehend von der Oberseite des Trägers. Durch eine Bewehrung im oberen Bereich des Querschnittes kann dies jedoch, falls gewünscht, behoben werden. Die Temperaturen sind an der Oberfläche des Trägers deutlich unter 40°C und somit in einem vertretbaren Bereich. Der Adaptionsvorgang ist mit ca. 5 Minuten recht träge, dennoch für langsam auftretende Belastungen wie z. B. Schneelasten ausreichend schnell. Außerdem bieten Entwurf und Ausführung des Aktors noch Potenzial für eine Beschleunigung des Vorganges. Der Energieeintrag ist mit 100 W relativ niedrig.

Bei dieser Art der Aktuierung überlagern sich drei Effekte, die bei den gemessenen Dehnungen deutlich sichtbar werden. Erstens erzeugt der Momentenanteil der Aktorik eine Durchbiegungsreduktion bzw. Biegeverformung nach oben, reduziert die Stauchung des oberen DMS und erzeugt ab einem bestimmten Punkt eine positive Dehnung. An der Unterseite reduziert er die Dehnung und erzeugt ab der Verformung nach oben eine Stauchung. Zweitens verlängert der Normaldehnungsanteil der Aktorik den Träger entlang seiner Längsachse, wodurch eine positive Dehnung an Ober- und Unterseite induziert wird. Ein dritter Effekt ist die asymmetrische Erwärmung des Betons, die zuerst den obere DMS betrifft, da der Aktor näher an diesem liegt. Durch die Erwärmung expandiert nicht nur der Aktor, sondern auch der Beton. Die Temperatur der seitlichen Betonoberfläche erwärmt sich um $\Delta_T = 16,4\text{ K}$ (vgl. Abbildung 6.9). Zu welchem Anteil welcher dieser Effekte die Dehnung beeinflusst, ist nicht nachvollziehbar. Dies ist für den Nachweis des Aktuierungs- und Aktorikkonzeptes von sekundärer Bedeutung und wird deshalb nicht weiter verfolgt.

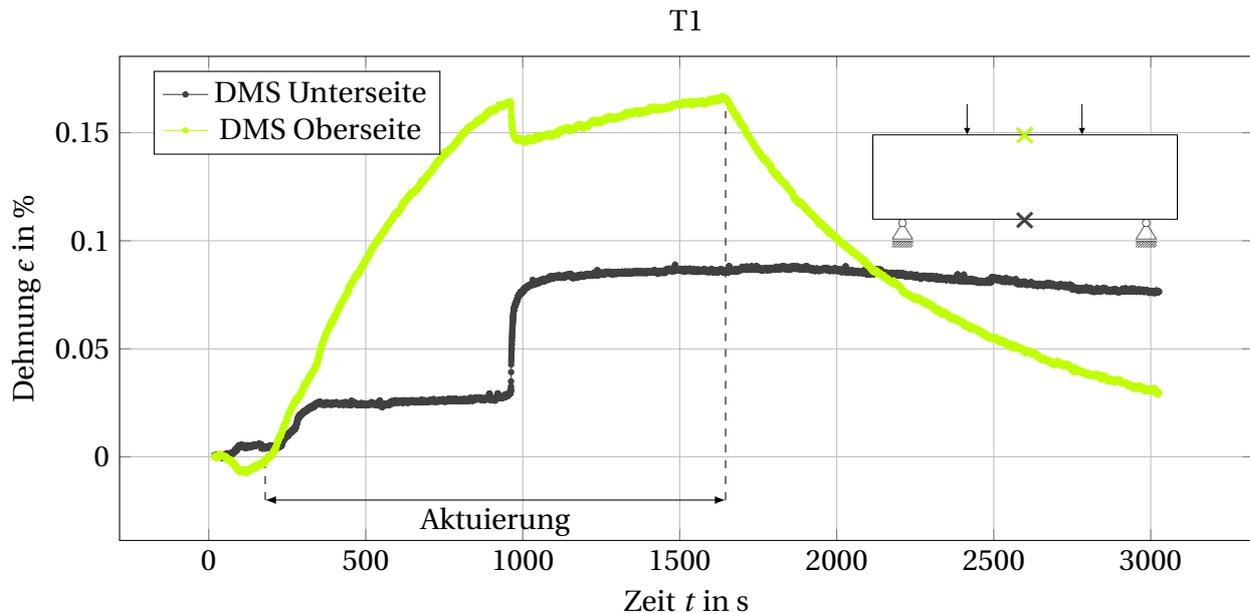


Abb. 6.11: Dehnung an der Unterseite (Grau) und an der Oberseite (Grün) des Trägers, in Feldmitte in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1

6.3.2 Druckerzeugung in den Aktoren mittels Zuführung eines Mediums

Bei diesem Versuch mit einem gesteuerten Biegeträger S1 sind entlang der Trägerlängsachse zehn Aktoren im Abstand von 100 mm äquidistant angeordnet. Der Druck in den Aktoren wird über die Zuführung eines Mediums realisiert. Die Zuführung erfolgt über das Hydraulikaggregat, die Ventile und die Leitungen (vgl. Abschnitt 5.4.2). Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Für diejenigen Aktoren, die während des Versuches mit dem gleichen Druck beaufschlagt werden, wird eine Aktorgruppe gebildet, sodass für jede Gruppe ein Ventil zur Ansteuerung benutzt wird. Die mittleren Aktoren (4, 5, 6 und 7) werden über ein Ventil angesteuert und haben somit den gleichen hydraulischen Druck. Zu den Auflagern hin fällt der Druck linear ab. Die symmetrische Belastung erlaubt eine paarweise Zusammenfassung der Aktoren 1 und 10, 2 und 9 sowie 3 und 8. Die Zieldrücke werden in der Steuerungseinheit (Bachmann, vgl. Abschnitt 5.2) hinterlegt und nach Erreichen der Prüflast von $F = 8 \text{ kN}$ angesteuert. Die Solldrücke sind identisch mit denen aus der Simulation bzw. dem analytischen Berechnungsverfahren und werden in Tabelle 6.3 aufgelistet. Dieser Versuch stellt die Erstinbetriebnahme des Hydraulikaggregates dar. Bei der Druckregelung kommt es zu Abweichungen zwischen dem Solldruck p_{soll} und dem während des Versuches maximal gemessenen Druck p_{ist} (vgl. Tabelle 6.3). Dies liegt an einer fehlerhaften Ventilsteuerung.

Die Maschinenkraft ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Bei $t = 92 \text{ s}$ ist die Haltekraft von $F = 8 \text{ kN}$ erreicht, die für die gesamte restliche Versuchsdauer kraftgeregelt gehalten wird. Bei $t = 158 \text{ s}$ und $t = 271 \text{ s}$ gibt es aufgrund der Trägheit der Prüfmaschine temporäre Abweichungen der Haltekraft. Der Anstieg auf $8,25 \text{ kN}$ ist auf die Drucksteigerung in den Aktoren und die damit verbundene Durchbiegungsreduktion des Trägers zurückzuführen. Da die Traverse der Prüfmaschine mit einer leichten zeitlichen Verzögerung verfährt, kommt es kurzzeitig zu einem Zwang, der die Maschinenkraft um $\Delta_F = 0,25 \text{ kN}$ ansteigen lässt. Ein ähnlicher Effekt führt bei $t = 272 \text{ s}$

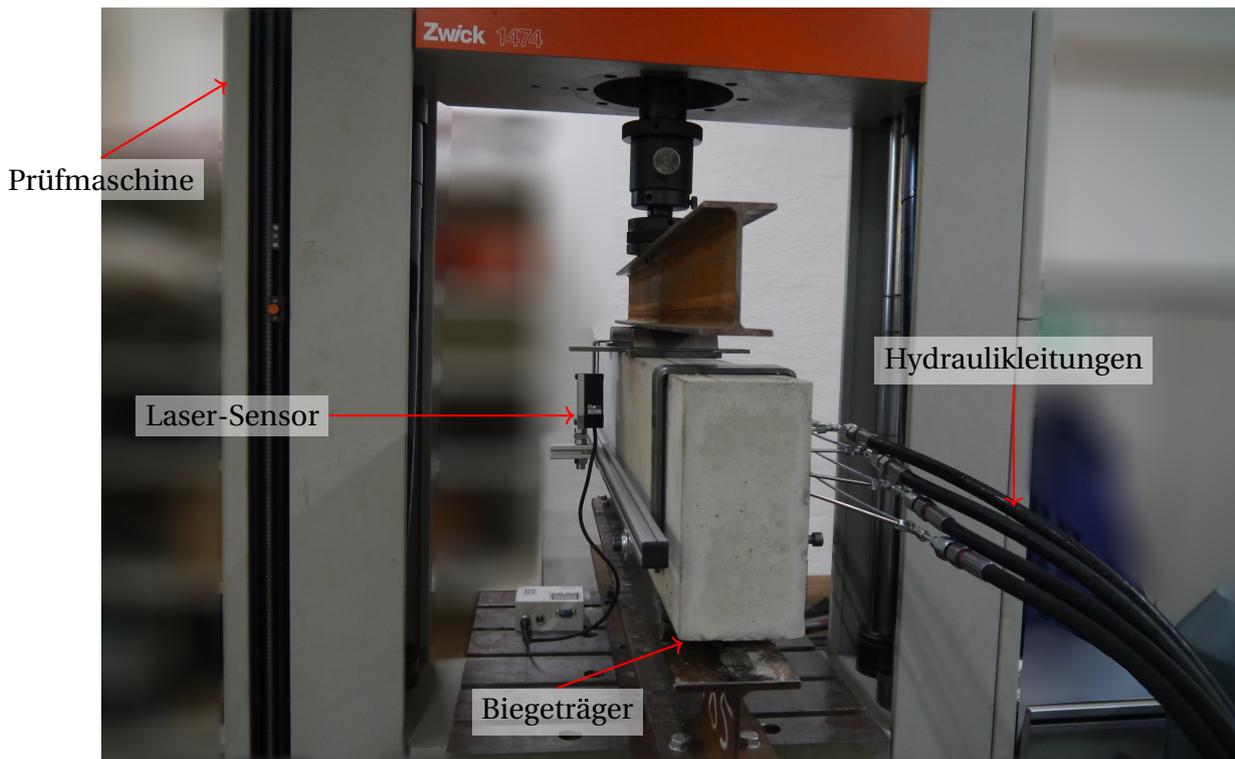


Abb. 6.12: Versuchsaufbau des Vier-Punkt-Biegeversuchs der mittels Hydraulikaggregat aktuierten Biegeträger

Tab. 6.3: Angesteuerte Solldrücke und gemessene Drücke

Aktorgruppe	Aktoren	Solldruck p_{soll} in bar	Maximaler Druck p_{ist} in bar
1	1 und 10	11,5	9,91
2	2 und 9	34,6	25,6
3	3 und 8	57,7	44,1
4	4, 5, 6 und 7	76,9	59,8

zu einem kurzzeitigen Abfall der externen Last auf $F = 7,1 \text{ kN}$. Durch die Reduktion des hydraulischen Druckes senkt sich der Träger wieder und entzieht sich der Last aus der Prüfmaschine. Diese regelt über die Traversenposition nach und stellt den Kraftzustand von $F = 8 \text{ kN}$ wieder her, sodass dieser Effekt nur kurzzeitig auftritt. Einen Einfluss auf den Nachweis der aktiven Verformungsmanipulation gibt es dadurch nicht. Lediglich die Durchbiegung und die Dehnungen können aufgrund der Prüfmaschinenregelung leichte, zeitlich begrenzte Abweichungen aufzeigen.

Abbildung 6.14 zeigt die Durchbiegung des Biegeträgers in Feldmitte u_{mitte} . Im passiven Zustand erfährt der Biegeträger eine Durchbiegung in Eigengewichtsrichtung von $u_{\text{passiv}} = 0,11 \text{ mm}$. Bei Öffnung der Ventile ($t = 157,8 \text{ s}$) wird die Durchbiegung reduziert und ist bei $t = 162 \text{ s}$ vollständig kompensiert. Es verbleibt eine Durchbiegung von $u_{\text{adaptiv}} = 0,004 \text{ mm}$. Bis zur manuellen Deaktivierung der Aktuierung bei $t = 263 \text{ s}$ schwankt die Durchbiegung leicht um die Nulla-

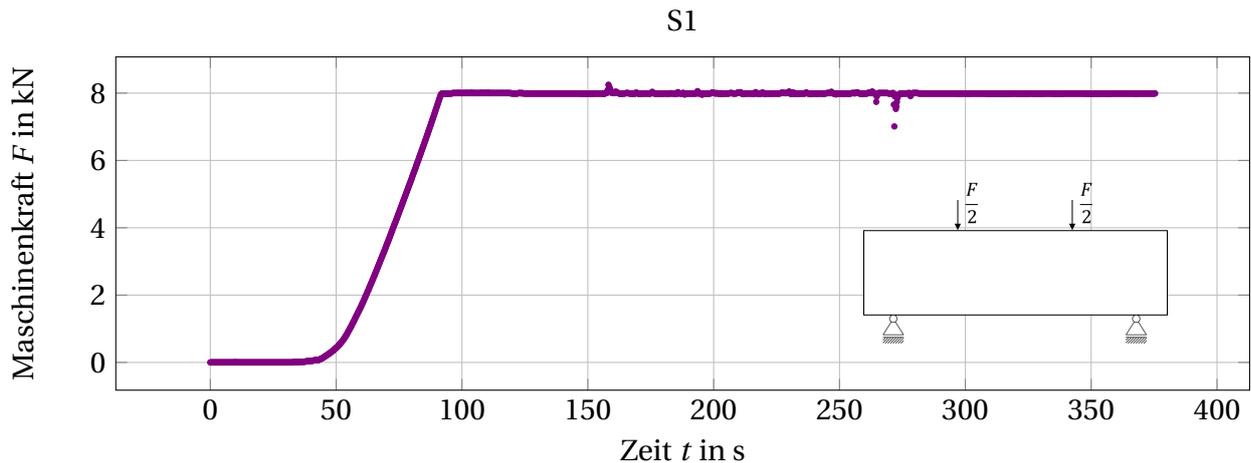


Abb. 6.13: Belastung in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens S1

ge. Es kommt zu einer maximalen Verformung des Trägers nach oben von $-0,004$ mm ($t = 248$ s). Die Regelung der hydraulischen Drücke hat einen Einfluss auf die Durchbiegung. Wie bereits erwähnt, kommt es, in diesem Zeitraum der Aktuierung ($t = 157,8$ s bis $t = 263$ s) zu minimalen Abweichungen der Maschinenkraft (vgl. Abbildung 6.13). Nach der Aktuierung geht der Träger wieder in seine passive Ausgangslage zurück. Die Durchbiegung ist mit $u_{\text{passiv}} = 0,16$ mm größer als vor der Aktuierung ($u_{\text{passiv}} = 0,11$ mm) und bis zum Versuchsende weitestgehend konstant.

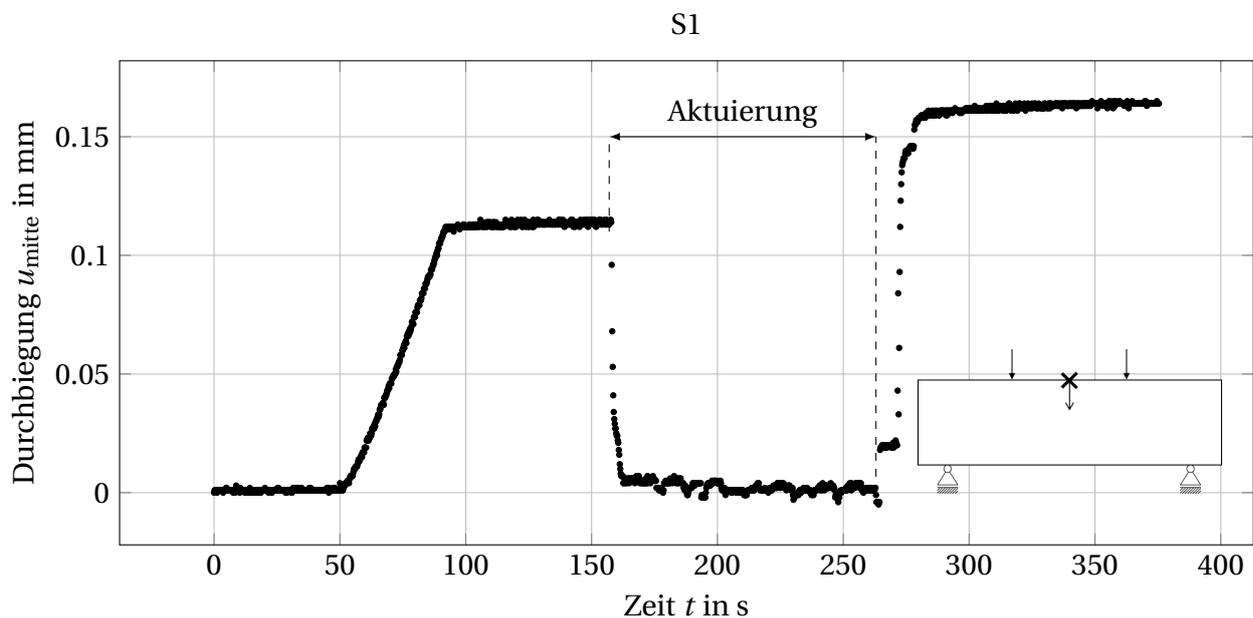


Abb. 6.14: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens S1

Die Durchbiegungsreduktion erfolgt durch die hydraulischen Drücke in den Aktoren. Die gemessenen Drücke in den Aktorengruppen sind in Abbildung 6.15 dargestellt. Zu Beginn des Versuches liegt der Druck in allen Aktoren bei $p = 0$ bar. Zum Zeitpunkt der Aktuierung ($t = 157,8$ s),

die manuell in der Steuerungseinheit gestartet wird, steigen die Drücke an und sind bei $t \approx 161$ s bei einem Druckniveau, das nur noch kleineren Schwankungen unterliegt. Die Drucksteigerung dauert etwas mehr als 2 Sekunden. Die Drücke steigen in allen Aktorengruppen simultan, lediglich Aktorgruppe 1 hat einen zeitlichen Versatz von ca. 5 Sekunden. Die Aktuierung wird bei $t = 263$ s beendet, was eine Druckreduktion auf $p = 0$ bar in allen Aktoren zur Folge hat. Die Druckminderung wird durch eine Öffnung der Ventile realisiert, sodass durch die Stauchung der Aktoren infolge der externen Last und des Eigengewichtes des Trägers das Öl zurück in den Tank fließt. Dadurch ist der Vorgang träger als die Druckaufbringung und dauert ca. 9 Sekunden. Je größer der Druck in den Aktoren ist, desto stärker sind die Schwankungen während der Aktuierungszeit. In den Aktoren 4, 5, 6 und 7 ist in diesem Zeitraum ein maximaler Druck von $p_{4,5,6,7} = 59,8$ bar und ein minimaler Druck von 52,3 bar vorhanden. Die Aktoren 3 und 8 weisen Drücke im Bereich von $p_{3,8} = 44,1$ bar und 39,4 bar auf. Die Schwankungen der Aktoren 2 und 9 bzw. 1 und 10 sind mit einem Druckunterschied von $\Delta p = 1$ bar gering.

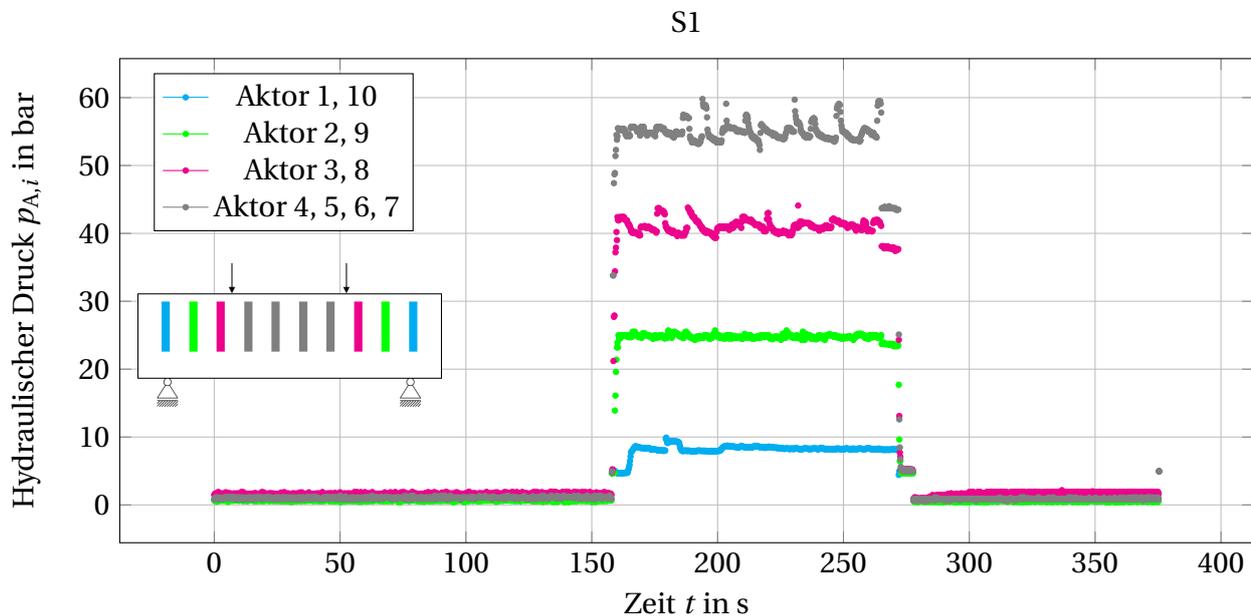


Abb. 6.15: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des adaptiven Balkens S1

Abbildung 6.16 stellt die Dehnungen an der Ober- und Unterseite des Trägers für die ersten 100 Sekunden dar. In diesem rein passiven Zustand des Trägers erfährt die Oberseite eine Stauchung von $\epsilon_{\text{passiv,o}} \approx -0,006$ %, die bis zur Aktuierung weitestgehend konstant ist. Die Dehnung an der Unterseite ist im passiven Zustand mit $\epsilon_{\text{passiv,u}} \approx 0,0057$ % betragsmäßig geringer. Diese Dehnungen liegen im Bereich des passiven Referenzbalkens ($\epsilon_u = 0,0065$ % und $\epsilon_o = -0,005$ %) (vgl. Abbildung 6.4).

Die Dehnungen für den gesamten Versuch sind in Abbildung 6.17 dargestellt. Die Dehnungen unterscheiden sich während der Aktuierung ($t = 157,8$ s bis $t = 263$ s) grundlegend. Die Stauchung an der Oberseite reduziert sich auf $\epsilon_{\text{adaptiv,o}} \approx -0,0038$ %. Dies entspricht einer Reduktion von 36,7 %, obwohl zu diesem Zeitpunkt die Durchbiegung u_{adaptiv} vollständig kompensiert ist.

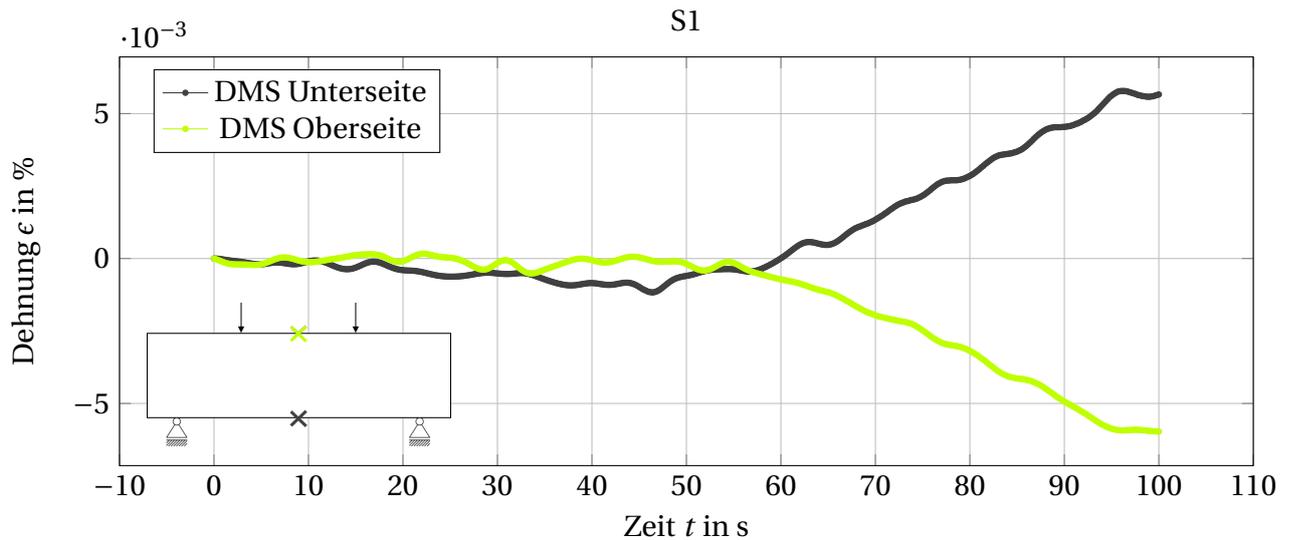


Abb. 6.16: Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens S1 von $t = 0$ s bis 100 s

Die oberseitige Dehnung im passiven Zustand unterscheidet sich vor und nach der Aktuierung nicht. Die Dehnung an der Unterseite ändert sich während der Aktuierung nicht maßgeblich. Das Rauschen des Messergebnisses und die Vergrößerung der Dehnung bei Lastaufbringung sind gut zu erkennen. Nach der Beendigung des Aktuierungsvorganges ist keine signifikante Änderung der Dehnung auf der Unterseite zu beobachten.

Im Gegensatz zur thermischen Aktuierung überlagern sich zwei der drei Effekte. Der Normalkraftanteil der Aktuierung lässt den Träger in seiner Längsrichtung expandieren, was zu einer Dehnung beider Oberflächen führt. Der Momentenanteil, der die Durchbiegung reduziert, führt – bis die Nulllage der Durchbiegung erreicht ist – zu einer Dehnungsreduktion an der Unterseite und zu einer Stauchungsreduktion an der Oberseite. Somit kann es dazu kommen, dass sich die beiden Effekte an der Unterseite gegenseitig aufheben und es zu keiner Dehnungsänderung durch den Aktuierungsvorgang kommt (vgl. Tabelle 6.4).

Tab. 6.4: Veränderung der Dehnung (+) / Stauchung (-) aufgrund der externen Last und der Anteile der Aktuierung

	Externe Last	Normalkraftanteil	Momentenanteil
Oberseite	-	+	+
Unterseite	+	+	-

Zu keinem Zeitpunkt können, bei fortwährender visueller Kontrolle, Rissbildungen an den Trägeroberflächen festgestellt werden. Nach diesem Versuch wird die Ventilsteuerung überarbeitet und korrekt eingestellt. Bei der Überprüfung kommt es zu keinen nennenswerten Abweichungen. Allerdings ist für die korrekte Ansteuerung der Ventile ein Mindestdruck im System von 5 bar notwendig. Dieser muss von Beginn an in allen Ventilen anliegen.

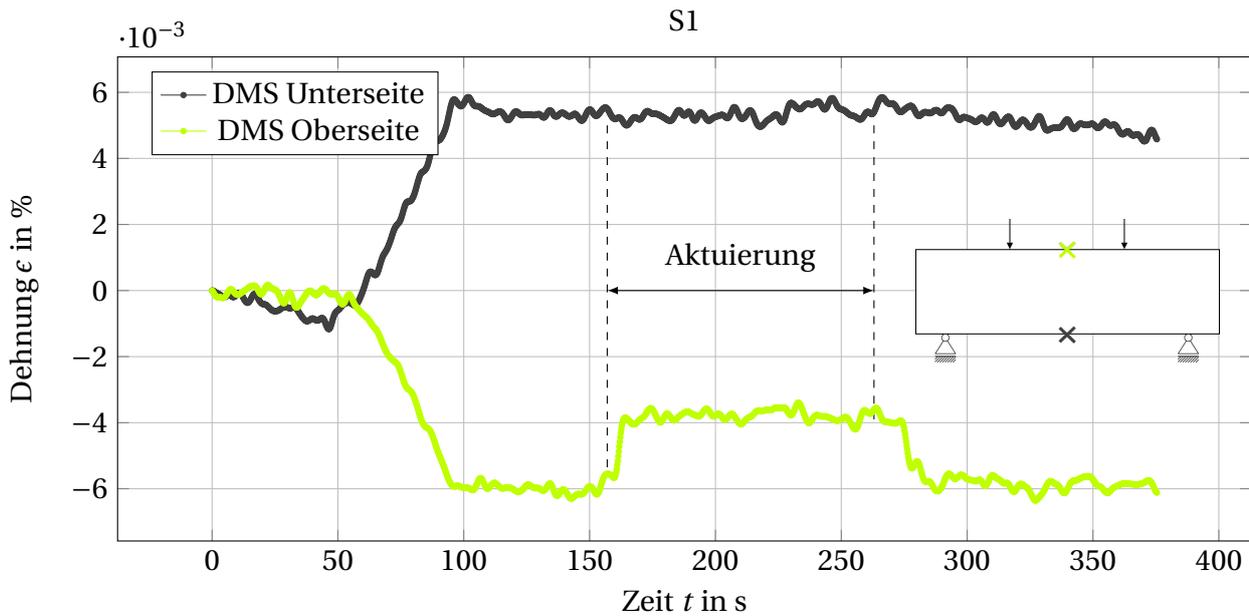


Abb. 6.17: Dehnung an der Unterseite (Grau) und an der Oberseite (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens S1 für den gesamten Versuch

6.4 Verformungsmanipulation in Echtzeit mittels Zuführung eines Mediums

In dieser Versuchsreihe wird die Durchbiegung mithilfe des Hydraulikaggregates nahezu in Echtzeit geregelt. Der Biegeträger verlässt dadurch die Ausgangslage, bei der nur das Eigengewicht wirkt, nur minimal. Eingangsparemeter ist die Durchbiegung, die über den Laser-Distanzsensor detektiert wird. Die erforderlichen Drücke, die aus den analytischen Berechnungen, den Simulationen und den bereits durchgeführten Versuchen bekannt sind, werden nicht in der Regelungseinheit hinterlegt. Es wird lediglich die Verteilung der Drücke den entsprechenden Aktorgruppen zugewiesen. Die Zuordnung der Aktorgruppen ist identisch mit dem vorherigen Versuch aus Abschnitt 6.3.2, da die Belastung nicht verändert wird. Es werden zur Regelung vier Versuche an vier betonierte Biegeträgern durchgeführt. Auf die Versuche R1 und R2 wird im Folgenden eingegangen. Diese Untersuchungen unterscheiden sich in der Regelungsstrategie. Biegeträger R2, R3 und R4 besitzen eine angepasste Regelung, die Aktorik setzt bereits bei einer kleineren Durchbiegung ein. Einen Unterschied zwischen den Versuchen R2, R3 und R4 gibt es nicht. Da sich die Ergebnisse aus den Versuchen zudem nicht wesentlich unterscheiden, werden die Versuche R3 und R4 im Anhang dargestellt (siehe Anhang B).

6.4.1 Geregelter Biegeträger R1

Das Diagramm in Abbildung 6.18 zeigt den Verlauf der Durchbiegung über die Zeit im passiven Zustand (rot) und im adaptiven Zustand (schwarz). Die Belastung erfolgt bei $t = 20$ s und hält ab $t = 70$ s konstant bei $F = 8$ kN. Die Regelung lässt eine minimale Durchbiegung von $u_{\text{adaptiv}} = 0,02$ mm zu, die bei $t = 42$ s zu erkennen ist. Ab diesem Zeitpunkt greift die Regelung

ein und der Träger weist keine Durchbiegungsvergrößerung auf. Bei Beginn der Kompensation verformt sich der Träger minimal entgegen seiner Eigengewichtsrichtung. Von da an schwankt der Wert um die Nulllage der Durchbiegung. Die Belastung wird im adaptiven Zustand bei $t = 100$ s zurückgenommen. Hier zeigt sich eine leichte Trägheit der Regelung, sodass es zu einer Verformung des Trägers von $-0,003$ mm kommt, die ab $t \approx 130$ s abgeklungen ist.

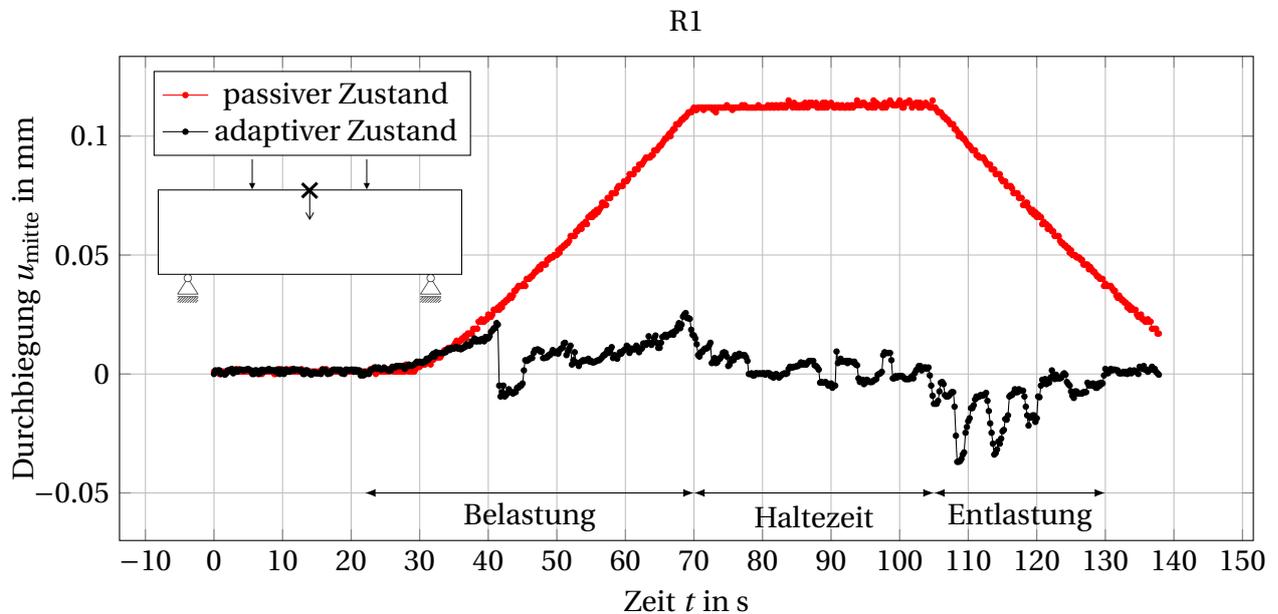


Abb. 6.18: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens R1

Die Verläufe der Drücke in den Aktoren sind in Abbildung 6.19 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die Drücke in den einzelnen Aktorgruppen verzögert einsetzen. Die mittleren Aktoren, die die höchsten Drücke verzeichnen, werden bei $t = 41$ s mit Druck beaufschlagt. Die Dosierung des Hydrauliköls durch das Ventil erfolgt sprunghaft von 5 bar auf 23 bar². Der weitere Anstieg verläuft weitestgehend ohne sprunghafte Veränderungen. Der maximale Druck in der Haltezeit des Lastniveaus liegt im Bereich von 68 bar bis 79 bar. Ähnlich der Durchbiegung schwankt der Druck in dieser Aktorgruppe um den vorhergesagten Druckwert von 76,9 bar. Die Schwankungen bewegen sich jedoch in einem kleinen, unkritischen Bereich. Durch eine Anpassung der Regelparameter können diese reduziert werden. Die Schwankungen des Druckes innerhalb der anderen Aktoren fallen zudem deutlich geringer aus. Bei Öffnung der Ventile ist ein sprunghafter Anstieg der Drücke bei $t = 52$ s bzw. 63 s zu erkennen. Der Druck in den Aktoren 3 und 8 bewegt sich unter voller Belastung im Bereich von 58 bar. Die Aktorgruppe mit den Aktoren 2 und 9 pendelt sich bei ca. 35 bar ein. Die äußeren Aktoren zeigen keine Steigerung des Druckes. Die Regelung kann ohne eine Erhöhung des Druckes in dieser Aktorgruppe die Durchbiegung weitestgehend kompensieren. Der Mindestdruck von 5 bar liegt in der Größenordnung des berechneten Drucks in Höhe von 11,5 bar.

² Die Ventilsteuerung des Hydraulikaggregates benötigt vor Versuchsbeginn einen Mindestdruck von 5 bar, um die Drücke in den Aktoren einstellen zu können.

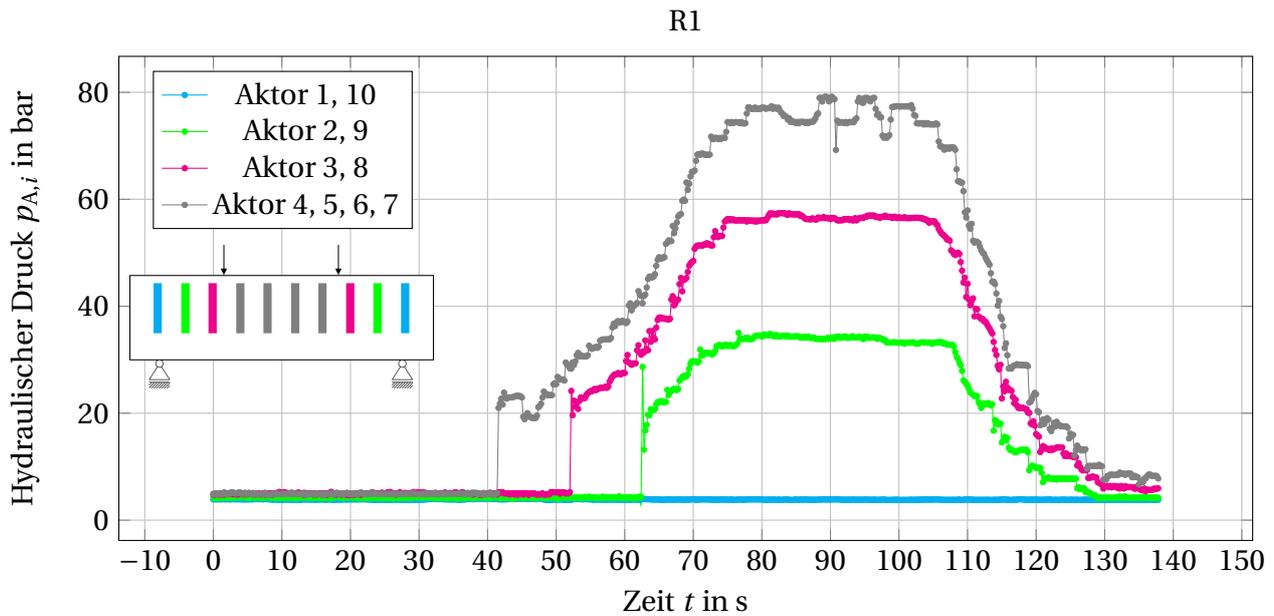


Abb. 6.19: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des adaptiven Balkens R1

Bei diesem Versuch zeigt die Trägheit der Aktorik ein deutliches Potenzial zur Verbesserung auf. In der zweiten Versuchsreihe wird die Regelung deshalb angepasst (vgl. Abschnitt 6.4.2). Das zulässige Delta der Durchbiegung wird so reduziert, dass die Aktorik früher einsetzt, d. h. bereits bei kleineren Messwerten des Lasersensors den Druck in den Aktoren erhöht.

6.4.2 Geregelter Biegeträger R2

Um den Adaptionsvorgang zu verbessern, werden drei weitere Biegeträger geprüft. Bei dieser Versuchsreihe erfolgt die Aufbringung des hydraulischen Druckes in Abhängigkeit der äußeren Last. Die Laststufen der Prüfmaschine sind unverändert, lediglich der Regelungsalgorithmus wird so eingestellt, dass die Regelung früher einsetzt. Die maximale Maschinenkraft von $F = 8 \text{ kN}$ wird 60 s lang kraftgeregelt gehalten.

Der Verlauf der Maschinenkraft über die Zeit ist in Abbildung 6.20 aufgezeigt. Die Belastung beginnt bei $t = 118 \text{ s}$ und erreicht nach 158 s das angestrebte Lastniveau von $F = 8 \text{ kN}$. Dieses wird 60 Sekunden lang gehalten. Die Prüfmaschine regelt mit einer Geschwindigkeit von 50 N/s , was zu einer Trägheit des Systems führt. Dies ist unvermeidbar, da die Geschwindigkeit bei der verwendeten Prüfmaschine nicht weiter erhöht werden kann. Die Einflüsse der Aktuierung sind von $t = 164 \text{ s}$ bis zur Entlastung bei $t = 218 \text{ s}$ sichtbar. Die Schwankungen der Maschinenkraft während der Haltezeit bewegen sich im Bereich zwischen $F = 8,28 \text{ kN}$ und $7,77 \text{ kN}$. Die Entlastung ist bei $t = 261 \text{ s}$ abgeschlossen.

Der Verlauf der Durchbiegung über die Zeit des adaptiven Balkens R2 (schwarz) ist in Abbildung 6.21 dargestellt. Zum Vergleich ist zudem der Maximalwert des passiven Referenzbalkens von $u_{\text{passiv}} = 0,0062 \text{ mm}$ eingezeichnet (rot). Bei Inbetriebnahme der Regelung ist bei $t = 4 \text{ s}$

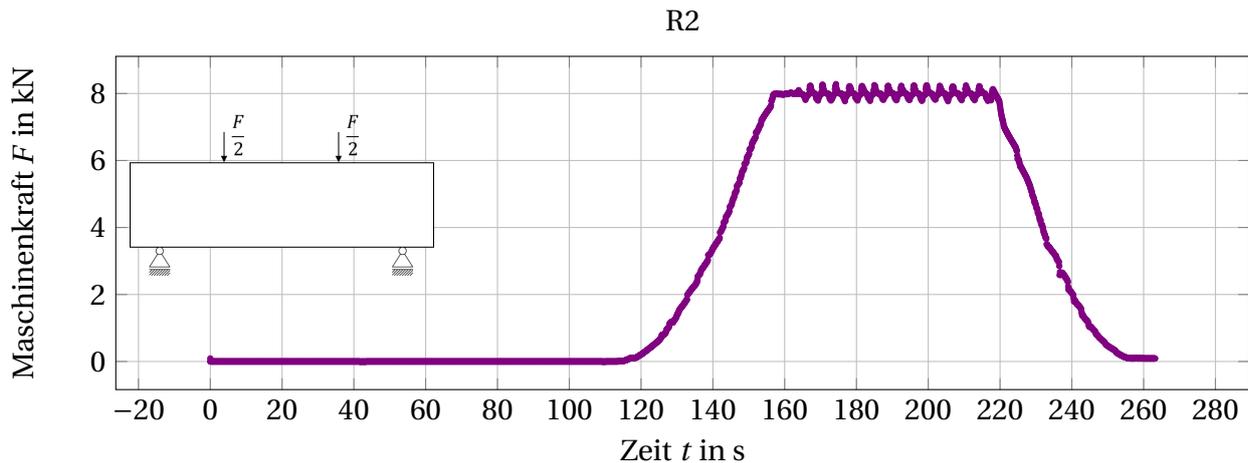


Abb. 6.20: Belastung in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens R2

ein deutliche Reduktion der Durchbiegung zu erkennen. Der Systemdruck von 5 bar, der anliegen muss, reicht aus, um den Träger entgegen seiner Eigengewichtsrichtung zu verformen, da zu diesem Zeitpunkt noch keine äußere Last anliegt. Die Verformung beträgt $-0,014$ mm und bleibt bis $t = 139$ s nahezu konstant. Bei größeren Probekörpern, die ein größeres Eigengewicht aufweisen, wird dieser systembedingte Mindestdruck einen deutlich geringeren Einfluss haben. Die Regelung greift diesmal früher ein, sodass sich die Verformungen bei Belastungsbeginn ($t = 118$ s) nicht wesentlich verändern. Deutlich sind jedoch die sich wiederholenden Schwankungen in der Haltezeit der Maschinenkraft zwischen $t = 158$ s und $t = 218$ s zu erkennen. Die Durchbiegung liegt in diesem Abschnitt im Wertebereich von $u_{\text{adaptiv}} \approx 0,01$ mm bis $-0,035$ mm. Nach der Haltezeit ist bei der Entlastung des Trägers die Durchbiegung wieder nahezu konstant, wie dies im Bereich von $t = 219$ s bis $t = 261$ s sichtbar ist. Bei Versuchsende, nach der vollständigen Entlastung des Trägers, liegt die Durchbiegung wieder in der Größenordnung vor Belastungsbeginn, aber nach der systembedingten Druckbeaufschlagung.

Die hydraulischen Drücke in den Aktoren zeigen im Vergleich zur Maschinenkraft und zur Durchbiegung einen ähnlichen Verlauf. In Abbildung 6.22 sind die Drücke der vier Aktorgruppen über die Zeit aufgezeigt. In allen Gruppen steigt bei $t = 4$ s der Druck auf den Systemdruck von 5 bar an. Der Druck in den mittleren Aktoren steigt ab $t \approx 125$ s linear an, leicht verzögert zum Belastungsbeginn bei $t = 118$ s. Jeweils ca. 4 Sekunden später steigt der Druck in den Aktoren 3 und 8 bzw. 2 und 9 an. Lediglich die äußeren Aktoren starten erst bei $t = 145$ s, merklich verzögert. Der Druck steigt im Vergleich zum Versuch R1 deutlich auf ca. 12,5 bar an. Die Haltedauer ist in allen Aktorgruppen gut erkennbar, die Drücke schwanken merklich. Je größer das Druckniveau im Aktor, desto größer sind die Schwankungen. Der Druck in den mittleren Aktoren pendelt um 73 bar und besitzt Extrema bei 79 bar und 67 bar. In den Aktoren 3 und 8 herrscht ein maximaler Druck von 60 bar. Während der Haltezeit schwankt dieser um ca. ± 10 bar. Die Druckspanne der Aktorgruppe mit den Aktoren 2 und 9 ist weniger deutlich ausgeprägt und liegt im Durchschnitt bei 35 bar.

Der Zusammenhang zwischen der externen Last und den hydraulischen Drücken wird in Ab-

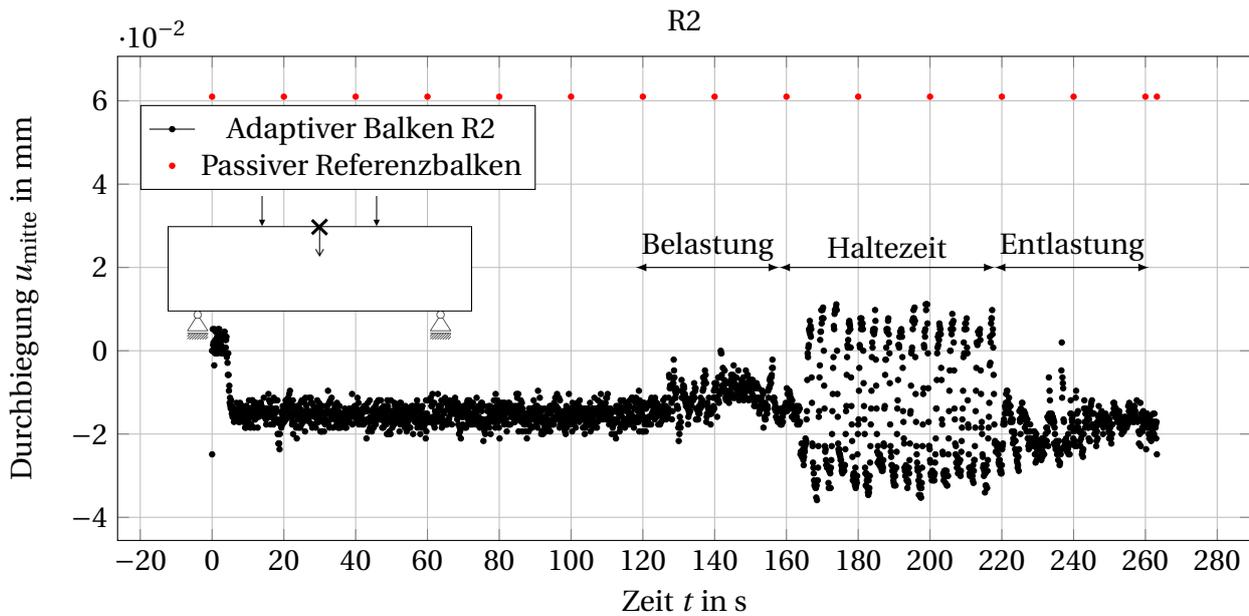


Abb. 6.21: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens R2 und der Maximalwert des passiven Referenzbalkens

bildung 6.23 deutlich. Mit zunehmender Maschinenkraft steigen die Drücke in den Aktoren ebenfalls. Es sind zwar unregelmäßige Sprünge erkennbar, der Zusammenhang kann trotzdem als linear betrachtet werden. Die Schwankungen der Durchbiegung während der Haltezeit der Maschinenkraft sind hier als kreisförmige Punktwolken zu erkennen.

Die Dehnungen an der Ober- und Unterseite des Trägers in Feldmitte sind in Abbildung 6.24 dargestellt. Die Messwerte an der Oberseite zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Verläufen der Kraft bzw. der Hydraulischen Drücken in Abhängigkeit der Zeit. Zu Beginn der Messung verformt sich der Balken durch den Systemdruck nach oben, was zu einem Anstieg der Dehnung von $\epsilon_o = 0\%$ auf ca. $0,001\%$ führt. Infolge der externen Last wird diese Dehnung zunächst ab $t \approx 125$ s abgebaut. Bei $t = 140$ s ist keine Dehnung vorhanden und es kommt danach zu einem Vorzeichenwechsel, sodass der Träger an der Oberseite bis zur Entlastung eine Stauchung erfährt. Die maximalen Dehnungen schwanken während der Haltezeit der äußeren Last um einen Wert von ca. $-0,0025\%$. Die Dehnungen liegen nach der Entlastung wieder auf dem Niveau vor der Belastung bei ca. $0,0012\%$.

Die Dehnungen an der Unterseite des Trägers verhalten sich vom Verlauf her ähnlich, weisen aber höhere Werte und eine ausgeprägtere Streuung auf, die eventuell auf einen Messfehler im Datenerfasser zurückzuführen sind. Der Maximalwert liegt bei $t = 186$ s und weist eine Dehnung von $\epsilon_u \approx 0,0082\%$ auf. Im Mittel liegt die Dehnung an der Unterseite während der Haltezeit der Maschinenkraft bei $0,0071\%$. Diese Streuung ist nicht auf die schwankende Durchbiegung zurückzuführen, da sie bereits bei Messbeginn auftritt. Wahrscheinlicher ist ein systematischer Messfehler aufgrund eines Defekts am Messdatenerfasser. Die Dehnung in Abhängigkeit der Zeit der Versuche R3 und R4 stützen diese Vermutung (vgl. Anhang B.10 und B.14). Der gewünschte Effekt des Adaptionvorgangs kann dennoch nachgewiesen werden.

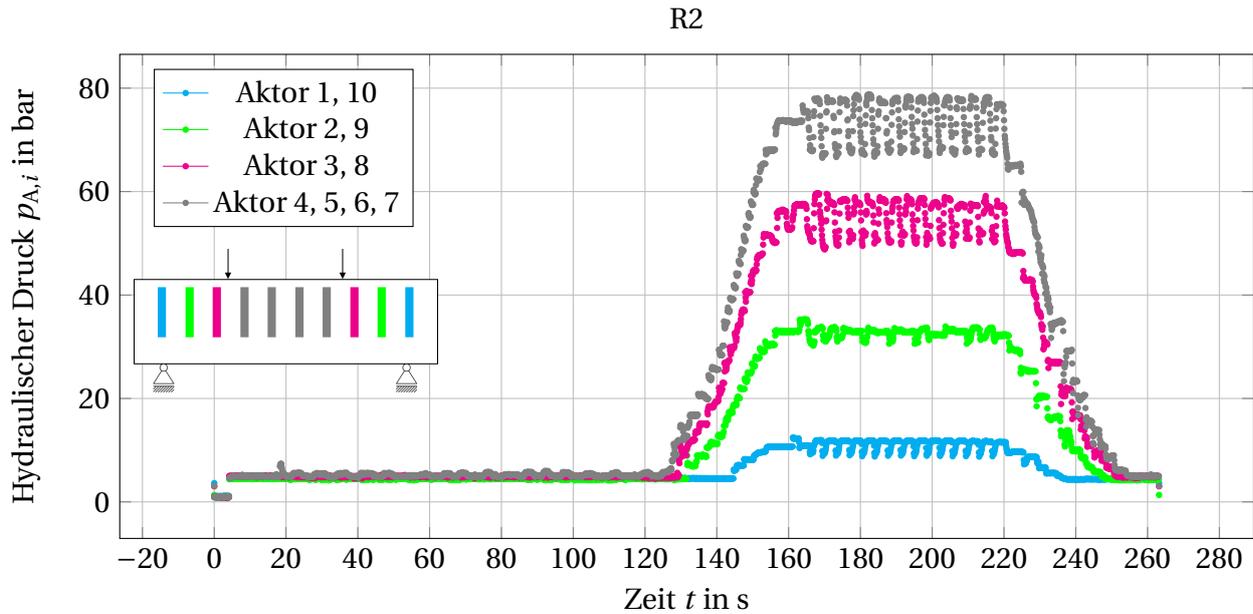


Abb. 6.22: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des adaptiven Balkens R2

Die Schwankungen der Durchbiegung während der Haltezeit sind zwar unkritisch, gilt es aber in weiteren Untersuchungen zu vermeiden. Wahrscheinlich ist die gegenseitige Wechselwirkung der beiden Regelkreise (Prüfmaschine, Hydraulikaggregat) der Grund für die wahrnehmbaren Schwankungen der hydraulischen Drücke, der Maschinenkraft und in der Folge auch der Durchbiegung. Eine minimale Auslenkung kann dieses gegenseitige „Aufschaukeln“ initiieren, sodass sich die Prüfmaschine und das Hydraulikaggregat in gegenseitiger Wechselwirkung austarieren. Ein minimaler Anstieg des Druckes führt zu einer Reduzierung der Durchbiegung. Aufgrund der Trägheit reagiert die Prüfmaschine leicht verzögert auf diese Durchbiegungsreduktion mit einer Anpassung der Traversenposition (nach oben). Dies wiederum hat eine Verformung des Trägers zur Folge, wodurch – wieder zeitlich leicht verzögert – die Drücke in den Aktoren reduziert werden. Dadurch sinkt die Prüflast und die Prüfmaschine tariert die Maschinenkraft, indem die Traverse nach unten verfahren wird. Es erhöht sich die Durchbiegung, worauf das Hydraulikaggregat den Druck in den Aktoren senkt. Dieser Vorgang scheint sich während der eigentlich konstanten Haltezeit mehrmals zu wiederholen. Die Regelgeschwindigkeiten und die unausweichlichen Trägheiten der beiden Systeme scheinen in einem ungünstigen Verhältnis zu stehen. Das Konzept der Verformungsmanipulation mittels integrierter fluidischer Aktoren ist jedoch durch diese Versuchsreihe verifiziert, da die Durchbiegung in Feldmitte permanent minimal gehalten werden kann.

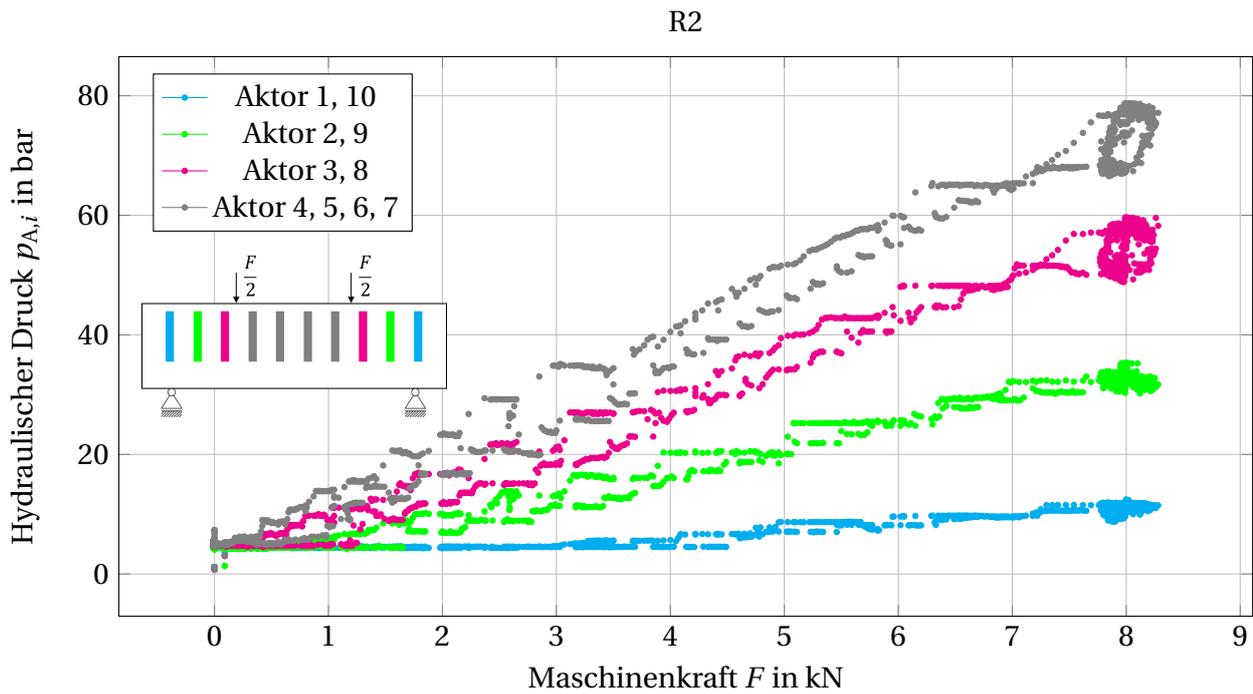


Abb. 6.23: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der externen Belastung für die Aktoren des adaptiven Balkens R2

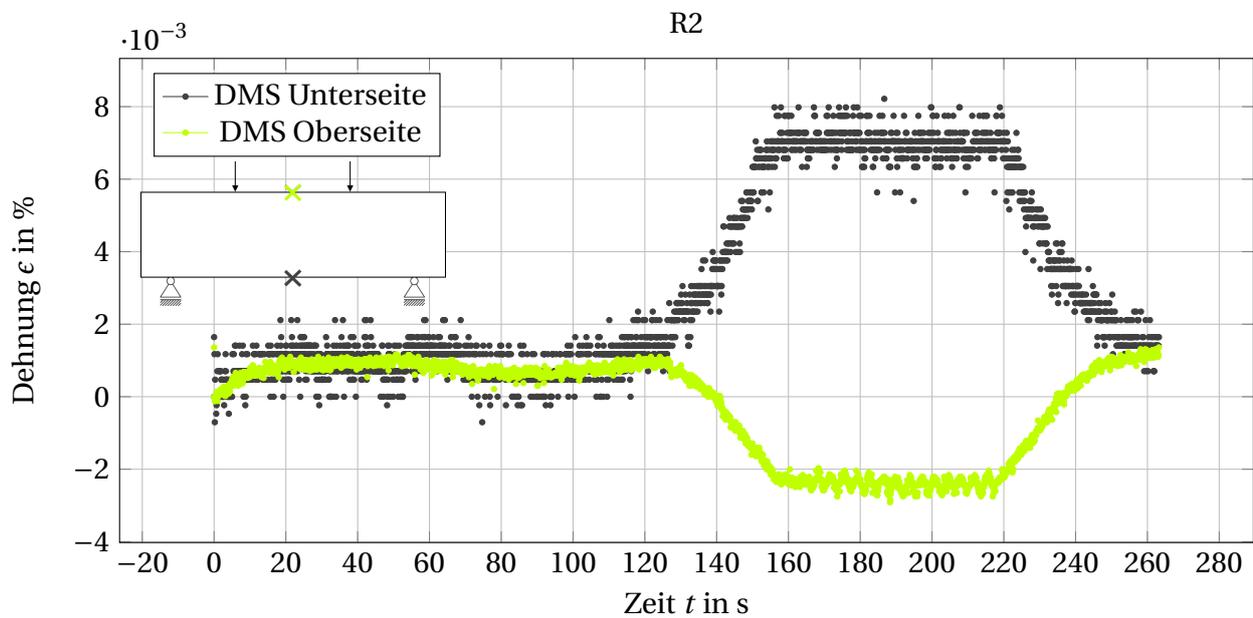


Abb. 6.24: Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens R2

6.5 Überprüfung der Versagensmechanismen

Bei den experimentellen Untersuchungen konnte – wie erwartet – keine Beschädigung der Biegeträger festgestellt werden, d. h. es waren zu keinem Zeitpunkt Risse auf der Betonoberfläche erkennbar. Um trotzdem die vorhergesagten Versagensmechanismen zu überprüfen werden zwei Biegeträger erneut geprüft und mit einem deutlich höheren hydraulischen Druck beaufschlagt, um ein Versagen hervorzurufen. Für Biegeträger M1 werden die externe Belastung und der Druck in den Aktoren gesteigert (vgl. Abschnitt 6.5.1). Das Vorgehen stimmt mit den verwendeten Eckdaten aus der FEM-Simulation aus Kapitel 4.6.1 überein. Der Biegeträger U1 erfährt, wie in Kapitel 4.6.2 simuliert, nur eine Erhöhung des Druckes, der bei diesem Versuch in allen Aktoren gleich groß ist (vgl. Abschnitt 6.5.2). Des Weiteren kann vermutet werden, dass es selbst nach einer Überschreitung der Betonzugfestigkeit in der oberen Querschnittshälfte im adaptiven Zustand zwar zu sichtbaren Rissen kommt, diese aber im passiven Zustand wieder überdrückt werden.

6.5.1 Rissbildung im Bereich der inneren Aktoren

Um ein Versagen des Trägers zu erzeugen, werden sowohl die externe Last als auch die aufgebracht Drücke deutlich gesteigert. Es wird ein Träger verwendet, der bereits geprüft wurde, jedoch keinerlei äußere Risse aufweist. Eine Vorschädigung kann zwar nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden, ist aber unwahrscheinlich. Außerdem tritt ein Versagen, falls eine Vorschädigung vorliegt, früher auf. Die Drücke in den Aktoren werden über die gleiche Regelstrategie, wie sie bei den Trägern R2 bis R4 (vgl. Abschnitt 6.4.2) zur Anwendung kommt, realisiert. Einziger Unterschied ist die Maschinenkraft, die nicht bei 8 kN gehalten wird, sondern mit gleichbleibender Belastungsgeschwindigkeit bis zu einer maximalen Last von 17,43 kN gefahren wird. Der Versuch wird bei dieser Maximallast manuell beendet, da die hydraulischen Drücke deutlich über 150 bar liegen. Die verwendeten Schneidringkupplungen sind, anders als alle anderen Komponenten, nur für Drücke bis zu 150 bar zugelassen. Abbildung 6.25 zeigt den Verlauf der Maschinenkraft über die Zeit. Nach Beendigung der Laststeigerung bei 17,43 kN ($t = 86,5$ s) wird die Kraft erst bei $t \approx 110$ s manuell reduziert und ist bei $t = 117$ s vollständig abgebaut. Durch den Stopp der Kraftsteigerung bei $t = 86,5$ s wird die Aufzeichnung der Maschinenkraft durch die Prüfmaschine beendet. Die nachfolgenden Datenpunkte der Maschinenkraft sind manuell eingefügt und dienen der besseren Übersicht. Alle anderen Sensordaten werden mit der Regelungseinheit bis Versuchsende $t = 137,5$ s aufgezeichnet.

Der Verlauf der hydraulischen Drücke ist in Abbildung 6.26 dargestellt. Der maximale Druck in der Aktorgruppe 1 (Aktor 1 und 10) beträgt 28,7 bar. Aktorgruppe 2 und 3 haben einen maximalen Druck von 87,2 bar bzw. 145,6 bar. Die höchsten Drücke werden in den mittleren Aktoren 4, 5, 6 und 7 (Aktorgruppe 4) gemessen, hier liegen diese bei 189 bar. Gut zu erkennen ist der nahezu lineare Verlauf der Drücke in den Aktorgruppen 4 bis 2 bis zum Erstriss bei $t = 73,1$ s. Der Verlauf des Druckes in den äußeren Aktoren (1 und 10) ist zeitlich leicht versetzt, weist aber ebenfalls einen nahezu linearen Anstieg bis zu diesem Punkt auf. Nach dem Riss im Träger und der damit einhergehenden Schwächung des Betonquerschnittes wird die externe Last weiter gesteigert. Als Folge der verminderten Steifigkeit des Trägers steigt der hydraulische Druck der benötigt wird, um die Durchbiegung weiterhin bei null zu halten, in allen Aktoren.

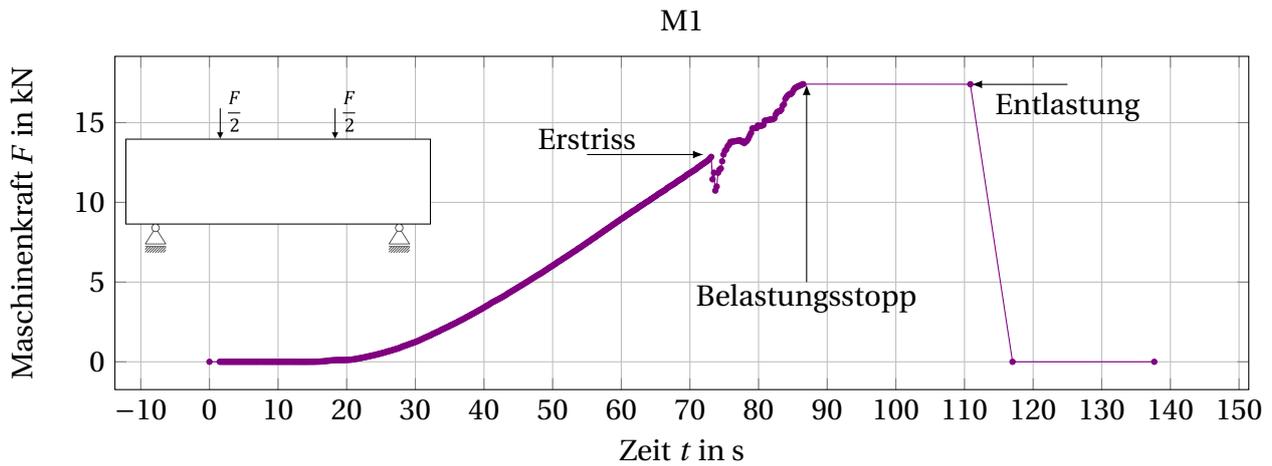


Abb. 6.25: Belastung in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens M1

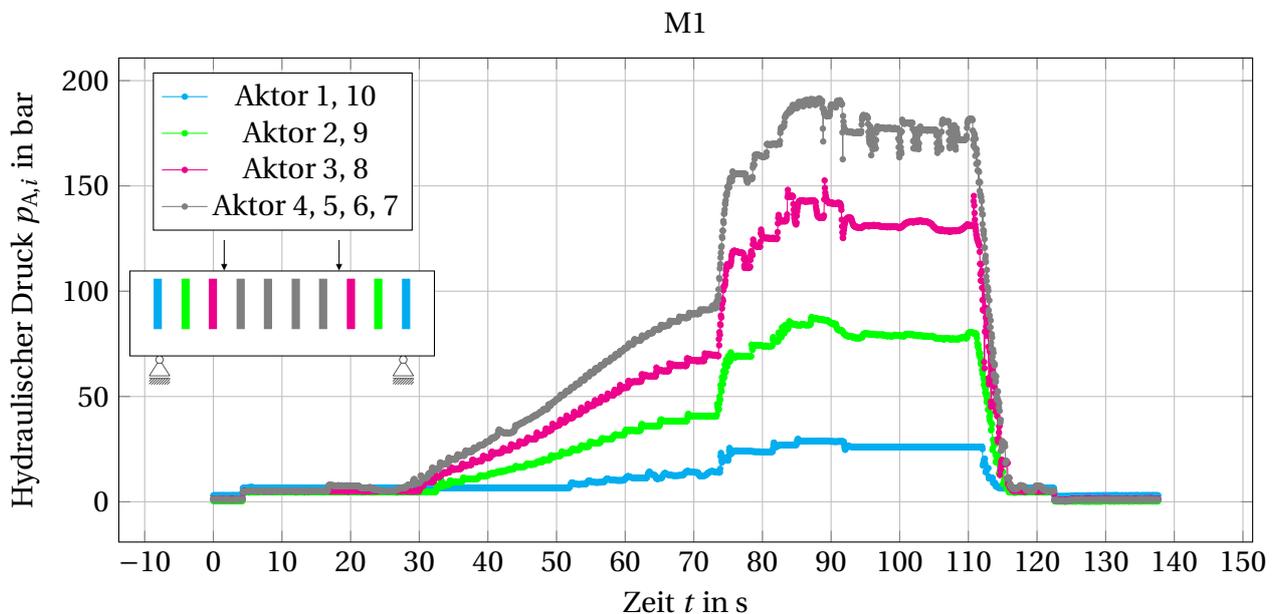


Abb. 6.26: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des adaptiven Balkens M1

Die Durchbiegung liegt bis $t = 73,1$ s nahezu konstant bei 0 mm, obwohl die externe Belastung bis zu diesem Zeitpunkt auf 12,85 kN angestiegen ist. Die Durchbiegung des Trägers ist in Abbildung 6.27 dargestellt. Gut zu erkennen ist die kurzzeitige starke Verformung des Trägers von $t = 73,1$ s bis 74,75 s auf $-0,189$ mm. Grund hierfür ist die Rissbildung im Querschnitt.

Bei der thermischen Aktuierung T1 (vgl. 6.3.1), bei der es zu einer deutlichen Biegeverformung des Trägers entgegen der Eigengewichtsrichtung kommt, lag der Rissursprung an der obersten Faser und zieht sich von dort mit wahrnehmbarer zeitlicher Verzögerung in den unteren Teil des Querschnittes. Dies ist zu erwarten, da bei gleichbleibender Last von 8 kN die

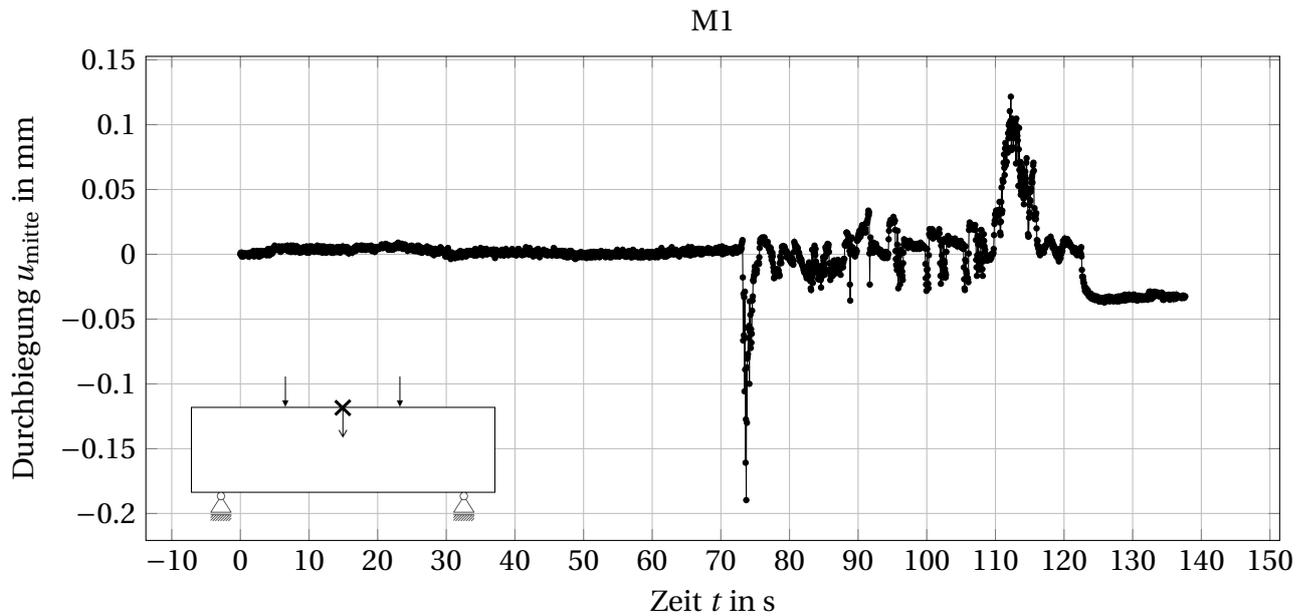


Abb. 6.27: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens M1

Aktuierung fortgesetzt wird und der Träger in der oberen, nicht bewehrten Querschnittshälfte Zugspannungen erfährt. Im Versuch M1 wird ein anderer Effekt sichtbar: Da hydraulischer Druck und Maschinenkraft gleichzeitig steigen, liegt die Durchbiegung bis zu $t = 72$ s auf einem Niveau um die Nulllage. Der Rissursprung kann zwar ebenfalls in der oberen Querschnittshälfte detektiert werden, jedoch nicht an der äußeren Faser. Die Risse ziehen sich unmittelbar über die gesamte Querschnittshöhe des Trägers. Wie erwartet sind die Risse an den mittleren Aktoren 4, 5, 6 und 7 vorzufinden, da in diesen der größte hydraulische Druck herrscht. Zum Zeitpunkt des Risses ($t = 72$ s) liegt der Druck in dieser Aktorgruppe bei 89 bar. Durch die erzeugten Risse kommt es zu einer deutlichen Verformung des Trägers M1. Umgekehrt kommt es aufgrund der deutlichen Verformung beim Träger mit den thermischen Aktoren T1 zu Rissen im Querschnitt.

Abbildung 6.28 zeigt die Ansichten des Trägers bei Versuchsbeginn $t = 0$ s, bei einer Maschinenkraft von 8 kN ($t = 65$ s), bei maximaler Maschinenkraft von 17,42 kN bzw. maximalen Drücken ($t = 90$ s) und bei Versuchsende $t = 135$ s. Gut zu erkennen sind die Risse in den mittleren Aktoren zum Zeitpunkt $t = 90$ s, die über den ganzen Querschnitt laufen (siehe Abbildung 6.29). Nicht sichtbar sind Risse bis zu einer Last von 8 kN. Bei Versuchsende werden die Risse durch das Eigengewicht des Trägers überdrückt und sind visuell nicht mehr wahrnehmbar. Es kommt zu den gewünschten Rissen, die sich mit den Simulationsergebnissen vergleichen lassen. Ein Versagen der Träger kann aber nicht festgestellt werden.

Phänomenologisch passen die Ergebnisse aus den Simulationen und den Experimenten gut zueinander. Die Grenzdehnungen sind ebenfalls in den vier mittleren Aktoren überschritten. Das simulierte Rissbild zeigt Abbildung 6.29 und spiegelt in vereinfachter Form die Risse aus dem Versuch wider. Somit decken sich die Erkenntnisse aus der analytischen Betrachtung nach Balkentheorie, den FEM-Simulationen und den Versuchen.

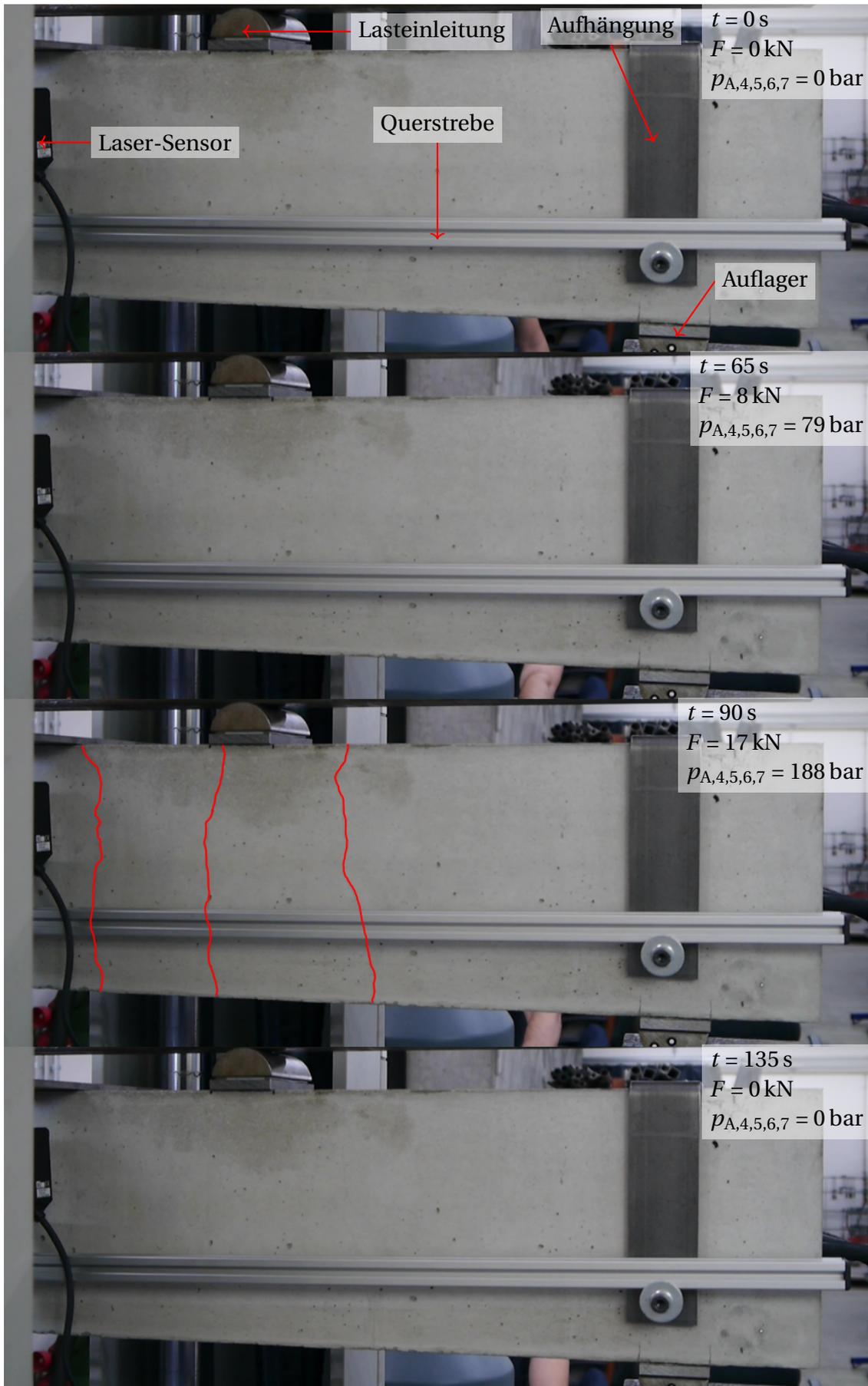


Abb. 6.28: Ansichten des adaptiven Trägers M1 bei $t = 0 \text{ s}$ (oben), $t = 65 \text{ s}$, $t = 90 \text{ s}$ (Risse rot hervorgehoben) und $t = 135 \text{ s}$ (Risse sind überdrückt und nicht mehr sichtbar)

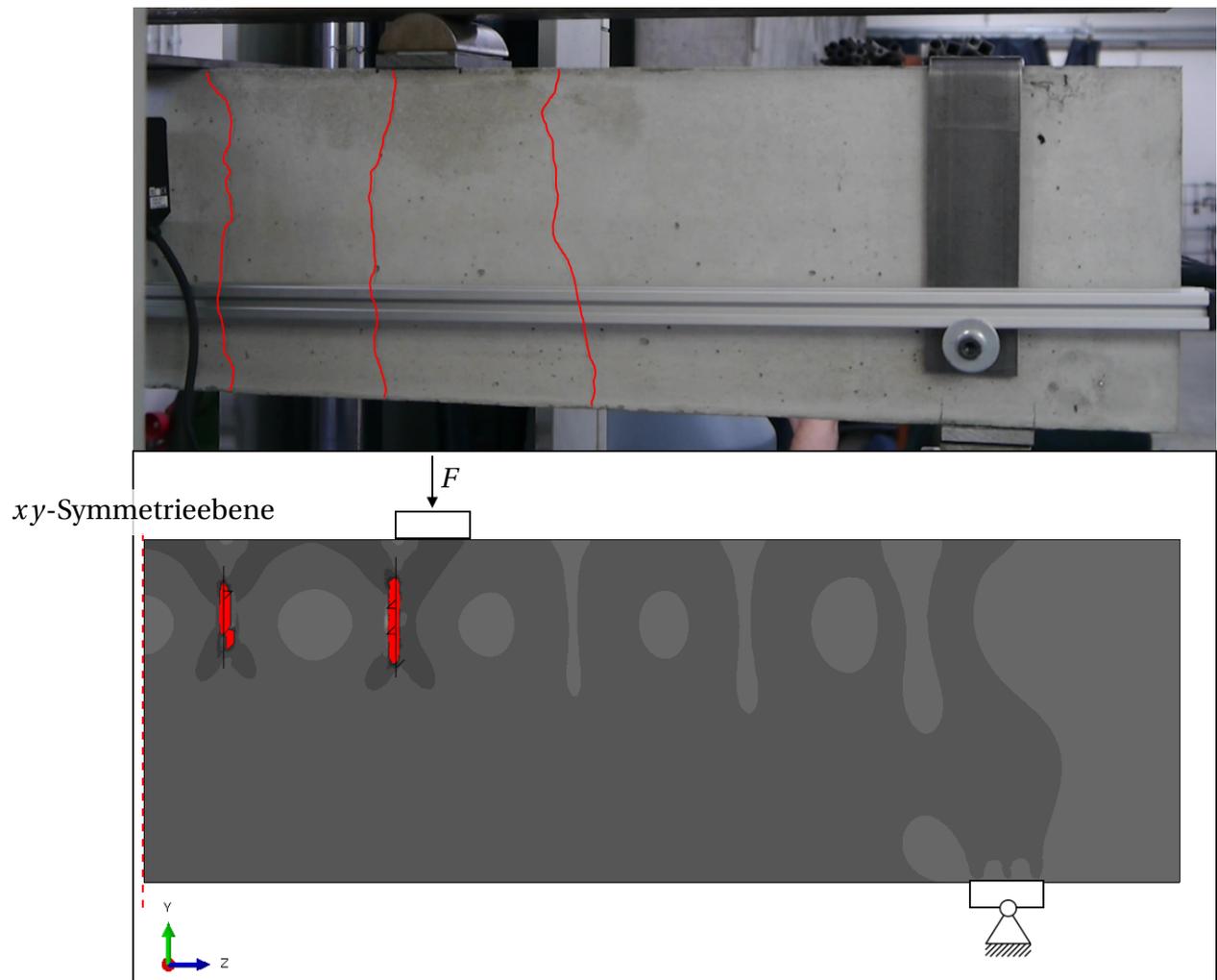


Abb. 6.29: Vorhersage der Rissposition über die FEM-Simulation möglich. Vergleich des Rissbildes aus dem Versuch bei $t = 90 \text{ s}$ und dem aus der FEM-Simulation (in Rot: Bereiche mit Grenzdehnung $\epsilon_z \geq 2 \text{ ‰}$).

6.5.2 Rissbildung im Bereich der äußeren Aktoren

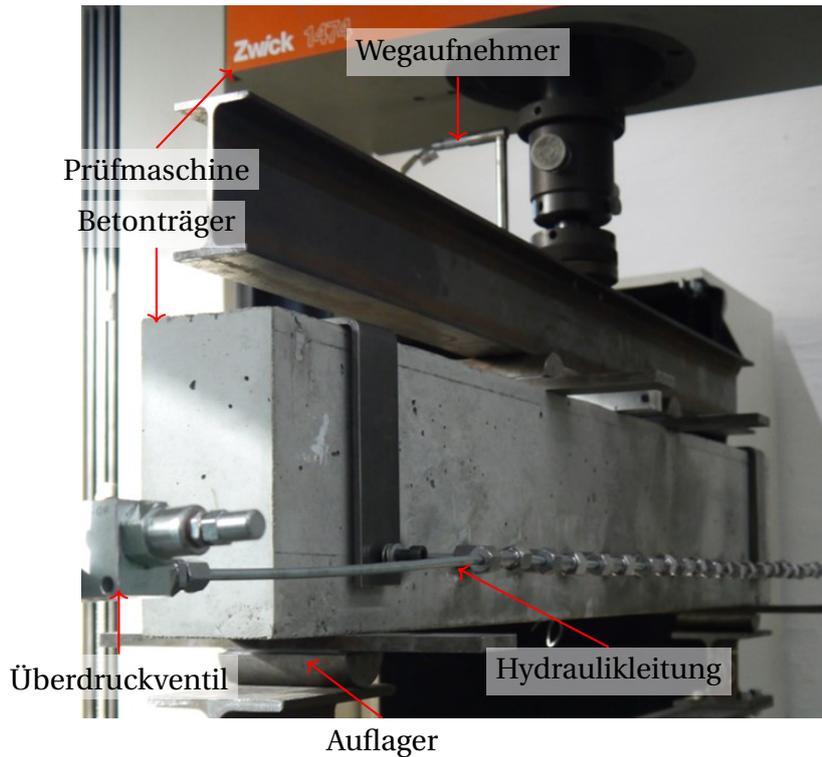


Abb. 6.30: Versuchsaufbau mit gleichem Druck in allen Aktoren des adaptiven Biegeträgers U1

Um ein weiteres Rissbild zur Überprüfung der Vorhersagen zu generieren, wird ein zusätzlicher Versuch durchgeführt, bei dem in allen Aktoren der gleiche Druck aufgebracht wird. Abbildung 6.30 zeigt den Versuchsaufbau, bei dem die Leitungen zu einem Strang reduziert werden. Alle anderen Rahmenbedingungen bleiben jedoch unverändert. Die Maschinenkraft wird bei 8 kN kraftgeregelt gehalten. Danach wird die Durchbiegung kompensiert und der Druck in den Aktoren in Schritten à 10 bar gesteigert. Eine Laststeigerung der Maschinenkraft erfolgt nicht, um bereits bei kleineren Drücken Risse zu generieren. Nach den Untersuchungen aus Kapitel 3.1 und den FEM-Simulationen wird vermutet, dass Risse zuerst an den äußeren Aktoren (1 und 10) auftreten, da das Moment aus der externen Last zu den Auflagern hin abnimmt, der hydraulische Druck jedoch in allen Aktoren gleich groß ist. Dadurch überwiegt bei der Überlagerung von M_A und M_Q das Moment aus der Aktorik in Auflagernähe deutlich. In Feldmitte heben sich beide Momente gegenseitig auf. Obwohl dieser Versuch zeigt, dass die gewünschte Verformungsmanipulation bei den prognostizierten Drücken problemlos durchgeführt werden kann, wird hierauf nur stark verkürzt eingegangen. Ziel ist die Risserzeugung zum Abgleich mit den Vorhersagen aus dem analytischen Berechnungsverfahren und den FEM-Simulationen. Die Versuchsergebnisse sind detailliert im Anhang B.4 aufgeführt.

Abbildung 6.31 zeigt den Verlauf des hydraulischen Druckes p über die Durchbiegung u_{mitte} . Im passiven Zustand erfährt der Biegeträger eine Durchbiegung von ca. 0,069 mm bei maximaler Maschinenkraft von 8 kN. Bei der ersten Drucksteigerung auf $p_A = 10$ bar ist keine Veränderung der Durchbiegung detektierbar. Bei der weiteren Erhöhung von 10 bar auf 20 bar ver-

ringert sich die Durchbiegung auf 0,062 mm. Mit der Steigerung des hydraulischen Druckes ist bei $p_A = 47,9$ bar die Durchbiegung vollständig kompensiert. Als Folge einer weiteren Steigerung des Druckes kommt es zur Verformung des Trägers entgegen seiner Eigengewichtsrichtung. Mit steigendem Druck erhöhen sich diese Verformungen weiter. Bei einer Drucksteigerung von 60 bar auf 70 bar kann eine Änderung der Durchbiegung von 0,091 mm auf $-0,248$ mm detektiert werden. Bei der nächsten Steigerung des Druckes auf 80 bar liegt die Zunahme bei 0,506 mm und erzeugt eine Verformung des Trägers von $-0,842$ mm. Die maximale Durchbiegung von $-1,05$ mm entsteht bei einem Druck von ca. 97 bar. Erste Risse werden auf Höhe der äußeren Aktoren 1 und 10 bei 60 bar sichtbar. Ab 70 bar vergrößert sich die Rissöffnung an der Balkenoberseite, wird jedoch zur Balkenunterseite hin deutlich kleiner. Zudem werden kleinere Risse auch an den benachbarten Aktoren 2 und 9 sichtbar. Mit zunehmendem Druck werden die Risse deutlich größer, sodass der Versuch bei ca. 97 bar beendet wird.

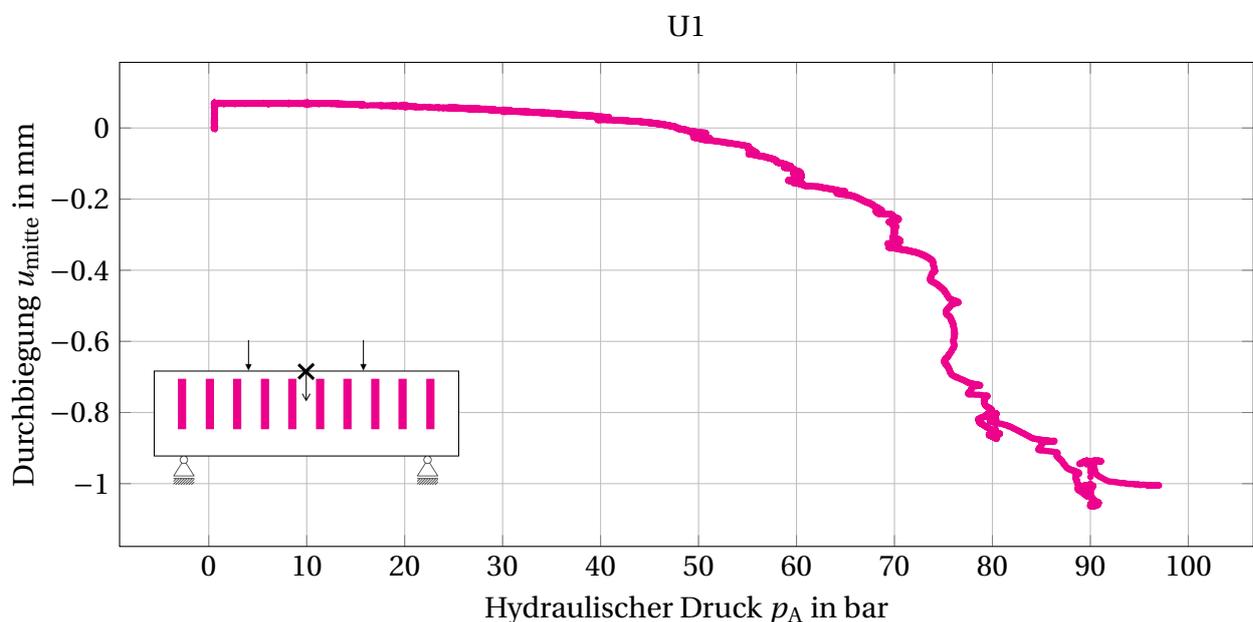


Abb. 6.31: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit des Drucks in den Aktoren des adaptiven Biegeträgers U1

Abbildung 6.32 zeigt den Biegeträger nach Versuchsende mit den erzeugten Rissen, die an Aktor 1 noch deutlich zu sehen sind. Erkennbar ist der Rissursprung an der oberen Trägerhälfte. Außerdem sind die Risse in der oberen Hälfte des Betonquerschnitts deutlich größer als in der unteren. Im unteren Bereich der Abbildung ist das Rissbild aus der Simulation zu sehen, das mit 100 bar Druck in den Aktoren erzeugt wurde. Dargestellt sind die Dehnungen entlang der Balkenlängsachse ϵ_z . In rot sind die Bereiche eingefärbt, die die Grenzdehnung von 2 ‰ überschreiten. Das Rissbild stimmt gut mit den in den Versuchen ermittelten Ergebnissen überein. Die Vorhersage der Rissverteilung kann somit zweifach verifiziert werden. Die analytische Betrachtung, die Simulation und die experimentellen Untersuchungen gleichen sich phänomenologisch.

Im Vergleich zum Biegeträger M1 mit gleichzeitiger Laststeigerung und angepasstem Druck



Abb. 6.32: Vorhersage der Rissposition über die FEM-Simulation möglich. Gute Übereinstimmung des Rissbildes aus dem Versuch: Rück- (oben) und Vorderseite (Mitte) des Biegeträgers U1 nach Versuchsende mit deutlichen Rissen am äußeren Aktor 1 und das Rissbild aus der FEM (unten) (in Rot: Bereiche mit Grenzdehnung $\epsilon_z \geq 2 \text{ ‰}$)

in den Aktoren kommt es in dieser Untersuchung früher zu Rissen (vgl. Abschnitt 6.5.1). Bei annähernd 60 bar treten die ersten Risse auf, die sich langsam vergrößern und vermehren. Bei der Untersuchung des Trägers M1 kommt es schlagartig zu mehreren simultanen Rissen, die allerdings erst ab einem Druck von ungefähr 90 bar in den mittleren Aktoren und bei einer Belastung von 12,85 kN auftreten. Da beim Biegeträger U1 die Maschinenkraft von 8 kN konstant gehalten wird, überwiegt bei dem hohem Druck von 100 bar der Anteil der Aktorik in Auflagernähe deutlich. Das hatte zur Folge, dass sich der Träger U1, anders als M1, deutlich nach oben verformt. Der Nulldurchgang der Durchbiegung des Trägers U1 liegt bei einem Druck von ca. 50 bar. Bei einem Druck von 100 bar und gleichbleibender externer Last dominiert hingegen der aktive Zustand, der die deutliche Verformung des Trägers entgegen seiner Eigengewichtsrichtung erklärt, die wiederum für die Risse im Träger verantwortlich ist. Träger M1 weist erst aufgrund seiner Risse diese Verformung auf. Ursache und Wirkung der Risse im Beton bzw. der Verformungen des Trägers sind bei den Versuchen M1 und U1 folglich vertauscht. Der Vergleich dieser beiden Versuche zeigt zudem die Vorteile einer individuellen Druckeinstellung, die der Belastung entspricht. Des Weiteren zeigt dies, wie wichtig die zeitliche Synchronisierung von Druckaufbringung und äußerer Belastung ist. Nur durch die Superposition und gegenseitige Kompensation der Zustände ist eine materialgerechte Aktuierung möglich.

6.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Vergleich mit den Simulationen

Die Versuche zeigen, dass eine gezielte Verformungsmanipulation möglich ist. Die Durchbiegungen aller untersuchten Biegeträger können in Feldmitte reduziert werden bzw. sind während der Versuche stets minimal. Die notwendigen Drücke in den Aktoren stimmen gut mit den prognostizierten aus den FEM-Simulationen bzw. der analytischen Betrachtung über die Momentengleichheit überein.

In Tabelle 6.5 sind die Ergebnisse der Durchbiegung in Feldmitte u_{mitte} zusammengefasst. Da die gemessenen Werte aus den Versuchen Schwankungen unterliegen, wird hier ein für den jeweiligen Zustand gemittelter Wert verwendet. Zum einen kann eine signifikante Durchbiegungsreduktion bei den gesteuerten Trägern erreicht werden. Beim Biegeträger S1 reduziert sich diese von 0,112 mm im passiven Zustand auf 0,009 mm im adaptiven Zustand – was einer Reduktion von 91 % entspricht. Beim Biegeträger T1 mit dem thermischen Aktor ist die Durchbiegung zeitweise vollständig kompensiert. Bei den geregelten Trägern R1 bis R4 wird die Nulllage nahezu nicht verlassen, die Restdurchbiegung ist minimal und bewegt sich im Bereich von 0,012 mm bis -0,015 mm. Zum anderen stimmen die prognostizierten Werte aus den Simulationen mit denen aus den Versuchen gut überein. Bei den kleinen Durchbiegungen erzeugen bereits geringe Unterschiede große prozentuale Abweichungen. Die Abweichungen bewegen sich deshalb in einem Bereich von 24 % beim passiven Referenzbalken und 161 % beim adaptiven Biegeträger R3. Der gesteuerte Biegeträger S1 weist im passiven Zustand eine Abweichung von 35 % auf. Im adaptiven Zustand liegt diese mit 60 % nur leicht höher. Vor allem die Biegeträger R2 bis R4, die in den Versuchen eine negative Durchbiegung aufweisen, besitzen eine hohe prozentuale Abweichung. Der Einfluss des Systemdruckes von 5 bar, der bei Versuchsbeginn anliegen muss, ist hoch. Vor Beginn der Belastung durch die Prüfmaschine verformen sich die Biegeträger deutlich entgegen der Eigengewichtsrichtung. Trotz dieser systembedingten Ungenauigkeit in der Druckjustierung wird das Aktuierungs- und Aktorikkonzept validiert. Die Abweichungen der getesteten Träger untereinander sind gering.

Tab. 6.5: Vergleich der Durchbiegung in Feldmitte u_{mitte}

	Versuch	FEM	Abweichung
Referenzbalken	0,062 mm	0,081 mm	24 %
Gesteuerter Balken S1 (passiver Zustand)	0,112 mm	0,081 mm	35 %
Gesteuerter Balken S1 (adaptiver Zustand)	0,009 mm	0,024 mm	60 %
Geregelter Balken R1	0,012 mm	0,024 mm	51 %
Geregelter Balken R2	-0,012 mm	0,024 mm	149 %
Geregelter Balken R3	-0,015 mm	0,024 mm	161 %
Geregelter Balken R4	-0,011 mm	0,024 mm	145 %

Weiterhin wird das FEM-Modell über den Vergleich der Dehnungen validiert. Tabelle 6.6 stellt die Dehnungen an der Oberseite aus den Versuchen den FEM-Simulationen gegenüber. Obwohl hier die Streuung des Materials Beton vermutlich einen großen Einfluss hat, stimmen die gemessenen und prognostizierten Werte gut überein. Deutlich ist die Reduktion der Dehnung

des gesteuerten Biegeträgers S1. Sowohl im Versuch als auch in der Simulation sind die Dehnungen im adaptiven Zustand deutlich geringer als im passiven. Die Reduktion beträgt im Versuch 36 % und in der Simulation 67 %. Das grundlegende Verhalten ist mit den Simulationen vorhersagbar. Im passiven Zustand liegt lediglich eine Abweichung von 2 % vor, die im adaptiven Zustand mit 95 % deutlich größer ist. Die Dehnungsabweichungen der Biegeträger R2 bis R4 liegen mit 20 %, 10 % bzw. 5 % in einem kleinen Bereich und validieren das FEM-Modell zusätzlich. Die Messung der Dehnungen im Versuch R1 sind aufgrund eines technischen Defektes fehlgeschlagen.

Tab. 6.6: Vergleich der Dehnungen an der Oberseite ϵ_o

	Versuch	FEM	Abweichung
Referenzbalken	-0,0049 %	-0,006 %	18 %
Gesteuerter Balken S1 (passiver Zustand)	-0,0061 %	-0,006 %	2 %
Gesteuerter Balken S1 (adaptiver Zustand)	-0,0039 %	-0,002 %	95 %
Geregelter Balken R2	-0,0024 %	-0,002 %	20 %
Geregelter Balken R3	-0,0018 %	-0,002 %	10 %
Geregelter Balken R4	-0,0019 %	-0,002 %	5 %

Die Dehnungen an der Unterseite sind in Tabelle 6.7 aufgelistet. Die Reduktion der Dehnung des Trägers S1 durch die Aktuierung in der Simulation kann im Versuch nicht nachvollzogen werden, obwohl die prozentualen Abweichungen der Ergebnisse mit 6 % im passiven Zustand und 28 % im adaptiven Zustand gering sind. Anders als an der Oberseite sind die Abweichungen an der Unterseite der geregelten Biegeträger R2 bis R4 deutlich größer. Sie liegen im Bereich zwischen 50 % und 57 %.

Tab. 6.7: Vergleich der Dehnungen an der Unterseite ϵ_u

	Versuch	FEM	Abweichung
Referenzbalken	0,0061 %	0,0062 %	2 %
Gesteuerter Balken S1 (passiver Zustand)	0,0058 %	0,0062 %	6 %
Gesteuerter Balken S1 (adaptiver Zustand)	0,0059 %	0,0046 %	28 %
Geregelter Balken R2	0,0071 %	0,0046 %	54 %
Geregelter Balken R3	0,0072 %	0,0046 %	57 %
Geregelter Balken R4	0,0069 %	0,0046 %	50 %

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das aufgestellte Aktuierungs- und Aktorikkonzept mehrfach validiert wurde und dass die Simulationen hinreichend genaue Ergebnisse liefern, um das Verhalten der adaptiven Biegeträger zu prognostizieren. Die analytischen Berechnungen, die die Drücke über die Momentengleichheit bestimmt, haben zu den angestrebten Verformungsmanipulationen geführt. Die Versuche zeigen untereinander keine nennenswerten Abweichungen und liefern reproduzierbare Ergebnisse. Eine Unschärfe ist im Vergleich der Versuche mit den Simulationsergebnissen zu erkennen, das generelle Verhalten ist aber vorhersagbar. Die Streuung der Materialparameter und die teils ungenaue Druckeinstellung in den Ventilen sind zwei wesentliche Störfaktoren.

Die Regelungsstrategie funktioniert ebenfalls, auch wenn messbare Schwankungen auftreten, die jedoch nicht als kritisch erachtet werden. Die Regelung muss wahrscheinlich weiter angepasst werden, um die störenden Wechselwirkungen zwischen Prüfmaschine und Hydraulikaggregat während der Haltezeit zu vermeiden. Hier muss ein Mittelweg aus der zu trägen Regelung aus R1 und dem zu feinen, sich aufschaukelnden Verhalten aus R2 bis R4 gefunden werden. Allerdings gilt dies nur, falls mit einer kraftgeregelten Belastung gearbeitet wird (in Realität kommt das höchstwahrscheinlich nicht vor).

Die beiden prognostizierten Rissbilder passen ebenfalls sehr gut und bestätigen die Vorhersagen der vorangegangenen Kapitel. Beide bewusst hervorgerufenen Rissverteilungen konnten vorab per FEM-Simulation ermittelt werden. Obwohl die hydraulischen Drücke in Träger M1 mit ca. 180 bar deutlich höher sind als in Träger U1 mit 97 bar, sind die Risse im Träger U1 deutlich größer. Dies liegt erstens an der im Verhältnis kleinen externen Last, die konstant bei 8 kN gehalten wird und zweitens ein Biegemoment hervorruft, das zu den Auflagern hin abnimmt. Die FEM-Ergebnisse spiegeln das wider, in denen beim Träger U1 deutlich größere Bereiche die Grenzdehnung überschreiten als beim Träger M1. Alle Messungen von Kraft, Druck, Dehnung und Weg liefern Ergebnisse, die sich nicht widersprechen und jeweils die Korrektheit der Messungen belegen.

Alle Phänomene konnten qualitativ bestätigt werden. Die ermittelten Durchbiegungen und Dehnungen weichen zum Teil noch ab, was darauf hindeutet, dass das FEM-Modell noch nicht in der Lage ist, die exakten Werte vorauszusagen. In dieser Arbeit sind die Ergebnisse jedoch als hinreichend genau zu bewerten, da das Adaption- und Aktorikkonzept validiert werden sollte. Das generelle Verhalten der adaptiven Biegeträger im passiven und adaptiven Zustand ist vorhersagbar und alle Prognosen stimmen mit den Versuchen überein.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

Adaptive Biegeträger können auf externe Lasten reagieren und ihre Durchbiegung dabei aktiv verringern. Dadurch können zulässige Grenzverformungen nicht wie üblich durch eine höhere Querschnittssteifigkeit (also zusätzliche Masse), sondern über das Zusammenspiel aus Aktorik, Regelungseinheit und Sensorik eingehalten werden. Dies stellt einen Vorteil dar, da so bei der Dimensionierung von adaptiven Biegeträgern die Durchbiegungsbegrenzung eine untergeordnete Rolle spielen kann. Das Steifigkeitsproblem wird in ein Festigkeitsproblem überführt, wodurch das Material stärker ausgenutzt werden kann. Insbesondere Biegeträger weisen aufgrund ihres Lastabtrages eine Durchbiegungsproblematik und dem Leichtbau widersprechende Spannungsverteilung über den Querschnitt auf. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Nachweis, dass über integrierte Aktoren die Durchbiegung vollständig kompensiert werden kann, erstmalig erbracht.

Das analytische Berechnungsverfahren zur Bestimmung der notwendigen Drücke über die Momentengleichheit liefert gute Ergebnisse. Die vorgestellten adaptiven Biegeträger heben erstmalig die Trennung zwischen Aktorik und Tragwerk auf. Die individuelle Einstellung der Drücke in den Aktoren erlaubt eine abschnittsweise und dadurch flexible Manipulation des Lastabtrages und somit eine optimale Reaktion auf eine große Bandbreite von unterschiedlichen Lastfällen. Auch die Berechnung der Aktordrücke entlang der Trägerlängsachse ist mit dem analytischen Berechnungsverfahren möglich.

Die durchgeführten Simulationen zeigen die ausreichende Genauigkeit des Aktuierungskonzeptes. Sie weisen zudem das Potenzial der Aktuierung im Hinblick auf Spannungen und Verformungen nach. Gerade die Biegezugspannungen in Balkenlängsrichtung am unteren Querschnittsrand sind durch die Aktuierung signifikant geringer. Die Superposition von passivem und aktivem Verformungszustand führt zu den gewünschten Effekten im adaptiven Zustand, in dem die Durchbiegung vollständig kompensiert ist.

Es werden zwei neue Aktorikkonzepte aufgestellt und erprobt. Die thermische Expansion stellt eine einfach zu realisierende, dezentrale Aktuierungsmöglichkeit dar. Mit dieser kann auf Lasten mit geringer Auftretensgeschwindigkeit gut reagiert werden. Das zweite Aktuierungskonzept, das mittels Hydraulikaggregat den Druck erzeugt, kann in Echtzeit aktuieren. Die Aufstellung eines Regelkreises mithilfe des Hydraulikaggregates funktioniert und bewirkt, dass die Biegeträger ihre Ausgangslage zu jedem Zeitpunkt nur minimal verlassen. In den experimentellen Untersuchungen können das analytische Berechnungsverfahren und die Simulationsmodelle validiert werden. Die Überprüfung der Rissbildung im Beton kann ebenfalls die Vorhersagen der Simulationen mit dem nichtlinearen Materialmodell bestätigen. Darüber hinaus zeigen sie, dass nach einer bewussten Überschreitung der notwendigen Drücke und einer deutlichen Rissbildung nicht von einem Versagen gesprochen werden kann, da die Risse nach dem

Aktuierungsvorgang wieder überdrückt werden. Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Simulationen und Versuchen zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung. Aufgrund der sehr kleinen Verformungen im adaptiven Zustand kommt es jedoch zu scheinbar großen prozentualen Abweichungen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen in dieser Arbeit bieten die Grundlage für eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten im Bauwesen mit revolutionärem Charakter. Die Kompensation der Durchbiegung ist in nahezu jedem biegebeanspruchten Tragwerk sinnvoll und erlaubt eine neue Form der Bemessung mit signifikanten Einsparungen von Ressourcen und grauer Energie. Durch die Bauform der Aktoren ist die Volumenzunahme während des Aktuierungsvorgangs minimal, das erlaubt eine energiearme und gleichzeitig schnelle Reaktion auf externe Lasten. Zusätzlich können mit einem Hydraulikaggregat, wie in dieser Arbeit verwendet, mehrere Bauteile gleichzeitig aktuiert werden, sodass der Mehreinsatz an Material für das Aggregat und Energie für den Aktuierungsvorgang nicht ins Gewicht fallen. Die geringen Volumenströme ermöglichen eine Reaktion in Echtzeit, die eine aktive Schwingungsdämpfung erlauben. Dadurch erweitert sich das Anwendungsfeld zusätzlich auf alle schwingungsanfälligen biegebeanspruchten Tragwerke, wie sie beispielsweise weitspannende dünne Geschossdecken oder Brücken darstellen.

Bei Brückentragwerken kann das vorgestellte Aktuierungskonzept mehrere Probleme von enormer gesamtgesellschaftlicher Relevanz lösen. Neben der Möglichkeit Brücken mit geringerem Eigengewicht zu erstellen, kann die Schwingungsreduktion die Lebenszeit von beispielsweise Autobahnbrücken signifikant steigern. Allein in Deutschland wird der derzeitige Investitionsbedarf für die Sanierungen bzw. den Neubau von Straßenbrücken auf 17 Milliarden Euro geschätzt [50]. Für Eisenbahnbrücken für Hochgeschwindigkeitszüge, bei denen die Anforderungen an die zulässigen Verformungen noch strenger sind, können diese bei Überfahrten aktiv über die Aktorik reduziert werden.

7.2 Anregungen für weitere Arbeiten

Die Untersuchungen fanden an einem einfachen Einfeldträger mit statisch bestimmter Lagerung statt. Ausgehend von den theoretischen Erkenntnissen zur statisch unbestimmten Lagerung mit behinderter Längsausdehnung des Trägers liegt die Vermutung nahe, dass das Tragverhalten noch weiter verbessert werden kann. Eine Erweiterung der Simulationen und experimentellen Untersuchungen in diesem Bereich bietet sich deshalb an, vor allem in Kombination mit einer erweiterten Sensorik, die bei einer gezwängten Auslenkung in Trägerlängsrichtung die Zwangskräfte misst.

Durch eine Anpassung der Position der Aktoren, sodass die Resultierende der Aktorkraft auf Höhe der Schwereachse des Querschnitts liegt, entstehen aus den Aktoren keine Biegemomente und es können ausschließlich Normalkräfte induziert werden. Dadurch kann beispielsweise bei Stützen eine Längung erreicht werden.

Da der Großteil der Tragwerksmasse in den Geschossdecken liegt, ist die Erweiterung der Untersuchungen von eindimensionalen auf flächige Tragwerke, die auf Biegung beansprucht werden, naheliegend. Die Untersuchung von adaptiven flächigen Bauteilen bedarf einer Erweiterung des Aktuierungs- und Aktorikkonzeptes, da der Lastabtrag bei zweiachsigen gespannten

Platten mehraxial erfolgt. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bieten eine gute Ausgangsbasis hierfür.

Die Durchbiegungskompensation erlaubt eine neue Art der Auslegung, bei der ausschließlich die Spannungen betrachtet werden können. Es entsteht eine Einsparmöglichkeit durch Reduktion des Querschnitts bei gleicher Tragfähigkeit oder eine gesteigerte Tragfähigkeit bei gleichbleibendem Querschnitt. Das Potenzial zur Einsparung wurde in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt. Es ist lohnenswert die Frage, wie hoch die Material- und Energieeinsparungen eines realen Tragwerkselements sind, weiter zu verfolgen.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Adeli und A. Saleh. *Control, optimization, and smart structures: High-performance bridges and buildings of the future / Hojjat Adeli, Amgad Saleh*. New York und Chichester: John Wiley, 1999.
- [2] A.-J.-C. Barré de Saint-Venant. „Mémoire sur la torsion des prismes, avec des considérations sur leur flexion ainsi que sur l'équilibre intérieur des solides élastiques en général, et des formules pratiques pour le calcul de leur résistance à divers efforts s'exerçant simultanément“. In: *[Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences ; 14]* (1856).
- [3] T. Berger, P. Prasser und H. G. Reinke. „Einsparung von Grauer Energie bei Hochhäusern“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108.6 (2013), S. 395–403. doi: 10.1002/best.201300019.
- [4] F. Bernhard, Hrsg. *Technische Temperaturmessung: Physikalische und messtechnische Grundlagen, Sensoren und Messverfahren, Messfehler und Kalibrierung ; Handbuch für Forschung und Entwicklung, Anwendungspraxis und Studium ; mit 297 Tabellen und 202 Berechnungsbeispielen*. Berlin: Springer, 2004.
- [5] H. Bernstein. *Messelektronik und Sensoren: Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, Imprint und Springer Vieweg, 2014.
- [6] A. Bleicher. „Aktive Schwingungskontrolle einer Spannbandbrücke mit pneumatischen Aktuatoren“. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2011.
- [7] P. Block u. a. *Beyond bending : reimaging compression shells: DETAIL Special*. First edition. Munich: Edition DETAIL, 2017.
- [8] T. Burghardt u. a. „Adaptive Beams with Integrated Thermal Actuator“. In: *ACTUATOR; International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021*. 2021, S. 1–3.
- [9] S. Y. Chu, T. T. Soong und A. M. Reinhorn. *Active, hybrid, and semi-active structural control: A design and implementation handbook / S.Y. Chu, T.T. Soong, A.M. Reinhorn*. Chichester: John Wiley, 2005.
- [10] R. L. Clark, W. R. Saunders und G. P. Gibbs. *Adaptive structures: Dynamics and control / Robert L. Clark, William R. Saunders, Gary P. Gibbs*. New York und Chichester: Wiley-Interscience, 1998.
- [11] Dassault Systèmes Simulia Corp. *Abaqus Theory Manual*. Hrsg. von Dassault Systèmes Simulia Corp. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence, USA, 2011. URL: http://130.149.89.49:2080/v6.11/pdf_books/THEORY.pdf (besucht am 01. 10. 2020).

- [12] Dassault Systèmes Simulia Corp. *Abaqus documentation 2017*. Hrsg. von Dassault Systèmes Simulia Corp. Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence, USA, 2017. URL: http://caedoc.hirs.de/abaqus/Documentation/docs/v2017/English/DSSIMULIA_Established.htm (besucht am 24. 09. 2020).
- [13] *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. [Nairobi]: United Nations environment programme, 2011.
- [14] A. Demir u. a. „EFFECT OF VISCOSITY P ARAMETER ON THE NUMERICAL SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE DEEP BEAM BEHAVIOR“. In: *The Online Journal of Science and Technology* 8.3 (2018), S. 50–56.
- [15] *DIN EN 12350-5:2019-09, Prüfung von Frischbeton_ - Teil_5: Ausbreitmass; Deutsche Fassung EN_12350-5:2019*. Berlin. DOI: 10.31030/3045714.
- [16] *DIN EN 12390-13:2014-06, Prüfung von Festbeton_ - Teil_13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN_12390-13:2013*. Berlin. DOI: 10.31030/2017410.
- [17] *DIN EN 12390-3:2019-10, Prüfung von Festbeton_ - Teil_3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN_12390-3:2019*. Berlin. DOI: 10.31030/3045735.
- [18] *DIN EN 12390-5, Prüfung von Festbeton. Teil 5, Biegezugfestigkeit von Probekörpern: = Testing hardened concrete. Part 5, Flexural strength of test specimens*. Deutsche Norm. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019.
- [19] *DIN EN 1991-1-3:2010-12, Eurocode_1: Einwirkungen auf Tragwerke_ - Teil_1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten; Deutsche Fassung EN_1991-1-3:2003_ + AC:2009*. DOI: 10.31030/1722664. URL: <http://dx.doi.org/10.31030/1722664>.
- [20] *DIN EN 1991-1-4:2010-12, Eurocode_1: Einwirkungen auf Tragwerke_ - Teil_1-4: Allgemeine Einwirkungen_ - Windlasten; Deutsche Fassung EN_1991-1-4:2005_ + A1:2010_ + AC:2010*. DOI: 10.31030/1625598. URL: <http://dx.doi.org/10.31030/1625598>.
- [21] *DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode_2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken_ - Teil_1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN_1992-1-1:2004_ + AC:2010*. DOI: 10.31030/1723945. URL: <http://dx.doi.org/10.31030/1723945>.
- [22] *DIN EN 1998-1/NA:2011-01, Nationaler Anhang_ - National festgelegte Parameter_ - Eurocode_8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben_ - Teil_1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau*. DOI: 10.31030/1738038. URL: <http://dx.doi.org/10.31030/1738038>.
- [23] H. Domke u. a. „Aktive Verformungskontrolle von Bauwerken. Active deformation control of buildings“. In: *Bauingenieur* v.56.11 (1981), S. 405–412.
- [24] H. Domke. *Aktive Tragwerke*. Opladen [Germany]: Westdeutscher Verlag, 1992.
- [25] M. J. Dykstra und L. E. Reuss, Hrsg. *Biological electron microscopy: Theory, techniques, and troubleshooting*. 2nd edition. [Place of publication not identified]: Springer Science+Business Media, LLC, 2003. DOI: 10.1007/978-1-4419-9244-4.

- [26] European Commission. *Taking action on the TOTAL impact of the construction sector*. Hrsg. von Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2019. DOI: 10.2779/458570. URL: [https://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/LEVEL\(S\)%20CONFERENCE%20REPORT.pdf](https://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/LEVEL(S)%20CONFERENCE%20REPORT.pdf) (besucht am 30. 10. 2019).
- [27] N. R. Fisco und H. Adeli. „Smart structures: Part I—Active and semi-active control“. In: *Scientia Iranica* 18.3 (2011), S. 275–284. DOI: 10.1016/j.scient.2011.05.034. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.034>.
- [28] N. R. Fisco und H. Adeli. „Smart structures: Part II — Hybrid control systems and control strategies“. In: *Scientia Iranica* 18.3 (2011), S. 285–295. DOI: 10.1016/j.scient.2011.05.035. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.035>.
- [29] Frank Daerden und Dirk Lefeber. „Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation“. In: *European journal of Mechanical and Environmental Engineering* 47 (2000), S. 10–21.
- [30] P. Friedlingstein u. a. „Global Carbon Budget 2019“. In: *Earth System Science Data* 11.4 (2019), S. 1783–1838. DOI: 10.5194/essd-11-1783-2019.
- [31] L. Gödde. „Numerische Simulation und Bemessung von Flächentragwerken aus Stahlfaserbeton sowie stahlfaserverstärktem Stahl- und Spannbeton“. Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2013. Aachen: Shaker, 2013.
- [32] H.-W. Grollius. *Grundlagen der Hydraulik: Mit 8 Tafeln, 4 Tabellen und 15 Übungsaufgaben*. 7., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2015.
- [33] D. Gross u. a. *Technische Mechanik 2: Elastostatik*. 12., aktual. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Vieweg, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-40966-0. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40966-0>.
- [34] D. Gross u. a. *Technische Mechanik 1: Statik*. 13., aktualisierte Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-49472-1. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49472-1>.
- [35] W. Hensel. *Pflanzen in Aktion: Krümmen, klappen, schleudern*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl., 1993.
- [36] E. Hering und G. Schönfelder. *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*. 2nd ed. Wiesbaden: Vieweg, 2018. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5231087>.
- [37] D. HeSS. *Allgemeine Botanik*. 1. Aufl. Bd. 2487. UTB basics. Stuttgart: Ulmer, 2004. URL: <http://www.utb-studi-e-book.de/9783838524870>.
- [38] D. HeSS. *Pflanzenphysiologie*. 11., komplett neu bearb. und neu gestaltete Aufl. Bd. 8393. UTB Botanik, Biologie, Agrarwissenschaften. Stuttgart: Ulmer, 2008. URL: <http://www.utb-studi-e-book.de/9783838583938>.
- [39] G. W. Housner u. a. „Structural Control: Past, Present, and Future“. In: *Journal of Engineering Mechanics* 123.9 (1997), S. 897–971. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:9(897).
- [40] F. Ilievski u. a. „Soft robotics for chemists“. In: *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 50.8 (2011), S. 1890–1895. DOI: 10.1002/anie.201006464.

- [41] R. Isermann. *Mechatronische Systeme: Grundlagen*. 2., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-32512-3. URL: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10218006>.
- [42] James Mitchel Crow. „The concrete conundrum“. In: *Chemistry World* (2008), S. 62–68. URL: https://www.rsc.org/images/Construction_tcm18-114530.pdf (besucht am 27. 08. 2019).
- [43] H. Janocha. *Actuators: Basics and Applications*. Berlin und Heidelberg: Springer, 2004. DOI: 10.1007/978-3-662-05587-8.
- [44] H. Janocha. *Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications*. 2. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, 2007. URL: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10210755>.
- [45] H. Janocha. *Unkonventionelle Aktoren: Eine Einführung*. München: Oldenbourg, 2010. DOI: 10.1524/9783486711455. URL: <http://www.oldenbourg-link.com/isbn/9783486589153>.
- [46] S. Keil. *Dehnungsmessstreifen*. 2., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg, 2017.
- [47] C. Kelleter u. a. „ACTUATION CONCEPTS FOR STRUCTURAL CONCRETE ELEMENTS UNDER BENDING STRESS“. In: *Proceedings of the 6th. European Conference on Computational Mechanics (Solids, Structures and Coupled Problems) ECCM 6*. Hrsg. von International Center for Numerical Methods in Engineerin. Spain: Artes Gráficas Torres, S.L., Huelva 9 , 08940 Cornellà de Llobregat, 2018, S. 127–137. URL: <http://www.eccm-ecfd2018.org/frontal/docs/Ebook-Glasgow-2018-ECCM-VI-ECFD-VII.pdf>.
- [48] C. Kelleter u. a. „Actuation of structural concrete elements under bending stress with integrated fluidic actuators“. In: *Advances in engineering materials, structures and systems*. Hrsg. von A. Zingoni. Boca Raton: CRC Press, 2019, S. 1005–1010.
- [49] C. Kelleter u. a. „Adaptive Concrete Beams Equipped With Integrated Fluidic Actuators“. In: *Frontiers in Built Environment* 6 (2020). DOI: 10.3389/fbuil.2020.00091.
- [50] *Kommunale Strassenbrücken - Zustand und Erneuerungsbedarf*. Bd. Bd. 2013,6. Difu-Impulse. Berlin: Difu, 2013.
- [51] S. Korkmaz. „A review of active structural control: Challenges for engineering informatics“. In: *Computers & Structures* 89.23-24 (2011), S. 2113–2132. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.07.010.
- [52] F. Krausmann u. a. „Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century“. In: *Ecological Economics* 68.10 (2009), S. 2696–2705. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.05.007.
- [53] G. Lang. *Histotechnik: Praxislehrbuch für die biomedizinische Analytik*. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wien und New York: Springer, 2013.
- [54] J. Lee und G. L. Fenves. „Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures“. In: *Journal of Engineering Mechanics* 124.8 (1998), S. 892–900. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281998%29124%3A8%28892%29> (besucht am 14. 09. 2020).

- [55] J. Lubliner u. a. „A plastic-damage model for concrete“. In: *International Journal of Solids and Structures* 25.3 (1989), S. 299–326. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- [56] J. Lubliner. *Plasticity Theory*. Dover Books on Engineering. Newburyport: Dover Publications, 2013. URL: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1897359>.
- [57] P. Mark. *Zweiachsig durch Biegung und Querkräfte beanspruchte Stahlbetonträger: Zugl.: Bochum, Univ., Habil.-Schrift, 2006*. Bd. H. 2006,3. Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau. Aachen: Shaker, 2006.
- [58] C. Mattheck. *Design in der Natur: Der Baum als Lehrmeister*. 4., überarb. und erw. Neuaufl. Bd. Band 1. Rombach Wissenschaften Reihe Ökologie. Freiburg im Breisgau: Rombach, 2006. URL: http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2790146&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- [59] D. Meschede. *Gerthsen Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. DOI: 10.1007/978-3-662-45977-5.
- [60] J. D. Milliman und J. P. M. Syvitski. „Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers“. In: *The Journal of Geology* 100.5 (1992), S. 525–544. DOI: 10.1086/629606.
- [61] R. v. Mises. „On Saint Venant's principle“. In: *Bulletin of the American Mathematical Society* 51.8 (1945), S. 555–563. DOI: 10.1090/S0002-9904-1945-08394-3.
- [62] B. Mosadegh u. a. „Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly“. In: *Advanced Functional Materials* 24.15 (2014), S. 2163–2170. DOI: 10.1002/adfm.201303288. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.201303288>.
- [63] S. Neuhäuser. „Untersuchungen zur Homogenisierung von Spannungsfeldern bei adaptiven Schalentragwerken mittels Auflagerverschiebung“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2014.
- [64] T. Noack, J. Ruth und U. Mueller. *Adaptive Hybrid Structures*. Rotterdam(NL): in-house publishing, 2006.
- [65] A. Öchsner. *Theorie der Balkenbiegung: Einführung und Modellierung der statischen Verformung und Beanspruchung / Andreas Öchsner. essentials*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [66] S. Oller u. a. „Finite element nonlinear analysis of concrete structures using a “plastic-damage model”“. In: *Engineering Fracture Mechanics* 35.1-3 (1990), S. 219–231. DOI: 10.1016/0013-7944(90)90200-Z.
- [67] T. A. Osswald, E. Baur und S. Brinkmann. *International plastics handbook: The resource for plastics engineers*. 4. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2006. DOI: 10.3139/9783446407923. URL: http://hawk-hhg.ciando.com/shop/book/index.cfm/fuseaction/show_book/bok_id/6773.
- [68] P. Pacheco u. a. „Automation robustness of scaffolding systems strengthened with organic prestressing“. In: *Automation in Construction* 19.1 (2010), S. 1–10. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.09.001.
- [69] Pacheco, Pedro Alvares Ribeiro do Carmo und Adão da Fonseca, António Manuel. „Organic Prestressing“. In: *Journal of Structural Engineering* 128.3 (2002), S. 400–405. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:3(400).

- [70] S. Poppinga, T. Masselter und T. Speck. „Faster than their prey: new insights into the rapid movements of active carnivorous plants traps“. In: *BioEssays : news and reviews in molecular, cellular and developmental biology* 35.7 (2013). DOI: 10.1002/bies.201200175. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23613360/>.
- [71] K. Reif, Hrsg. *Sensoren im Kraftfahrzeug*. 3. Auflage. Bosch Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. DOI: 10.1007/978-3-658-11211-0.
- [72] Robert D. Allen. „Mechanism of the Seismonastic Reaction in *Mimosa pudica*“. In: *Plant Physiology* 44.8 (1969), S. 1101–1107. DOI: 10.1104/pp.44.8.1101. URL: <http://www.plantphysiol.org/content/44/8/1101>.
- [73] W. Roddeck. *Einführung in die Mechatronik*. 6th ed. 2019. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden und Springer Vieweg, 2019.
- [74] R. Sachse u. a. „Snapping mechanics of the Venus flytrap (*Dionaea muscipula*)“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117.27 (2020), S. 16035–16042. DOI: 10.1073/pnas.2002707117.
- [75] D. Sadava u. a. *Purves Biologie*. Tenth edition. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2019.
- [76] M. Sakamoto, N. Koshika und T. Kobori. „Development and applications of structural control systems - Active-passive composite tuned mass damper (Entwicklung und Anwendung von Tragwerkskontrollsystemen - aktiv-passive Schwingungstilger)“. In: *Stahlbau* 69.6 (2000), S. 455–463. DOI: 10.1002/stab.200001470. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/stab.200001470>.
- [77] Schlegl u. a. „Integration of LCA in the Planning Phases of Adaptive Buildings“. In: *Sustainability* 11.16 (2019), S. 4299. DOI: 10.3390/su11164299.
- [78] K.-J. Schneider. *Schneider - Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen*. 24. Auflage. Köln: Reguvis, 2020.
- [79] M. Schnellenbach-Held u. a. „Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy - Regelungssystem“. In: *Bauingenieur* 89.2 (2014), S. 57–66. URL: <http://www.irb.fraunhofer.de/cgi-bin/lis.pl?id=2014029003166>.
- [80] L. C. T. Scorza und M. C. Dornelas. „Plants on the move: towards common mechanisms governing mechanically-induced plant movements“. In: *Plant signaling & behavior* 6.12 (2011), S. 1979–1986. DOI: 10.4161/psb.6.12.18192.
- [81] K. Scrivener, V. John und E. Gartner. *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry*. 2016.
- [82] G. Senatore. „Adaptive Building Structures“. Dissertation. London: University College London, 2016.
- [83] G. Senatore, P. Duffour und P. Winslow. „Synthesis of minimum energy adaptive structures“. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 60.3 (2019), S. 849–877. DOI: 10.1007/s00158-019-02224-8.
- [84] G. Senatore u. a. „Shape control and whole-life energy assessment of an ‘infinitely stiff’ prototype adaptive structure“. In: *Smart Materials and Structures* 27.1 (2018), S. 015022. DOI: 10.1088/1361-665X/aa8cb8.

- [85] W. Sobek. „Ultraleichtbau“. In: *Stahlbau* 83.11 (2014), S. 784–789. doi: 10.1002/stab.201410211.
- [86] W. Sobek. „Ultra-lightweight construction“. In: *International Journal of Space Structures* 31.1 (2016), S. 74–80. doi: 10.1177/0266351116643246.
- [87] W. Sobek u. a. „Ultralightweight Structures“. In: *Proceedings of IASS Annual Symposia 2013.6* (2013), S. 1–9. URL: <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2013/00002013/00000006/art00014>.
- [88] T. T. Soong und B. F. Spencer. „Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice“. In: *Engineering Structures* 24.3 (2002), S. 243–259. doi: 10.1016/s0141-0296(01)00092-x. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00092-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00092-X).
- [89] B. F. Spencer und S. Nagarajaiah. „State of the Art of Structural Control“. In: *Journal of Structural Engineering* 129.7 (2003), S. 845–856. doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2003)129:7(845). URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(845\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845)).
- [90] C. Spura. *Einführung in die Balkentheorie nach Timoshenko und Euler-Bernoulli*. essentials. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-25216-8. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-25216-8>.
- [91] C. Spura. *Stereostatik: Nach fest kommt ab*. Bd. ein etwas anderes Lehrbuch / Christian Spura ; 2. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [92] Statistisches Bundesamt. *Umwelt Abfallbilanz: (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen): 2018*. Hrsg. von Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 1. Juli 2020. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf;jsessionid=6238BA1892BDC6E60DBF36AB87ACB9F0.internet742?__blob=publicationFile (besucht am 02. 02. 2021).
- [93] S. Steffen u. a. „Using influence matrices as a design and analysis tool for adaptive truss and beam structures“. In: *Frontiers in Built Environment* 6 (2020). doi: 10.3389/fbuil.2020.00083.
- [94] J. K. Steinberger, F. Krausmann und N. Eisenmenger. „Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis“. In: *Ecological Economics* 69.5 (2010), S. 1148–1158. doi: 10.1016/j.ecolecon.2009.12.009.
- [95] E. Strasburger u. a. *Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften*. 37., vollst. überarb. u. akt. Aufl. Berlin: Springer Spektrum, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-54435-4.
- [96] P. Teuffel. „Entwerfen adaptiver Strukturen: Lastpfadmanagement zur Optimierung tragender Leichtbaustrukturen“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2004.
- [97] D. Trivedi u. a. „Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research“. In: *Applied Bionics and Biomechanics* 5.3 (2008), S. 99–117. doi: 10.1080/11762320802557865. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/11762320802557865>.
- [98] United Nations Environment Programme. *Sand, rarer than one thinks: UNEP global environmental alert service: March, 2014*. Hrsg. von United Nations Environment Programme. 2014. URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11822/8665>.

- [99] Ursula von der Leyen. *Presseerklärung der Präsidentin von der Leyen zum neuen Europäischen Bauhaus: 14.10.2020*. Brüssel, 2020. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/statement_20_1902 (besucht am 21. 12. 2020).
- [100] A. Verl u. a., Hrsg. *Soft robotics: Transferring theory to application*. Berlin: Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-662-44506-8. URL: http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/1870306.
- [101] S. Weidner, S. Steffen und W. Sobek. „The Integration of Adaptive Elements into High-Rise Structures“. In: *International Journal of High-Rise Buildings* 8.2 (2019), S. 95–100. URL: <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2019.8.2.95>.
- [102] D. Will u. a. *Hydraulik: Grundlagen, Komponenten, Schaltungen*. 4., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-79535-3.
- [103] *World Population Prospects 2019: Highlights*. Statistical Papers - United Nations (Ser. A), Population and Vital Statistics Report. New York: United Nations, 2019.
- [104] J. Yao. „Concept of structural Control“. In: *Journal of The Structural Division* 98 (7) (1972), S. 1567–1574.
- [105] K. Zilch und G. Zehetmaier. *Bemessung im konstruktiven Betonbau: Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)*. 2., neu bearb. u. erw. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 2010.
- [106] U. P. Zimmer u. a. *Handbuch der Betonprüfung: Prüfanleitungen und Beispiele*. 6. Auflage. Edition beton. Erkrath: Verlag Bau+Technik, 2013.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung einer Zelle und deren Veränderung bei Druckzunahme (oben) und Druckabnahme (unten) aus [70] (nach [80])	6
2.2	Turgorbewegung der <i>Mimosa pudica</i> im ungereizten und gereizten Zustand (aus [95])	7
2.3	Regelkreis eines adaptiven Tragwerks nach [104] (aus [96])	8
2.4	Schematische Einwirkungsdauer unterschiedlicher Lasten im Bauwesen (aus [105])	10
2.5	Prinzip der Superposition bei adaptiven Biegeträgern	11
2.6	Prinzip der Zustandsüberlagerung bei adaptiven Biegeträgern mittels integrierter fluidischer Aktoren (nach [49])	13
3.1	Schnitt durch einen integrierten Aktor mit der resultierenden Kraft F_A und dem Moment M_A	16
3.2	Normalkräftepaar, das durch einen Aktor erzeugt wird, und der dazugehörige Normalkraftverlauf für einen statisch bestimmt gelagerten Biegeträger	17
3.3	Normalkräftepaar, das durch einen Aktor erzeugt wird, und der dazugehörige Normalkraftverlauf für einen statisch unbestimmt gelagerten Biegeträger	17
3.4	Momentenpaar, das durch einen Aktor erzeugt wird, und der dazugehörige Momentenverlauf für einen statisch bestimmt gelagerten Biegeträger	17
3.5	Momentenpaar M_A , das durch einen Aktor erzeugt wird, und die dazugehörige Biegelinie	18
3.6	Streckenlast q , die ein Moment erzeugt, das dem Moment aus dem Aktor entgegenwirkt, und die dazugehörige Biegelinie	18
3.7	Aufgebrachtes Momentenpaar M_A und Streckenlast q mit den Biegelinien für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii), und 8 iii)	19
3.8	Aufgebrachtes Momentenpaar M_A (links) und Streckenlast q (rechts) mit den entsprechenden Momentenverläufen	20
3.9	Aufgebrachtes Momentenpaar M_A und Streckenlast q mit den theoretischen Momentenverläufen für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii), und 8 iii)	21
3.10	Statisch bestimmt gelagerter Biegeträger mit 10 Aktoren und dazugehöriger Normalkraftverlauf	22
3.11	Statisch unbestimmt gelagerter Biegeträger mit 10 Aktoren und dazugehöriger Normalkraftverlauf	22
3.12	Statisch bestimmt gelagerter Biegeträger mit 10 Aktoren und dazugehöriger Momentenverlauf	23
3.13	Zehn Momentenpaare M_A , die durch zehn Aktoren erzeugt werden, und die dazugehörige Biegelinie	23
3.14	Zehn aufgebrachte Momentenpaare M_A und Streckenlast q mit den Biegelinien für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii) und 8 iii)	24

3.15 Zehn aufgebrachte Momentenpaare M_A und Streckenlast q mit den theoretischen Momentenverläufen für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii) und 8 iii)	25
3.16 Zehn im Betrag angepasste Momentenpaare $M_{A,i}$ mit dem theoretischen Momentenverlauf (links) und Streckenlast q mit Momentenverlauf (rechts)	27
3.17 Zehn im Betrag angepasste Momentenpaare $M_{A,i}$ und die Biegelinie (links) und Streckenlast q mit Biegelinie (rechts)	27
3.18 Zehn aufgebrachte Momentenpaare $M_{A,i}$ und Streckenlast q mit den theoretischen Momentenverläufen für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii), und 8 iii)	28
3.19 Zehn aufgebrachte Momentenpaare $M_{A,i}$ und Streckenlast q mit den Biegelinien für $\frac{M_A}{M_q}$ von 0,8 i), 4 ii), und 8 iii)	28
3.20 Zehn aufgebrachte Momentenpaare $M_{A,i}$ und Streckenlast q mit dem Momentenverlauf und Biegelinie für $\frac{M_A}{M_q} = 10$	29
3.21 Biegeträger mit zwei Einzellasten, der dazugehörige Momentenverlauf (rot) und der durch die Aktoren erzeugte, angepasste Momentenverlauf (blau)	30
4.1 Geometrie des modellierten Biegeträgers mit fünf Aktoren, der Lasteinleitungs- und Auflagerplatte und den beiden Symmetrieebenen (xy -Ebene rot eingefärbt) und (yz -Ebene grün eingefärbt)	34
4.2 FEM-Modell des Aktors nach Vernetzung mit Volumenelementen	35
4.3 FEM-Modell des passiven Referenzträgers mit Auswertungspunkt (rot hervorgehoben) und den Bezeichnungen der Ränder	36
4.4 Netzkonvergenzstudie zur Auswahl der Elementgröße des Tetraeder-Elements mit 10 Knoten	37
4.5 FEM-Modell des Biegeträgers mit den Stahlplatten nach der Diskretisierung	37
4.6 FEM-Modell des Biegeträgers mit den angesetzten Lasten	38
4.7 Randbedingungen für die Berechnung des Biegeträgers, die aus der ausgenutzten Symmetrie resultieren	40
4.8 Detailansicht der modellierten Auflagerplatte. Die Knoten entlang der roten Linie sind gehalten ($u_y = u_z = 0$). Die yz -Symmetrieebene ($u_x = u_{r_y} = u_{r_z} = 0$) ist grün eingefärbt.	41
4.9 Vereinfachtes statisches System nach Ausnutzung der Symmetrie und unter Berücksichtigung der Kontaktformulierung	41
4.10 Die drei FEM-Modelle zur Berücksichtigung der Aktorik: zylinderförmige Aussparung (oben), mit abgerundeten Ecken (Mitte) und mit modelliertem Aktor (unten).	42
4.11 Vergrößerung der FEM-Modelle: zylinderförmige Aussparung (links), zylinderförmige Aussparung abgerundet (Mitte) und Aktor modelliert (rechts).	43
4.12 Verformung des Aktors in Balkenlängsrichtung u_z bei der Variante mit modelliertem Aktor (Darstellung in 100-facher Überhöhung)	44
4.13 Spannungen in Balkenlängsrichtung σ_z für die zylinderförmige Aussparung (oben), die zylinderförmige Aussparung mit abgerundeten Ecken (Mitte) und dem modellierten Aktor (unten)	46
4.14 Bruchspannungsfläche des Betons im Hauptspannungsraum (nach [105])	48
4.15 Festigkeiten im ebenen Spannungszustand (aus [105])	49
4.16 Hauptspannungstrajektorien eines Biegeträgerausschnittes mit einem druckbehaftetem Aktor (qualitativ)	51

4.17 Biegeträger mit einem Aktor in Feldmitte zur Bestimmung der Abklinglänge	52
4.18 Durchbiegung u_y für den passiven, aktiven und adaptiven Zustand (200-fach überhöhte Darstellung)	54
4.19 Durchbiegung u_y entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am unteren inneren Rand ausgewertet	55
4.20 Verformungen u_z für den passiven (links), aktiven (Mitte) und adaptiven Zustand (rechts) (Darstellung in 300-fach Überhöhung.	56
4.21 Spannungen $\sigma_{z,EG}$ des Trägers unter Eigengewicht (Darstellung in 300-facher Überhöhung)	57
4.22 Spannungen $\sigma_{z,passiv}$ des Trägers im passiven Zustand (Darstellung in 300-facher Überhöhung)	58
4.23 Spannungen $\sigma_{z,aktiv}$ des Trägers im aktiven Zustand (Darstellung in 300-facher Überhöhung)	58
4.24 Spannungen $\sigma_{z,adaptiv}$ des Trägers im adaptiven Zustand (Darstellung in 300-facher Überhöhung)	59
4.25 Spannungen σ_z in den untersuchten Zuständen (Darstellung in 300-facher Überhöhung)	60
4.26 Spannungen $\sigma_{z,adaptiv}$ im adaptiven Zustand	61
4.27 Spannungsverteilung σ_z über die Trägerhöhe im aktiven, passiven und adaptiven Zustand an der Schnittlinie der beiden Symmetrieebenen	62
4.28 Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen inneren Rand	63
4.29 Verlauf der Dehnungen ϵ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen inneren Rand	64
4.30 Dehnungen in Trägerlängsrichtung ϵ_z	65
4.31 Dehnungen in Trägerlängsrichtung ϵ_z	66
5.1 Applizierter DMS auf der Betonoberfläche	68
5.2 Vier-Punkt-Biegeversuch mit induktivem Wegaufnehmer zur Durchbiegungsbestimmung in Feldmitte	69
5.3 Laser-Distanzsensor zur Durchbiegungsbestimmung in Feldmitte	70
5.4 Bachmann-Regelungseinheit zur Regelung der Durchbiegung und der hydraulischen Drücke	70
5.5 Netzteil zur Stromversorgung in Verbindung mit einer Temperaturregelungseinheit zur Ansteuerung der Heizpatrone	71
5.6 Schematische Darstellung des Regelkreises eines adaptiven Biegeträgers mit Druckerzeugung durch ein Hydraulikaggregat	72
5.7 Verschiedene Arten der Hilfsenergie für die Umwandlung in Aktoren (aus [41])	72
5.8 Thermoaktor mit Verschlusschraube und Heizpatrone (Angaben in mm) (nach [8])	74
5.9 Thermoaktor: Zeichnungen Frontansicht (links), Seitenansicht (rechts) (Angaben in mm)	75
5.10 Thermoaktor: Frontansicht (links), und Seitenansicht (rechts)	76
5.11 Hydraulikaggregat mit Verteilerblock, Proportionalventilen und angeschlossenem Biegeträger	77
5.12 Abmessungen des Deckbleches (links), des Aussteifungsrings (rechts) und der Leitung (unten). Alle Angaben in mm.	78

5.13	Aktor mit angeschweißter Leitung zum Anschluss an das Hydraulikaggregat	79
5.14	Anordnung der Aktoren innerhalb eines Biegeträgers (Alle Angaben in mm)	79
5.15	Geöffnete Schalung des um 180° gedrehten Trägers mit 10 ausgerichteten Aktoren und den Bewehrungsstäben.	80
5.16	Als Funktionsmuster nur bis zur senkrechten Mittelebene betonierter Biegeträger mit 10 integrierten Aktoren	80
5.17	Bestimmung des Ausbreitmaßes (im vorliegenden Fall 630 mm) während der Betonage der adaptiven Biegeträger	82
6.1	Versuchsaufbau für die Vier-Punkt-Biegeversuche. Alle Angaben in cm. (nach [49]) . . .	83
6.2	Belastung in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren (Ausschnitt von $t = 0$ s bis 150 s)	86
6.3	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren (Ausschnitt von $t = 0$ s bis 150 s)	86
6.4	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren (Ausschnitt von $t = 0$ s bis 150 s)	87
6.5	Zwei Ansichten des adaptiven Biegeträgers T1 im Vier-Punkt-Biegeversuch (nach [8]) . .	88
6.6	Belastung in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1	88
6.7	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1 im Zeitraum $t = 0$ s bis 500 s	89
6.8	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1	90
6.9	Temperatur in Feldmitte auf halber Trägerhöhe ($h = 100$ mm) in Abhängigkeit der Zeit des Thermoelements an der Oberfläche des adaptiven Biegeträgers T1	91
6.10	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1 von $t = 0$ s bis 500 s	92
6.11	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens T1	93
6.12	Versuchsaufbau des Vier-Punkt-Biegeversuchs der mittels Hydraulikaggregat aktuierten Biegeträger	94
6.13	Belastung in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens S1	95
6.14	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens S1	95
6.15	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des adaptiven Balkens S1 .	96
6.16	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens S1 von $t = 0$ s bis 100 s	97
6.17	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens S1 für den gesamten Versuch . . .	98
6.18	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens R1	99
6.19	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des adaptiven Balkens R1 .	100
6.20	Belastung in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens R2	101

6.21	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens R2 und der Maximalwert des passiven Referenzbalkens	102
6.22	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des adaptiven Balkens R2	103
6.23	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der externen Belastung für die Aktoren des adaptiven Balkens R2	104
6.24	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens R2	104
6.25	Belastung in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens M1	106
6.26	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des adaptiven Balkens M1	106
6.27	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des adaptiven Balkens M1	107
6.28	Ansichten des adaptiven Trägers M1 bei $t = 0$ s (oben), $t = 65$ s, $t = 90$ s (Risse rot hervorgehoben) und $t = 135$ s (Risse sind überdrückt und nicht mehr sichtbar)	108
6.29	Vorhersage der Rissposition über die FEM-Simulation möglich. Vergleich des Rissbildes aus dem Versuch bei $t = 90$ s und dem aus der FEM-Simulation (in Rot: Bereiche mit Grenzdehnung $\epsilon_z \geq 2$ ‰).	109
6.30	Versuchsaufbau mit gleichem Druck in allen Aktoren des adaptiven Biegeträgers U1	110
6.31	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit des Drucks in den Aktoren des adaptiven Biegeträgers U1	111
6.32	Vorhersage der Rissposition über die FEM-Simulation möglich. Gute Übereinstimmung des Rissbildes aus dem Versuch: Rück- (oben) und Vorderseite (Mitte) des Biegeträgers U1 nach Versuchsende mit deutlichen Rissen am äußeren Aktor 1 und das Rissbild aus der FEM (unten) (in Rot: Bereiche mit Grenzdehnung $\epsilon_z \geq 2$ ‰)	112
A.1	Verformungen u_y im unbelasteten Zustand	141
A.2	Verformungen u_y im passiven Zustand	142
A.3	Verformungen u_y im aktiven Zustand	142
A.4	Verformungen u_y im adaptiven Zustand	143
A.5	Spannungen in Trägerlängsrichtung σ_z im unbelasteten Zustand	144
A.6	Spannungen in Trägerlängsrichtung σ_z im passiven Zustand	145
A.7	Spannungen in Trägerlängsrichtung σ_z im aktiven Zustand	145
A.8	Spannungen in Trägerlängsrichtung σ_z im adaptiven Zustand	146
A.9	Hauptspannungen σ_{mpa} im unbelasteten Zustand	147
A.10	Hauptspannungen σ_{mpa} im passiven Zustand	148
A.11	Hauptspannungen σ_{mpa} im aktiven Zustand	148
A.12	Hauptspannungen σ_{mpa} im adaptiven Zustand	149
A.13	Position der Lasteinleitung und des Auflagers aller dargestellter Ausschnitte in diesem Abschnitt	149
A.14	Spannung σ_x im adaptiven Zustand	150
A.15	Spannung σ_y im adaptiven Zustand	150
A.16	Spannung σ_y im adaptiven Zustand (Druck in blau, Zug in rot)	151
A.17	Spannung σ_x im adaptiven Zustand (Druck in blau, Zug in rot)	151
A.18	Spannung σ_z im adaptiven Zustand	152
A.19	Erste Hauptspannung σ_1 im adaptiven Zustand	152

A.20	Zweite Hauptspannung σ_2 im adaptiven Zustand	153
A.21	Dritte Hauptspannung σ_3 im adaptiven Zustand	153
A.22	Hauptspannungen σ_{mpa} im adaptiven Zustand	154
A.23	FEM-Modell des passiven Referenzträgers mit Auswertungspunkt und den Bezeichnungen der Ränder	155
A.24	Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen inneren Rand	156
A.25	Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen äußeren Rand	157
A.26	Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am unteren inneren Rand	158
A.27	Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am unteren äußeren Rand	159
A.28	Verformungen des Aktors u_z im passiven Zustand	160
A.29	Verformungen des Aktors u_z im aktiven Zustand	161
A.30	Verformungen des Aktors u_z im adaptiven Zustand	162
A.31	Dehnungsverlauf ϵ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am unteren inneren Rand	163
A.32	Dehnungsverlauf ϵ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen inneren Rand	164
B.1	Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren	165
B.2	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren	166
B.3	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren	166
B.4	Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren. Ausschnitt von $t = 0$ s bis $t = 150$ s.	167
B.5	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren. Ausschnitt von $t = 0$ s bis $t = 150$ s.	168
B.6	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren. Ausschnitt von $t = 0$ s bis $t = 150$ s.	168
B.7	Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R3	169
B.8	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R3	170
B.9	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des Balkens R3	170
B.10	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R3	171
B.11	Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R4	172
B.12	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R4	173
B.13	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des Balkens R4	173

B.14	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R4	174
B.15	Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Biegeträgers mit universalem Druck U1 . . .	175
B.16	Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Biegeträgers mit universalem Druck U1	175
B.17	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des Biegeträgers U1	176
B.18	Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Biegeträgers mit universalem Druck U1	176
C.1	Prüfaufbau mit Betonprobe zur Bestimmung des E-Moduls	177
C.2	Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit der drei Betonproben	178
C.3	Spannung in Abhängigkeit der Zeit der Betonprobe 1	178
C.4	Spannung in Abhängigkeit der Zeit der Betonprobe 2	179
C.5	Spannung in Abhängigkeit der Zeit der Betonprobe 3	179
D.1	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Maschinenkraft im Aktor 1	182
D.2	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Maschinenkraft im Aktor 2	183
D.3	Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Maschinenkraft im Aktor 3	183

Tabellenverzeichnis

3.1	Momente für die Studie zur Biegelinie	19
3.2	Hydraulische Drücke in den Aktoren, die über die Momentengleichheit bestimmt wurden	31
4.1	Netzkonvergenzstudie	35
4.2	Spannungsspitzen der untersuchten Modellierungsmöglichkeiten	44
4.3	Angepasster Druck in den Aktoren $p_{A,i,angepasst}$	45
4.4	Verwendete linear-elastische Materialkennwerte	47
4.5	Verwendete Parameter für das nichtlineare CDP-Materialmodell	48
4.6	Eingabeparameter zur Beschreibung des Beton-Druckverhaltens	49
4.7	Eingabeparameter zur Beschreibung des Beton-Zugverhaltens	49
4.8	Eingabeparameter zur Beschreibung des nichtlinearen Verhaltens des Bewehrungsstahls	50
4.9	Durchbiegung in Feldmitte in den verschiedenen Zuständen des Biegeträgers	52
4.10	Maximale und minimale Biegespannungen σ_z in den verschiedenen Zuständen des Biegeträgers	59
5.1	Wärmeausdehnungskoeffizienten ausgewählter Werkstoffe	74
5.2	Betonrezeptur C35/45	81
5.3	Mischregime des Betons	81
6.1	Übersicht über die durchgeführten Versuche	84
6.2	Laststufen der Vier-Punkt-Biegeversuche der geregelten Biegeträger	85
6.3	Angesteuerte Solldrücke und gemessene Drücke	94
6.4	Veränderung der Dehnung (+) / Stauchung (-) aufgrund der externen Last und der Anteile der Aktuierung	97
6.5	Vergleich der Durchbiegung in Feldmitte u_{mitte}	113
6.6	Vergleich der Dehnungen an der Oberseite ϵ_o	114
6.7	Vergleich der Dehnungen an der Unterseite ϵ_u	114
C.1	Experimentell ermittelte E-Moduln und deren Abweichung zum verwendeten E-Modul in den Simulationen	179
D.1	Gemessene Kraft und theoretisch bestimmte Aktorkraft	181

Bezeichnungen und Symbole

Akronyme

DMS	Dehnungsmessstreifen
FEM	Finite-Elemente-Methode
PAM	Pneumatic Artificial Muscle
SVB	Selbstverdichtender Beton
UNEP	United Nations Environment Programme
CDP	Concrete Damage Plasticity

Lateinische Buchstaben

h	Höhe
b	Breite
l	Länge
A	Fläche
F	Kraft
I	Flächenträgheitsmoment
E	Elastizitätsmodul
K	Kompressionsmodul
M	Moment
p	hydraulischer Druck
q	Streckenlast
R	elektrischer Widerstand
t	Zeit
u	vertikale Durchbiegung
v	Belastungsgeschwindigkeit
h_A	Abstand Schwerpunkt zur betrachteten Faser
K	Invariantenverhältnis
G	Potentialfunktion

Griechische Buchstaben

ϵ	Dehnung
σ	Spannung
$\sigma_{1,2,3}$	1., 2. bzw 3. Hauptspannung
σ_{mpa}	Maximalwert der betragsmäßig größten Hauptspannung $\sigma_{1,2,3}$, programmintern <i>Max. principal absolut (mpa)</i>
μ	Reibung

ν	Querdehnzahl
ρ	Dichte
α_f	Verhältnis von zweiachsiger zu einachsiger Druckfestigkeit von Beton
ψ	Dilatanzwinkel
α	Wärmeausdehnungskoeffizient

A Anhang

Alle Angaben in mm und MPa.

A.1 Darstellung der Verformungen des Trägers

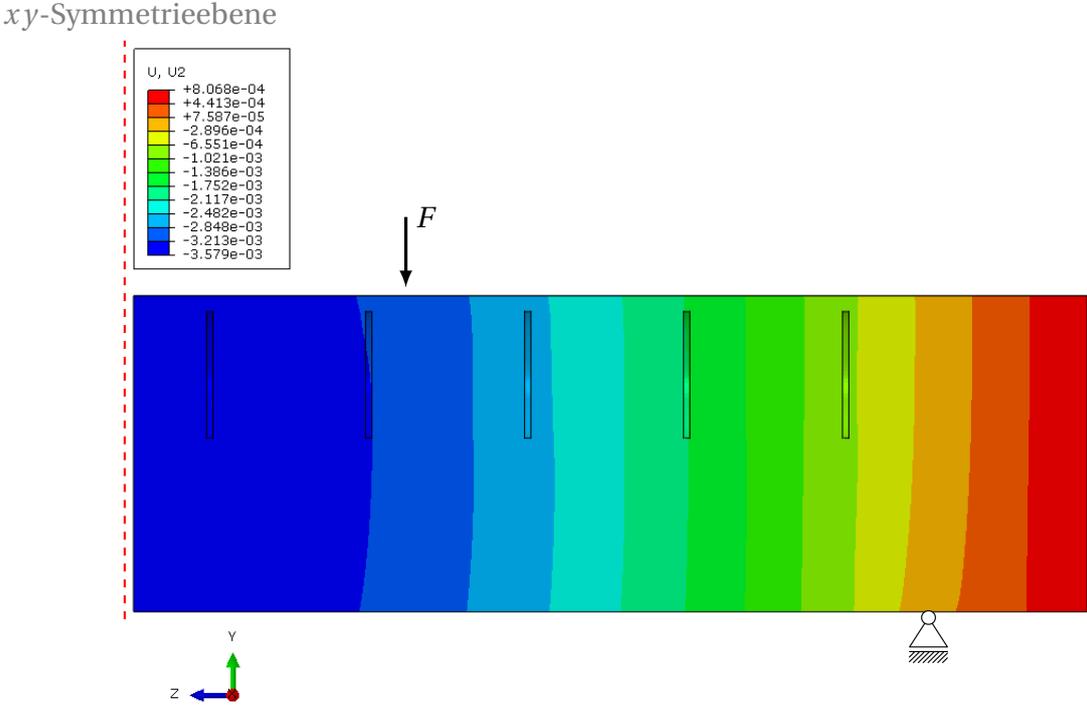


Abb. A.1: Verformungen u_y im unbelasteten Zustand

xy -Symmetrieebene

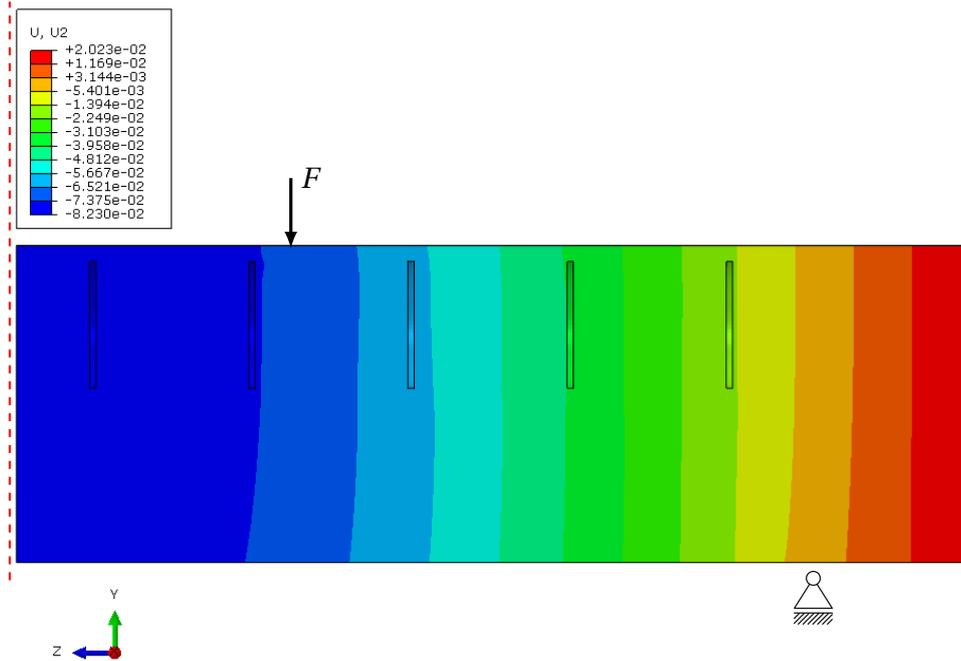


Abb. A.2: Verformungen u_y im passiven Zustand

xy -Symmetrieebene

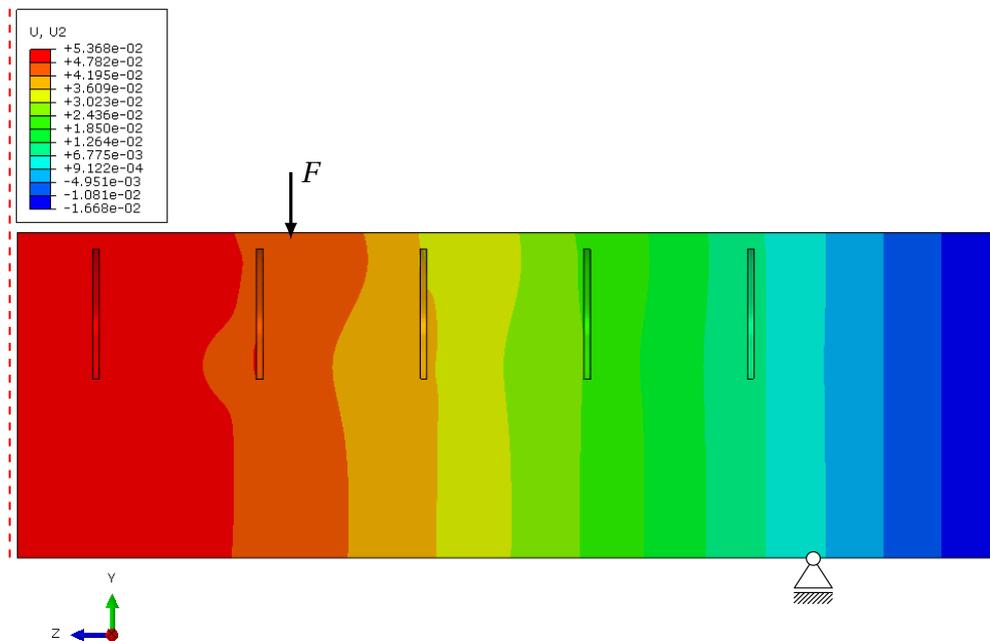


Abb. A.3: Verformungen u_y im aktiven Zustand

xy -Symmetrieebene

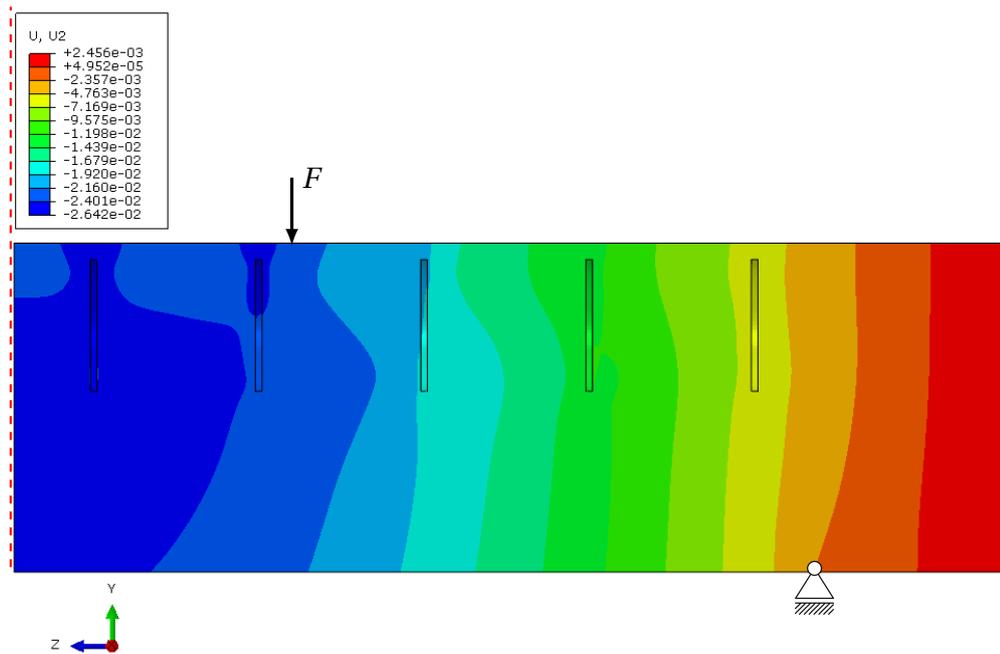


Abb. A.4: Verformungen u_y im adaptiven Zustand

A.2 Darstellung der Spannungen des Trägers

A.2.1 Spannungen in Balkenlängsrichtung σ_z

xy-Symmetrieebene

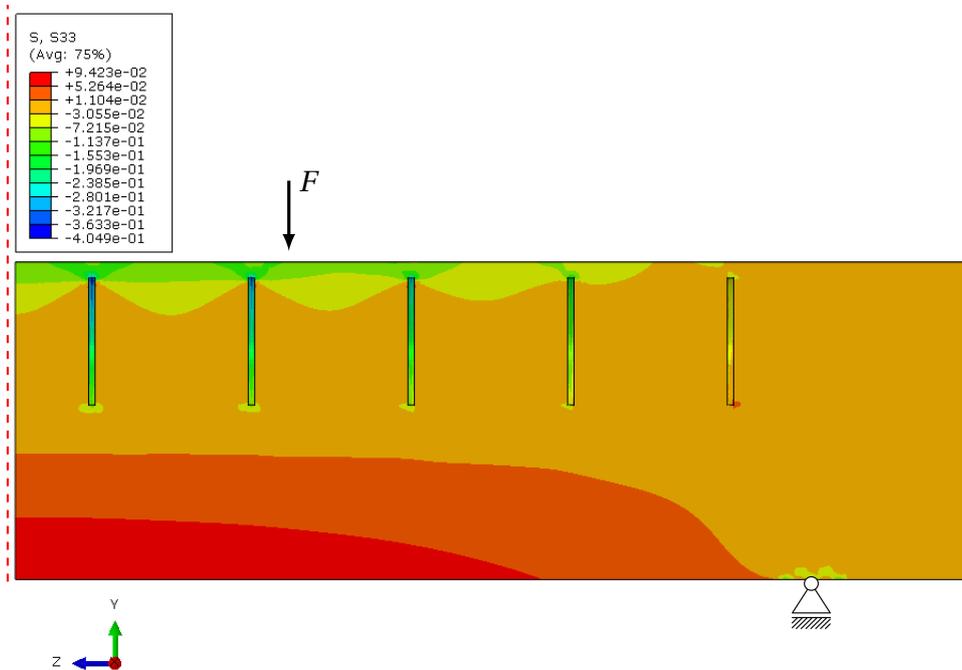
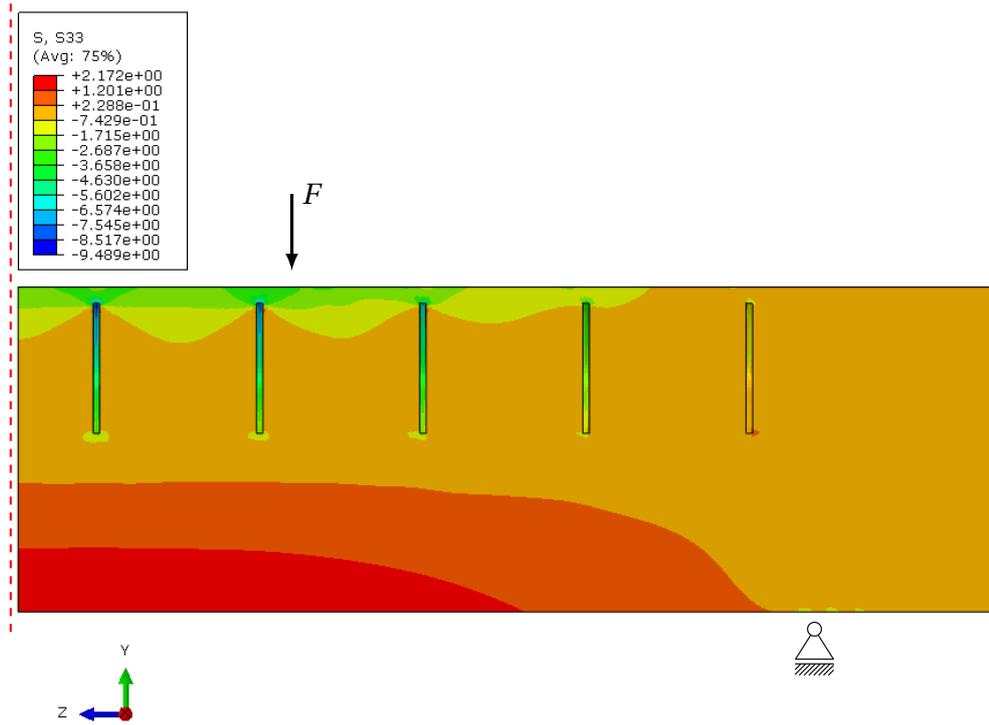
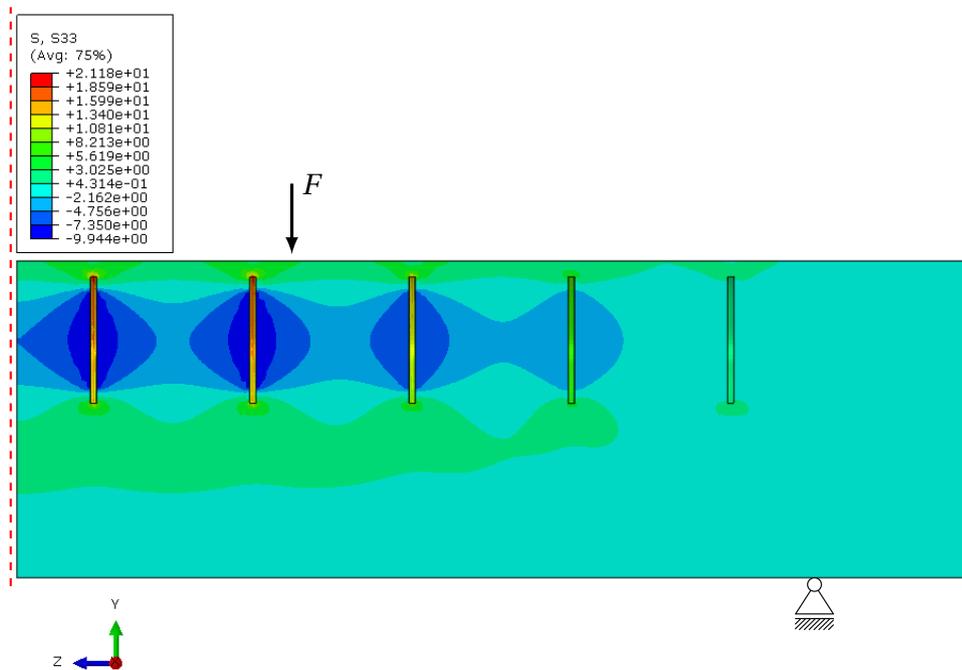


Abb. A.5: Spannungen in Trägerlängsrichtung σ_z im unbelasteten Zustand

xy -SymmetrieebeneAbb. A.6: Spannungen in Trägerlängsrichtung σ_z im passiven Zustand xy -SymmetrieebeneAbb. A.7: Spannungen in Trägerlängsrichtung σ_z im aktiven Zustand

xy -Symmetrieebene

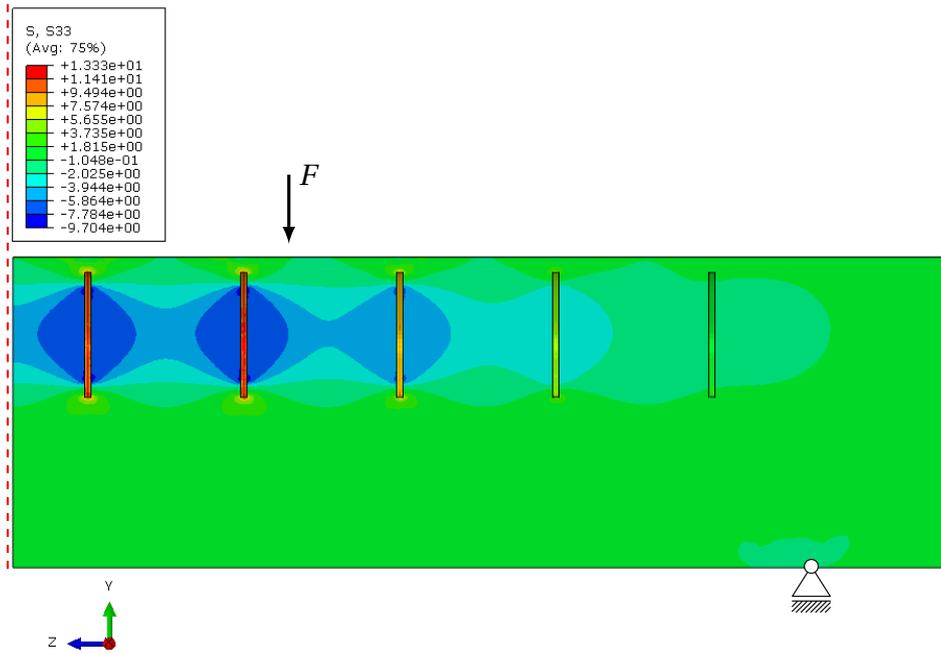


Abb. A.8: Spannungen in Trägerlängsrichtung σ_z im adaptiven Zustand

A.2.2 Maximalwert der betragsmäßig größten Hauptspannung $\sigma_{1,2,3}$, programmintern *Max. principal absolut (mpa)* σ_{mpa}

xy -Symmetrieebene

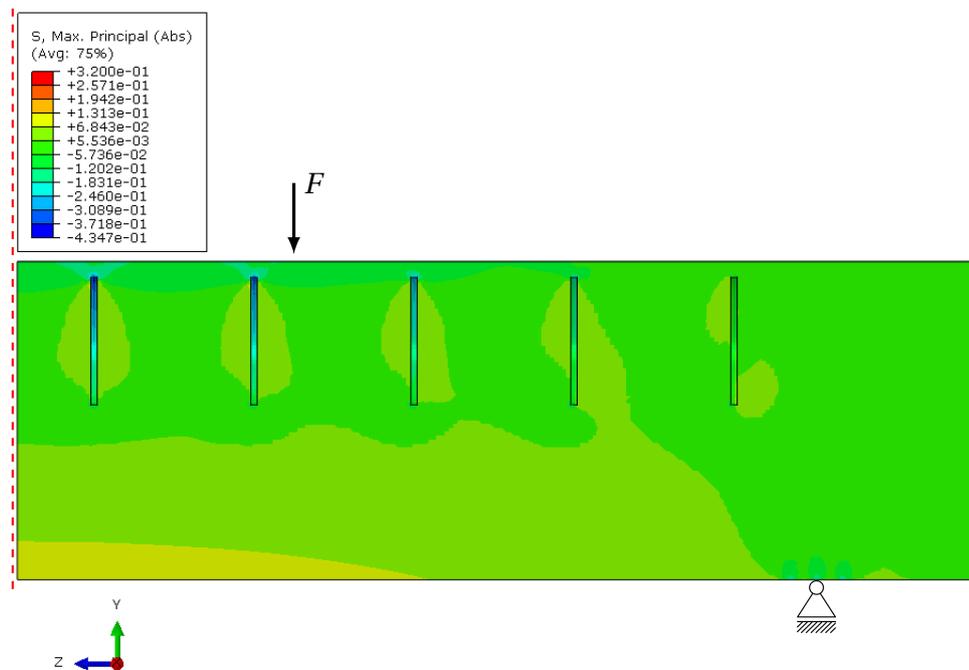


Abb. A.9: Hauptspannungen σ_{mpa} im unbelasteten Zustand

xy-Symmetrieebene

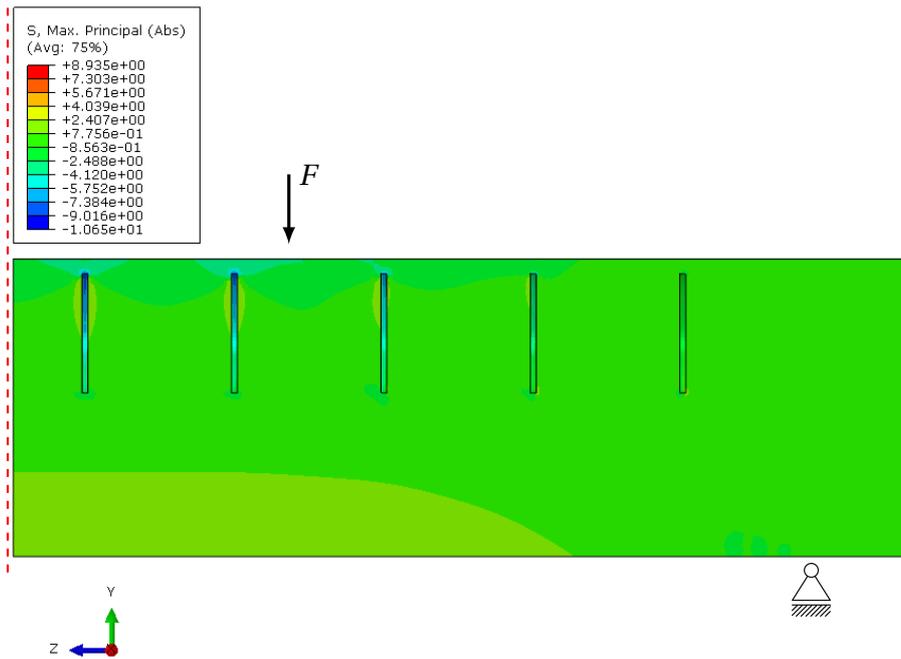


Abb. A.10: Hauptspannungen σ_{mpa} im passiven Zustand

xy-Symmetrieebene

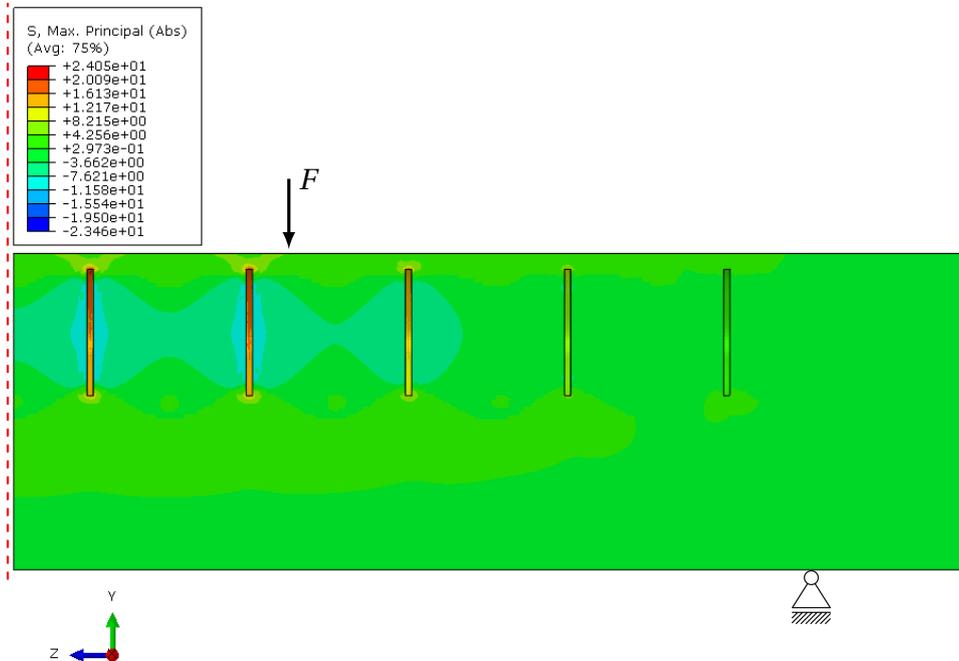


Abb. A.11: Hauptspannungen σ_{mpa} im aktiven Zustand

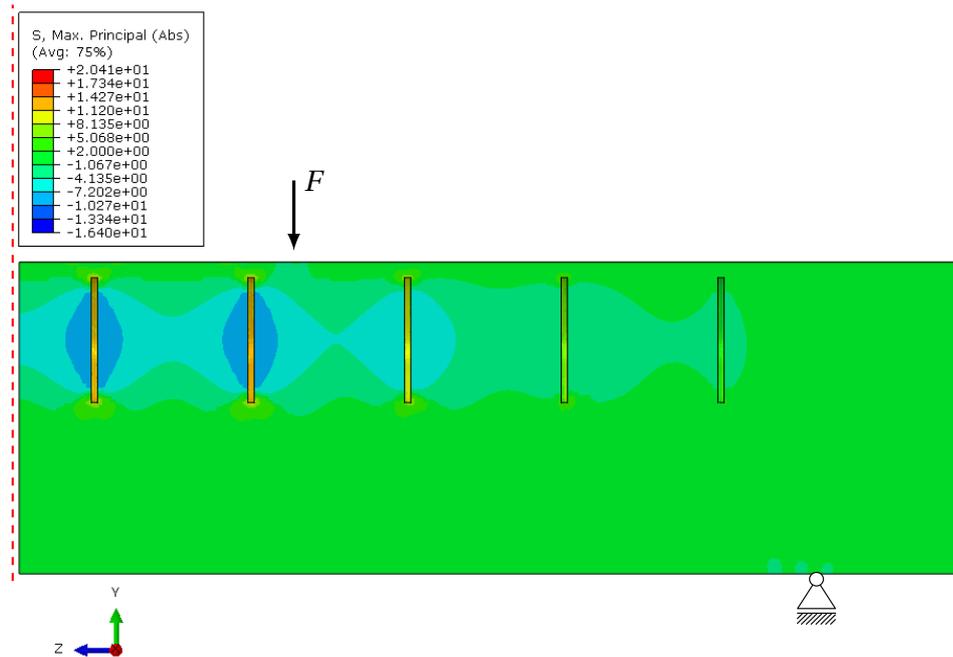
xy -Symmetrieebene

Abb. A.12: Hauptspannungen σ_{mpa} im adaptiven Zustand

A.2.3 Perspektivische Darstellung der Spannungen im adaptiven Zustand

Abbildung A.13 zeigt die Position des Auflagers und der Lasteinleitung der folgenden Darstellungen. Sie werden der besseren Übersichtlichkeit wegen nicht in jeder Abbildung dargestellt.

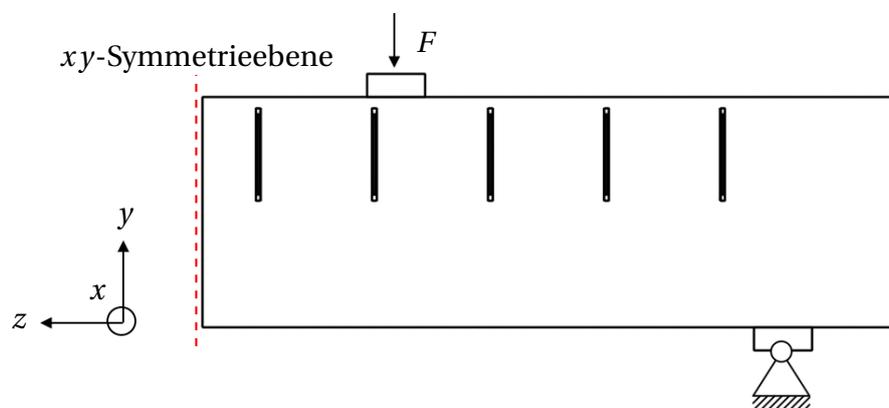


Abb. A.13: Position der Lasteinleitung und des Auflagers aller dargestellter Ausschnitte in diesem Abschnitt

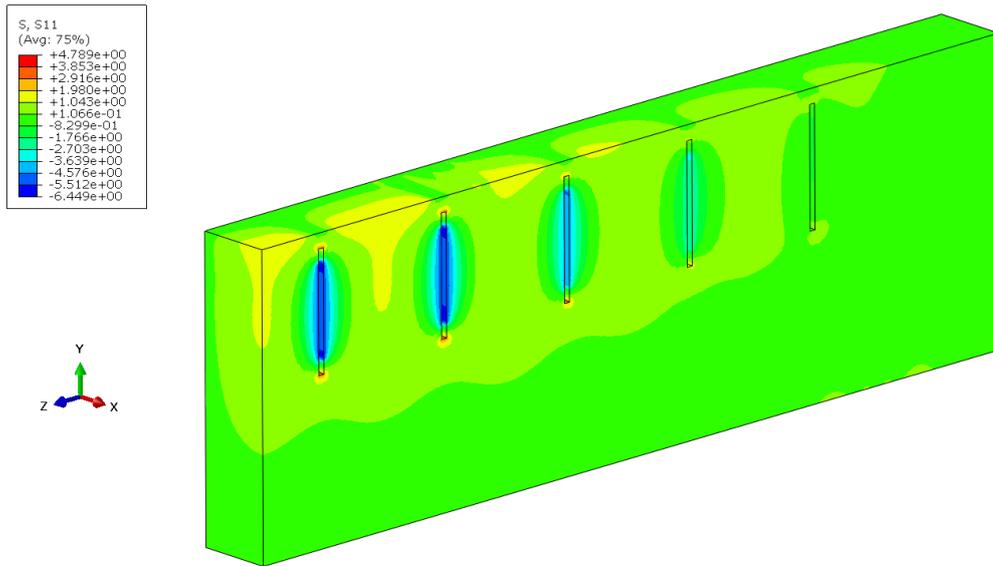


Abb. A.14: Spannung σ_x im adaptiven Zustand

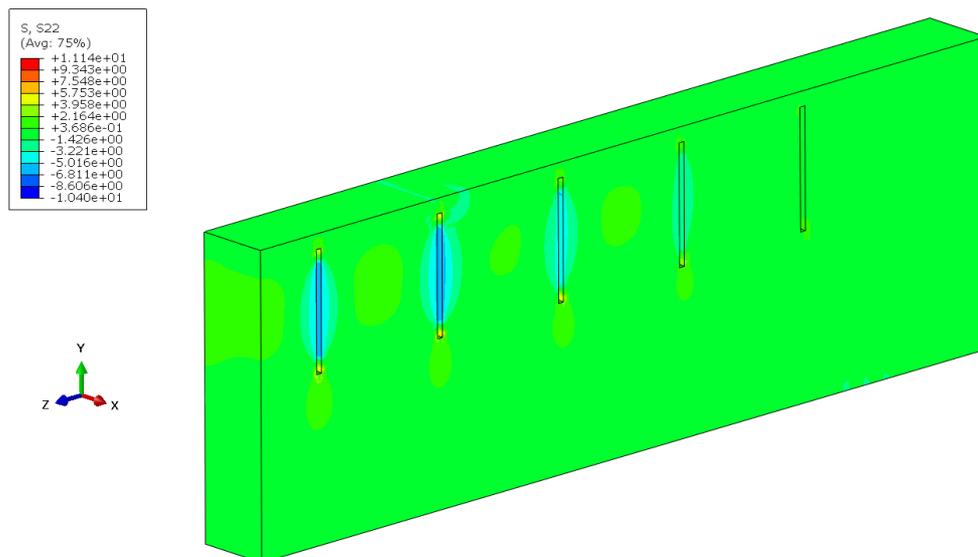


Abb. A.15: Spannung σ_y im adaptiven Zustand

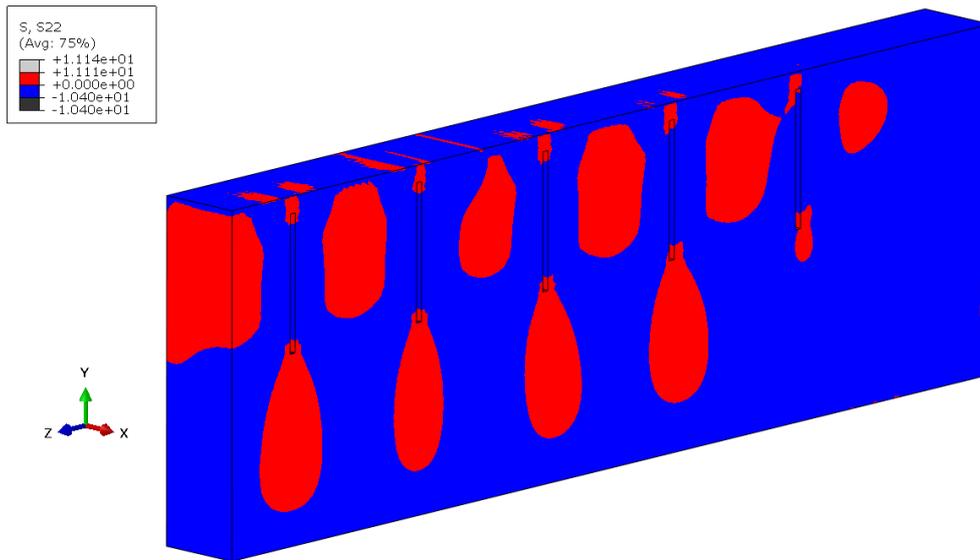


Abb. A.16: Spannung σ_y im adaptiven Zustand (Druck in blau, Zug in rot)

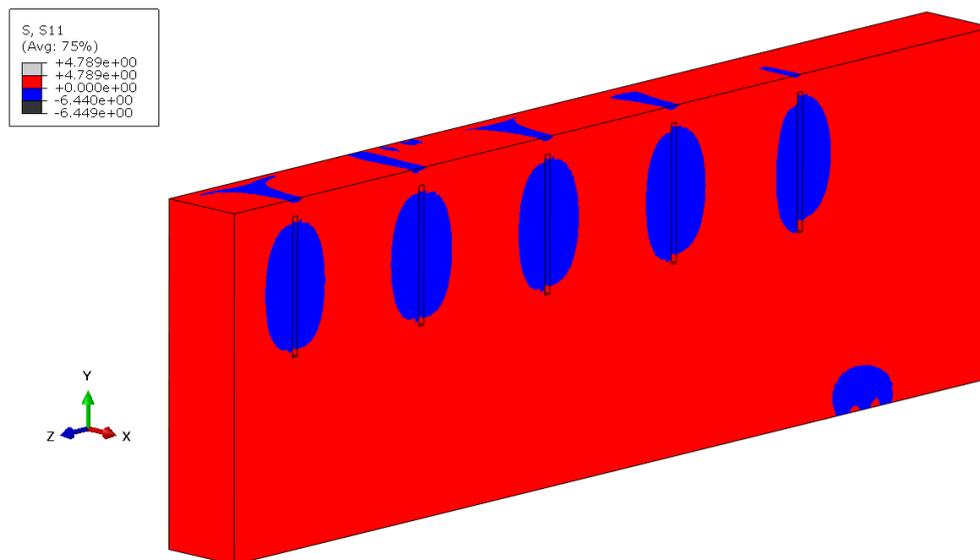


Abb. A.17: Spannung σ_x im adaptiven Zustand (Druck in blau, Zug in rot)

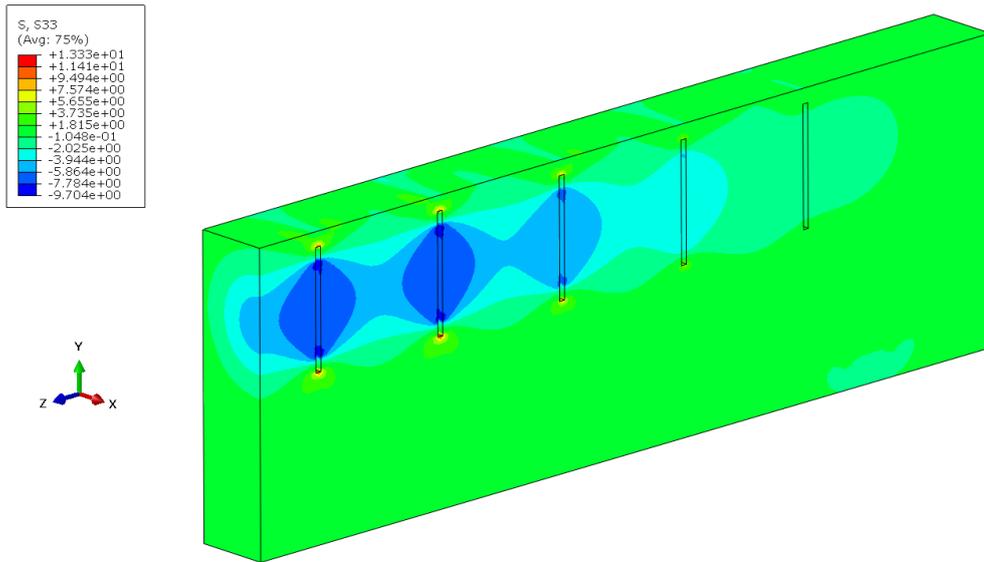


Abb. A.18: Spannung σ_z im adaptiven Zustand

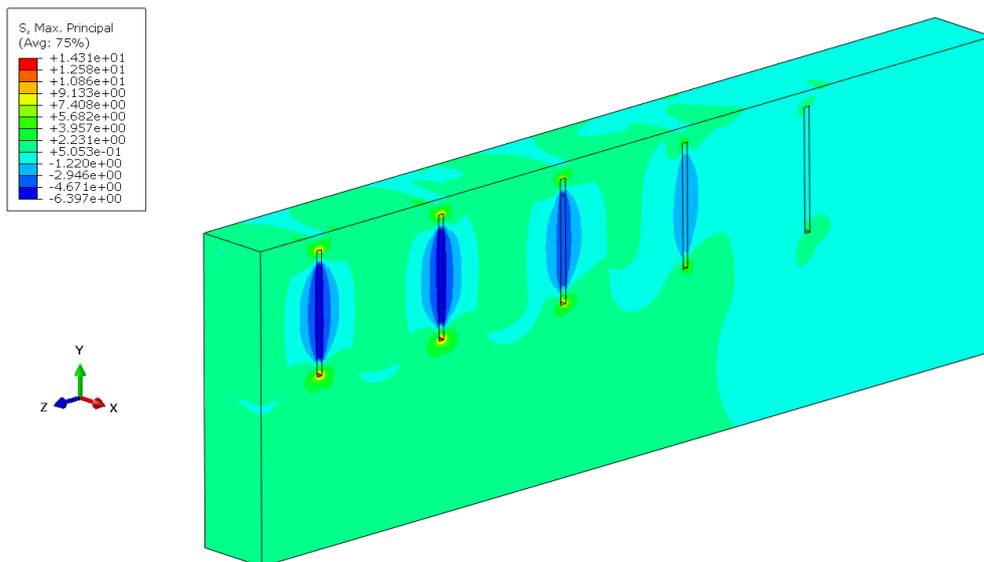


Abb. A.19: Erste Hauptspannung σ_1 im adaptiven Zustand

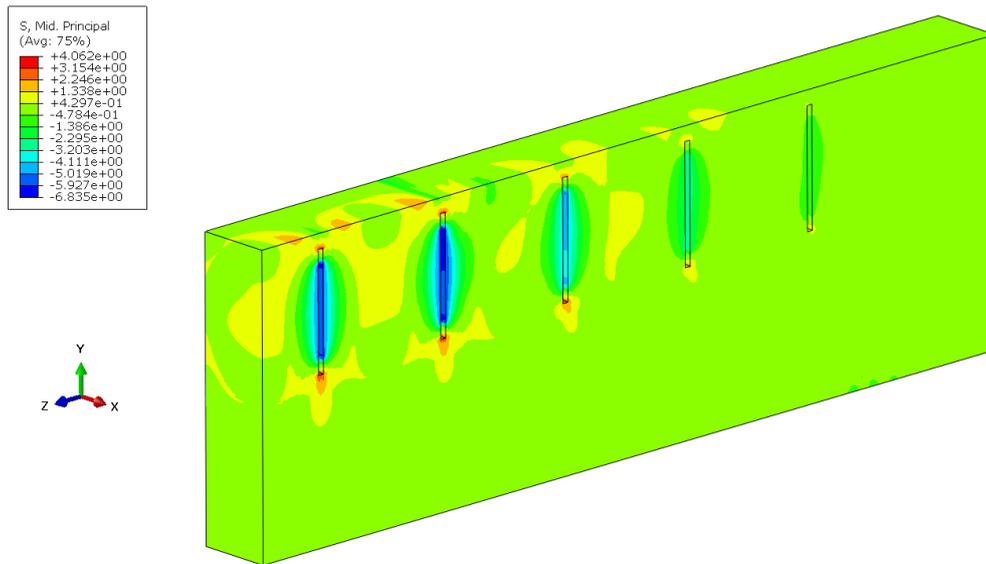


Abb. A.20: Zweite Hauptspannung σ_2 im adaptiven Zustand

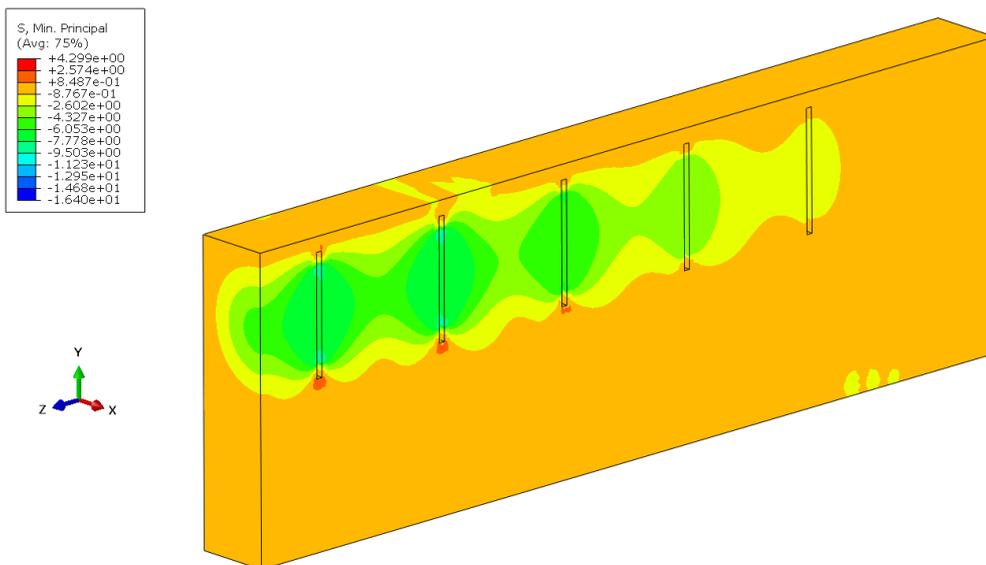


Abb. A.21: Dritte Hauptspannung σ_3 im adaptiven Zustand

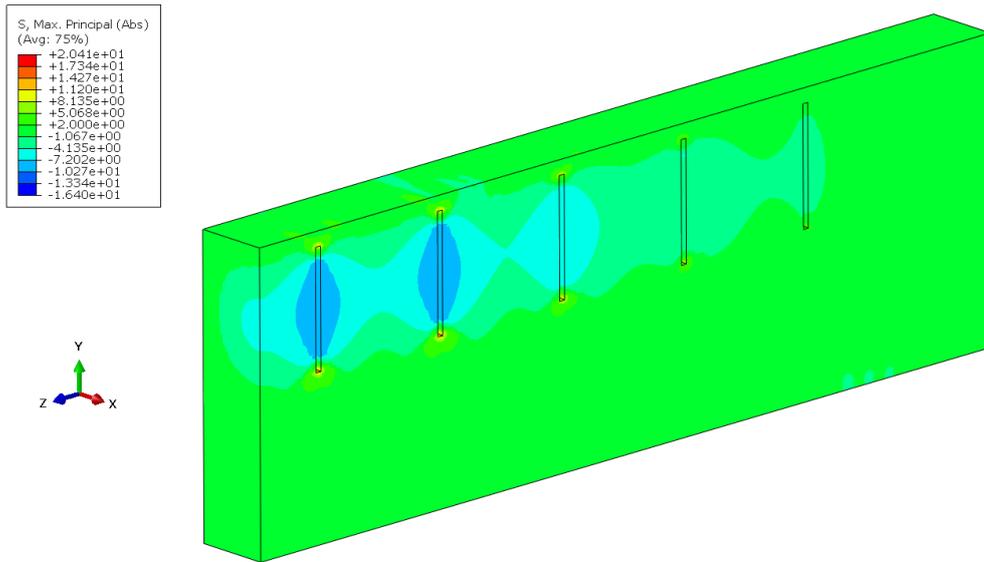


Abb. A.22: Hauptspannungen σ_{mpa} im adaptiven Zustand

A.3 Spannungsverteilungen entlang der Längskanten des Trägers

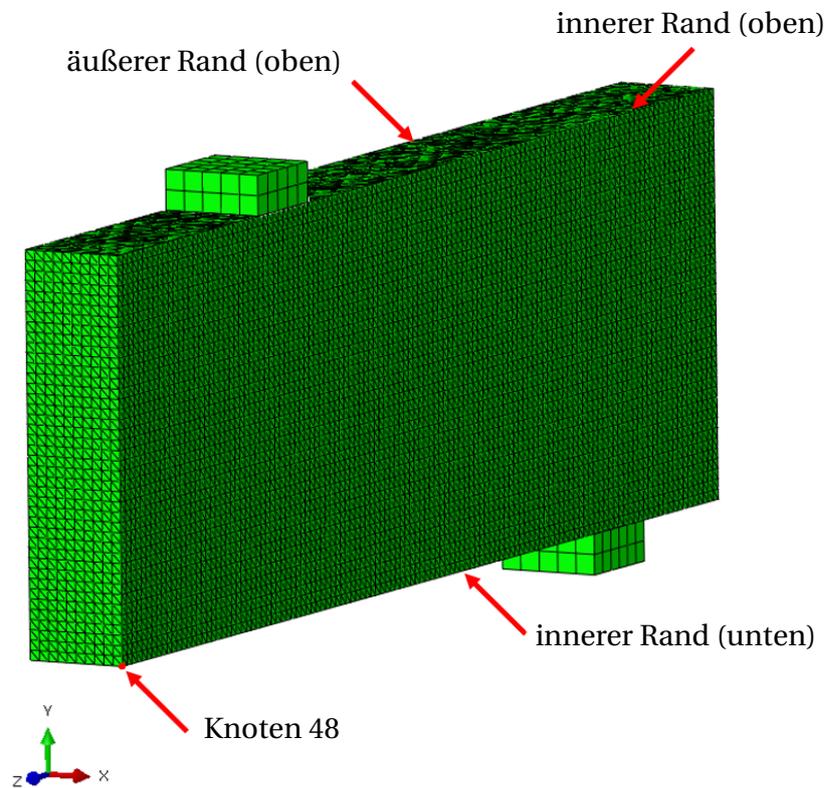


Abb. A.23: FEM-Modell des passiven Referenzträgers mit Auswertungspunkt und den Bezeichnungen der Ränder

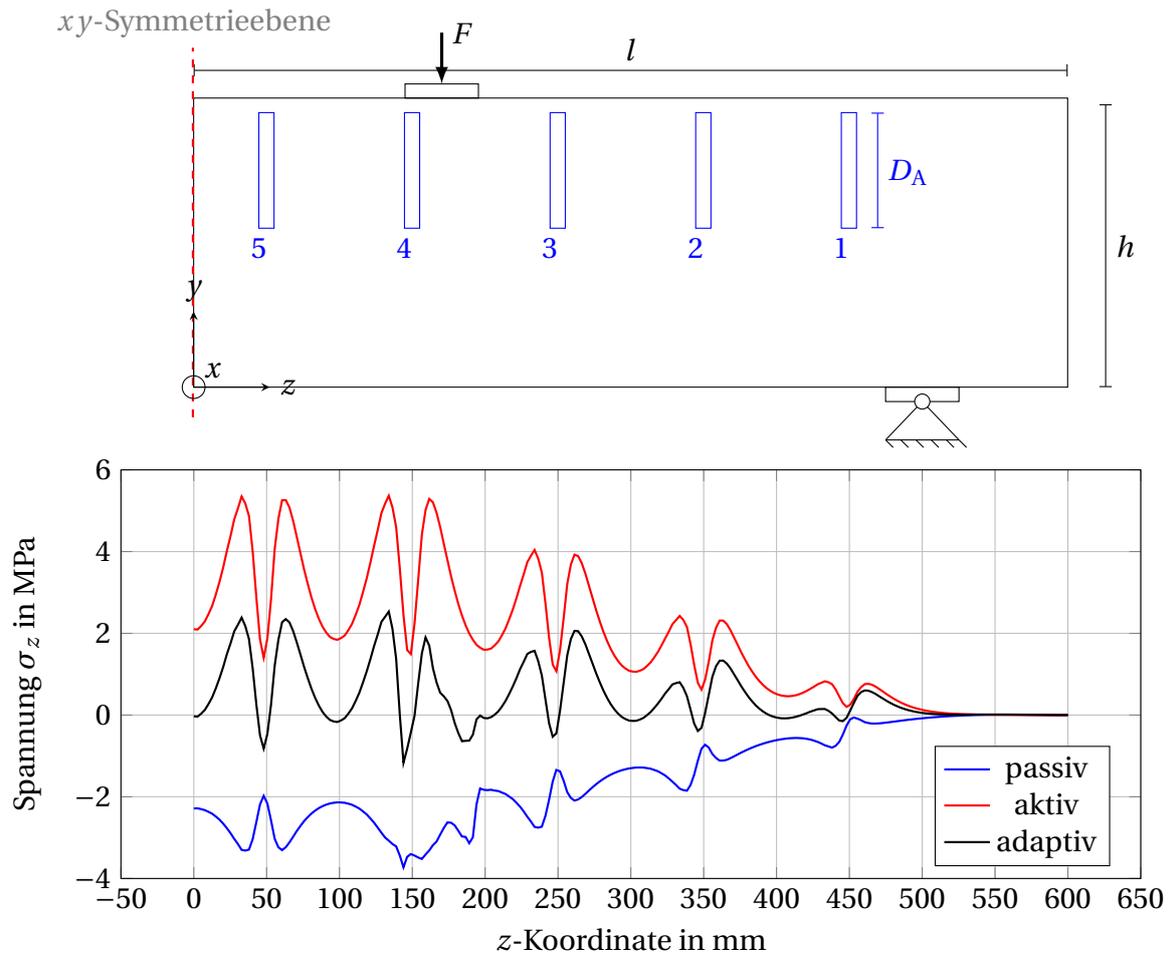


Abb. A.24: Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen inneren Rand

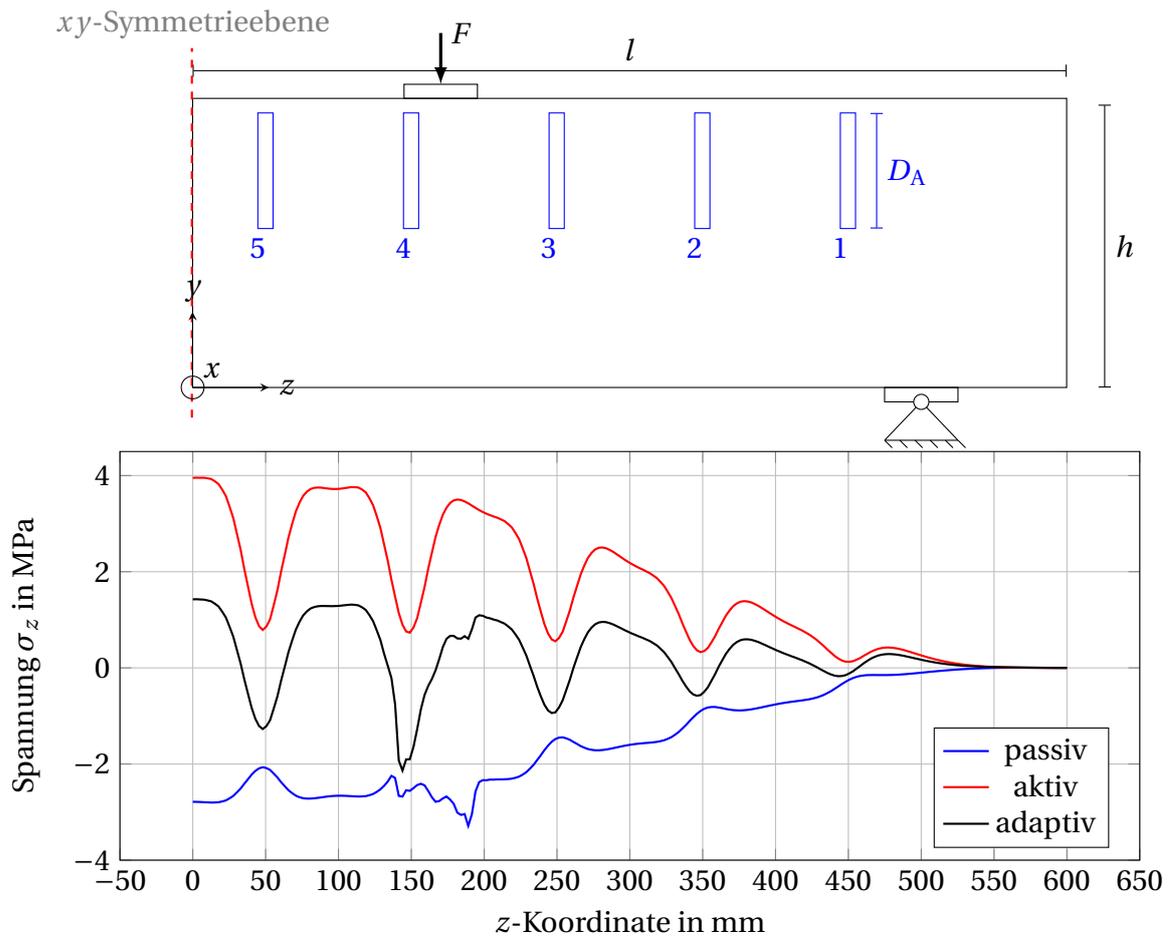


Abb. A.25: Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen äußeren Rand

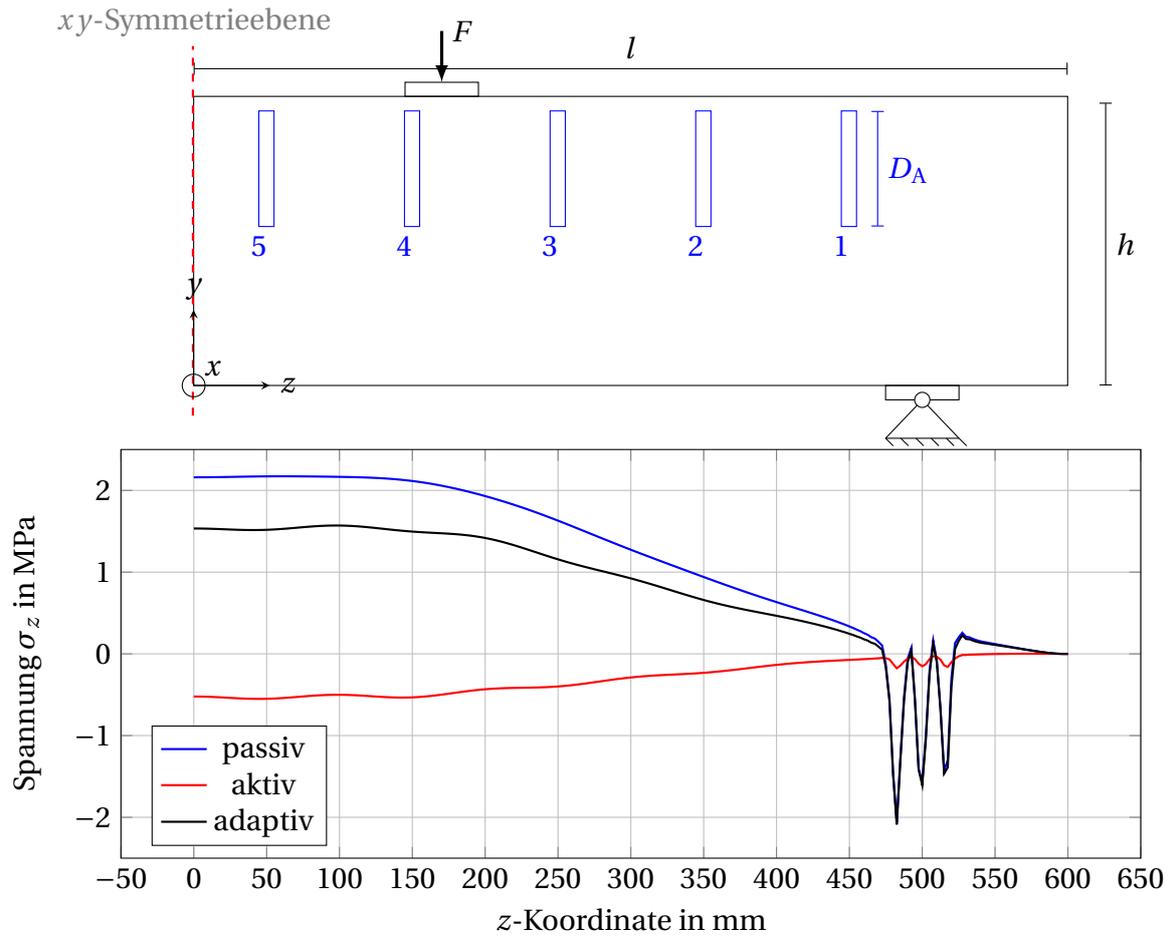


Abb. A.26: Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am unteren inneren Rand

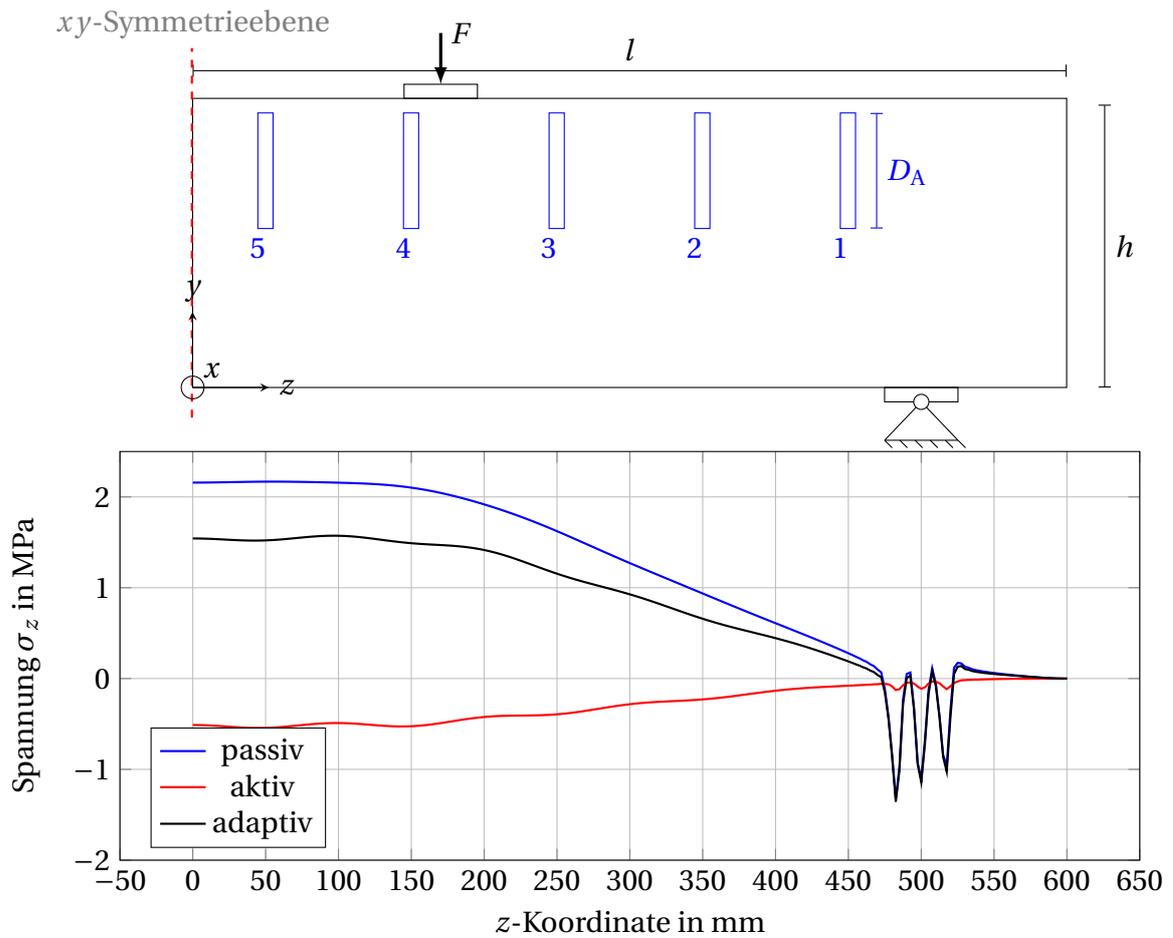


Abb. A.27: Spannungsverteilung σ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am unteren äußeren Rand

A.4 Darstellung der Verformungen des inneren Aktors

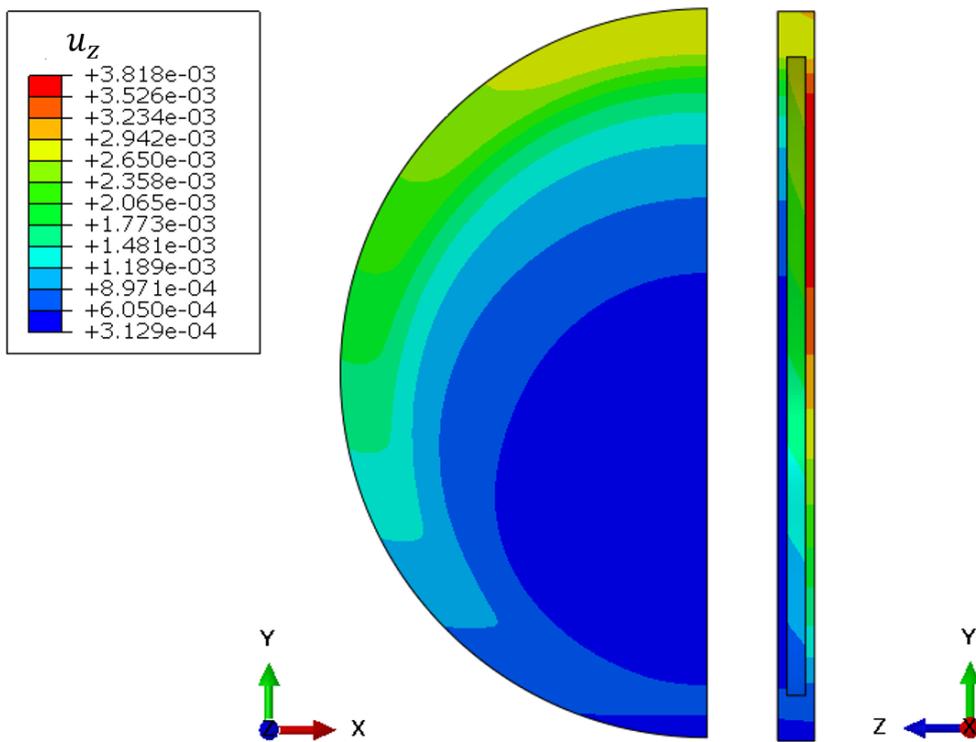


Abb. A.28: Verformungen des Aktors u_z im passiven Zustand

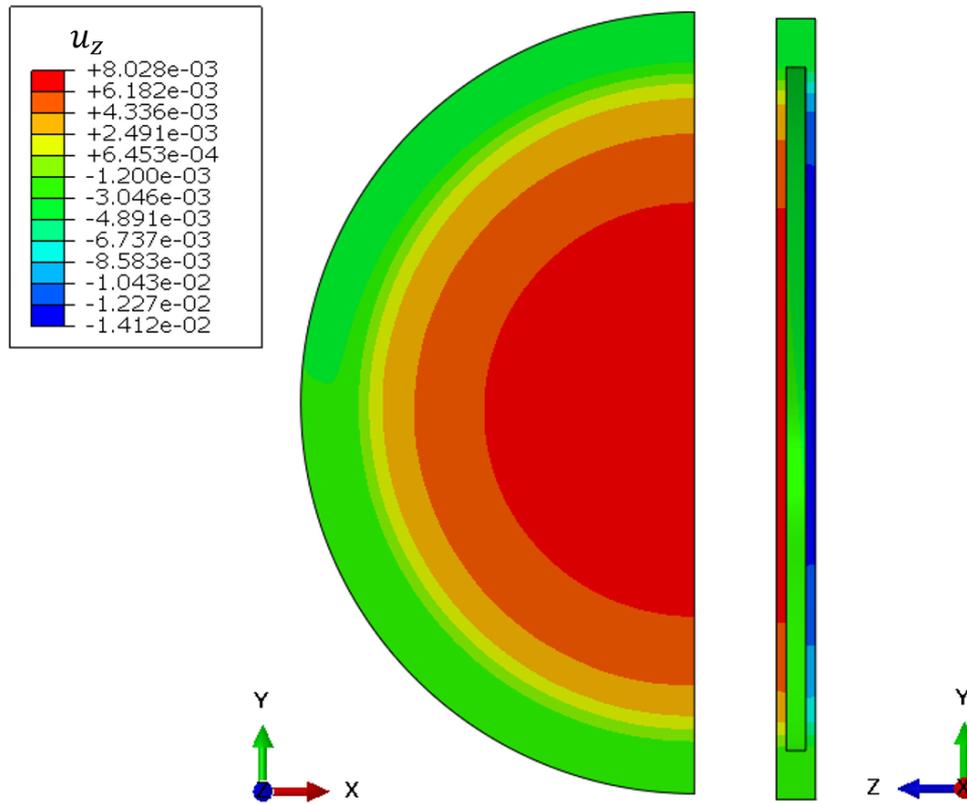


Abb. A.29: Verformungen des Aktors u_z im aktiven Zustand

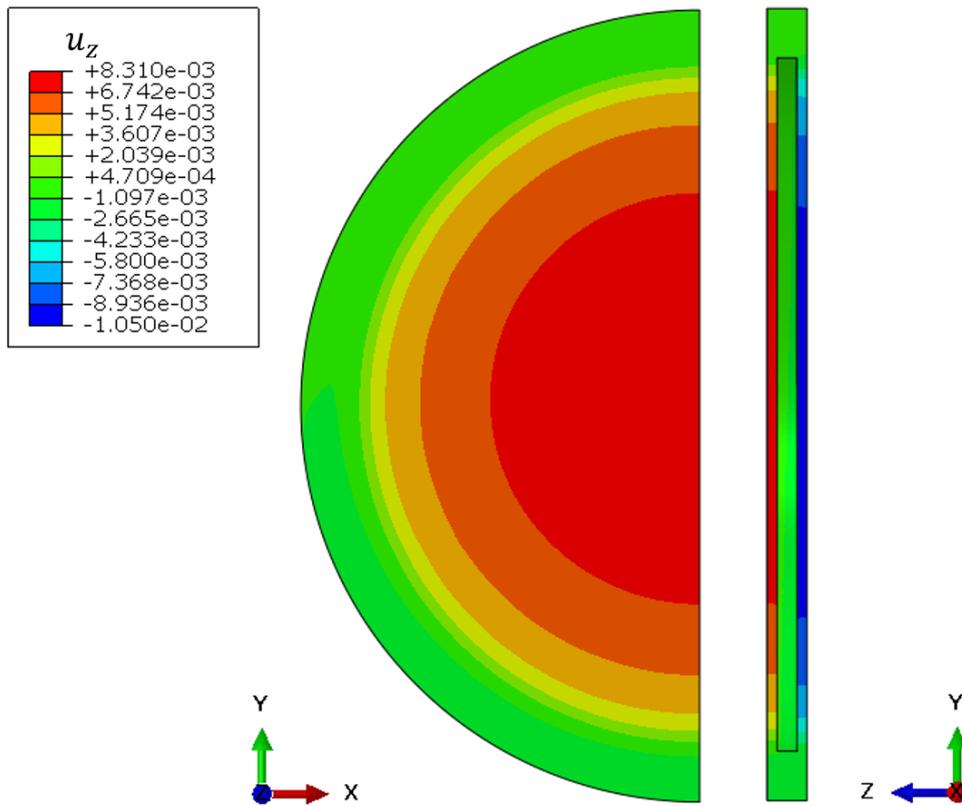


Abb. A.30: Verformungen des Aktors u_z im adaptiven Zustand

A.5 Dehnungen ϵ_z entlang der Längskanten des Trägers

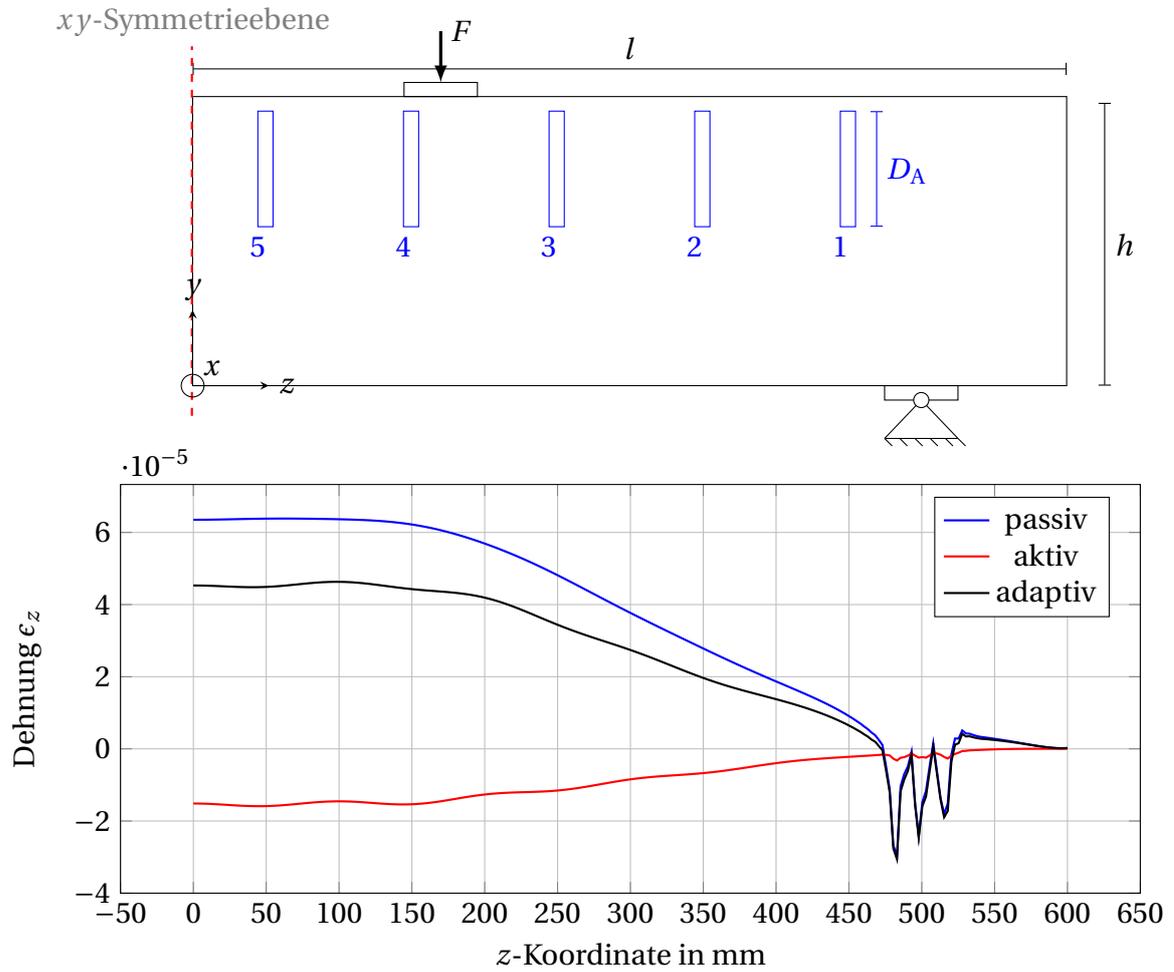


Abb. A.31: Dehnungsverlauf ϵ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am unteren inneren Rand

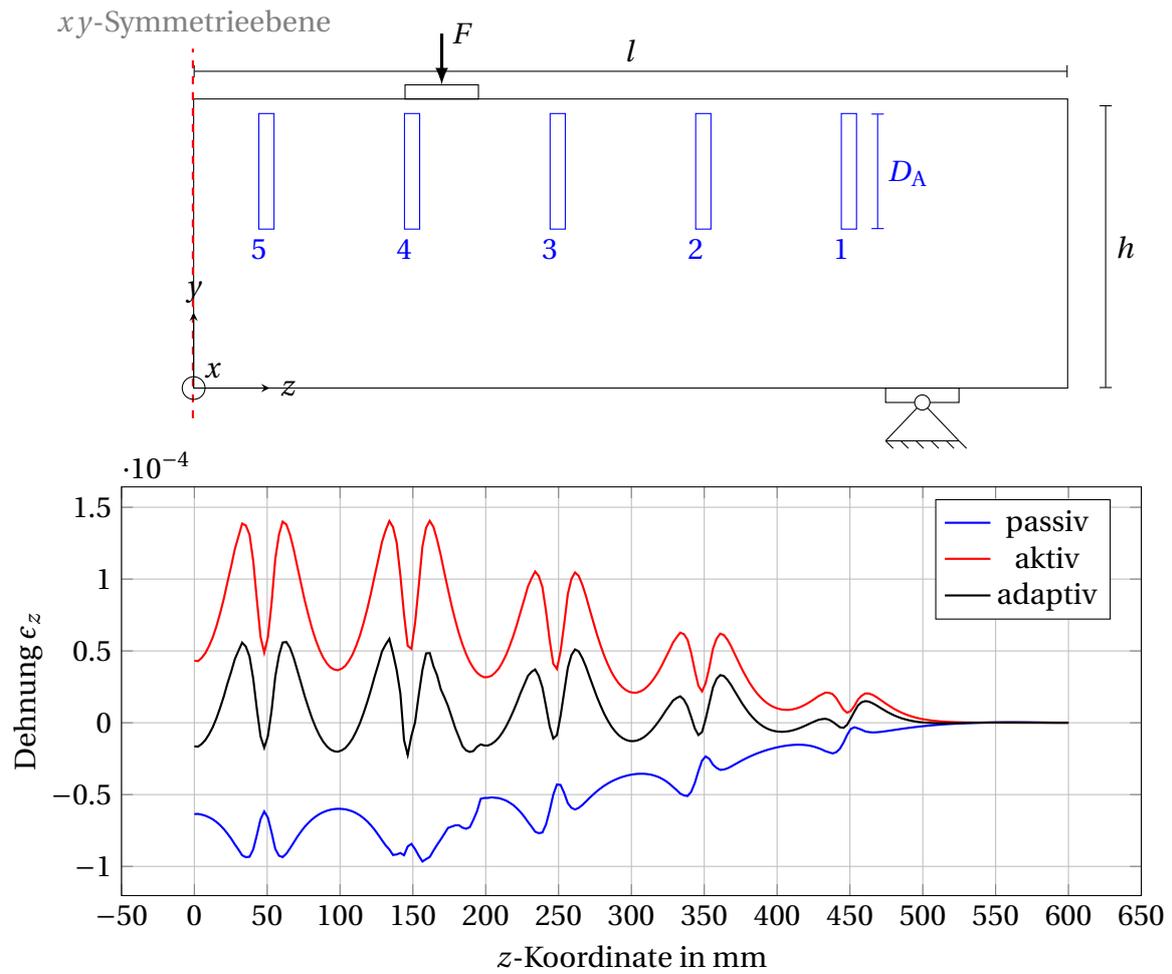


Abb. A.32: Dehnungsverlauf ϵ_z entlang des Trägers im aktiven, passiven und adaptiven Zustand am oberen inneren Rand

B Anhang

B.1 Versuchsergebnisse des Referenzbalkens

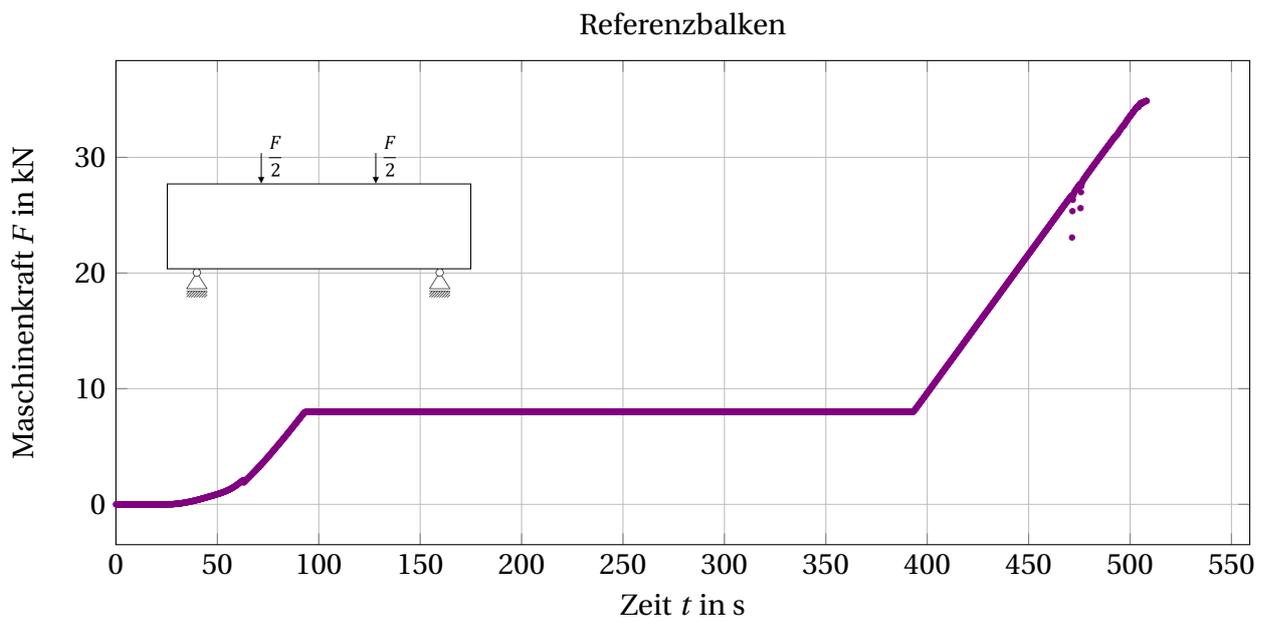


Abb. B.1: Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren

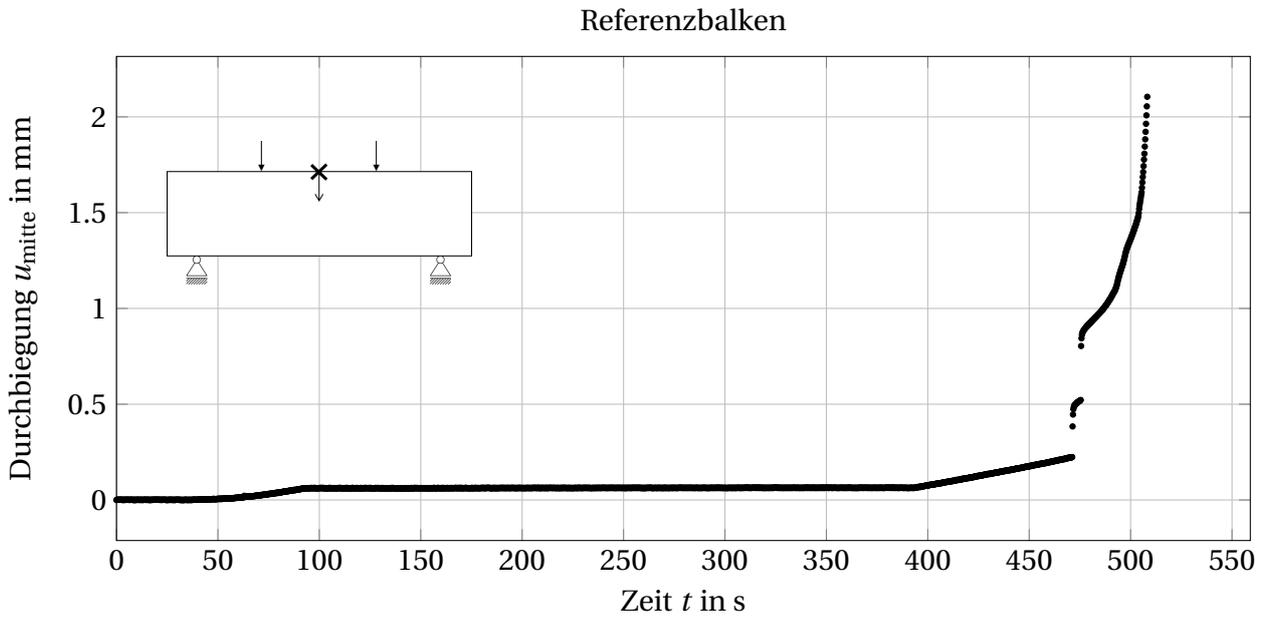


Abb. B.2: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren

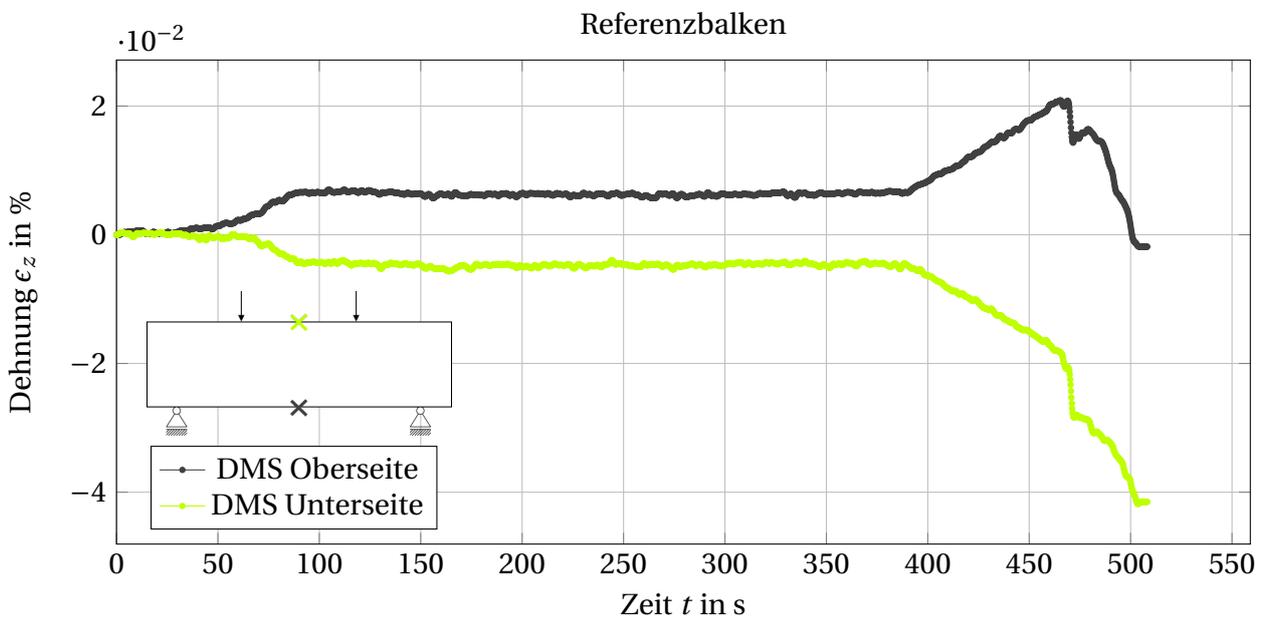


Abb. B.3: Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren

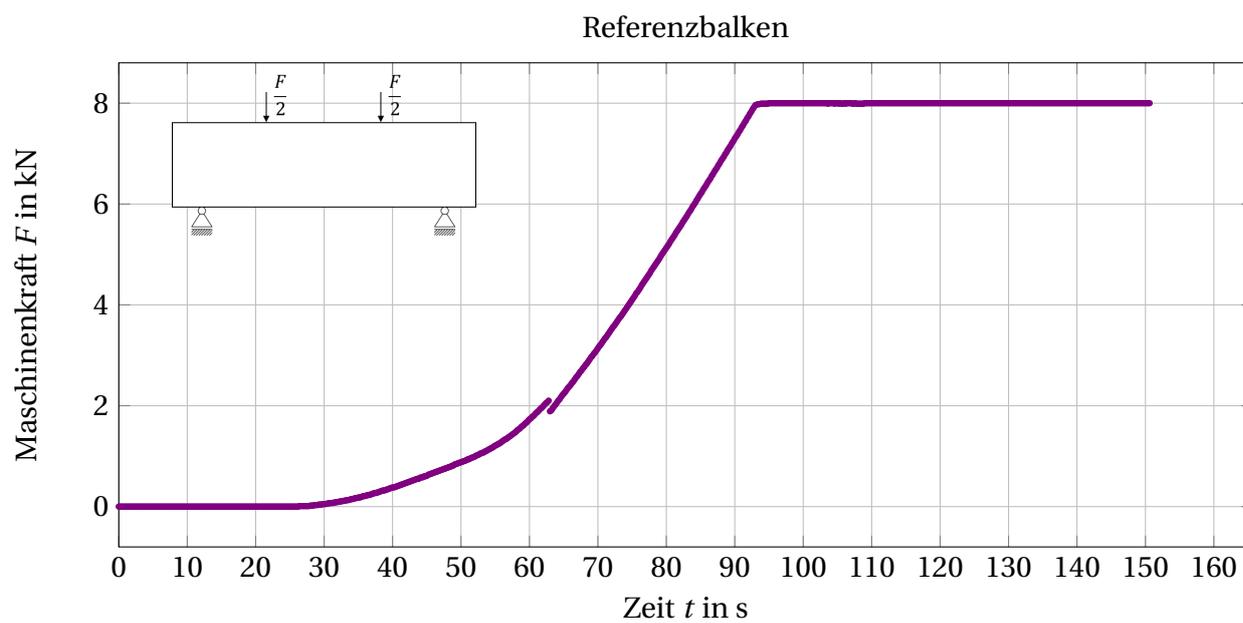
B.1.1 Referenzbalken Ausschnitt von $t = 0$ s bis $t = 150$ s

Abb. B.4: Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren. Ausschnitt von $t = 0$ s bis $t = 150$ s.

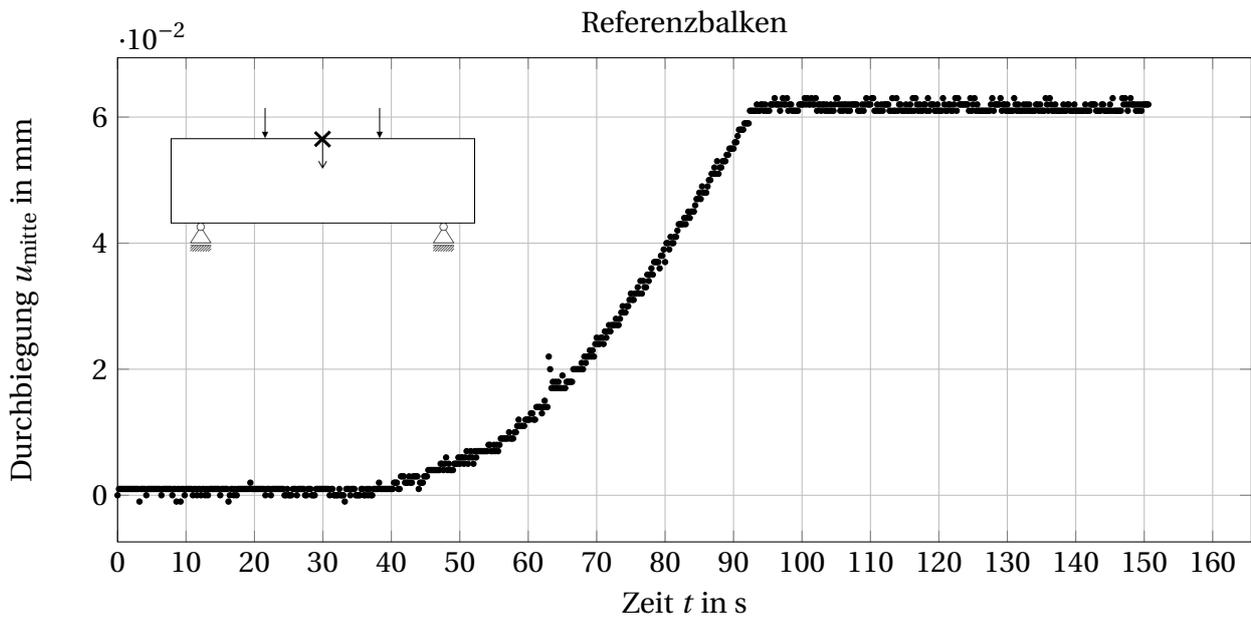


Abb. B.5: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren. Ausschnitt von $t = 0$ s bis $t = 150$ s.

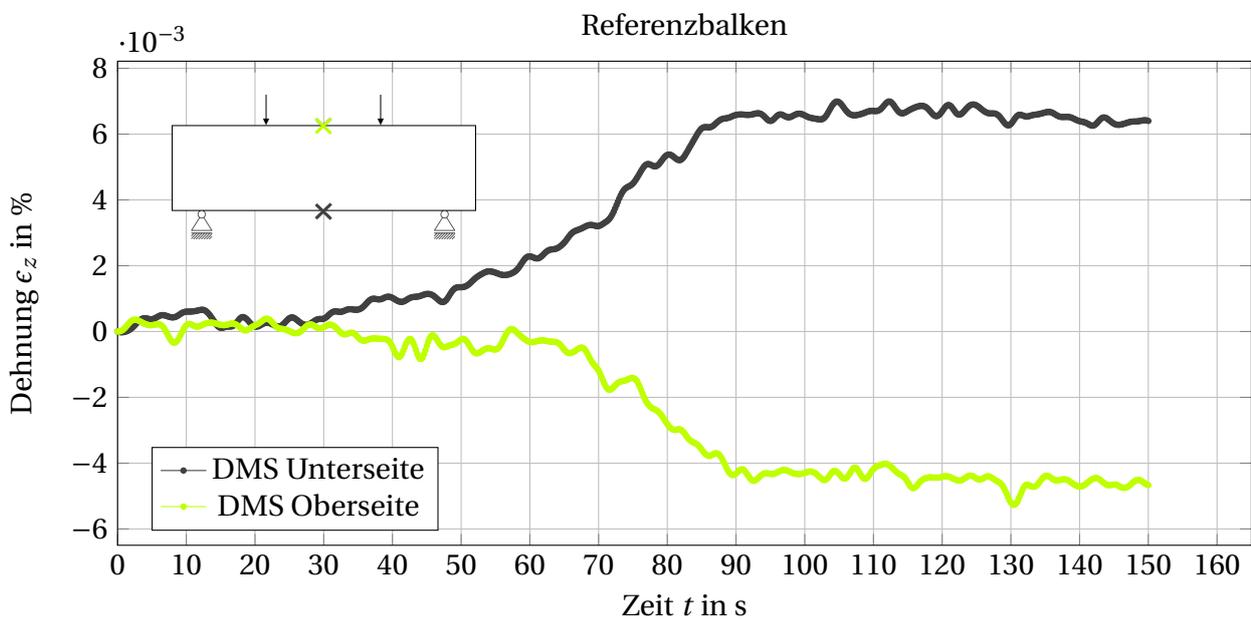


Abb. B.6: Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Referenzbalkens ohne Aktoren. Ausschnitt von $t = 0$ s bis $t = 150$ s.

B.2 Versuchsergebnisse des adaptiven Balkens R3

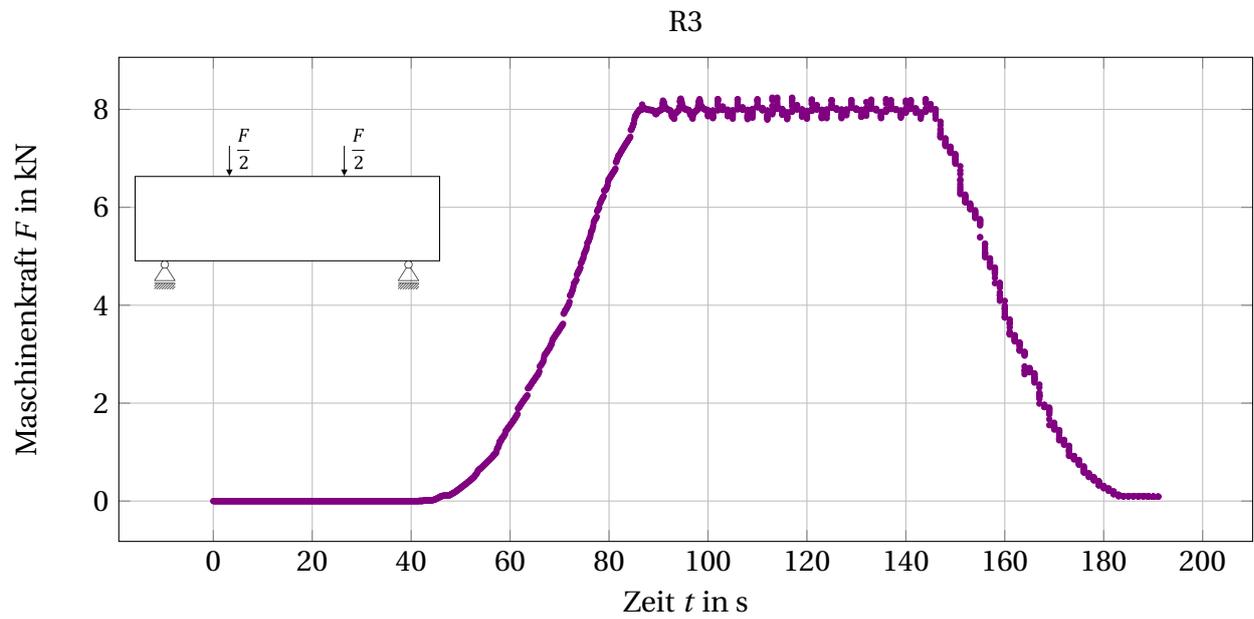


Abb. B.7: Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R3

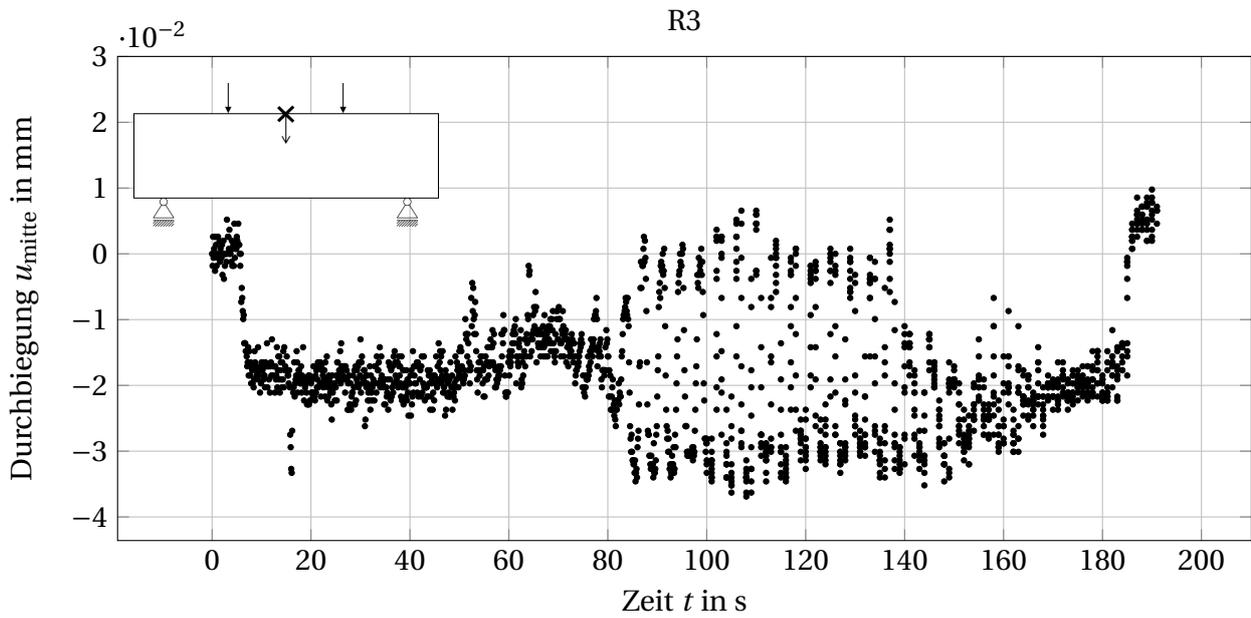


Abb. B.8: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R3

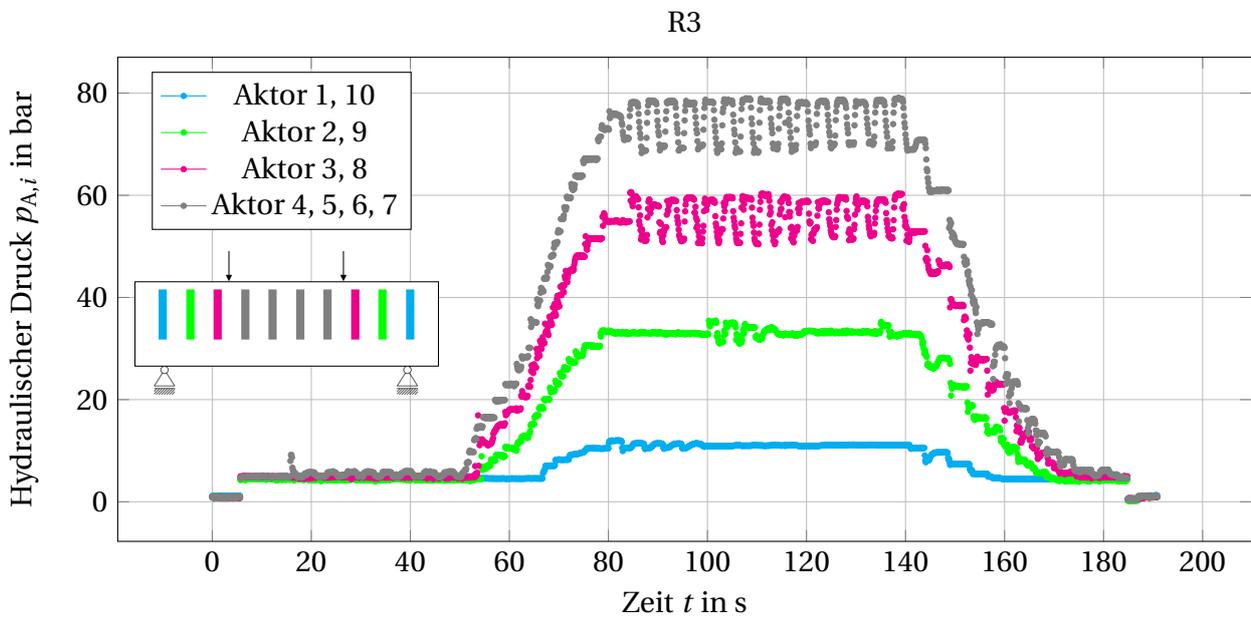


Abb. B.9: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des Balkens R3

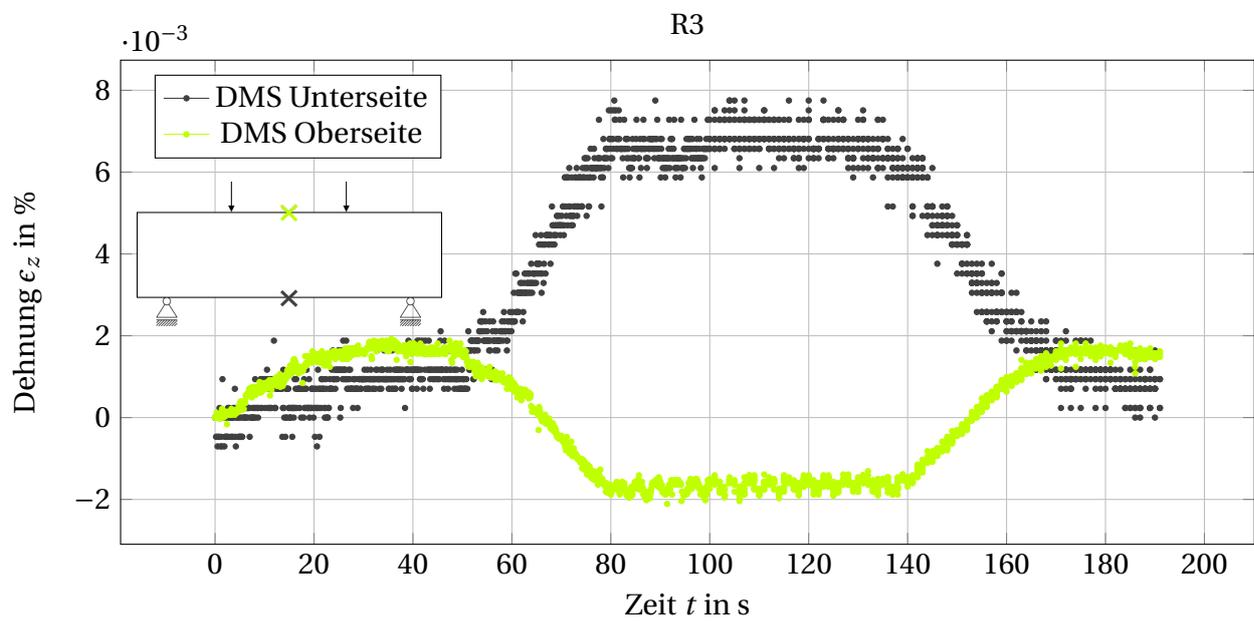


Abb. B.10: Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R3

B.3 Versuchsergebnisse des adaptiven Balkens R4

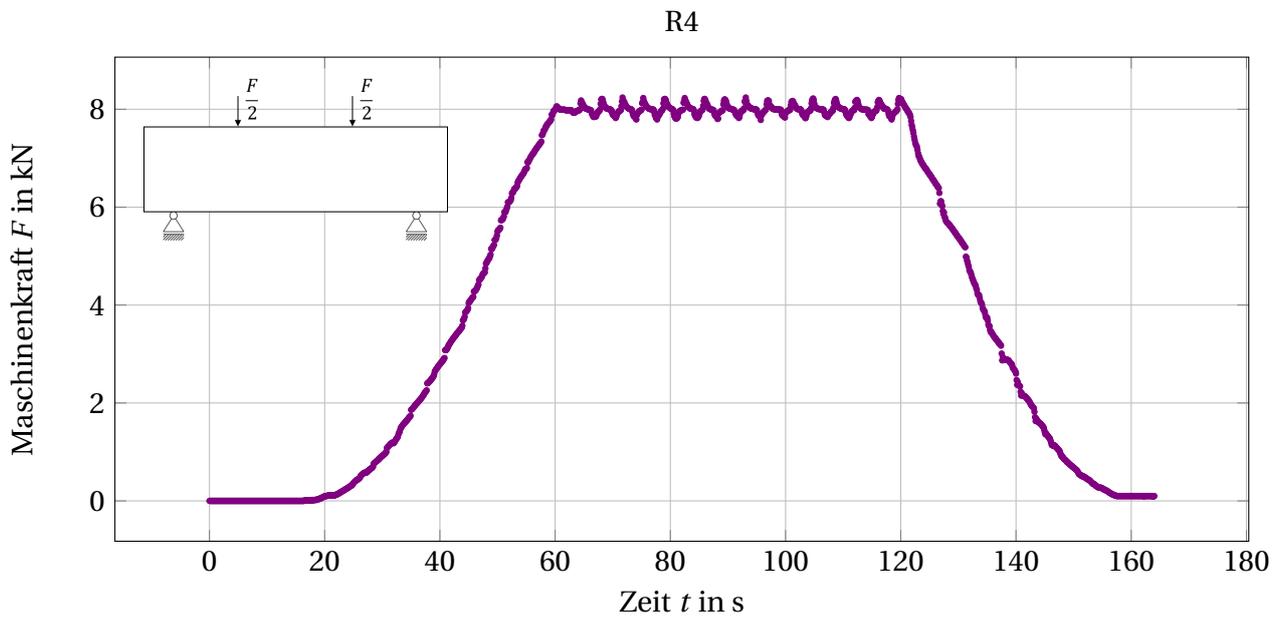


Abb. B.11: Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R4

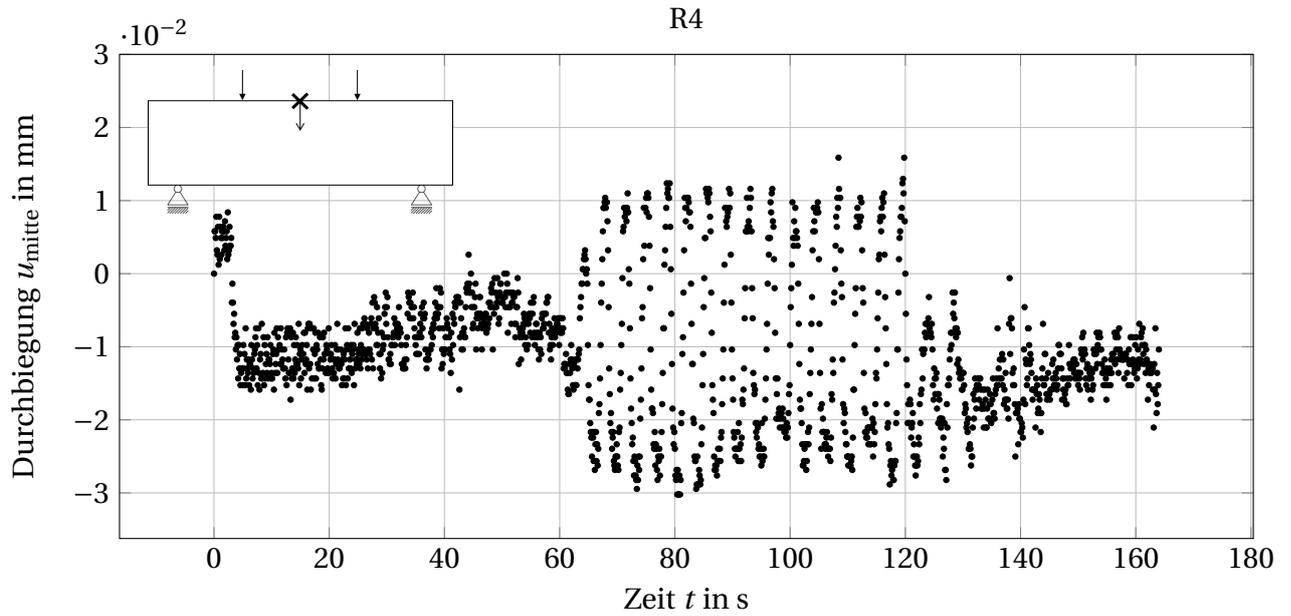


Abb. B.12: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R4

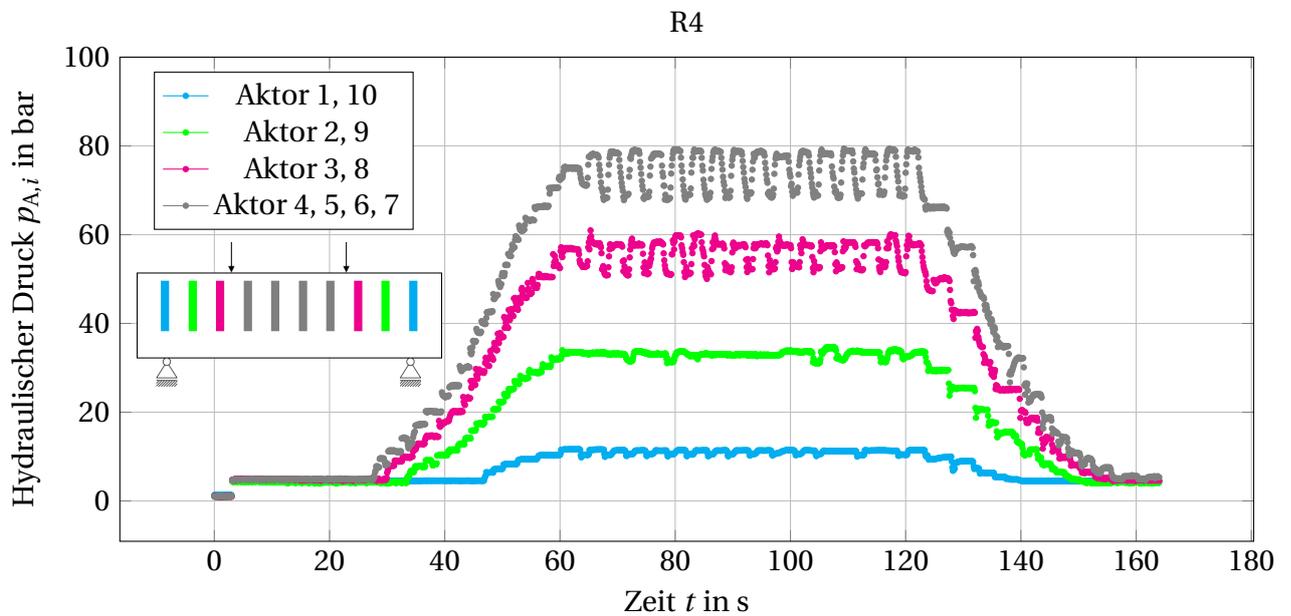


Abb. B.13: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des Balkens R4

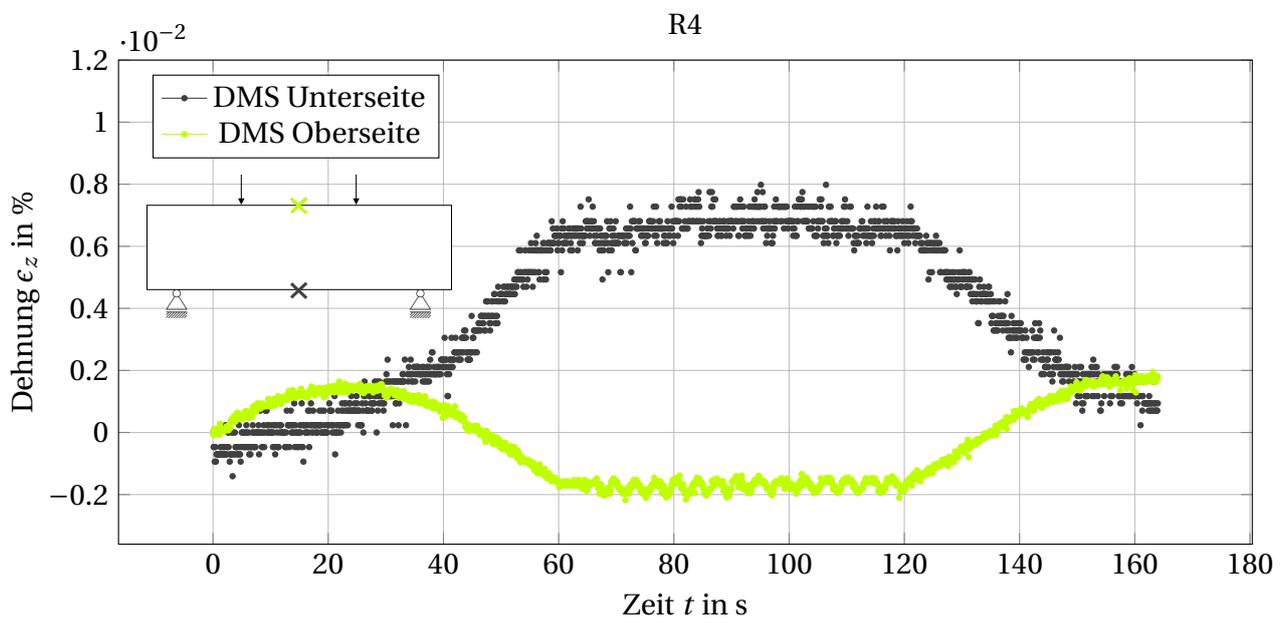


Abb. B.14: Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Balkens R4

B.4 Versuchsergebnisse des adaptiven Balkens U1

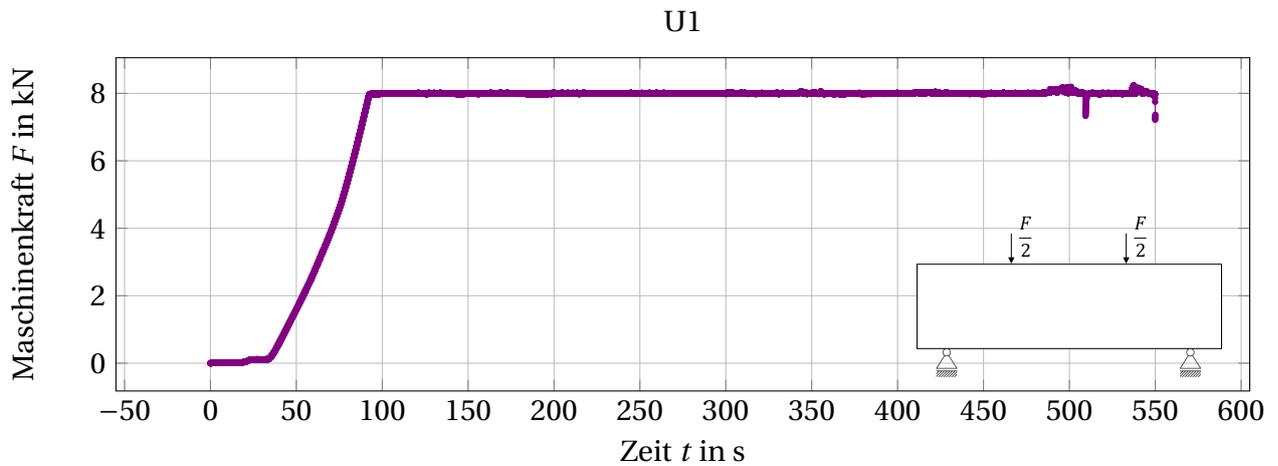


Abb. B.15: Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit des Biegeträgers mit universalem Druck U1

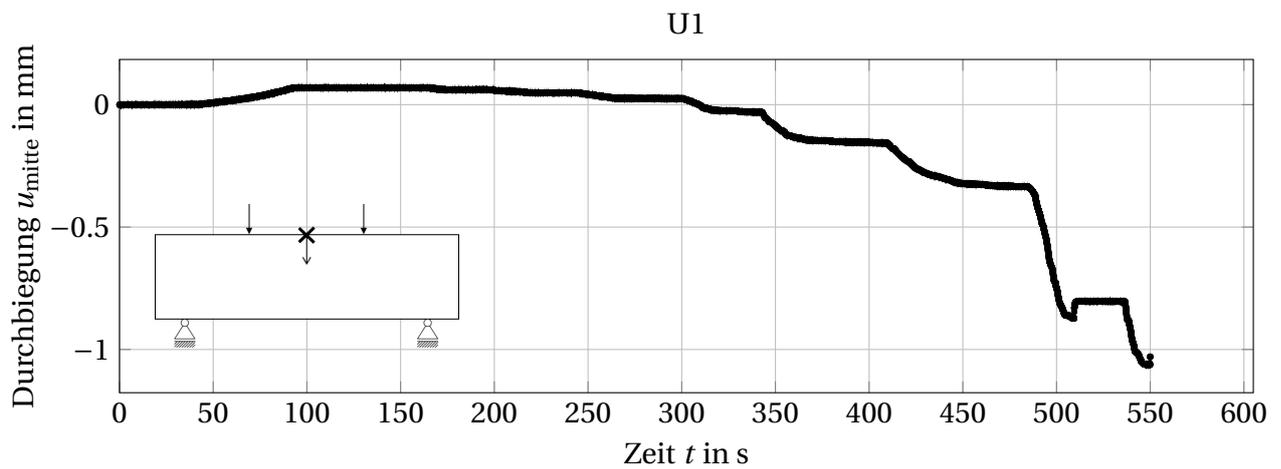


Abb. B.16: Durchbiegung an der Oberkante des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Biegeträgers mit universalem Druck U1

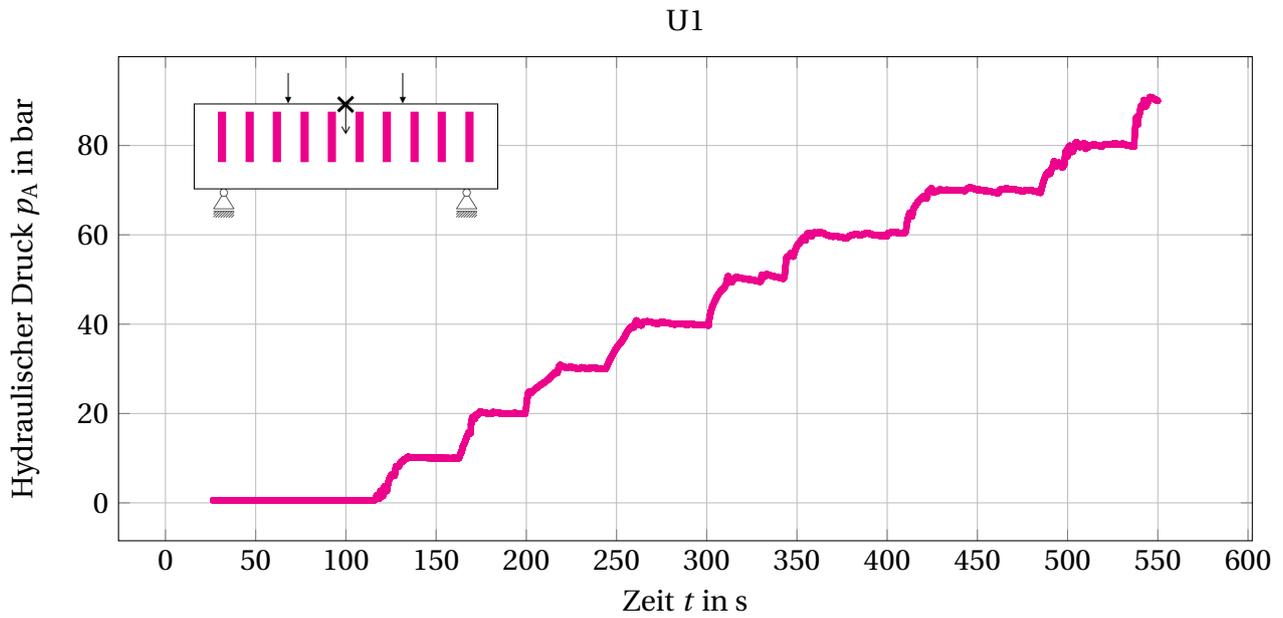


Abb. B.17: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Zeit in den Aktoren des Biegeträgers U1

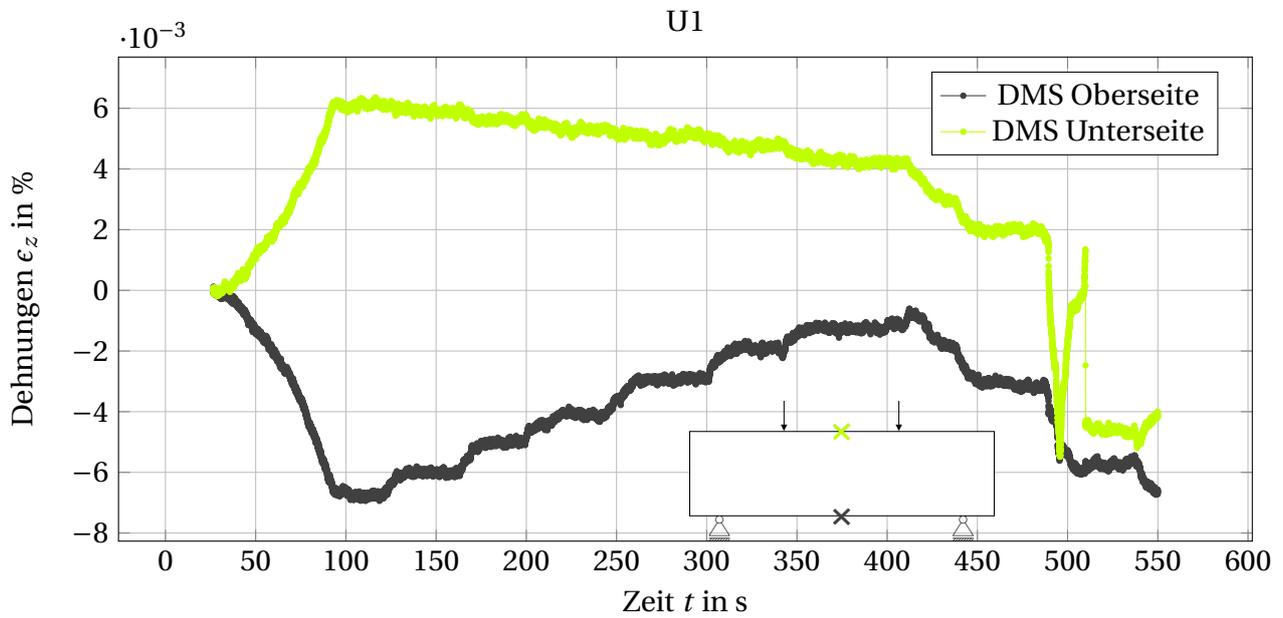


Abb. B.18: Dehnung an der Unterkante (Grau) und an der Oberkante (Grün) des Trägers, in Feldmitte, in Abhängigkeit der Zeit des Biegeträgers mit universalem Druck U1

C Anhang

C.1 Überprüfung des Elastizitätsmoduls des verwendeten Betons

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) wird mittels Druckprüfungen nach Verfahren A der DIN EN 12390-13 *Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung* [16] bzw. ergänzend [17] und [106] überprüft. Es werden drei Proben mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ getestet¹. Die Aushärtezeit liegt bei mehr als 28 Tagen. Hier wird von den Vorgaben aus der Norm abgewichen, da auch die adaptiven Biegeträger eine Aushärtezeit von mehr als 28 Tagen haben. Abbildung C.1 zeigt den Aufbau des Versuchs mit eingespanntem Betonprobekörper.



Abb. C.1: Prüfaufbau mit Betonprobe zur Bestimmung des E-Moduls

Die Probekörper werden mehrmals be- und entlastet (vgl. Abbildung C.2). Zunächst werden die Probekörper dreimal bis zu einer Kraft von 5 kN vorbelastet und auf 0,8 kN entlastet. Die jeweiligen Haltezeiten betragen 20 s. Nach einer Haltezeit von 60 s nach den drei Vorbelastungen werden die eigentlichen Belastungen bis zu einer maximalen Last von 16 kN durchgeführt. Während der Haltezeit wird überprüft, ob es zu einem Anstieg der Dehnungen kommt, was nicht der Fall ist. Das Entlastungsniveau liegt bei 5 kN. Die jeweiligen Haltezeiten der Ent- und Belastungen betragen 20 s. Die Verfahrensgeschwindigkeiten der Prüfmaschine liegen stets bei 0,6 MPa/s. In den Abbildungen C.3, C.4 und C.5 sind die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der

¹ Bei den Prüfkörperabmessungen sind Zylinder bevorzugt. Es sind aber auch andere Abmessungen, wie prismatische Probekörper möglich, sofern d (Breite) $\geq 3,5 \cdot D_{max}$ und das Verhältnis der Probekörperlänge L zum Maß d im Bereich von $\frac{L}{d} \leq 4$ liegt.

drei Versuche aufgezeigt. Die E-Moduln, die aus den Versuchen hervorgehen, sind in Tabelle C.1 aufgelistet.

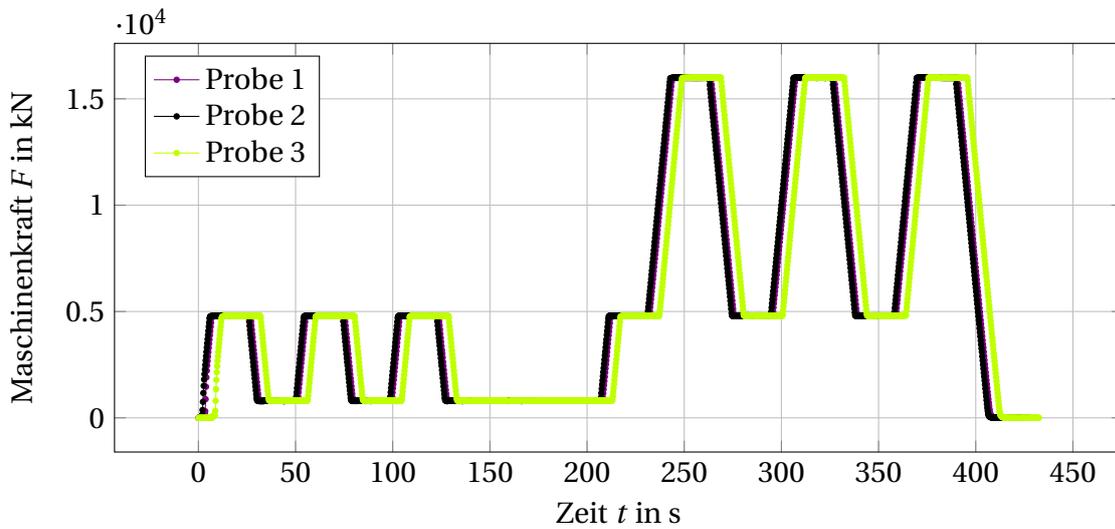


Abb. C.2: Maschinenkraft in Abhängigkeit der Zeit der drei Betonproben

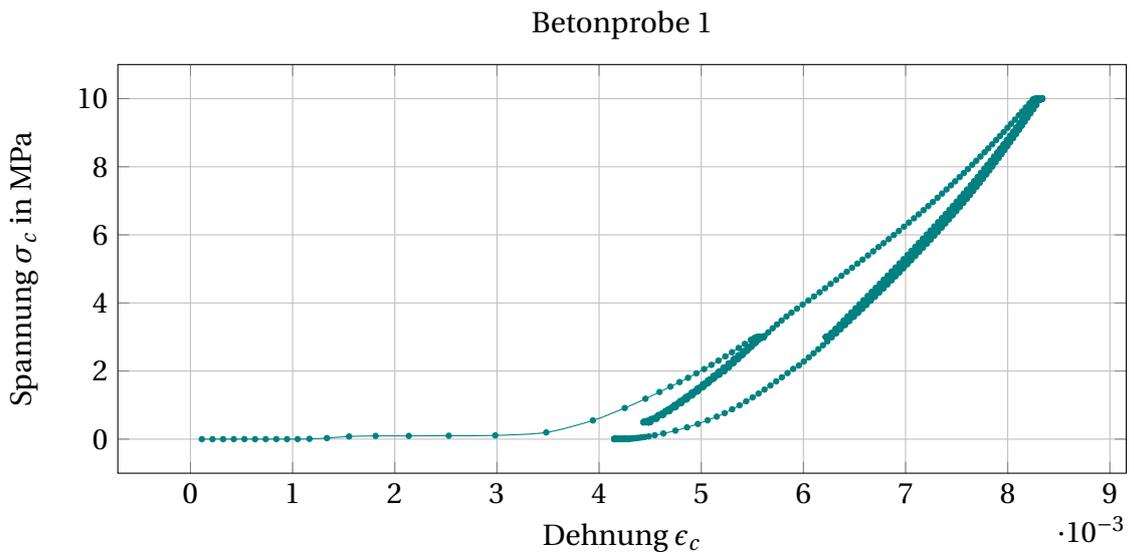


Abb. C.3: Spannung in Abhängigkeit der Zeit der Betonprobe 1

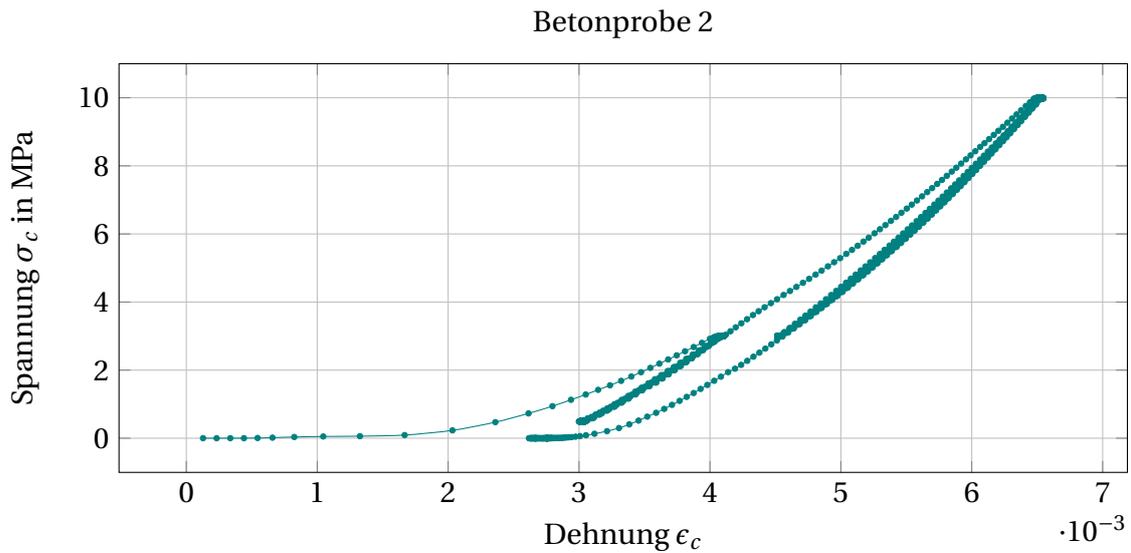


Abb. C.4: Spannung in Abhängigkeit der Zeit der Betonprobe 2

Tab. C.1: Experimentell ermittelte E-Moduln und deren Abweichung zum verwendeten E-Modul in den Simulationen

Probekörper	E-Modul $E_{c,0}$	verwendeter E-Modul	Abweichung
1	35.483,87 MPa	34.000 MPa	4,18 %
2	33.118,18 MPa	34.000 MPa	-2,66 %
3	34.375,19 MPa	34.000 MPa	1,09 %

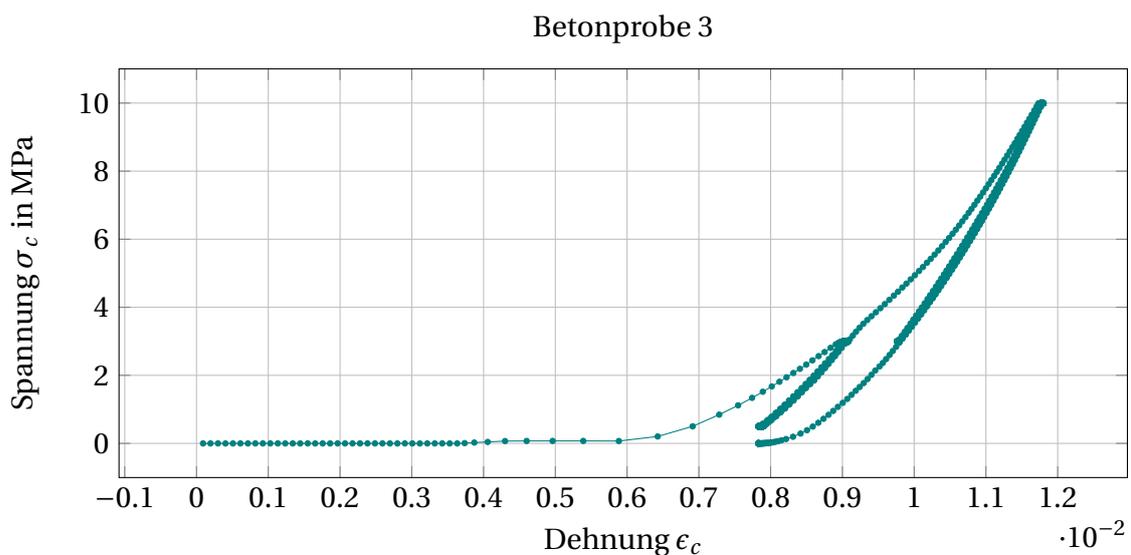


Abb. C.5: Spannung in Abhängigkeit der Zeit der Betonprobe 3

D Anhang

D.1 Kennlinien der Aktoren

Zur Überprüfung der Linearität der Beziehung zwischen hydraulischem Druck und Kraft wird der Zusammenhang in experimentellen Untersuchungen ermittelt. Es werden einzelne Aktoren in die Prüfmaschine eingespannt und mit hydraulischem Druck beaufschlagt. Die daraus resultierende Expansion wird behindert, sodass eine resultierende Aktorkraft messbar ist. Die Untersuchungen beschränken sich auf die Aktoren, bei denen der Druck über ein Hydraulikaggregat erzeugt wird (vgl. Kapitel 5.4.2). Für die thermischen Aktoren ist die Untersuchung in dieser Form nicht möglich, da kein Drucksensor integriert ist (vgl. Kapitel 5.4.1). Da sich Aufbau und die Funktionsweise ähneln, sind die Erkenntnisse übertragbar.

Es werden drei Versuche durchgeführt. Die Abbildungen D.1, D.2 und D.3 zeigen die Verläufe der gemessenen Kraft über den aufgebrachten hydraulischen Druck. Der Druck $p_{A,i}$ wird kontinuierlich auf $p_{A,1} = 169$ bar im ersten, $p_{A,2} = 181$ bar im zweiten und $p_{A,3} = 180$ bar im dritten Versuch gesteigert. Dabei kommt es zu einer maximalen Kraft $F_{A,\text{Versuch}}$ von 82 kN, 89 kN bzw. 83 kN.

Über die Gleichung

$$F_A = A_A \cdot p_A \quad (\text{D.1})$$

kann die theoretische Aktorkraft $F_{A,\text{Berechnet}}$ mithilfe des aufgebrachten Druckes $p_{A,\text{Versuch}}$ und der Aktorfläche A_A bestimmt werden. Die Fläche der Aktoren A_A beträgt $3.846,5 \text{ mm}^2$ (vgl. Kapitel 5.4.2). Die berechneten Kräfte $F_{A,\text{Berechnet}}$ und die gemessenen Kräfte $F_{A,\text{Versuch}}$ sowie deren prozentuale Abweichung sind in Tabelle D.1 aufgeführt.

Tab. D.1: Gemessene Kraft und theoretisch bestimmte Aktorkraft

Versuch	max. $p_{A,\text{Versuch}}$	max. $F_{A,\text{Versuch}}$	$F_{A,\text{Berechnet}}$	Abweichung
1	169,7 bar	82,1 kN	65,3 kN	20,4 %
2	180,9 bar	89,7 kN	69,6 kN	22,4 %
3	179,65 bar	82,3 kN	69,1 kN	16,1 %

Die Abweichungen zwischen den theoretischen und den gemessenen Kräften liegen mit 22,4 % bzw. 16,1 % im akzeptablen Bereich. Die Tatsache, dass alle drei Aktoren in etwa die gleiche Abweichung zeigen, lässt vermuten, dass eine systemische Unterschätzung vorliegt. Vermutlich ist der Durchmesser, der dem Druck zur Verfügung steht, größer als die zugrundegelegten $D_{\text{innen}} = 70$ mm. Da die drei Bleche am äußeren Rand (bei $D_A = 80$ mm) verschweißt sind, kann es sein, dass Hydrauliköl im inneren Bereich zwischen dem Aussteifungsring und das

äußere Blech gelangt. Damit wäre die Fläche A_A größer als die angenommenen $3.846,5 \text{ mm}^2$. Dies würde die erhöhten gemessenen Kräfte erklären. Die Beziehung zwischen dem hydraulischen Druck und der resultierenden Kraft kann als linear betrachtet werden.

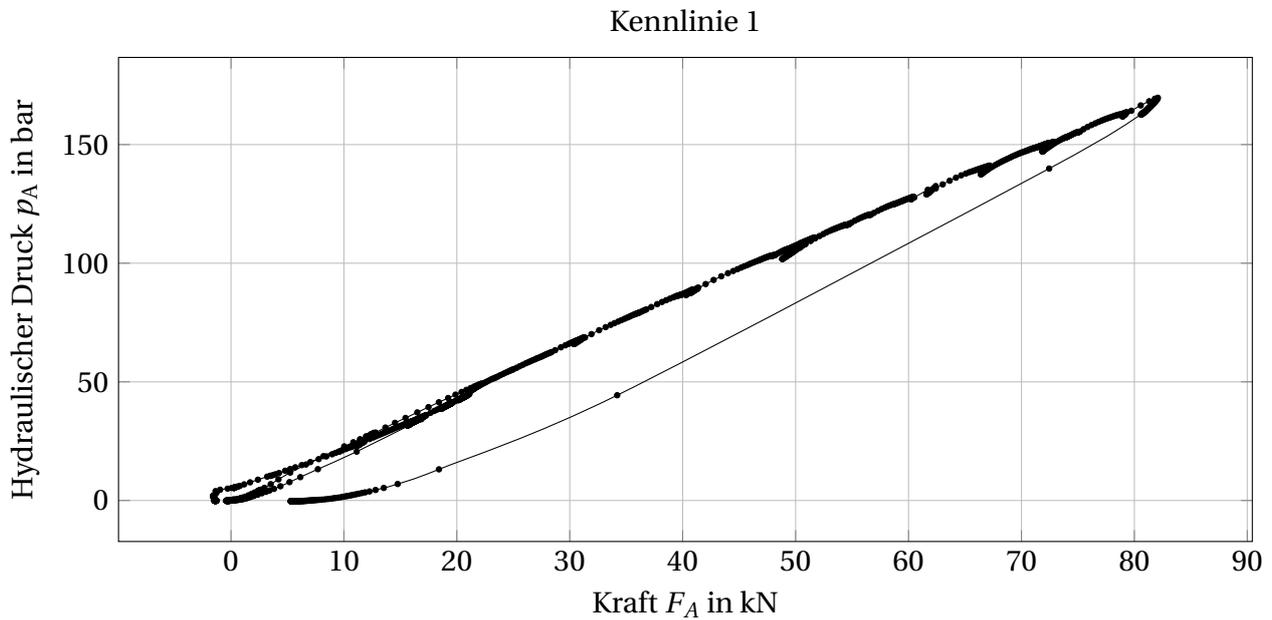


Abb. D.1: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Maschinenkraft im Aktor 1

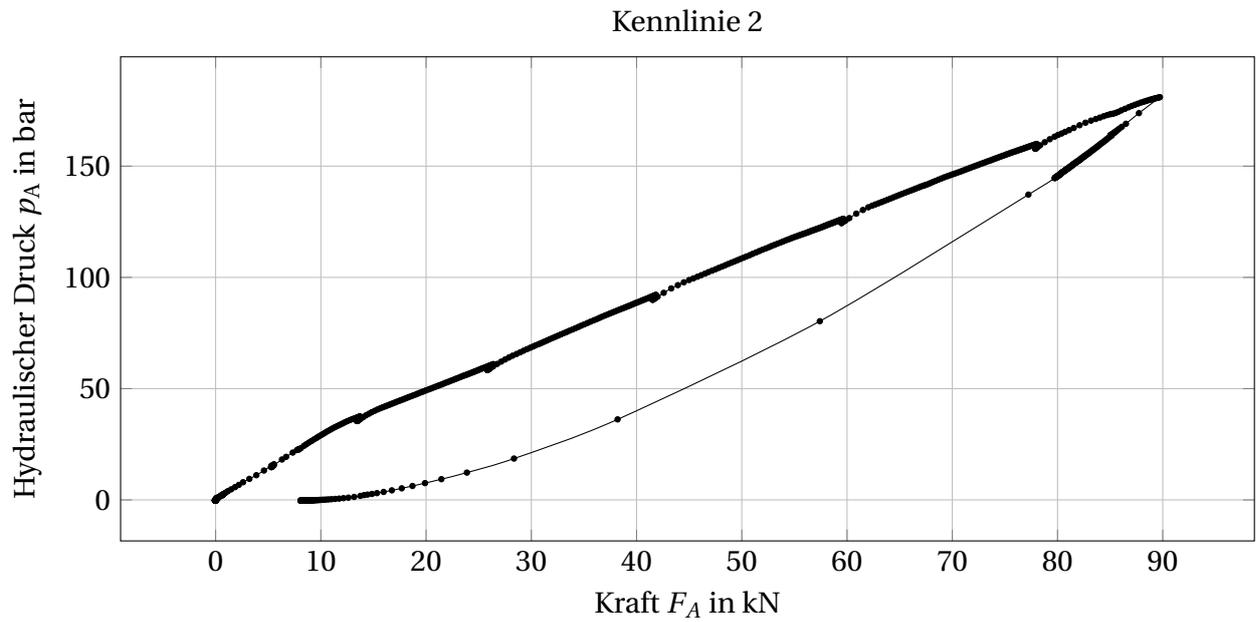


Abb. D.2: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Maschinenkraft im Aktor 2

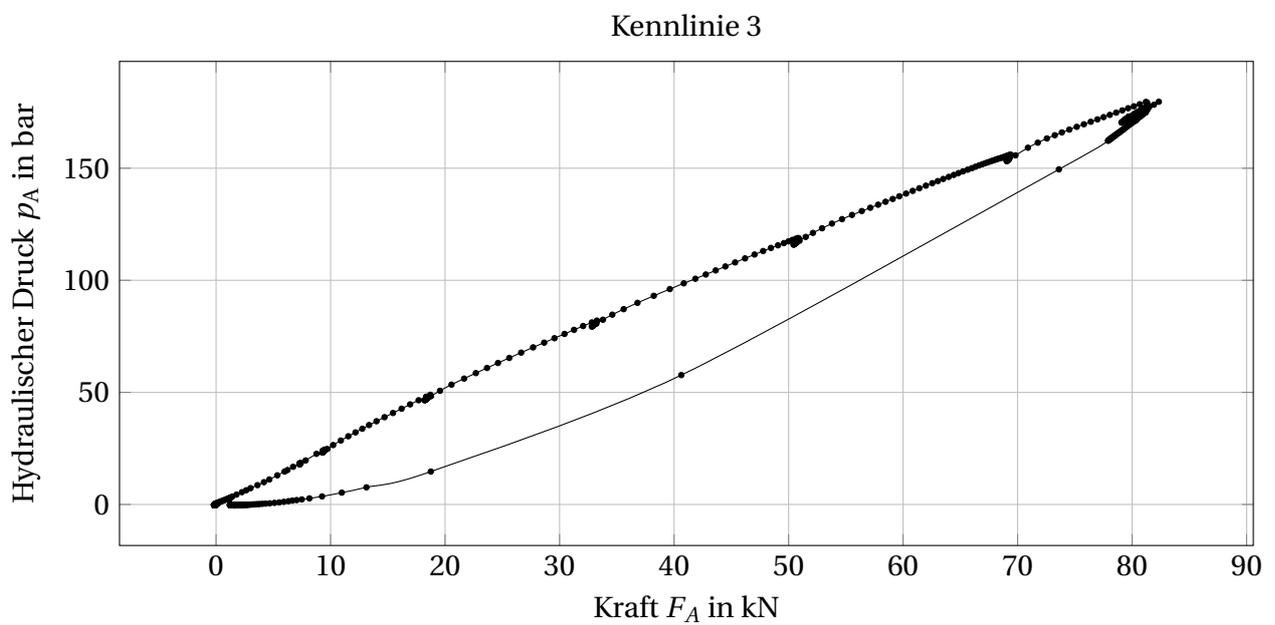


Abb. D.3: Hydraulischer Druck in Abhängigkeit der Maschinenkraft im Aktor 3

E Anhang

Es werden zwei Fallbeispiele für die Bestimmung des Grades der zeitlichen Ausnutzung untersucht.

E.1 Hörsaal im Regelbetrieb

Der reguläre Hörsaalbetrieb findet von Montag bis Freitag, also 5 Tage in der Woche, statt. In der vorlesungsfreien Zeit werden die Hörsäle für die Durchführung von Prüfungen genutzt. Deshalb wird vereinfachend nicht zwischen vorlesungs- und vorlesungsfreier Zeit unterschieden. Würde diese Unterscheidung getroffen, wäre der zeitliche Ausnutzungsgrad noch geringer. Bei einem angenommenen Betrieb von 08:00 Uhr bis 20:00 Uhr ergibt sich eine tägliche Nutzung von 50 % und eine jährliche Nutzung von

$$52 \text{ Wochen} \cdot 5 \text{ Tage pro Woche} \cdot \frac{12}{24} = 125 \text{ Tage.} \quad (\text{E.1})$$

Daraus folgt auf ein Jahr bezogen eine zeitliche Ausnutzung von 34 %. Diese Abschätzung kann als oberer Randwert betrachtet werden. Die tatsächliche Nutzung ist wahrscheinlich geringer, da nicht jeden Tag jeder Hörsaal 12 Stunden lang belegt ist. Zudem müssen Feiertage und Exkursionswochen berücksichtigt werden. Es wird aber deutlich, wie gering bereits bei dieser konservativen Abschätzung die zeitliche Ausnutzung ist.

E.2 Fußballstadion im Ligabetrieb

In einem standarmäßigen deutschen Fußballstadion der Profiligen finden durch den Ligabetrieb mit 18 Mannschaften im Jahr 17 Spiele statt. Eventuelle Test-, Pokal- und Spiele aus europäischen Wettbewerben werden vereinfachend vernachlässigt. Da Zuschauer meist vor Beginn eines 90-minütigen Spiels die Tribünen betreten und auch nach Beendigung im Stadion verweilen, wird pro Spieltag eine Nutzung von 4 Stunden angenommen. Damit ergibt sich im Jahr eine Nutzung von

$$17 \text{ Spieltage} \cdot \frac{4}{24} = 2,8 \text{ Tage.} \quad (\text{E.2})$$

Dies entspricht einer Ausnutzung von lediglich 0,8 % im Jahr.