

Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. H. Binz

Timon Burghardt

Aktoren zur Aktuierung linearer Tragwerkselemente

Bericht Nr. 719

Aktoren zur Aktuierung linearer Tragwerkselemente

Actuators for Actuating Linear Structural Elements

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der
Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Timon Burghardt, M.Sc.
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Oliver Sawodny

Tag der mündlichen Prüfung: 11.09.2023

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
Universität Stuttgart

2023

D 93

ISBN-13: 978-3-946924-30-2

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: mail@iktd.uni-stuttgart.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) an der Universität Stuttgart. Die Ergebnisse wurden innerhalb des Sonderforschungsbereichs 1244 (SFB 1244) „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ erarbeitet, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde.

Für die Betreuung der Arbeit gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing Hansgeorg Binz mein ganz besonderer Dank. Sein mir entgegengebrachtes Vertrauen, seine fachlichen Anregungen und die gewährten wissenschaftlichen Freiheiten zur Bearbeitung der Forschungsthemen haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing Oliver Sawodny für das Interesse an meiner Arbeit, die fachlichen Diskussionen und die Übernahme des Mitberichts. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Nicola für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer, der mir die Finalisierung dieser Arbeit am Institut ermöglichte.

Herzlich danke ich all meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts und des SFB 1244 für die angenehme Arbeitsatmosphäre und den fachlichen und persönlichen Austausch. Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Gruppenleiter Herrn Dipl.-Ing. Matthias Bachmann, Herrn Matthias Bosch, M.Sc., und Herrn Michael Voigt, M.Sc., für die vielen fachlichen Diskussionen und die Durchsicht der Dissertation. Herrn Clemens Honold, M.Sc., Herrn Dr.-Ing. Christian Kelleter, und Herrn Markus Nitzlader, M.Sc., danke ich für die großartige Zusammenarbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei den vielen wissenschaftlichen Hilfskräften und studentischen Arbeiterinnen und Arbeitern, die einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Herzlich danke ich meinen Eltern, meinem Familien- und Freundeskreis für die jahrelange Begleitung und Unterstützung. Der größte Dank gebührt meiner Frau Anna-Lena Burghardt, die mir jederzeit starken persönlichen Rückhalt gegeben und meine Arbeit durch alle Höhen und Tiefen mitgetragen hat. Ohne ihr Verständnis und ihre Unterstützung, die mir den nötigen Freiraum gegeben hat, wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Abstract	VII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Tragwerke und deren Elemente im Bauwesen	5
2.2 Leichtbaustrategien und Bauweisen	7
2.3 Adaptive Tragwerke	10
2.3.1 Klassifikation von adaptiven Strukturen	11
2.3.2 Komponenten von adaptiven Tragwerken	12
2.4 Aktoren	13
2.4.1 Einteilung von Aktoren	14
2.4.2 Aktor-Wirkprinzipien	17
2.4.2.1 Wirkprinzipien von elektromechanischen Aktoren	17
2.4.2.2 Wirkprinzip von piezoelektrischen Aktoren	18
2.4.2.3 Wirkprinzip von magneto- und elektrorheologische Aktoren	19
2.4.2.4 Wirkprinzip von fluidmechanischen Aktoren	20
2.4.2.5 Wirkprinzip von thermomechanischen Aktoren	20
2.4.3 Eigenschaften von Aktoren	21
3 Stand der Forschung und Technik	24
3.1 Aktuierung von normalkraftbeanspruchten Tragwerkselementen	24
3.2 Aktuierung von biegebeanspruchten Tragwerkselementen	28
3.3 Aktuierung von Flächentragwerken	30
3.4 Zusammenfassung und Defizite	31
4 Konkretisierung der Aufgabenstellung	35
4.1 Ziel der Arbeit	35
4.2 Vorgehensweise	36
5 Lösungsprinzipien zur Aktuierung linearer Tragwerkselemente	39
5.1 Funktionsstrukturen von aktuierbaren Tragwerkselementen	39
5.2 Lösungsprinzipien zur Aktuierung linearer Tragwerkselemente	44

5.3	Lösungsprinzipien für Aktoren.....	50
5.3.1	Lösungsprinzipien für Energiewandler.....	50
5.3.2	Lösungsprinzipien für Stellübertrager	54
5.4	Zwischenfazit	56
6	Aktuierung eines Aussteifungselements.....	57
6.1	Vorstellung des Demonstrator-Hochhauses.....	57
6.2	Planen und Klären der Aufgabe	60
6.3	Konzeption	62
6.3.1	Funktionsstruktur	62
6.3.2	Teillösungen und Konzepterstellung.....	63
6.3.2.1	Konzeptvariante 1	66
6.3.2.2	Konzeptvariante 2	66
6.3.2.3	Konzeptvariante 3	67
6.3.2.4	Konzeptvariante 4	68
6.3.3	Bewertung und Auswahl.....	68
6.4	Entwurf.....	70
6.4.1	Erstentwurf	70
6.4.2	Maßstabsgetreuer Prototyp der Tragwerksstruktur	71
6.4.3	Finaler Entwurf und Einsatz im Demonstrator-Hochhaus	73
6.5	Zwischenfazit	75
7	Aktuierung einer Stütze	77
7.1	Planen und Klären der Aufgabe	77
7.2	Konzeption	79
7.2.1	Funktionsstruktur	79
7.2.2	Teillösungen und Konzepterstellung.....	80
7.2.2.1	Konzeptvariante 1	81
7.2.2.2	Konzeptvariante 2	82
7.2.2.3	Konzeptvariante 3	83
7.2.3	Bewertung und Auswahl.....	83
7.3	Entwurf.....	84
7.4	Zwischenfazit	86
8	Aktuierung eines Biegebalkens	89
8.1	Planen und Klären der Aufgabe	89
8.2	Konzeption	92
8.2.1	Funktionsstruktur	92
8.2.2	Teillösungen und Konzepterstellung.....	93

8.2.2.1	Konzeptvariante 1.....	96
8.2.2.2	Konzeptvariante 2.....	97
8.2.2.3	Konzeptvariante 3.....	97
8.2.2.4	Konzeptvariante 4.....	98
8.2.2.5	Konzeptvariante 5.....	98
8.2.2.6	Konzeptvariante 6.....	99
8.2.3	Bewertung und Auswahl.....	99
8.3	Entwurf	101
8.4	Experimentelle Evaluation	104
8.4.1	Versuche unter Laborbedingungen	104
8.4.1.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	104
8.4.1.2	Versuchsergebnis	106
8.4.2	Versuch mit einem Balken mit realitätsnahen Abmessungen....	108
8.4.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	108
8.4.2.2	Versuchsergebnis	111
8.5	Zwischenfazit.....	114
9	Aktuierung eines Biegebalkens mit integriertem Energiesteller.....	117
9.1	Planen und Klären der Aufgabe.....	117
9.2	Konzeption.....	119
9.2.1	Funktionsstruktur.....	119
9.2.2	Teillösungen und Konzepterstellung	120
9.2.2.1	Konzeptvariante 1.....	121
9.2.2.2	Konzeptvariante 2.....	122
9.2.2.3	Konzeptvariante 3.....	123
9.2.2.4	Konzeptvariante 4.....	123
9.2.2.5	Konzeptvariante 5.....	124
9.2.3	Bewertung und Auswahl.....	124
9.3	Entwurf	126
9.4	Experimentelle Validierung	127
9.4.1	Versuchsaufbau und Durchführung.....	128
9.4.2	Versuchsergebnis	128
9.5	Zwischenfazit.....	130
10	Zusammenfassung.....	133
11	Ausblick.....	137
	Literaturverzeichnis	139
	Anhang.....	155

A.1	Technologie-Reifegrad nach [DIN ISO 16290 2016].....	155
A.2	Quellennachweis für Tabelle 5.3.....	157
A.3	Paarweiser Vergleich für die Konzeptauswahl.....	159

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

DFG	Deutsche Forschungsgesellschaft
DMS	Dehnmessstreifen
ERF	Elektrorheologische Flüssigkeit
FG	Formgedächtnis
FGL	Formgedächtnis-Legierung
IKTD	Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
ILEK	Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
MRF	Magnetorheologische Flüssigkeit
SFB	Sonderforschungsbereich
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TRL	Technologie-Reifegrad
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Erläuterung
a	mm	Kantenlänge des rechteckigen Innenraums der Stütze
b	mm	Breite des Tragwerkselements
d	mm	Durchmesser
E_{elektr}	W	Elektrische Energie
E_{mech}	W	Mechanische Energie
f_{max}	Hz	Aktuierungsfrequenz
F_m	N	Reluktanz-/Maxwellkraft
F_{max}	N	Maximale Kraft
F_{pass}	N	Im passiven Zustand zu übertragende Kraft

F_{vor}	N	Vorspannkraft
h	mm	Höhe des Tragwerkselements
i	-	Getriebeübersetzung
l	mm	Länge des Tragwerkselements
m	kg	Masse
n	-	Anzahl der Aktoreinheiten
n_{ges}	-	Gesamtanzahl von Baugruppen
P_{elektr}	W	Elektrische Leistung
t_{vor}	s	Zulässiger Zeitbedarf zum Einstellen der Vorspannung
T_U	°C	Umgebungstemperatur
$v_{\text{mech,A}}$	mm	Stellgeschwindigkeit eines Aktors
$v_{\text{mech,T}}$	mm	Bewegungs- bzw. Verformungsgeschwindigkeit eines Tragwerkselements

Abstract

One approach to reducing the consumption of materials and energy throughout the life cycle of a building is through adaptive structures. By using sensors, actuators and a control unit, load-bearing structures are able to respond actively to external loads. By applying forces or displacements, the stress state in the structure or in individual components can be changed. This allows dynamic loads to be damped and (quasi-)static loads to be redistributed.

Previous studies on adaptive structures have focused on their load-bearing behavior due to actuation. The emphasis is on the investigation of the effect that can be achieved by actuation. The actuators required for actuation are of minor importance.

For effective actuation, the structural element and the actuator must be considered together. This requires a holistic development. The overall objective of this thesis is to support this development from the actuator perspective. The field of interest is limited to the actuation of linear structural elements. Concretely, the question is answered how actuatable structural elements can be developed by means of varying already existing solutions for parts of the overall system.

In order to provide these partial solutions, initially the required sub-functions are determined and combined in function structures. From this, actuation concepts can be derived that are required to specify the actuator task. The concretization of the determined functions leads to a collection of solution principles. Using four examples, it is shown how actuators for actuating linear structural elements can be developed by varying the solution principles.

All examples were investigated within the Collaborative Research Center 1244 (SFB 1244). The procedure is based on the development process according to Pahl and Beitz [GERICKE21, S. 66 ff.]. Initially, requirements are determined. The conception bases on the collections of the solution principles. The possibility of generating holistic concepts by means of variation of the solution principles is confirmed. After the design is completed, the prototypes are validated experimentally.

For the first and second example, bracing and columns of the demonstrator high-rise building of the SFB 1244 are to be actuated. Therefore, hydraulic actuators are used. In case of the bracing, the actuators are installed directly in the load-bearing structure. The column consists of a hollow profile into which the actuators are integrated. Here, actuation takes place parallel to the load-bearing outer structure. The proof of function of both

actuatable structural elements is successfully demonstrated on a full-scale prototype structure.

A reinforced concrete beam subjected to bending is to be actuated in the third example. For this purpose, pressure chambers are integrated into the beam, which expand due to an internal hydraulic pressure. This results in the bending moment, which counteracts the deflection due to external loads. The function of the beam is verified on approx. 1.2 m long beams. The experimental evaluation is carried out on an approx. 4.4 m long beam in a four-point bending test.

In a fourth example, another beam made of reinforced concrete is to be actuated. For that reason, a thermo-mechanical actuator is developed. Contrary to the previous example, no external power unit and valves are required. The function is demonstrated on an approx. 1.2 m long beam in a four-point bending test. Due to the thermal inertia, only static loads can be compensated.

1 Einleitung

Die Errichtung und der Betrieb von Bauwerken ist energie- und ressourcenintensiv. Weltweit sind ca. die Hälfte des weltweiten Rohstoffabbaus [UNEP11, S. 11], 37 % der CO₂-Emissionen [UNEP22, S. 42] und 45 % des Energieverbrauchs [UNEP11, S. 44] dem Bauwesen zuzurechnen. Allein in Deutschland entfallen 55 % des Abfallaufkommens [DESTANTIS, S. 35] auf das Bauwesen.

Bereits heute zeigt sich eine Verknappung von Baumaterial. Der weltweit am meisten verwendete Werkstoff ist Stahlbeton [CURBACH13, S. 751]. Der Verbrauch von Sand, einer der Hauptbestandteile von Beton, beträgt fast das Doppelte der auf natürliche Weise entstehenden Menge [UNEP14, S. 2]. Aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung [UN19, S. 2] und der damit einhergehenden Nachfrage an Wohnraum und Infrastruktur [WEIDNER18, S. 109] ist mit einem weiter steigenden Verbrauch zu rechnen.

Ein maßgeblicher Treiber des hohen Ressourcenverbrauchs ist die Art des heutigen Bauens. Konventionelle Bauwerke sind nicht in der Lage, auf sich ändernde Einwirkungen, z. B. Windlasten, zu reagieren. Infolgedessen erfolgt die Auslegung von Tragwerken anhand der kritischsten Lastfallkombination [DIN EN 1990 2021, S. 31 ff.]. Während der Nutzung treten diese sehr selten oder nie auf. Daraus resultiert eine Überdimensionierung für den größten Teil der Lebenszeit des Tragwerks [WEIDNER19, S. 1 f.]. Neue Ansätze zum energie- und ressourceneffizienten Bauen sind daher gefragt [CURBACH13, S. 751].

Adaptive Tragwerke sind in der Lage, auf äußere Beanspruchungen aktiv zu reagieren. Die Integration von Sensoren, Aktoren und einer Regelungseinheit ermöglicht das gezielte Verändern der Systemeigenschaften [CLARK98, S. 8]. Durch das Einbringen von Kräften oder Verformungen kann der Spannungszustand innerhalb des Tragwerks oder in einzelnen Tragwerkselementen entsprechend der äußeren Belastung angepasst werden. Eine Reduzierung der Masse ist somit möglich. [SOBEK14, S. 787]

1.1 Problemstellung

Bisherige Studien zu adaptiven Tragwerken fokussieren deren Tragverhalten aufgrund einer Aktuierung. Dabei steht die Untersuchung der Auswirkung im Vordergrund, d. h. die Frage nach den Effekten, die sich durch die Aktuierung erzielen lassen. So werden das durch die Aktuierung beeinflusste Verformungsverhalten und der Lastabtrag von Stabtragwerken, z. B. in [REINHORN92, S. 2-1 ff.] und [BANI-HANI98; BANI-HANI99,

S. 998 f.], Brücken, z. B. in [BOSENS01, S. 969 ff.], und Schalen, z. B. in [NEUHÄUSER13A], untersucht. Schwerpunktmäßig werden Anwendungen mit dynamischen Belastungen betrachtet, bei der die Aktuierung vorrangig zur Schwingungsdämpfung eingesetzt wird, wie bspw. in [BLEICHER12, S. 90].

Weiterhin wird die Position des Aktors in Bezug auf die zu beeinflussende Struktur untersucht. So wird z. B. in [SENATORE13, S. 2507] die Berechnung der Anzahl der notwendigen Aktoren sowie deren Platzierung zur Aktuierung eines Fachwerkträgers vorgestellt. Ebenfalls existieren Studien, in denen die Möglichkeiten der Kraffteinleitung betrachtet werden. Beispielhaft sind hier die Untersuchungen für biegebeanspruchte Strukturen in [CONNOR03, S. 442 f.] genannt. Die Aktorik spielt eine untergeordnete Rolle. In den bisher realisierten Forschungsobjekten werden Standard-Aktoren eingesetzt. So verwenden bspw. Reinhorn et al. [REINHORN92, S. 2-1 ff.] konventionelle Hydraulikzylinder zur Aktuierung eines Fachwerks und Senatore et al. [SENATORE18] elektro-mechanische Aktoren, um einzelne Stäbe eines Fachwerkträgers zu ersetzen. Für eine effektive Aktuierung sind die verwendeten Komponenten aufeinander abzustimmen. Diskussionen zum ganzheitlichen Aufbau bzw. zur Konzeption werden in den dazugehörigen Publikationen nicht geführt. Eine (Weiter-)Entwicklung von aktuierbaren Tragwerken und Tragwerkselementen einschließlich der dafür optimierten Aktorik ist aufgrund des Fehlens dieser Grundlage kaum möglich.

1.2 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist, die Entwicklung von adaptiven Tragwerkelementen zu unterstützen. Hierzu erfolgt eine systematische Auseinandersetzung mit dem Aspekt der Kraft- bzw. Bewegungserzeugung zur Aktuierung dieser Strukturen. Eine Eingrenzung des Themengebiets erfolgt dabei auf die Aktuierung von linearen Tragwerkselementen. Im Gegensatz zu aus der Literatur bekannten Untersuchungen wird das Tragwerk und der Aktoren nicht getrennt behandelt, um dem integrativen Charakter von adaptiven Tragwerken zu entsprechen. Die gemeinsame Betrachtung dieser Komponenten ermöglicht die Entwicklung von Funktionseinheiten, d. h. Tragwerkselementen mit dazugehörigem bzw. integriertem Aktor. Der Schwerpunkt liegt in dieser Arbeit jedoch auf der Aktoreinheit.

Um den unterschiedlichen Anforderungen, z. B. funktionalen oder architektonischen Anforderungen, zu entsprechen, sind verschiedene Bauweisen zu berücksichtigen, d. h. die Position der Aktoren außerhalb oder innerhalb des Tragwerks. Die sich daraus

ergebenden prinzipiellen Aktuierungsmöglichkeiten sind aufzuzeigen. Dies ermöglicht die Spezifikation der Aktuierungsaufgabe des Aktors. Durch eine Konkretisierung wird die Entwicklung auf einer niedrigeren Abstraktionsebene unterstützt. Hierzu sind Funktionsprinzipien in einer Sammlung zusammenzustellen.

Ein weiteres Ziel ist, den Nachweis der Nutzbarkeit der Unterstützung zu erbringen. Dies soll im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1244 (SFB 1244) an Forschungs- und Entwicklungsbeispielen von zu aktuierenden Tragwerkselementen erfolgen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Ziele der Arbeit spiegeln sich im Aufbau wider. Dieser lässt sich in drei Teile untergliedern.

Im ersten Teil werden die Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit und der Stand der Forschung vorgestellt, aus dem die konkretisierte Aufgabenstellung hervorgeht. Hierzu beinhaltet Kapitel 2 die Grundlagen zu den Hauptthemen der konventionellen und adaptiven Tragwerke sowie der Aktoren. In diesem Teil werden Begriffe definiert sowie relevante Komponenten und deren Kategorisierungen erläutert. In Kapitel 3 wird der Stand der Forschung und Technik zur Aktuierung von Tragwerkselementen vorgestellt. Zusätzlich werden die bestehenden Defizite aufgezeigt. Darauf aufbauend werden in Kapitel 4 der Forschungsbedarf identifiziert und die Ziele dieser Arbeit konkretisiert. Weiterhin erfolgt die Vorstellung des Vorgehens zum Erreichen der Ziele.

Die Erarbeitung von Inhalten, die als allgemeine Unterstützungshilfe zur Entwicklung und Realisierung von aktuierbaren Tragwerkselementen dienen, erfolgt im zweiten Teil. Hierzu werden in Kapitel 5 unterschiedliche Aufbaustrategien anhand von Funktionsstrukturen aufgezeigt. Davon ausgehend werden prinzipielle Aktuierungsprinzipien abgeleitet. Mit Sammlungen von Lösungsprinzipien für Aktoren schließt dieses Kapitel.

Die Nutzbarkeit der Inhalte wird im dritten Teil anhand beispielhafter Entwicklungen verschiedener zu aktuierender Tragwerkselemente gezeigt. Im Demonstrator-Hochhaus des SFB 1244 sind Aussteifungen (Kapitel 6) und Stützen (Kapitel 7) zu aktuieren. Beide Elemente werden durch Normalkräfte belastet. Im Gegensatz dazu erfolgt die Belastung des zu aktuierenden Stahlbetonträgers in Kapitel 8 auf Biegung. Hier sind zumindest die kraftübertragenden Komponenten des Aktors in den tragenden Querschnitt des Balkens zu integrieren. Eine vollständige Integration des Aktors wird in Kapitel 9 angestrebt.

Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung (Kapitel 10) und dem Ausblick (Kapitel 11).

Der Überblick über den Aufbau dieser Arbeit ist in Bild 1.1 dargestellt.

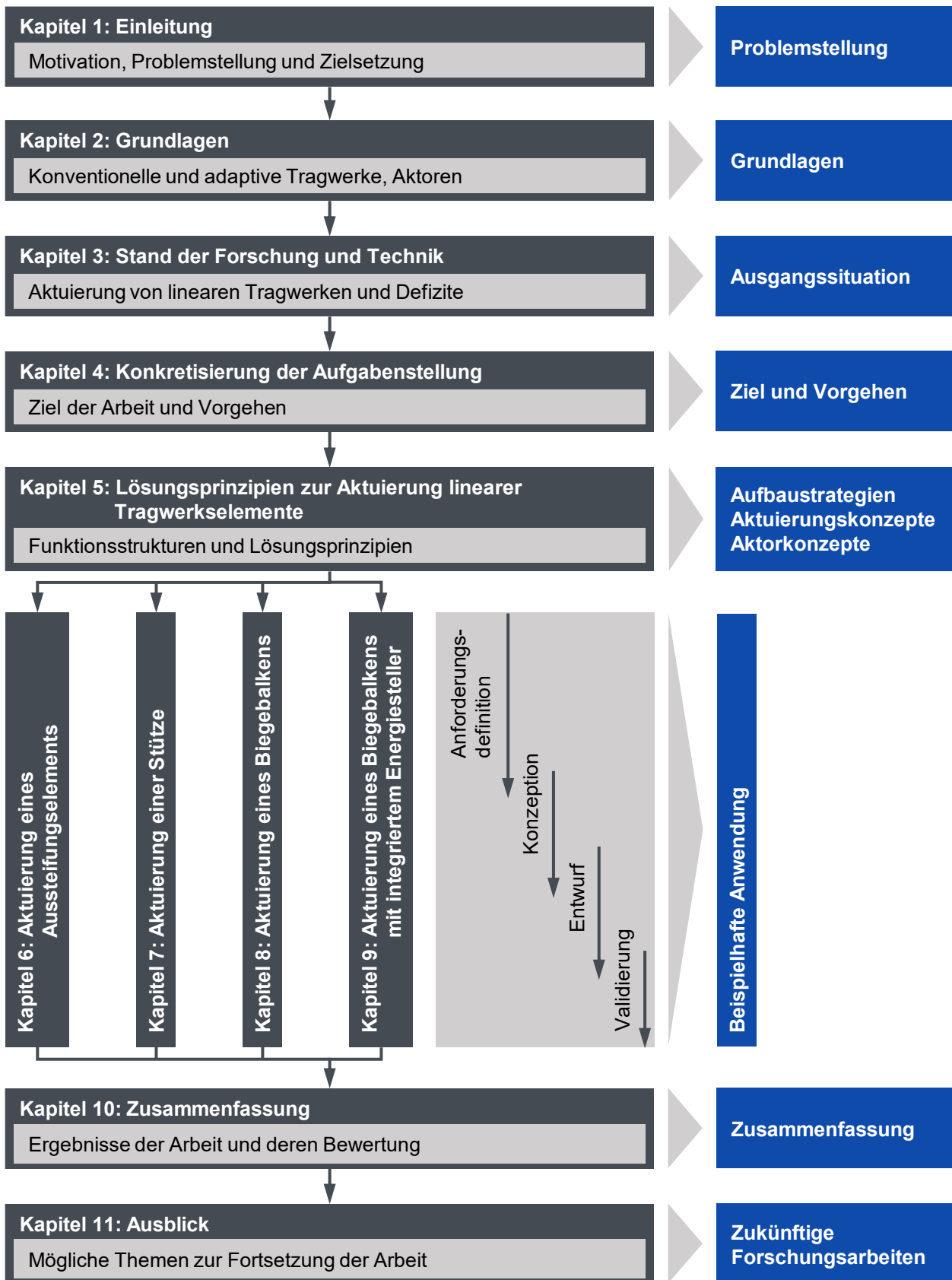


Bild 1.1: Aufbau dieser Arbeit

2 Grundlagen

In diesem Kapitel erfolgt die Erläuterung der Grundlagen zu den in dieser Arbeit relevanten Themen. Hierzu werden in Kapitel 2.1 die grundlegenden Begriffe der Tragwerksplanung eingeführt und die dieser Arbeit übergeordnete Problemstellung des Masseinsatzes im Bauwesen dargestellt. In Kapitel 2.2 werden die klassischen Leichtbaustrategien erläutert, die zum Ansatz der adaptiven Tragwerke führen. Die Vorstellung des Aufbaus und der Komponenten von adaptiven Tragwerken erfolgt in Kapitel 2.3. Eine wichtige Komponente davon stellen Aktoren dar. Eine Einführung hierzu ist in Kapitel 2.4 gegeben. Aufbauend auf diesen Grundlagen wird in Kapitel 3 der Stand der Forschung und Technik zur Aktuierung von Tragwerken und Tragwerkselementen aufgezeigt. Der Zusammenhang der relevanten Themen ist in Bild 2.1 dargestellt.

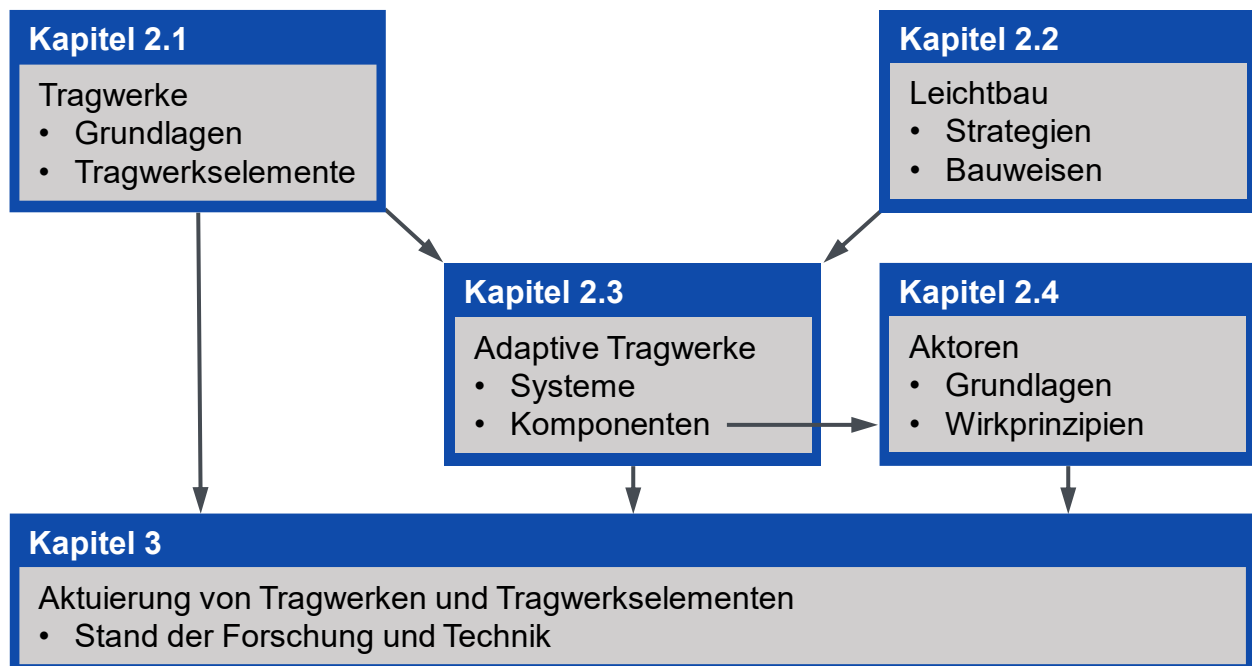


Bild 2.1: Zusammenhang der Themengebiete

2.1 Tragwerke und deren Elemente im Bauwesen

Gebäude, z. B. Wohn- und Bürogebäude, und Ingenieurbauwerke, z. B. Brücken, werden gemeinsam als Bauwerke bezeichnet [DIN EN 1990 2021, S. 15]. Diese bestehen aus den sogenannten Primär-, Sekundär- und Tertiärsystemen. Die Unterteilung erfolgt anhand derer Hauptfunktionen. Das Primärsystem dient zum (Ab-)Tragen von Lasten. Dem Sekundärsystem werden die einhüllenden Bestandteile zugeordnet, z. B. nicht-selbsttragende Fassaden. Das Tertiärsystem umfasst die Ver- und Entsorgungssysteme [MORO21, S. 33].

Das Tragen und Leiten von Kräften erfolgt durch das Tragwerk, das oft dem Primärsystem gleichgesetzt wird. Da tragende Bauteile in allen drei oben genannten Systemen zu finden sind, wird das Tragwerk entsprechend der obigen Zuordnung in Primär-, Sekundär- und Tertiärtragwerk unterteilt [MORO21, S. 502]. Die in dieser Arbeit umgesetzten aktuierbaren Tragwerkselemente (s. Kapitel 6 bis 9) sind Teil des Primärsystems.

Ein Tragwerk besteht aus einzelnen Tragwerkselementen, deren Anordnung die Art des Tragwerks definiert. Die einzelnen Elemente werden anhand der Geometrie und der maßgebenden Beanspruchung unterteilt (s. Tabelle 2.1). [BLOCK15, S. 137]

		Normalkraft	Biegung
Stabtragwerk	gerade	Zug-/Druckstab	Biegeträger
	gekrümmt	Seil, Bogen	
	kombiniert-linear	Rahmen, Rahmenträger	
Flächentragwerk	gerade	Scheibe	Platte, Trägerrost
	gekrümmt	Membran, Gewölbe, Seilnetz	
		Schale	

Tabelle 2.1: Unterteilung der Tragwerkselemente nach [BLOCK15, S. 137 ff.] und [ZILCH10, S. 2 f.]

Während bei Stabtragwerken zumeist ein uniaxialer Spannungszustand vorliegt, mit Ausnahme bestimmter Zonen wie bspw. Auflager, erfolgt der Lastabtrag bei Flächentragwerken in mehrere Raumrichtungen [ZILCH10, S. 106]. Diese mehraxiale Beanspruchung ist bei der Bemessung der Tragwerkselemente zu berücksichtigen.

Die Tragfähigkeit und Steifigkeit des Bauwerks werden maßgeblich durch dessen Tragwerk bestimmt. Die Dimensionierung von Tragwerken erfolgt nach DIN EN 1990 bis DIN EN 1998 mit dem Nachweis der Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit. Die Tragfähigkeit ist anhand von Festigkeitskriterien nachzuweisen, wohingegen die Verformung bzw. die Steifigkeit des Tragwerks für die Gebrauchstauglichkeit maßgebend ist [DIN EN 1990 2021, S. 31 ff.].

Die Belastung der Tragwerke erfolgt aufgrund direkter, z. B. Windlasten, oder indirekter Einwirkungen, z. B. Verformungen aufgrund von Temperaturänderungen. Je nach Auftrittshäufigkeit werden diese in ständige (z. B. Eigenlast), veränderliche (z. B. Schnee) oder außergewöhnliche Einwirkungen (z. B. Erdbeben) unterteilt. [DIN EN 1990 2021, S. 18 ff.]

Bei der Bemessung der Tragwerkskomponenten bzgl. deren Tragfähigkeit werden für die zeitvarianten Belastungen regionsspezifische statische Ersatzlasten angenommen.

Diesen Ersatzlasten liegen Lastfälle mit einer definierten Auftretenswahrscheinlichkeit zugrunde. Beispielsweise treten die maßgebenden Schneelasten nur einmal in 50 Jahren auf (2 % jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit) [DIN EN 1991-1-3 2010, S. 41]. Konventionelle Tragwerke sind daher für den Großteil der Nutzungsdauer überdimensioniert.

Weiterhin nimmt mit der zunehmenden Höhe eines Gebäudes die Belastung durch Querkräfte zu, z. B. durch Wind [KHAN66, S. 572 f.]. Somit dominiert mit zunehmender Gebäudehöhe die Auslegung anhand der Steifigkeitsanforderungen. Ähnliches gilt bei weitspannenden Trägern oder Platten. Mit zunehmender Stützweite ist die Steifigkeit maßgebend, u. a. um Schäden an der Sekundär- oder Tertiärstruktur zu vermeiden [ZILCH13, S. 1113]. Die Erfüllung dieser Anforderungen erfolgt bei einer konventionellen Bauweise durch den Einsatz von zusätzlichem Material.

Zusammengefasst bedeutet das, dass in der konventionellen Tragwerksplanung die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit mit einem enormen Materialbedarf einhergeht. So ist das Bauwesen für ca. die Hälfte des weltweiten Rohstoffabbaus [UNEP11, S. 11] und für 37 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich [UNEP22, S. 42]. Aus Gründen der Tragfähigkeit ist dieser Materialeinsatz jedoch nicht zwingend erforderlich. Die Gebrauchstauglichkeit kann mit steifigkeitssteigernden Maßnahmen aus dem Leichtbau verbessert werden. Dunant et al. [DUNANT18, S. 302] zeigen bspw., dass bei herkömmlich ausgelegten Stahltragwerken mindestens 20 % Masseinsparung möglich ist. Die zur Umsetzung dieser Reduktion verwendeten Ansätze und Strategien werden in folgenden Kapiteln vorgestellt.

2.2 Leichtbaustrategien und Bauweisen

Im Vergleich zu anderen technischen Disziplinen spielt das Thema Leichtbau im Bauwesen eine untergeordnete Rolle [KLEIN13, S. 9]. Jedoch erfordern u. a. der enorme Ressourcenbedarf und die weiter steigende Nachfrage an Baumaterial eine zunehmende Berücksichtigung von Energie- und Materialeinsparmöglichkeiten [SOBEK14, S. 784]. Sobek [SOBEK95, S. 323; SOBEK14, S. 784] identifiziert folgende Leichtbau-Treiber:

- **Ökonomische Aspekte:** Durch den reduzierten Einsatz von teurem Baumaterial werden die Gesamtkosten reduziert. Dies ist nur relevant, wenn die Materialkosten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten haben.
- **Ökologische Aspekte:** Aufgrund des hohen Ressourcenverbrauchs des Bauwesens ist eine Reduzierung des eingesetzten Materials und der benötigten Energie für die Aufrechterhaltung einer intakten Umwelt zwingend notwendig.

- Technische Anforderungen: Für das Überbrücken großer Spannweiten ist bspw. ein geringes Eigengewicht des Bauwerks zielführend.
- Anforderungen an den Montageprozess: Gewichtsreduzierte Bauteile erleichtern die Handhabbarkeit während der Montage.

Zur Entwicklung und der Umsetzung von allgemeinen Leichtbau-Strukturen gibt es folgende grundlegende Leichtbaustrategien, die miteinander kombiniert angewendet werden: Bedingungs-, Konzept-, Stoff-, Form- und Fertigungsleichtbau [KOPP11, S. 62 f.]. Die Abfolge der Leichtbaustrategien im Entwicklungsprozess ist in Bild 2.2 dargestellt. Die Anwendung kann iterativ sowie auf einzelne Komponenten oder ganze Baugruppen erfolgen [KOPP11, S. 63].

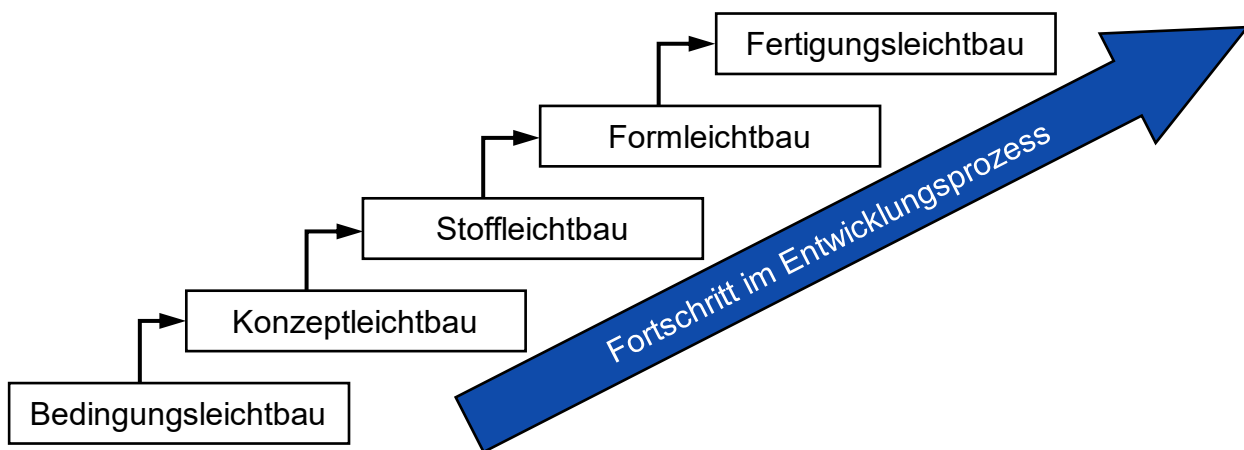


Bild 2.2: Leichtbaustrategien im Entwicklungsprozess nach [KOPP11, S. 63]

Beim Bedingungsleichtbau werden zunächst die von der Gesellschaft, der Politik, der Gesetzgebung und den Märkten vorgegebenen Anforderungen an die Leichtbaustruktur identifiziert. Die konsequente Bewertung und Streichung aller nicht unmittelbar benötigter Anforderungen bzw. der daraus abgeleiteten Funktionen schafft die Basis für nachfolgende Leichtbaustrategien. [KOPP11, S. 63]

Der Konzeptleichtbau betrachtet das Gesamtsystem und/oder die Teilsysteme. Mit diesem Überblick werden Kraftleitungspfade identifiziert und optimiert. Weiterhin wird die Integration von Funktionen und das Vereinigen von Bauteilen angestrebt. Durch die sich daraus ergebende Umstrukturierung und Gestaltänderungen wird das Gesamtgewicht reduziert [KOPP11, S. 64 f.]. Ein Beispiel stellen Wände dar, die teilweise zum Lastabtrag beitragen und gleichzeitig der Wärmedämmung dienen [SOBEK95, S. 325].

Eine weitere Strategie ist der Stoffleichtbau. Hier werden Materialien mit möglichst geringer Dichte eingesetzt bzw. die Dichte im Verhältnis zur Beanspruchung angepasst, bspw. beim Einsatz von Gradientenbeton [HERRMANN13]. Das Ziel ist es, Bauteile mit

möglichst geringem Gewicht zu schaffen, die gleichzeitig die an sie gestellten Anforderungen erfüllen. Eine Kennzahl stellt hierbei die Leichtbaukennzahl LBK dar, die das Verhältnis zwischen der ertragbaren Gesamtlast zum Eigengewicht wiedergibt [KLEIN13, S. 32]. Angewandt auf das Steifigkeitsproblem von Hochhäusern (s. Kapitel 2.1) trägt der reine Stoffleichtbau kaum zur Lösung bei. Die Steifigkeit der Tragwerkselemente hängt hauptsächlich vom Elastizitätsmodul des Baumaterials ab, der z. B. bei hochfesten Stählen trotz höherer Festigkeit nicht signifikant gesteigert wird [ALI07, S. 216].

Im Formleichtbau entsteht bei der konstruktiven Umsetzung eines Bauteils eine Gestalt mit minimalem Gewicht, z. B. durch eine Topologieoptimierung. Diese Leichtbaustrategie bedingt auch den Konzept- und Stoffleichtbau, da bspw. Bauräume verändert und Lastenleitungspunkte verschoben werden. [KOPP11, S. 65]

Vom Stoff- und Formleichtbau wird auch der Fertigungsleichtbau beeinflusst. Unter Berücksichtigung des vorgegebenen Materials und/oder der Form werden Fertigungsverfahren und Montageprozesse gewählt, durch die eine weitere Gewichtsreduktion möglich ist. Beispielhaft sind hier das Umformverfahren Tailored Welded Blanks genannt, mit dem Bleche mit unterschiedlicher bzw. angepasster Wandstärke erzeugt werden, und Schweißverbindungen, die im Vergleich mit Schraub- oder Nietverbindungen Verbindungen mit weniger benötigtem Material ermöglichen [KOPP11, S. 67].

Die Ausgestaltung von Bauteilen und deren Verbindungen kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Im Leichtbau wird daher zwischen folgenden Bauweisen unterschieden [KLEIN13, S. 17 ff.; KOPP11, S. 70 ff.]:

- Differenzialbauweise: Einzelne Bauteile, die normalerweise eine sehr einfache Geometrie haben, werden miteinander zu einem Gesamtsystem verbunden.
- Integralbauweise: Idealerweise wird die Anzahl der Einzelteile durch die Integration von Funktionen in einem Bauteil minimiert. Das Bauteil wird aus einem Material gefertigt.
- Integrierende Bauweise (wird auch Modulbauweise genannt, z. B. nach [KOPP11, S. 71]): Im Gegensatz zur Integralbauweise erfolgt die Funktionsintegration vornehmlich auf Teilsystemebene (Module). Die Teilsysteme werden in Differenzialbauweise miteinander verbunden. So werden komplexe, in Integralbauweise hergestellte Einzelbauteile zu einem großen Gesamtsystem zusammengesetzt.

- Verbundbauweise: Durch die Kombination verschiedener Materialien in einem Bauteil werden deren spezifische Eigenschaften für den entsprechenden Anwendungsfall ausgenutzt. So nimmt bspw. bei Stahlbeton der Beton die Druck- und die Stahlbewehrung die Zugkräfte auf.
- Vollwand- und Schalensysteme: Bei diesen Systemen erfolgt keine Trennung anhand der Hauptfunktion in tragende und einhüllende Strukturen (vgl. Kapitel 2.1). Dies bietet sich bei großen Strukturen an, bspw. Zug- oder Flugzeugrumpfe, bei der die Umhüllung am Lastabtrag beteiligt wird. Die Bezeichnung erfolgt gemäß der Beanspruchung als Vollwand- (schubbeansprucht) oder als Schalensystem (normal- und schubbeansprucht).

Eine Herausforderung bei der Realisierung von Leichtbaustrukturen im Bauwesen ist deren Anfälligkeit gegenüber äußeren Lasten. Im Gegensatz zu herkömmlichen Tragwerken ist hier das Eigengewicht als formbestimmender Lastfall nicht mehr gegeben. Daher erfolgt die Auslegung anhand mehrerer Belastungsszenarien [SOBEK14, S. 785]. Da hierzu die Ersatzlasten nach Norm verwendet werden (vgl. Kapitel 2.1), führt dies ebenfalls zu Tragwerken und Tragwerkselementen, bei denen das verwendete Material nicht optimal ausgenutzt wird.

Eine Möglichkeit den Ressourcenbedarf noch weiter zu senken, stellen adaptive Tragwerke dar. Bei diesen steht der Konzept- und Formleichtbau im Vordergrund [TEUFFEL04, S. 10]. Adaptive Tragwerke sind in der Lage, auf äußere Belastungen zu reagieren, indem Spannungen und Verformungen des Tragwerks derart beeinflusst werden, dass das eingesetzte Material in optimaler Weise belastet wird. Steifigkeitsprobleme werden somit in Festigkeitsprobleme überführt. [SOBEK14, S. 785]

2.3 Adaptive Tragwerke

Abgeleitet von dem lateinischen Wort „adaptare“ [PONS23], bezeichnet das Adjektiv „adaptiv“ die Fähigkeit sich anzupassen [Duden23]. Als adaptiv werden somit Systeme bezeichnet, die sich selbst an ihre Umgebung anpassen [SOBEK00, S. 544]. Diese können natürliche oder technische Systeme sein [WEILANDT07, S. 5]. Als Synonyme zu dem Begriff „adaptiv“ im Kontext der technischen Systeme werden in der Literatur auch „intelligent“, „smart“ oder „aktiv“ benutzt. Eine genauere Auseinandersetzung mit diesen Begriffen findet sich bspw. in [CLARK98, S. 4] und [SHRINIVASAN01, S. 4]. Anhand der benötigten Zeitdauer zur Anpassung wird zwischen der Kurz- und Langzeitadaption unterschieden. Bei der Kurzzeitadaption erfolgt die Reaktion eines Systems sofort auf die

Umgebungsänderung, wie z. B. Farbänderung des Chamäleons. Erfolgt die Anpassung über eine längere Zeitdauer hinweg, z. B. Ausbildung der Röhrenknochen von Vögeln, wird von einer Langzeitadaption gesprochen. Während in natürlichen Systemen beide Adaptionarten vorkommen, spielt im technischen Bereich hauptsächlich die Kurzzeitadaption eine Rolle. [CLARK98, S. 1]

Durch die Adaption von Tragwerken, also deren Anpassung an die Umgebung, lassen sich zwei unterschiedliche Ziele verfolgen. So werden die die Tragstruktur angreifende Belastungen beeinflusst, z. B. durch die Verstellung von Windabweisern, oder der Lastabtrag des Tragwerks wird direkt manipuliert. Dazu wird die Geometrie und/oder die Eigenschaften der Struktur, bspw. deren Steifigkeit, entsprechend den Erfordernissen angepasst [SOBEK01, S. 38]. Dies kann entweder manuell, d. h. gesteuert, oder automatisch geregelt als Reaktion auf eine äußere Beanspruchung erfolgen [WADA90, S. 330].

2.3.1 Klassifikation von adaptiven Strukturen

Die Anpassung von Strukturen bzw. deren Eigenschaften kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Entsprechend wird unterschieden in passive, aktive, semi-aktive und hybride Systeme [HOUSNER97, S. 899].

Im Gegensatz zu den anderen Ansätzen benötigt die Reaktion von passiven Systemen auf Veränderungen keine zusätzliche Energiezufuhr. Eine Reaktion erfolgt nur, wenn sich das System verändert. Die Hauptaufgabe dieser Systeme ist die Dissipation von Energie, z. B. die Dämpfung einer Gebäudebewegung aufgrund einer externen Anregung. Dabei wird zwischen Schwingungstilgern und Schwingungsdämpfern unterschieden [HOUSNER97, S. 899]. Schwingungstilger sind Feder-Masse-Dämpfer-Systeme, die durch die extern eingebrachte Energie in Schwingung gesetzt werden und diese somit in kinetische Energie umwandeln. Die Tilger sind auf die Gebäudesteifigkeit abgestimmt und dämpfen nur bestimmte Frequenzen. Andere Schwingungen werden nicht beeinflusst [SOONG02, S. 249]. Ein Beispiel für den Einsatz eines Schwingungstilgers ist der Sydney Tower [WARGON85]. Schwingungsdämpfer wandeln die externe Energie in Wärme oder in plastische Verformung um. Hierzu werden bspw. metallische Verformungsdämpfer, Reibungsdämpfer und viskoelastische Dämpfer verwendet [SOONG02, S. 246-249]. Passive Systeme sind nur für bestimmte Belastungsszenarien ausgelegt und nicht in der Lage, sich an strukturelle Veränderungen oder anderen Belastung anzupassen [SPENCER03, S. 845].

Aktive Systeme benötigen zur Reaktion auf sich ändernde Einwirkungen separat zugeführte Energie. Mittels Aktoren werden Kräfte und Verschiebungen eingebracht, um Systemeigenschaften zu beeinflussen, wie bspw. das Schwingungsverhalten oder interne Lastpfade. Mit aktiven Systemen kann dem System Energie zugeführt oder Energie dissipiert werden, z. B. durch Erzeugen von Gegenschwingungen [HOUSNER97, S. 899]. Eine Destabilisierung des Systems ist mittels der aktiven Komponenten möglich [SPENCER97, S. 26-27]. Dies kann ungewollt geschehen, bspw. aufgrund Komponentenausfällen und Regelungsfehlern, oder absichtlich herbeigeführt werden, z. B. zur Simulation von Belastungen bei dem in Kapitel 6 vorgestellten Versuchsgebäude.

Semi-aktive Systeme bestehen aus einer Kombination eines aktiven und eines passiven Systems. Im Vergleich mit aktiven Systemen ist eine direkte Manipulation der Tragstruktur nicht möglich, z. B. das Erzwingen einer Verformung. Jedoch können Systemeigenschaften wie die Steifigkeit und die Dämpfung angepasst werden, ohne dass eine leistungsstarke externe Energiequelle benötigt wird. Dies kann bspw. erfolgen mit Reibungsdämpfern mit variabler Reibkraft, Flüssigkeitsdämpfern mit einstellbarer Drossel und Dämpfern mit einer elektro- oder magnetorheologischen Flüssigkeit [SPENCER97, S. 26 ff.]. Das Kajima Shizuoka Building in Shizuoka ist ein Beispiel für eine Umsetzung eines Gebäudes mit semi-aktiver Tragstruktur. Zur Beeinflussung des dynamischen Tragverhaltens der Gebäudestruktur werden Flüssigkeitsdämpfer eingesetzt, deren Dämpfung mittels einer verstellbaren Drossel angepasst wird [KURATA99].

Hybride Systeme vereinen die Eigenschaften von passiven, aktiven und semi-aktiven Systemen. So kann die Anpassung einer Struktur unabhängig von der äußeren Belastung erfolgen. Die Sicherheit gegenüber eines Kompletversagens ist aufgrund der passiven Eigenschaften gewährleistet. Zum Bau solcher Systeme kommen bspw. hybride Massendämpfer und hybride seismische Isolierungen zum Einsatz [SPENCER97, S. 20 ff.]. Eine Umsetzung erfolgte z. B. beim Bau des Yokohama Landmark Towers. Die Beeinflussung der Tragstruktur erfolgt über einen einstellbaren Schwingungstilger, der zusätzlich aktiv angeregt werden kann [YAMAZAKI92].

2.3.2 Komponenten von adaptiven Tragwerken

Mit Ausnahme der passiven Systeme sind die genannten Systeme in der Lage, sich aktiv anzupassen, und sind somit adaptiv. Adaptive technische Systeme bestehen aus Aktoren, Sensoren und einer Regelungseinheit [CLARK98, S. 8]. Das Zusammenspiel zwischen diesen Komponenten im Kontext der Tragwerke ist in Bild 2.3 dargestellt.

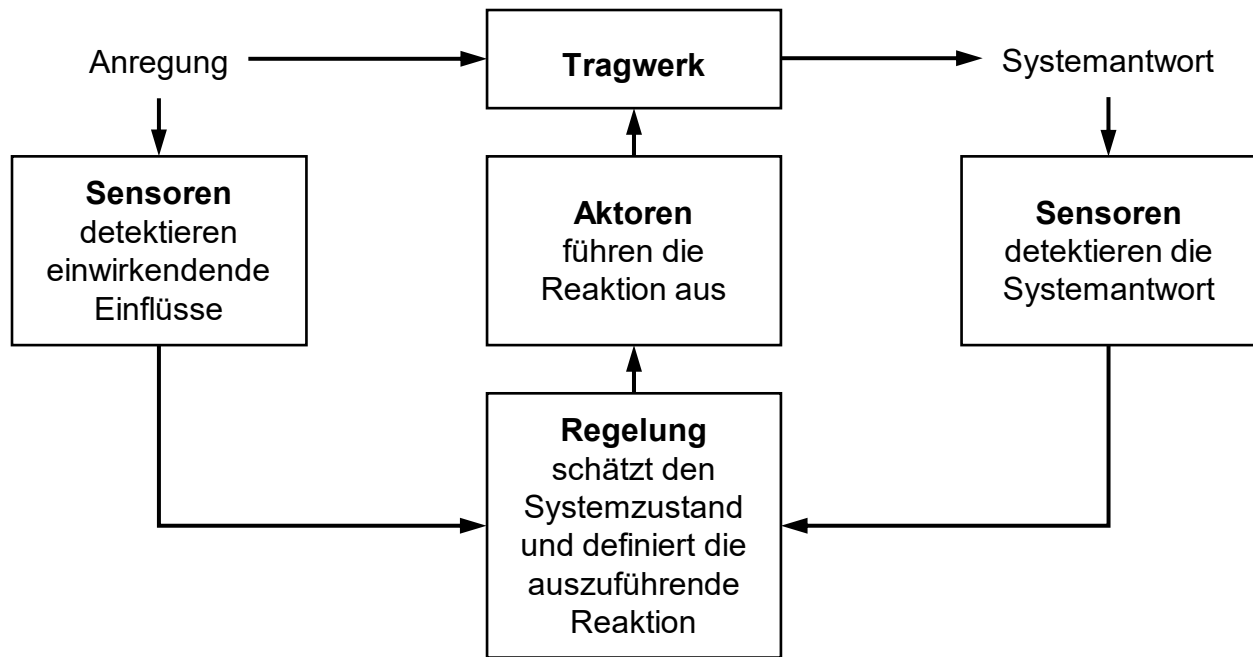


Bild 2.3: Schematischer Aufbau eines adaptiven Tragwerks nach [YAO72, S. 1568] und [TEUFFEL04, S. 12]

Das Tragwerk wird über äußere Einflüsse angeregt. Die Anregung und die Reaktion des Tragwerks werden mittels Sensoren detektiert. Die Regelung schätzt anhand der Sensordaten den Systemzustand und definiert die benötigte Reaktion des Tragwerks auf die Anregung. Mittels Aktoren wird das Tragwerk manipuliert und in den gewünschten Zustand überführt [YAO72, S. 1571 f.].

2.4 Aktoren

Ein Aktor ist die Kraft oder Bewegung erzeugende Einheit innerhalb eines technischen Systems. Dessen Hauptaufgabe besteht in der Wandlung eines beliebigen, zumeist energiearmen Stellsignals in eine mechanische, zumeist energiereichere Prozessgröße. Dabei ist das Ziel, einen Energie- oder Stofffluss bzw. einen Prozess oder Zustand zu beeinflussen. Somit stellt der Aktor die Verbindung zwischen dem informationsverarbeitenden Teilsystem (Steuer- oder Regelungseinheit) und dem zu beeinflussenden Prozess oder (Teil-)System dar (vgl. Bild 2.3). [ISERMANN08, S. 442 f.]

Der allgemeine Aufbau eines Aktors wird anhand der allgemeinen Funktionen nach Roth [ROTH00, S. 82] beschrieben und den Hauptkomponenten zugeordnet. Diese sind der Signalumformer, der Energiewandler (Steller) und der Stellübertrager (Stellglied) [CZICHOS19, S. 153]. Der schematische Aufbau ist in Bild 2.4 dargestellt.

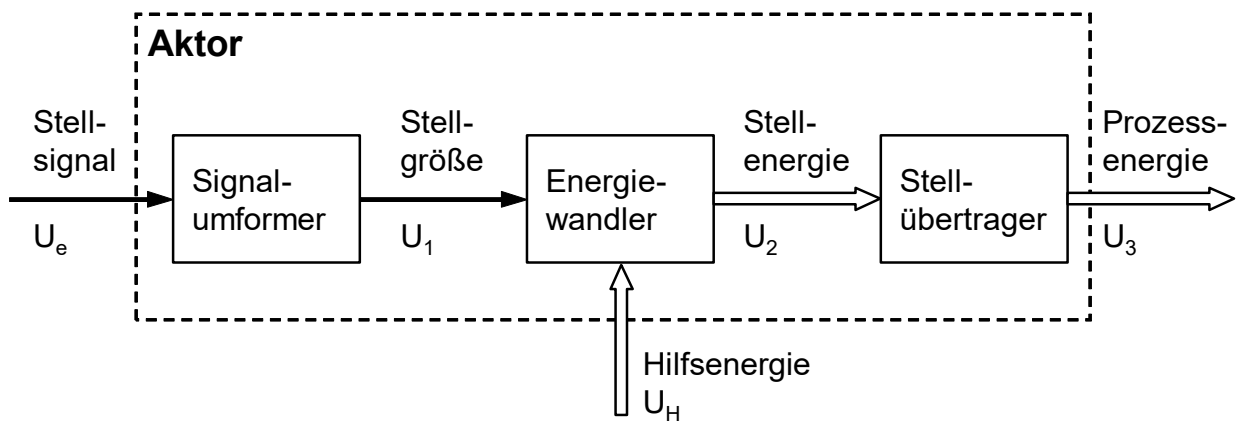


Bild 2.4: Schematischer Aufbau eines Aktors nach [ISERMANN08, S. 443]

Der Signalumformer überführt das Stellsignal U_e in eine für den Energiewandler geeignete Stellgröße U_1 , z. B. in ein Taktsignal. Gesteuert durch die Stellgröße U_1 wandelt der Energiewandler die zugeführte Hilfsenergie U_H in eine mechanische Stellenergie U_2 um, bspw. eine Kraft. Die Hilfsenergie U_H ist eine nicht-mechanische Energie, bspw. eine elektrische, chemische, fluidische (potenzielle) oder chemische Energie (vgl. Kapitel 2.4.1). Für die direkte Verwendung zur Erzeugung einer mechanischen Aktion ist die Stellenergie U_2 häufig nicht geeignet. Bspw. liegt diese in Form einer geringen Kraft vor und muss auf ein höheres Kraftniveau angehoben werden. Dies ist Aufgabe des Stellübertragers, der die Stellenergie U_2 in eine nutzbare Prozessenergie U_3 umformt. Der Aktor kann weitere Energiewandler und Stellübertrager enthalten. Dadurch wird bspw. unter Zuhilfenahme einer weiteren Hilfsenergie eine größere Ausgangsenergie erzeugt [ISERMANN08, S. 442 f.]. Zudem können weitere physikalische Effekte zur Erzeugung der mechanischen Ausgangsenergie genutzt werden. So wird bspw. bei einem Magnetaktor die elektrische Energie zum Aufbau eines Magnetfelds genutzt, mit dem anschließend eine Kraft auf den Magnetanker ausgeübt wird [GERKE12, S. 74].

2.4.1 Einteilung von Aktoren

Die Einteilung von Aktoren erfolgt anhand der Art der zugeführten Hilfsenergie, dem Übertragungsverhalten der Aktoren oder der Art der erzeugten Bewegung.

Anhand der Art der zugeführten Hilfsenergie werden Aktoren den Hauptgruppen der elektrischen, fluidischen, thermischen und chemischen Aktoren zugeordnet [CZICHOS19, S. 154]. Einige Autoren fassen Aktoren, deren Funktion auf der Änderung von Materialeigenschaften basieren, zur Gruppe der unkonventionellen Aktoren, z. B. [JANOCHA10, S. 2] und [ISERMANN08, S. 446 f.] nach [RAAB90], oder neuartigen Aktoren, z. B. [RODDECK17, S. 692] und [JENDRITZKA98, S. 85], zusammen. In dieser Arbeit wird jedoch

die konsequente Kategorisierung anhand der zugeführten Hilfsenergie und die weitere Untergliederung mittels des Wirkprinzips bevorzugt (s. Tabelle 2.2).

Hilfsenergie	Aktortyp	Prinzip	Beispiele
Elektrische Energie	Elektromagnetisch	Kraftwirkung auf Körper im Magnetfeld	Hubmagnet, Drehmagnet, Schwingmagnet
	Elektrodynamisch	Lorentzkraft auf elektrischen Leiter im Magnetfeld	DC-Motor, AC-Motor, Tauchspule, Linearmotor
	Piezoelektrisch	Piezokristall-Dickenänderung durch elektrische Spannung	Piezo-Motor, Tintenstrahldrucker, Einspritzventil
	Magneto- und elektrostriktiv	Ferromagnetische Volumenänderung im Magnetfeld	Stelleinheit, Translator
	Magneto- und elektrorheologisch	Viskositätsänderung im elektrischen/magnetischen Feld	Kupplung, Stoßdämpfer, Pumpenantrieb
Strömungsenergie (Fluidik)	Pneumatisch	Fluidische Druckdifferenz, Verdrängungsströmung	Schubmotor, Membranantrieb
	Hydraulisch	Fluidische Druckdifferenz, Verdrängungsströmung	Translationsmotor, Rotationsmotor
Thermische Energie	Thermobimetal	Wärmeausdehnungsdifferenz eines Materialverbundes	Thermoschalter
	Formgedächtnis	Gefügeumwandlung	Stellelemente
	Dehnstoff	Volumenänderung	Stellantrieb, Thermostat
Chemische Energie	Elektrochemisch	Druckänderung durch elektrochemische Reaktion	Gasdosierer, Dehnungs-Stellelement

Tabelle 2.2: Einteilung der Aktoren nach Art der zugeführten Hilfsenergie nach [CZICHOS19, S. 154]

Bei der Einteilung anhand des Übertragungsverhaltens werden die Aktoren als Black-Box behandelt. Die Funktion lässt sich über den Zusammenhang der Ein- und Ausgangsgrößen beschreiben. Diese Größen können bspw. Energieströme sein. Die Beschreibung des Zusammenhangs erfolgt durch die Betrachtung der Ausgangsgröße U_2 bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsgröße U_1 im eingeschwungenen Zustand und für einen bestimmten Arbeitspunkt. Hieraus ergibt sich die Unterscheidung in proportional- und integralwirkende Aktoren. [ISERMANN08, S. 446 ff.]

Aktortyp	proportionalwirkend			integralwirkend		
	$\Delta U_2(t) = K_p \cdot \Delta U_1(t) \quad (2.1)$			$\frac{dU_2(t)}{dt} = K_i \cdot \Delta U_1(t) \quad (2.2)$		
	eindeutig		zweideutig	eindeutig		zweideutig
linear	nicht-linear	nichtlinear (Hysterese)	linear	nichtlinear	nichtlinear (Hysterese)	
Elektro-mechanische Aktoren	Schritt-motor		Elektromagnet	Gleichstrom-motor	Wechsel-strommotor	Elektro-antriebe mit Reibung und Losen
Fluidische Aktoren			Pneumatische Membran-antriebe mit Gegenfeder		Hydrau-lische Stell-zylinder	Pneuma-tische Stellzylinder
Unkonven-tionelle Aktoren			Piezokeramische Aktoren, Magnetostriktive Aktoren, Memory-Metall Aktoren			

Tabelle 2.3: Unterscheidung der Aktoren anhand des Übertragungsverhalten nach [ISERMANN08, S. 447 ff.]

Mittels des Zusammenhangs der Ein- und Ausgangsgrößen lassen sich Kennlinien der Aktoren erstellen (U_2 in Abhängigkeit von U_1 für proportionalwirkende Aktoren bzw. $dU_2(t)/dt$ in Abhängigkeit von $U_1(t)$ für integralwirkende Aktoren). Die Kennlinien haben lineare oder nichtlineare Verläufe (s. Bild 2.5 (a)) [ISERMANN08, S. 447]. Weiterhin können Hysteresen auftreten, d. h. mehrdeutige Verläufe, bspw. durch Reibung oder Lose (s. Bild 2.5 (b)). Durch eine gezielte Regelung ist es möglich, dieses Verhalten auszugleichen und den Aktor der gewünschten Kennlinie anzupassen [ISERMANN93, S. 593 ff.].

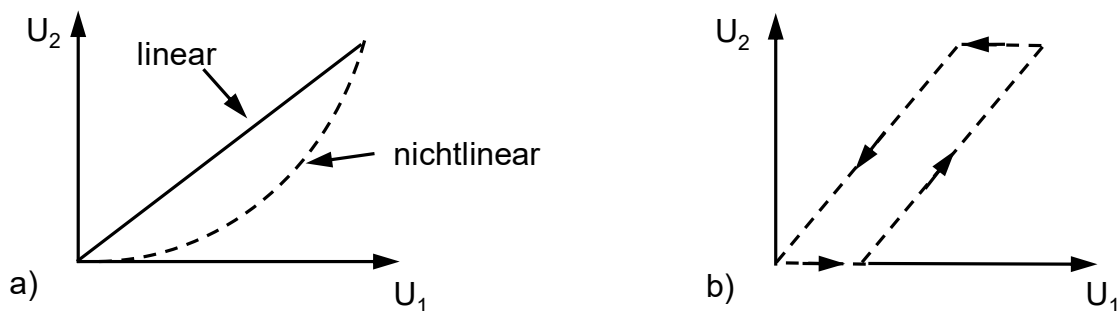


Bild 2.5: Beispiele eines eindeutigen (a) und mehrdeutigen (b) Kennlinienverlaufs nach [ISERMANN08, S. 448]

Aktoren lassen sich auch anhand der erzeugten Bewegung in translatorische und rotatorische Aktoren unterscheiden. So sind bspw. Elektromagnete und Linearmotoren translatorische Aktoren, wohingegen klassische Elektromotoren (Rotationsmotoren) rotatorische Aktoren sind. Im Vergleich zu Kraft- und Arbeitsmaschinen, die zumeist im Dauerbetrieb laufen, unterscheiden sich die als Aktoren eingesetzten Elektromotoren nur durch deren Optimierung an die an sie gestellten Anforderungen für den Kurzzeitbetrieb [ISERMANN08, S. 452]. Da als Aktor hauptsächlich Kleinmotoren verwendet werden, kann auch eine leistungstechnische Begrenzung zum Trennen der Begriffe des Aktors und der Arbeitsmaschine gewählt werden. Stölting [STÖLTING04, S. 85] legt diese bei einer Leistung von 1 kW.

2.4.2 Aktor-Wirkprinzipien

Die Funktion von Aktoren beruht auf unterschiedlichen Wirkprinzipien. Ein Wirkprinzip setzen sich aus dem physikalischen Effekt und den geometrischen und stofflichen Merkmalen zusammen¹ [GERICKE21, S. 18 ff.]. Auflistungen der nutzbaren physikalischen Effekte finden sich bspw. in [ROTH01, S. 88 ff.] und [KOLLER94, S. 55 ff.]. Die geometrischen Merkmale beschreiben die Gestalt der an der Funktion beteiligten Wirkflächen, z. B. die Form und die Anzahl, und die Wirkbewegung, z. B. die Art und die Richtung. Die Art des Materials an dessen Flächen der Effekt wirkt, wird über die stofflichen Merkmale definiert. Beispiele sind der Aggregatzustand und die Festigkeit. Mit den geometrischen und stofflichen Merkmalen wird die Stelle definiert, an der der Effekt wirkt [GERICKE21, S. 18 ff.]. Die wichtigsten Wirkprinzipien zur Erzeugung von Bewegungen und Kräften bzw. Momenten werden in diesem Kapitel vorgestellt.

2.4.2.1 Wirkprinzipien von elektromechanischen Aktoren

Elektromechanische Aktoren beruhen auf dem elektromagnetischen und dem elektrodynamischen Prinzip. [CZICHOS19, S. 157]

Beim elektromagnetischen Prinzip wird mit einer stromdurchflossenen Spule ein gerichtetes Magnetfeld erzeugt. Beim Einbringen eines beweglichen, magnetischen Körpers ändert sich der magnetische Widerstand (Reluktanz) des Felds. Dadurch wird eine Kraft (Reluktanz- oder Maxwellkraft F_m) erzeugt, die derart auf den Körper wirkt,

¹ Roth [ROTH00, S. 45] fasst die geometrischen und stofflichen Merkmale unter dem Begriff Effekträger zusammen.

dass die Reluktanz minimiert wird. In Bild 2.3 ist dies am Beispiel eines Elektromagneten dargestellt. Das Magnetfeld wird von einer Spule erzeugt und durch einen Magnetkörper ausgerichtet. Fließt Strom durch die Spule, baut sich das Feld auf. Der sich im Magnetfeld befindende bewegliche Anker wird dadurch angezogen. [GERKE12, S. 69]

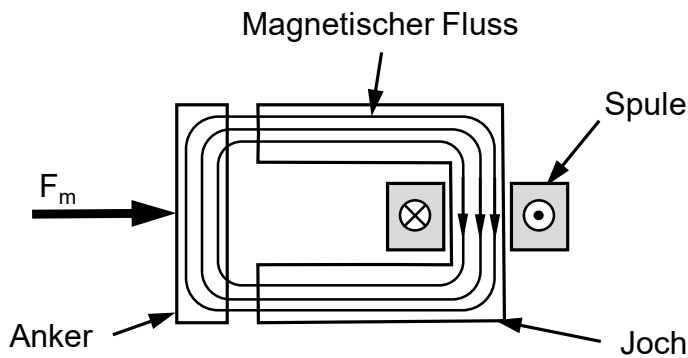


Bild 2.6: Prinzipieller Aufbau eines elektromagnetischen Aktors

Wird anstatt eines magnetischen Körpers ein stromdurchflossener Leiter in das Magnetfeld eingebracht, so wird das Magnetfeld maßgeblich von den Ladungsteilchen im Leiter beeinflusst. Dadurch entsteht die auf den Leiter wirkende Lorentzkraft F . Diese ist immer senkrecht zum Magnetfeld und der Bewegungsrichtung der Ladungsteilchen gerichtet (elektrodynamisches Prinzip). Somit können Bewegungen gezielt erzeugt werden (s. Bild 2.7). [GERKE12, S. 37 ff.]

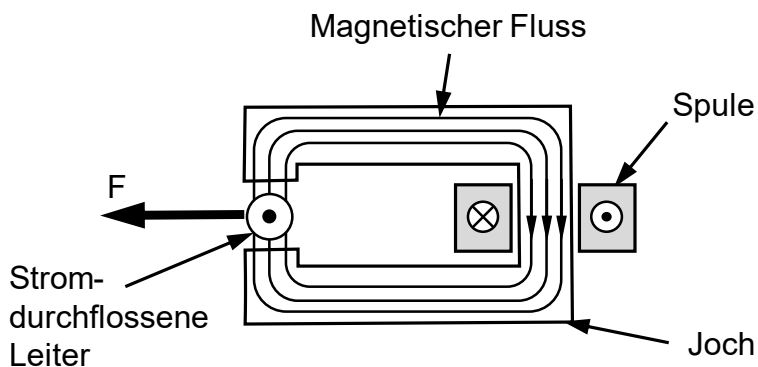


Bild 2.7: Wirkung einer Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

2.4.2.2 Wirkprinzip von piezoelektrischen Aktoren

Bei Kristallstrukturen, die mindestens eine polare Achse besitzen, besteht ein physikalischer Zusammenhang zwischen mechanischer Belastung und elektrischer Polarisation. Wird der Körper mechanisch verformt, verschiebt sich das Ionengitter und eine elektrische Spannung im Körper entsteht. Dies wird als piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Umgekehrt wird beim inversen (reziproken) piezoelektrischen Effekt der

Körper durch das Anlegen einer elektrischen Spannung verformt. Die Verformung ist materialabhängig und kann sich entlang aller Raumrichtungen ausbilden. Die Stärke des Piezoeffekts in die jeweilige Richtung wird mit der materialspezifischen piezoelektrischen Materialkonstante d_{ij} angegeben. Die Indizes i und j beschreiben die Richtungen des angelegten Felds E und der erzeugten Dehnung S (s. Bild 2.8). [JANOCHA10, S. 19 ff.]

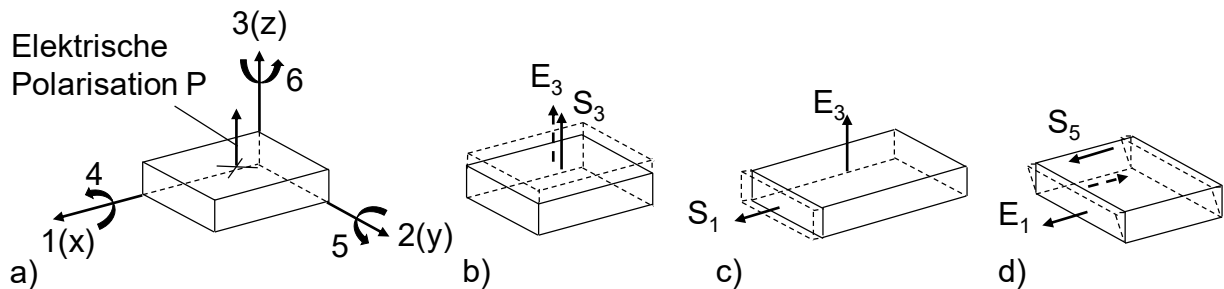


Bild 2.8: Achsdefinition bei Piezokeramiken (a), Longitudinaleffekt (d33-Effekt) (b), Transversaleffekt (d31-Effekt) (c) und Schereffekt (d15-Effekt) nach [JANOCHA10, S. 20]

Der piezoelektrische und der inverse piezoelektrische Effekt sind reversibel. Als Sensorfunktion, z. B. zum Messen einer Kraft, wird der piezoelektrische Effekt genutzt. Piezoaktoren basieren auf dem inversen piezoelektrischen Effekt.

2.4.2.3 Wirkprinzip von magneto- und elektrorheologische Aktoren

Das funktionsbestimmende Element bei magneto- und elektrorheologischen Aktoren ist die magneto- bzw. elektrorheologische Flüssigkeit (MRF bzw. ERF). Diese Flüssigkeit besteht aus einer Trägerflüssigkeit, z. B. einem Mineral- oder Silikonöl, in dem polarisierte Feststoffteilchen gelöst sind, z. B. Polyurethan- oder Magnetitteilchen. Durch das Anlegen eines elektrischen oder magnetischen Felds werden die Teilchen entsprechend ihrer Polarisation ausgerichtet. Es bilden sich mechanisch belastbare Bereiche innerhalb der Flüssigkeit und die Viskosität wird erhöht. Dies kann bis zu einem vollständigen Festkörper-Zustand der Flüssigkeit gesteigert werden. Dieser sogenannte magneto- bzw. elektrorheologische Effekt ist reversibel und durch das Steuern des Felds gezielt anpassbar. [JANOCHA10, S. 97 ff.]

In Bild 2.9 sind die nutzbaren Wirkprinzipien dargestellt. Der Grundaufbau besteht aus der ERF oder MRF, die sich zwischen zwei Festkörpern befindet. Die Körper können als Elektroden oder Polpaare eines Magneten dienen, die das Feld erzeugen. Im Schermodus wird die Relativbewegung der Körper durch Anpassen der Viskosität beeinflusst. Durch die Erhöhung der Viskosität wird eine Kraft erzeugt, die entgegen der

Bewegungsrichtung der Körper wirkt (s. Bild 2.9 (a)). Um die Fließgeschwindigkeit der zwischen den Körpern strömenden Flüssigkeit zu beeinflussen (Fließmodus), wird die Viskosität im felddurchsetzten Bereich gezielt erhöht (s. Bild 2.9 (b)). Ebenso kann das Herausfließen der Flüssigkeit aus dem Spalt zwischen den Körpern verhindert werden. Dies wird im Quetschmodus genutzt, um die Annäherung der Körper zu erschweren (s. Bild 2.9 (c)). [JANOCHA10, S. 107 ff.]

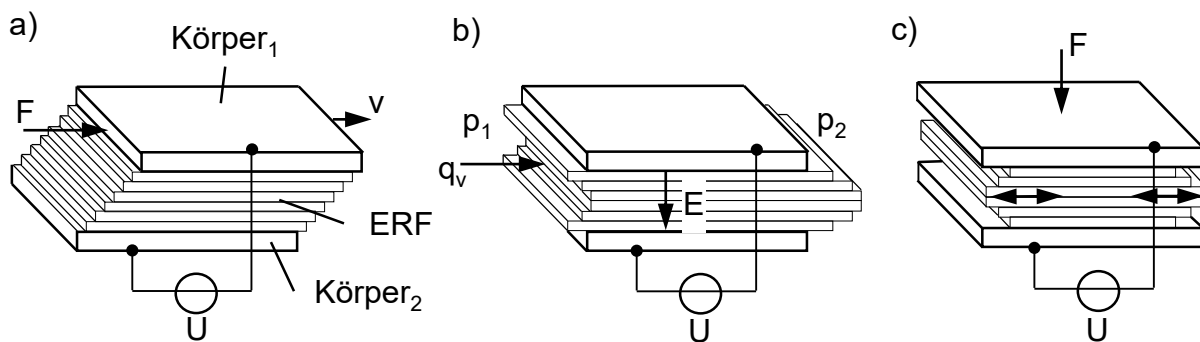


Bild 2.9: Schermodus (a), Fließmodus (b) und Quetschmodus (c) am Beispiel der Grundstruktur eines elektrorheologischen Aktors nach [JANOCHA10, S. 107]

2.4.2.4 Wirkprinzip von fluidmechanischen Aktoren

Fluidmechanische Aktoren nutzen als Hilfsenergie die potenzielle Energie eines zugeführten Gases, z. B. Luft, oder einer Flüssigkeit, z. B. Öl [CZICHOS19, S. 169]. Dementsprechend wird zwischen Pneumatik- und Hydraulikaktoren unterschieden. Beide Untergruppen nutzen das Verdrängerprinzip [WILL14, S. 3]. Dabei wird die mechanische Ausgangsenergie erzeugt, indem der fluidische Druck auf einen Festkörper wirkt. Hiermit lassen sich translatorische und rotatorische Bewegungen ermöglichen. [BAUER16, S. 113]

2.4.2.5 Wirkprinzip von thermomechanischen Aktoren

Die gezielte Erzeugung einer Kraft oder Bewegung erfolgt bei thermischen Aktoren unter Zuhilfenahme von thermischer Energie.

Dehnstoff-Aktoren nutzen den Effekt der materialspezifischen Wärmeausdehnung. Als Dehnstoff wird ein Material mit einem hohen Wärmeausdehnungskoeffizient eingesetzt. Durch die Erwärmung dehnt sich der Dehnstoff stärker als die umgebende Struktur aus. Mittels einer geeigneten Konstruktion wird die Expansion in eine gezielte Bewegung umgesetzt. [ISERMANN08, S. 504]

Die unterschiedliche Wärmeausdehnung wird auch bei Thermobimetall-Aktoren verwendet. Diese bestehen aus einem Schichtverbund aus mindestens zwei verschiedenen

Werkstoffen. Wird der Verbund erwärmt, dehnen sich diese unterschiedlich stark aus und der Verbund verformt sich. [ISERMANN08, S. 503]

Zu den thermomechanischen Aktoren zählen auch Aktoren, deren Funktion auf dem thermischen Formgedächtnis-Effekt (FG-Effekt) beruht. Dieser beschreibt die Eigenschaft eines Materials, zwei temperatur- oder belastungsabhängige Gestalten anzunehmen. Durch die Zuführung von thermischer Energie ändert sich das Materialgefüge von Martensit in Austenit. Dieser reversible Vorgang verläuft diffusionslos, d. h. die Stellung der Atome zueinander (benachbarte Atome) ändert sich nicht, sondern nur deren Position und damit die Form des gesamten Körpers. Die Gestalten werden dem Körper bei der Herstellung aufgeprägt und können temperaturgesteuert eingenommen werden. [LANGBEIN13, S. 3 ff.]

2.4.3 Eigenschaften von Aktoren

Für Aktoren besteht eine Vielzahl an möglichen Einsatzszenarien. Die sich daraus ergebenden Anforderungen sind bei der Entwicklung von Aktoren oder deren Auswahl zu berücksichtigen. Die Anforderungsdefinition deckt dabei folgende allgemeine Aktoreigenschaften ab: [ISERMANN08, S. 450; CZICHOS19, S. 169 ff.; JANOCHA10, S. 14 ff.]

- genaue Positionierbarkeit
- gutes statisches und dynamisches Verhalten (kein Losbrechen, kein Überspringen, kurze Reaktionszeiten)
- großer Stellbereich von Geschwindigkeit und Drehzahl
- großer Kraft- und Drehmomentbereich
- gute, ggf. stufenlose Einstellbarkeit der Betriebskenngößen
- möglicher Vierquadrantenbetrieb (Anfahren und Bremsen in jeweils zwei Richtungen)
- hohe Überlasttoleranz
- geeignete Möglichkeit zur Signaleinleitung/-aufnahme
- geringer/kein Energieverbrauch im stationären Zustand (z. B. bei Halteaufgaben)
- hohe Alterungs- und Verschleißbeständigkeit
- hohe Energiedichte (Arbeitsvermögen pro Volumen)
- hohe, spezifische Leistungsdichte (Leistungsvermögen pro Volumen oder Masse)
- hoher Wirkungsgrad

Bei Aktoren, deren Funktion auf aktiven Materialien basieren, z. B. Aktoren mit Piezokeramiken oder Formgedächtnis-Legierungen, sind die entsprechenden Material-

eigenschaften zusätzlich zu berücksichtigen. Diese sind: [CZICHOS19, S. 169 ff.; JANOCHA10, S. 14 ff.]

- hohe Grenzlastspielzahl des Materials
- hohe Steifigkeit
- schnelle Gestalt-/Formänderung

Zur Konzeption der grundlegenden Aktorfunktionen finden sich in der Literatur Effektsammlungen, z. B. in [KOLLER94, S. 51 ff.], [ROTH01, S. 87 ff.] und [VDI 2222-2 1982, S. 23 ff.]. Ein Beispiel für eine qualitative Gegenüberstellung von Aktortypen anhand spezifischer Eigenschaften, z. B. der Stellzeit und der Stellgeschwindigkeit, ist in [BINZ07, S. 32 ff.] gegeben. Konstruktionskataloge mit quantifizierten Eigenschaften sind bspw. in [SCHNEIDER87, S. 113 ff.] und [RABUS16, S. 71 ff.] aufgeführt. Durch die Korrelation der Eigenschaften lassen sich Diagramme erstellen, die zur Auswahl der Aktortypen dienen. Beispiele sind in [ISERMANN93, S. 594] und [JANOCHA10, S. 17] gegeben. Bild 2.10 zeigt beispielhaft einen Vergleich unterschiedlicher Aktortypen hinsichtlich Stellkraft, Stellweg und Leistungsdichte. Das Erstellen dieser Diagramme kann software-gestützt erfolgen. Hierfür existieren verschiedene Datenbanken [ZUPAN02; MADDEN05; ERBE13; HUBER97].

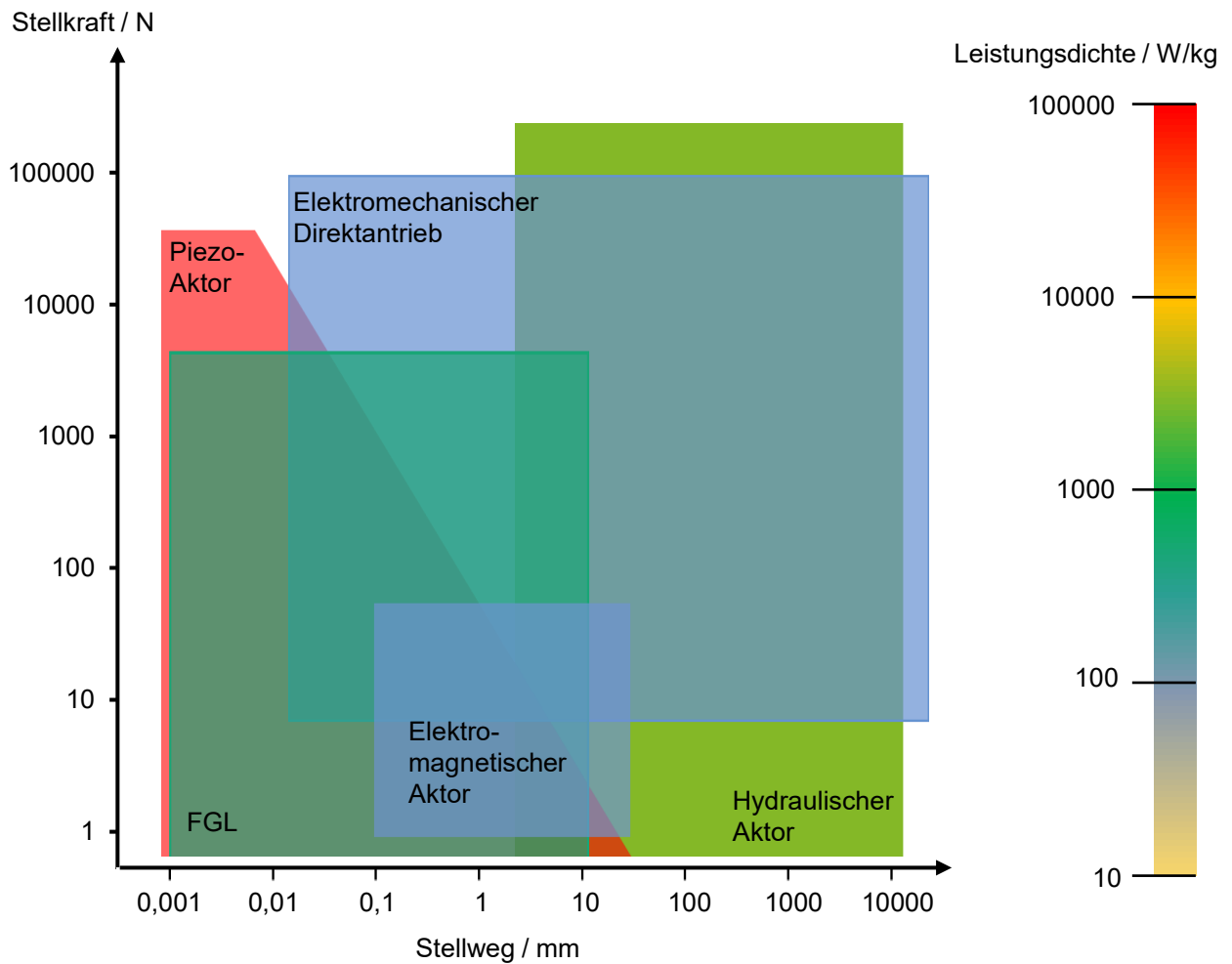


Bild 2.10: Vergleich von Stellkraft und Stellweg für ausgewählte Aktoren nach [JANOCHA10, S. 17] und [ISERMANN93, S. 594]

3 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel dient dazu, das Thema der Arbeit im Kontext des aktuellen Stands der Technik und Forschung einzuordnen.

Die Forschung an adaptiven Tragwerken begann in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts [SOONG90, S. 5]. Wie auch in den darauffolgenden Jahren war das Ziel die Kompensation von dynamischen Lasten, die bspw. durch Wind oder Erdbeben verursacht werden. Gebäudeträgerwerke mit (semi-)aktiver und hybrider Schwingungsdämpfung wurden erst Ende der 1980er Jahre gebaut. Auflistungen von Bauwerken mit passiver, hybrider und (semi-)aktiver Schwingungsdämpfung finden sich in [SPENCER03, S. 846 ff.; FISCO01; FISCO11; SOONG02, S. 249 ff.; CHU05, S. 5 ff.]. Im Folgenden werden Beispiele zur Aktuierung von Trägerwerkselementen für adaptive Strukturen vorgestellt.

3.1 Aktuierung von normalkraftbeanspruchten Trägerwerkselementen

In [STEFFEN21] wird das Funktionsmuster einer Stütze vorgestellt. Dieses besteht aus einem Betonkern, der von einem Stahlzylinder umschlossen ist. Durch eine laterale Kompression des Betonkerns, indem Öl zwischen den Beton und den Stahlzylinder gedrückt wird, wird der Querkompression unter Axiallast entgegengewirkt. Mit diesem Konzept lässt sich die Tragfähigkeit und die Längenänderung der Stütze beeinflussen. Der Funktionsnachweis erfolgt gesteuert. Die Regelung des Vorgangs ist für zukünftige Untersuchungen angedacht.

Zur aktiven Beeinflussung der Verformung von Tragwerken untersuchen Abdel-Rohman und Leipholz [ABDEL-ROHMAN83, S. 632 ff.] die gezielte Längenänderung von kreuzenden Aussteifungselementen eines Fachwerks mittels numerischer Simulationen. In [REINHORN92, S. 2-1 ff.] wird diese Aktuierungsart in einem sechsstöckigen Tragwerksaufbau umgesetzt (s. Bild 3.1 links). Die Aktuierung erfolgt mittels vier Hydraulikzylindern, die im Erdgeschoss mit jeweils einem Aussteifungselement in Reihe eingebaut sind. Mittels einer Regelung werden über die Aussteifungen Zug- und Druckkräfte in die Struktur geleitet.

Werden für die Aussteifungen druckschlaffe Seile eingesetzt, können diese über Umlenrollen zur Aktoreinheit geführt werden (s. Bild 3.1 rechts). In [CONNOR03, S. 440 f.] erfolgt die Montage der Aktoren auf der Boden- bzw. Deckenplatte und somit außerhalb der beanspruchten Trägerwerksbereiche.

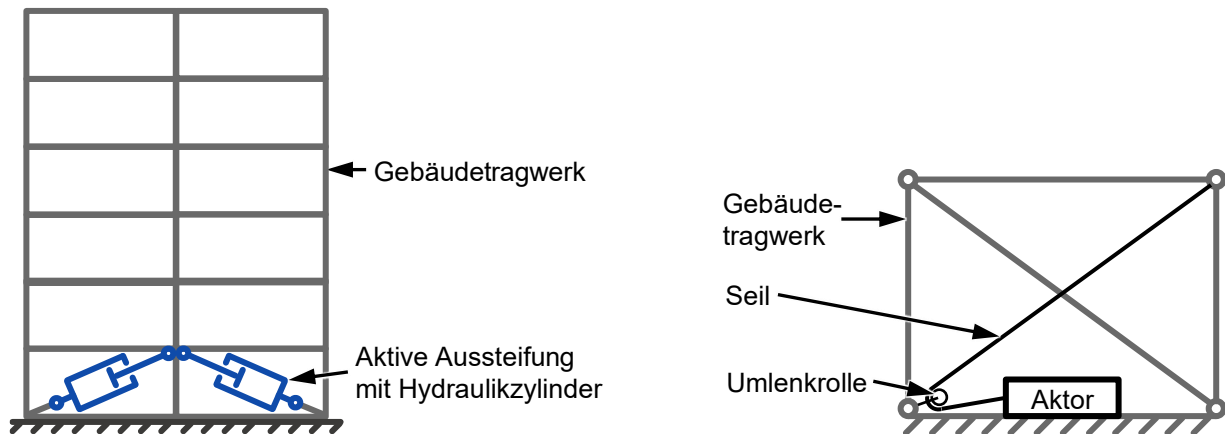


Bild 3.1: Aktuierung der Aussteifung nach [REINHORN92, S. 2-1 ff.] (links) und nach [CONNOR03, S. 440 f.] (rechts)

Dieses Konzept wurde von Wagner et al. [WAGNER20, S. 8 f.] beim Bau eines ca. 2 m hohen Modells des in [BLANDINI22] vorgestellten Demonstrator-Hochhauses D1244 verwendet. Das Modell besteht aus fünf Modulen (s. Bild 3.2). Jedes Modul besteht aus vier Stützen, die sich in den Ecken des quadratischen Grundrisses befinden, und in den Seitenebenen diagonal zwischen den Stützen verlaufenden Seilen, die zur Aussteifung dienen. Sämtliche Stützen und Aussteifungen sind aktulierbar. Die Seile werden mittels Elektromotoren und Schneckengetrieben aufgerollt. Die Motor-Getriebeeinheit ist auf der Deckenplatte zwischen den Modulen befestigt. Innerhalb der Stützen befinden sich ebenfalls Elektromotoren mit nachgeschalteten Kugelgewindetrieben. Die erzeugten Kräfte und Verschiebungen werden über Federsysteme auf die oberen und unteren Enden der Stützen übertragen, um deren Längung bzw. Stauchung zu beeinflussen. Im Vergleich zu obigen Beispielen befindet sich hier die Aktoreinheit nicht im direkten Fluss der über die Stütze abzuleitenden Kräfte, sondern parallel dazu. Das Modell steht auf einem beweglichen Kreuztisch. Dieser ermöglicht die Simulation von Belastungen. Die Anpassung des Modells erfolgt geregelt.

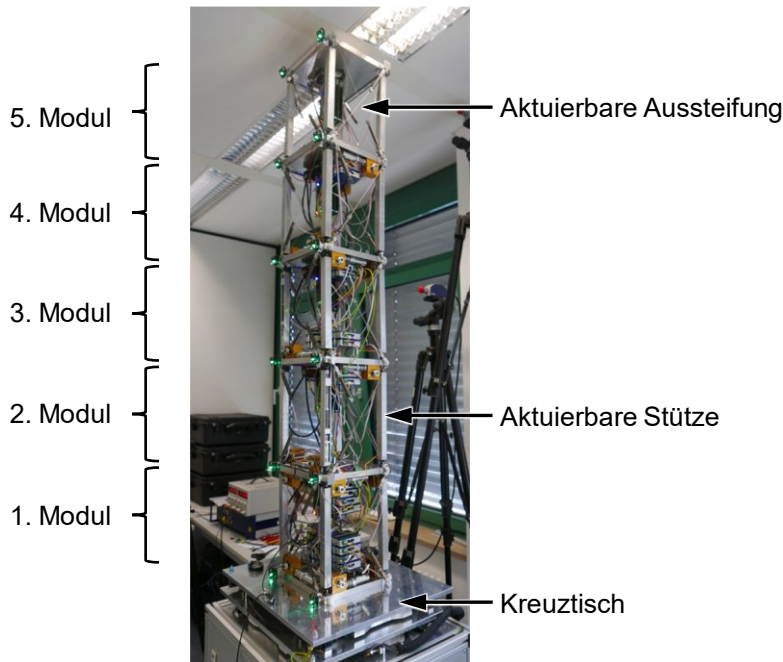


Bild 3.2: Maßstabsmodell des Demonstrator-Hochhauses D1244 nach [Blandini22, S. 8] (Bildquelle: ISYS)

Bani-Hani et al. [BANI-HANI98; BANI-HANI99, S. 998 f.] verwenden zur Aktuierung ihres ca. 2,5 m hohen Stabtragwerks einen hydraulischen Aktor. Jeweils zwei sich kreuzende, aus Stahlseilen bestehende Aussteifungen werden über Umlenkrollen geführt, die sich jeweils am unteren Ende befinden. Die Seile werden an einem gemeinsamen Verbindungsstück befestigt. Der Hydraulikzylinder verschiebt dieses Verbindungsstück derart, dass immer an einem der Aussteifungen gezogen wird, wohingegen das andere entlastet wird. Das Modell steht auf einer beweglichen Plattform, mit der Erdbeben simuliert werden.

In [KORVINK00, S. 31 f.] wird das Aktuierungskonzept einer Schrägkabelbrücke vorgestellt. Das Ziel ist die Reduktion der Fahrbahnverformung aufgrund von Verkehrslasten. Dies erfolgt, indem die Seile der daran aufgehängten Brücke aktiv längenveränderlich sind. Hierzu sind Aktoren zwischen die konventionellen Seile und deren Befestigungspunkten einzubringen. Ein weiterer Vorschlag der Autoren ist, die Seile selbst als Aktor zu verwenden. Hierfür werden die Seile aus einem aktiven Multimaterial hergestellt, z. B. Kohlenstofffasern in Kombination mit Piezokeramiken. Die Seile sind somit in der Lage ihre Länge selbstständig anzupassen. In einer numerischen Studie wird anhand eines Beispiels gezeigt, dass eine Verformungsreduktion der Brücke mit diesem Aktuierungskonzept möglich ist [SOBEK01, S. 40 ff.].

Ein solches Aktuierungskonzept wird in [BOSENS01, S. 969 ff.] anhand eines 30 m langen Modells einer Hängebrücke umgesetzt. Durch die Integration von Hydraulikaktoren in zwei der acht Tragseile wird die Schwingungsanregung der Brücke aktiv beeinflusst (s. Bild 3.3 links). Jeder Hydraulikaktor besteht aus zwei unterschiedlich großen Druckkammern bzw. Druckflächen am Zylinderkolben, die separat bedruckbar sind. Dieser Aufbau entspricht der Reihenschaltung zweier unterschiedlich großer Zylinder. Über die großen Druckflächen werden (quasi-)statische Lasten adaptiert, während die dynamische Aktuierung über die kleinen Druckflächen erfolgt. Diese Aufteilung ermöglicht eine genauere Einstellung der Hydraulikdrücke mittels für die jeweiligen Anforderungen optimierter Ventile. Zur Versuchsdurchführung wird die Brücke mit einem Einmassenschwinger angeregt, der sich am äußersten Ende des Brückenauslegers befindet.

Ein 6 m langer auskragender Fachwerkträger wird in [SENATORE18] vorgestellt. Um dessen Durchbiegung zu reduzieren, werden einzelne normalkraftbeanspruchte Stäbe durch elektromechanische Aktoren ersetzt (s. Bild 3.3 rechts). Senatore et al. [SENATORE19] zeigen, dass die Aktuierung Verformungen minimiert sowie Material und Energie einspart.

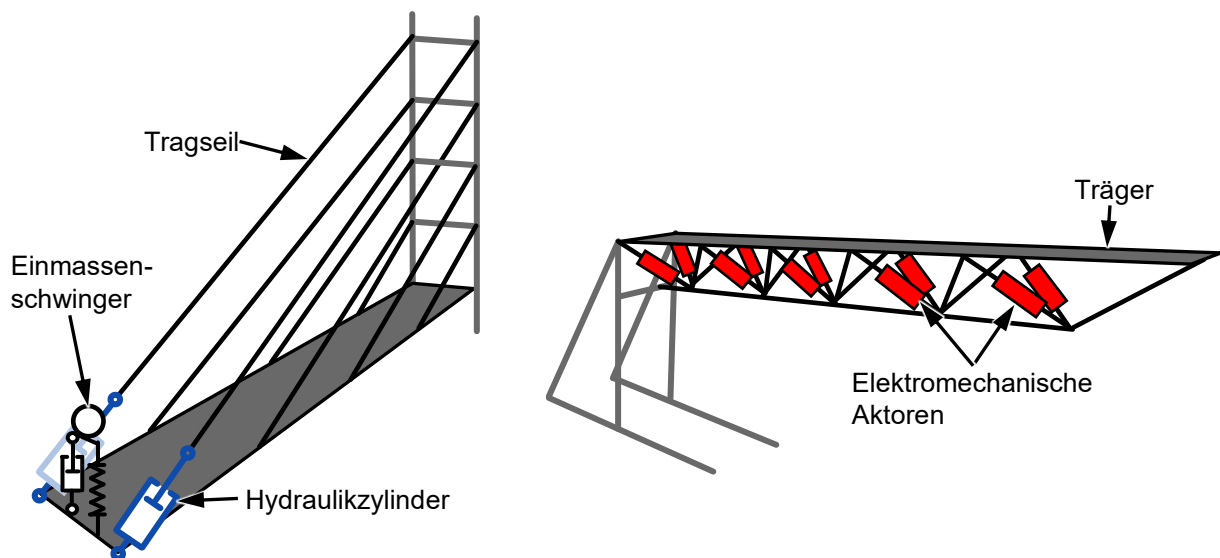


Bild 3.3: Hängebrücke nach [BOSENS01, S. 969 ff.] (links) und Fachwerkträger nach [SENATORE18] (rechts)

Ein ähnlicher Ansatz wird von Reksowardojo et al. [REKSOWARDOJO22] verfolgt, die die Adaption der Durchbiegung eines beidseitig gelagerten, 6,6 m langen Fachwerkträgers untersuchen. Wie auch im vorhergehenden Beispiel werden einzelne normalkraftbeanspruchte Stäbe gegen elektromechanische Aktoren ausgetauscht. Auch hier wird

gezeigt, dass erhebliche Material- und Energieeinsparungen durch die Aktuierung möglich sind.

Seit Anfang der 2000er Jahre wird die Aktuierung von Tensegrity-Strukturen untersucht. Tensegrity-Strukturen sind Leichtbaustrukturen, die aus Druckstäben und Zugelementen bestehen und sich in einem in sich stabilen Gleichgewicht befinden [FULLER75, S. 372]. In [SHEA02] wird eine aktive Tensegrity-Struktur vorgestellt, die eine Fläche von 9 m² überspannt. Über das Ein- und Ausschrauben einer Gewindestange wird die Länge der Druckstäbe manuell angepasst. Mit diesem Modell wird die Formanpassung der Struktur gezeigt. Eine gesteuerte oder geregelte Zustandsänderung erfolgt nicht.

Die von Fest et al. [FEST04, S. 1458] untersuchte Tensegrity-Struktur überspannt eine Fläche von 15 m². Zehn elektromechanische Aktoren, bestehend aus einem Asynchronmotor, einem Kegelradgetriebe und einem Spindelantrieb, werden seriell zu Druckstäben eingebaut. Durch die Aktuierung wird die Gesamtlänge von Druckstab und Aktor den Erfordernissen angepasst.

In [MOTRO03, S. 147 ff.] befinden sich die Aktoren außerhalb der Tensegrity-Struktur. Die Betätigungskräfte werden über Seile an die zu manipulierenden Stellen geleitet. Dadurch wird die Gesamtmasse des Tragwerks reduziert, die Komplexität durch die zusätzlichen Zugseile jedoch erhöht [MOORED09, S. 3273].

Die Forschungsschwerpunkte im Bereich der aktiven Tensegrity-Strukturen liegen auf der Art der Aktuierung, z. B. [MOORED09], und der Regelung bzw. der Regelungsalgorithmen, z. B. [ADAM07], [WROLDSEN09] und [BEL HADJ ALI10]. Eine Umsetzung von Tensegrity-Strukturen als praxisnahes Tragwerk ist bisher nicht erfolgt. Eine detaillierte Auseinandersetzung mit den Aktuierungsmöglichkeiten und der nutzbaren Aktoren fehlt im Kontext dieser Strukturen.

3.2 Aktuierung von biegebeanspruchten Tragwerkselementen

Wird ein beidseitig gelagertes Element auf Biegung beansprucht, so besteht nach Connor [CONNOR03, S. 442 f.] eine Möglichkeit darin, die Auflager zu drehen (s. Bild 3.4 links). Dadurch wird ein konstantes Biegemoment entlang des Bauteils erzeugt, das der Verformung entgegenwirkt. Auf diese Weise wird das gesamte Element beeinflusst. Das Erzielen einer lokalen Manipulation, z. B. zur Kompensation von Punktlasten oder zur Vermeidung von lokalen Überbelastungen, ist nicht möglich.

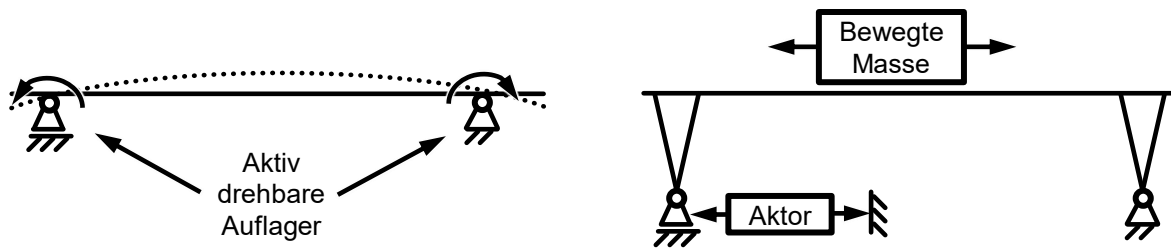


Bild 3.4: Drehbare Auflager zur Erzeugung von Biegeverformungen nach [CONNOR03, S. 442 f.] (links) und schematische Darstellung des Stuttgarter Trägers nach [SOBEK06, S. 6/39] (rechts)

Das Konzept der aktuierbaren Auflager wird in [SOBEK06, S. 6/39] in Form des „Stuttgarter Trägers“ umgesetzt. Der Träger ist ein ca. 1,6 m langes Modell einer Brücke. An den Enden der Brücke befindet sich jeweils ein drehbares Auflager. Eines der Auflager ist zusätzlich mittels einer elektromechanischen Stelleinheit horizontal in Brückenlängsrichtung verschiebbar. Die durch eine bewegliche Einzellast verursachte Verformung des Trägers lässt sich durch die geregelte translatorische Bewegung des Auflagers reduzieren. Der Stuttgarter Träger ist schematisch in Bild 3.4 rechts dargestellt.

Um lokale Bereiche eines biegebeanspruchten Elements zu beeinflussen, können Aktoren an der Ober- und Unterseite befestigt werden (s. Bild 3.5 links). Durch die Längung bzw. Verkürzung der Aktoren und deren Abstand zur neutralen Faser werden Biegemomente erzeugt, die zwischen den Befestigungspunkten wirken [CONNOR03, S. 442 f.]. Dieses Konzept wurde von Bleicher [BLEICHER12, S. 90] zur Schwingungsdämpfung einer ca. 13 m langen Spannbandbrücke angewendet. Im Handlauf befinden sich pneumatische Muskeln (Zugaktoren). Mit den Geländerholmen als Hebelarme werden Momente in die Brücke geleitet, die entgegen der Vertikalschwingungen wirken.

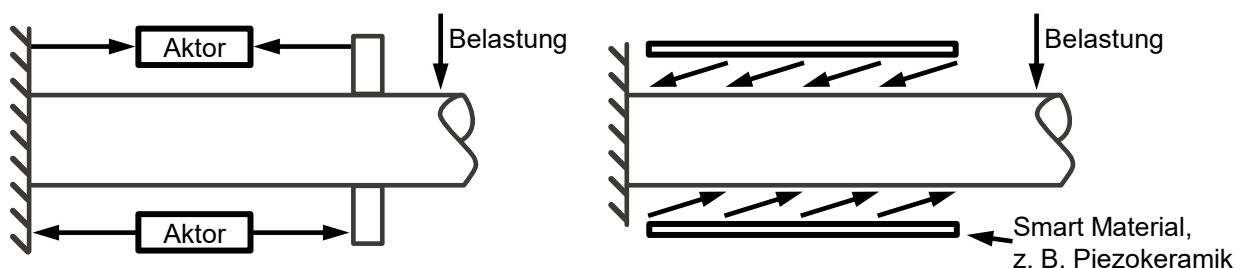


Bild 3.5: Punktuelle (links) und flächige Einleitung von Kräften (rechts) nach [CONNOR03, S. 442 f.]

Neben der punktuellen Befestigung der Aktoren, können Kräfte auch kontinuierlich in das Tragelement eingeleitet werden, z. B. durch das flächige Aufkleben von Piezoaktoren

(s. Bild 3.5 rechts). Je nach Ausführung sind mit diesem Aktuierungskonzept lokale und das gesamte Element betreffende Beeinflussungen möglich. [CONNOR03, S. 442 f.]

In [CONNOR03, S. 442 f.] wird ein weiteres Aktuierungskonzept für biegebeanspruchte Elemente vorgestellt. Dabei wird eine zum Tragwerkselement transversal wirkende Kraft in dieses eingeleitet. Diese Kraft kann an einem unter dem Element verlaufenden Unterzug abgestützt werden (s. Bild 3.6 links). Dadurch wird ein dreieckförmiger Momentenverlauf erzeugt, der dem durch eine äußere Last verursachten Biegemoment entgegenwirkt.

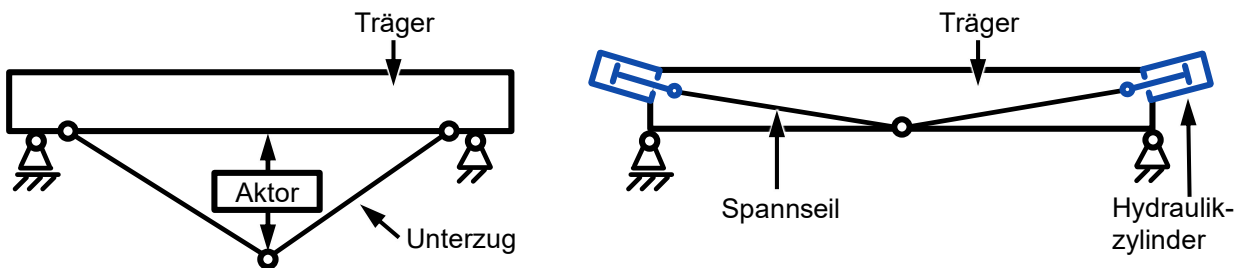


Bild 3.6: Aktuierbare Luftstütze nach [CONNOR03, S. 442 f.] (links) und schematische Darstellung der Aktuierung des Biegebalkens nach [SCHNELLENBACH-HELD14] (rechts)

Dieses Konzept wird in [DOMKE84, S. 4 ff.] an einem 10 m langen Betonträger umgesetzt und untersucht. Hierzu befinden sich pneumatische Kissen zwischen dem Träger und den darunter verlaufenden Stützseilen. Es wird gezeigt, dass die Lastableitung in den Unterzug durch die Änderung des pneumatischen Drucks in den Kissen gesteuert werden kann. Damit lässt sich die Verformung des Trägers den Erfordernissen anpassen.

Schnellenbach-Held und Steiner [SCHNELLENBACH-HELD14] reduzieren die Durchbiegung von Trägern, indem deren Vorspannung angepasst wird. Die Versuche werden an einem Fachwerk-Träger aus Aluminiumstäben und einem Betonbalken mit T-förmigem Querschnitt durchgeführt. Unterhalb der Träger verlaufen Spannseile, die an der Unterseite des Trägers in Feldmitte und mit den Auflagern verbunden sind. Die Vorspannung der Seile wird mittels hydraulischer Hohlzylinder eingestellt, die sich außerhalb der Bauteile an den Auflagern befinden (s. Bild 3.6 rechts).

3.3 Aktuierung von Flächentragwerken

In der vorliegenden Arbeit erfolgt eine Eingrenzung auf lineare Tragwerkselemente. Zur Vollständigkeit wird hier der aktuelle Stand der Forschung und Technik bei der Aktuierung

von Flächentragwerken vorgestellt. Dabei wird gezeigt, dass zur Aktuierung von Flächentragwerken uniaxial wirkende Aktoren zum Einsatz kommen oder Konzepte angewandt werden, die bereits von der Aktuierung der linearen Tragwerkselemente bekannt sind.

Innerhalb der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsgruppe 981 „Hybride Intelligente Konstruktionselemente (HIKE)“ wurde eine aus einer Faltkernsandwichstruktur bestehenden, adaptive Schale aufgebaut. Diese überspannt eine Fläche von 4 m x 4 m [BINZ16, S. 13 ff.]. In Anlehnung an das oben bereits vorgestellte Konzept aus [CONNOR03, S. 442 f.], erfolgt die Aktuierung über pneumatische textile, kissenförmige Flächenaktoren, die an der Ober- und Unterseite des Schalentragwerks befestigt werden. Durch die Beaufschlagung mit einem Innendruck bläht sich der Aktor auf und der Abstand zwischen dessen Befestigungspunkten verkürzt sich. Dadurch können Zugkräfte lokal in das Tragwerk eingeleitet und die Spannung flächig beeinflusst werden [BINZ16, S. 20 ff.]. Die Auflager lassen sich ebenfalls mit diesem pneumatischen Aktor verschieben. Dazu wird der Aktor mit einer Feder vorgespannt, um dessen Rückstellung sicherzustellen. Durch die Befestigung des Aktors an zwei sich gegenüber befindenden Seiten wird eine translatorische Bewegung erzeugt [BINZ16, S. 108 ff.]. Eine weitere Möglichkeit der Aktuierung erfolgt über die an den Tragwerksrändern befestigten Seile. Mittels eines Hydraulikzylinders und eines Hebelmechanismus wird die Vorspannung des Seils verändert. Dadurch werden Kräfte an den Befestigungspunkten in die Struktur eingeleitet, um die Spannungsverteilung zu beeinflussen [BINZ16, S. 141 ff.]. Die Stuttgart SmartShell ist die großmaßstäbliche Umsetzung des oben beschriebenen Schalenprototyps. Die SmartShell ist eine Holzschale, die eine Fläche von 10 m x 10 m überspannt. Drei der vier Auflager sind mittels Hydraulikzylinder in alle Raumrichtungen verschiebbar. Pro Auflager sind jeweils drei Hydraulikzylinder parallel zueinander angeordnet und befinden sich zwischen der Schale und der Bodenplatte. Neben der Dämpfung von Schwingungen können Spannungen minimiert und lokal homogenisiert werden. [NEUHÄUSER13A; NEUHÄUSER13B; NEUHÄUSER14]

3.4 Zusammenfassung und Defizite

Wie in diesem Kapitel aufgezeigt, existieren bereits unterschiedliche Untersuchungen zur Aktuierung von Tragwerkselementen. Die Art der Studien reicht von theoretischen Vorüberlegungen bis hin zu deren Realisierung. Auffallend ist, dass an der Aktuierung entgegen sämtlichen relevanten Beanspruchungen geforscht wird. Eine Übersicht über die oben vorgestellten Publikationen ist in Bild 3.7 gegeben. Zur Einordnung der Nähe zu

einer möglichen Überführung in die Praxis sind diese anhand des Technologie-Reifegrads TRL nach [DIN ISO 16290 2016] gegliedert. Anhand der Norm wird der „Grad der Ausgereiftheit“ [DIN ISO 16290 2016, S. 8] eines physischen Systems definiert. Die Einteilung beginnt bei der Beschreibung technologischer Grundsätze für einen möglichen Anwendungsfall (TRL 1) und endet mit dem Einsatz des Systems in der vorgesehenen Umgebung im finalen Zustand (TRL 9). Eine zusammenfassende Beschreibung der Grade findet sich in Tabelle A.1. Die Einteilung der in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellten Beispiele erfolgt anhand den in der Norm beschriebenen Merkmalen. Auf Basis der aus der Literatur bekannten Informationen ist eine Zuordnung zu den Reifegraden möglich. Aufgrund des beschränkten Informationsgehalts der Veröffentlichungen und der nicht absolut trennungsscharfen Einteilung kann diese jedoch nicht mit Bestimmtheit gewährleistet werden.

In Bild 3.7 ist gekennzeichnet, ob die Veröffentlichung einen Beitrag im Bereich der Aktuierung bzw. des Gesamtsystems (grünes Haus) und/oder der Aktorik (rotes Zahnrad) im Kontext der Tragwerke geleistet hat. Zumeist liegt der Fokus auf dem Gesamtsystem. Informationen zur Entwicklung von Komponenten oder des Gesamtsystems finden sich in keiner Veröffentlichung.

Weiterhin spielen Aktoren als Teilsystem des adaptiven Tragwerks eine untergeordnete Rolle. Aus einigen Publikationen geht hervor, dass eine (Anpassungs-)Entwicklung erfolgte (s. Bild 3.7, mit rotem Zahnrad markierte Quellen). Jedoch fehlen genauere Informationen. Evident ist, dass in diesen Veröffentlichungen zumeist kommerziell erhältliche Standardaktoren zum Einsatz kommen, die durch zusätzliche Übertragungsglieder ergänzt und damit für deren Einsatz angepasst werden. Eine systematische Auseinandersetzung mit der Auswahl bzw. der ggf. erfolgten Anpassungsentwicklung findet sich in keiner bekannten Studie.

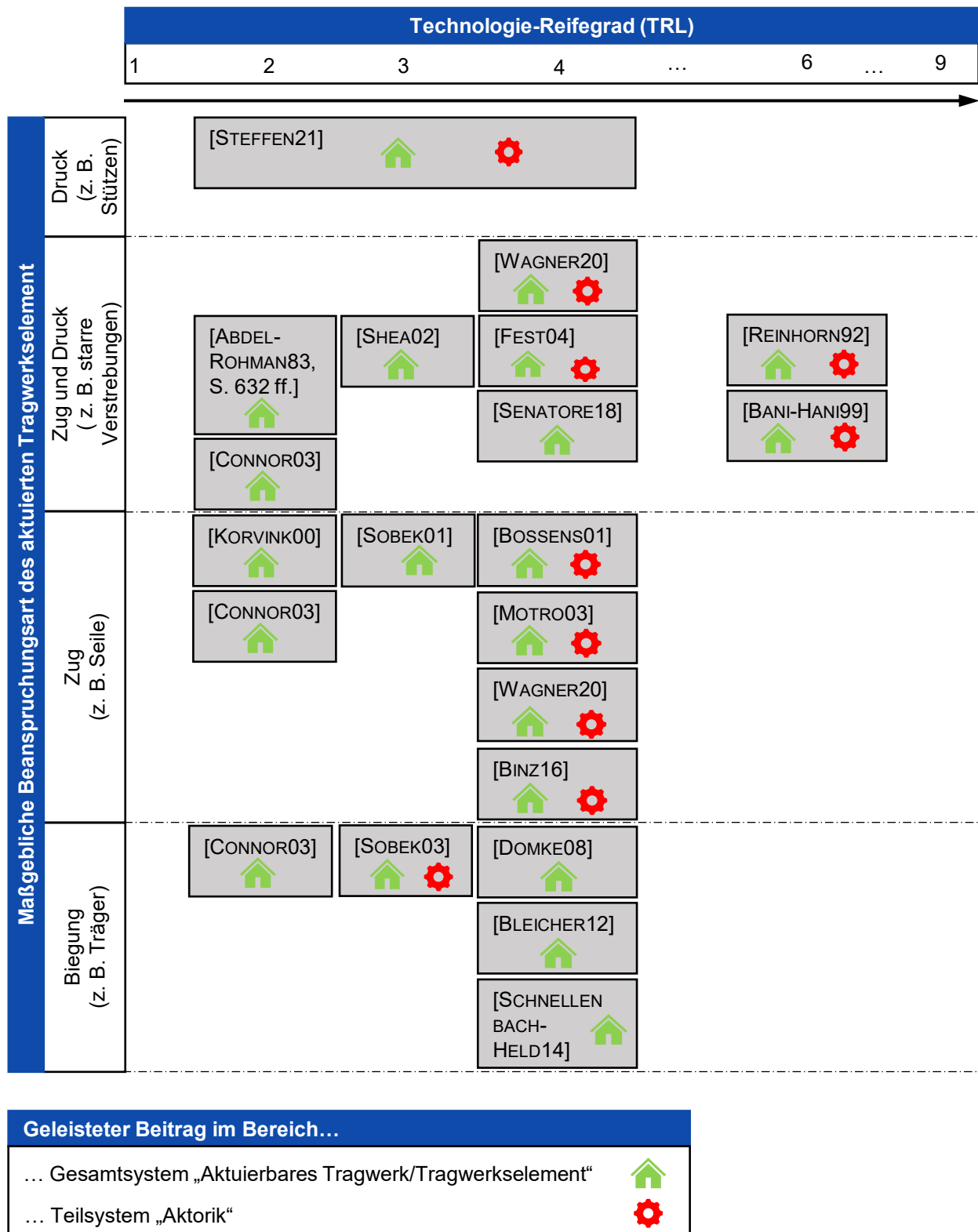


Bild 3.7: Übersicht über die für diese Arbeit relevanten Veröffentlichungen

Aufgrund der wenigen bzw. fehlenden Informationen ist es nicht möglich, quantifizierte, allgemeine Anforderungen oder Anforderungsbereiche für Eigenschaften der zu aktuierenden Tragwerkelemente oder der benötigten Aktoren herauszufiltern. So sind z. B. die zu erforderlichen Kräfte und Stellwege immer anwendungsspezifisch zu

bestimmen und ergeben sich aus Eigenschaften der zu aktuierenden Struktur sowie den Adaptionszielen [SCHNELLENBACH-HELD14, S. 165]. Zweckmäßig erscheint der Einsatz von robusten und ausfallsicheren Aktoren, die den jahrelangen Betrieb auch unter ausgesetzter Witterung gewährleisten. Nach Schnellenbach-Held und Steiner [SCHNELLENBACH-HELD14, S. 165] sind anzustrebende Aktoreigenschaften kleine Beschleunigungszeiten, ein großer Bereich abzudeckender Stellfrequenzen und eine hohe Wiederholgenauigkeit der Bewegung bzw. Kraft. Diese Eigenschaften implizieren eine reversible Aktuierung und eine stufenlos erzeugbare Bewegung bzw. Kraft. Weitere Anforderungen bestehen an die Baugröße, den Wartungsaufwand und die -möglichkeiten sowie die Kosten für die Anschaffung und den Betrieb der Aktoren [SCHNELLENBACH-HELD14, S. 165].

4 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Ausgehend von den in Kapitel 3.4 aufgezeigten Defiziten im Bereich der Entwicklung von adaptiven Tragwerkselementen, wird im Folgenden das Ziel dieser Arbeit definiert. Weiterhin wird das Vorgehen zum Erreichen des Ziels vorgestellt.

4.1 Ziel der Arbeit

Wie in Kapitel 3.4 aufgezeigt, erfolgt in keiner bekannten Studie eine systematische Auseinandersetzung mit der grundlegenden Konzeption des adaptiven Tragwerks oder Tragwerkelements. Da diese im Bereich der Konzeption angesiedelten Vorarbeiten fehlen, ist eine anwendungsspezifische (Neu-)Entwicklung auf Basis der bereits bekannten Veröffentlichungen nur bedingt möglich. Diese Arbeit hat daher das übergeordnete Ziel, die Entwicklung von aktuierbaren Strukturelementen für adaptive Tragwerke zu unterstützen, indem systematisch Aktuierungs- und Aktorkonzepte erarbeitet und aufgezeigt werden. Damit wird ein Beitrag zur ganzheitlichen Betrachtung der Aktuierung von Tragwerkselementen auf Komponentenebene geleistet.

Aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems „Adaptives Tragwerk“ erfolgt eine Eingrenzung des Themengebiets auf die Funktion der Tragwerksaktuierung, insbesondere auf den mechanischen Teil des Gesamtsystems. Die Aktuierung einer Tragstruktur geschieht durch das Einbringen von Kräften oder die Verformungsmanipulation einzelner Elemente. Dadurch, dass die verwendeten Aktoren zumindest teilweise am Lastabtrag beteiligt sind, sind diese selbst Bestandteil der Tragstruktur. Wie in Kapitel 2.4 gezeigt, existiert zur Erzeugung von Kräften und Linearbewegungen bzw. Momenten und Drehbewegungen eine Vielzahl von Möglichkeiten. Eine Diskussion dieser Einsatzmöglichkeiten zur Manipulation von Tragwerkselementen steht noch aus und ist Teil dieser Arbeit.

Im Vergleich zu linearen Tragwerkselementen ist bei flächigen Tragwerkselementen aufgrund des mehraxialen Lastabtrags und der überlagerten Spannungszustände (s. Kapitel 2.1) eine zusätzliche Raumrichtung zu betrachten. Dies bedeutet eine höhere Systemkomplexität, der bei der Aktuierung Rechnung getragen werden muss. Im ersten Schritt einer gesamtheitlichen Betrachtung der Aktuierung von Tragwerkselementen auf Komponentenebene, die in dieser Arbeit erfolgt, werden zur Fokussierung des Themas nur lineare Elemente betrachtet. Die Verwendung der erzielten Ergebnisse zur

Aktuierung von Flächentragwerken in zukünftigen Arbeiten wird an dieser Stelle nicht ausgeschlossen.

Ein gängiges Vorgehen in der Produktentwicklung zur Erzeugung eines möglichst großen Lösungsraums besteht in der Variation von Teillösungen und deren Kombination zu Gesamtkonzepten [GERICKE21, S. 299]. Dieses Vorgehen wird für die Entwicklung der Aktoren für die zu aktuierenden Tragwerkselemente als zielführend erachtet.

Zusammengefasst ergibt sich hieraus folgende Forschungsfrage:

Wie können mittels systematischer Variation von Lösungsprinzipien lineare aktuierbare Strukturelemente für adaptive Tragwerke entwickelt werden?

Weiterhin ist die Umsetzbarkeit der Lösungsmöglichkeiten an einigen Beispielen zu zeigen. Die dabei verfolgte Fragestellung lautet:

Wie können Tragwerkselemente mit (teil-)integrierter Aktorik in adaptiven Strukturen am Beispiel von normalkraft- und biegebeanspruchten Bauteilen (konstruktiv) realisiert werden?

4.2 Vorgehensweise

Der Aufbau der Arbeit wird entsprechend der zwei Forschungsfragen unterteilt. Im ersten Teil erfolgt die Erarbeitung von möglichen Lösungen zur Aktuierung von Tragwerkselementen (Kapitel 5). Im zweiten Teil erfolgt deren Anwendung anhand von Beispielen (Kapitel 6 bis 9).

Das in dieser Arbeit gewählte Vorgehen orientiert sich am Entwicklungsprozess nach Pahl und Beitz [GERICKE21, S. 66]. Dieses besteht aus den Hauptphasen *Klären der Aufgabe*, *Konzipieren*, *Entwerfen* und *Ausarbeiten*. In der ersten Phase sind Informationen über die Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt zu sammeln. Das Ergebnis wird in Form einer Anforderungsliste für die nachfolgenden Phasen zur Verfügung gestellt. Beim Konzipieren ist die prinzipielle Lösung zu bestimmen. Ausgehend von einer Abstraktion der Entwicklungsaufgabe werden (Teil-)Funktionen identifiziert. Durch die Kombination mehrerer Wirkprinzipien werden Lösungsprinzipien gebildet. Dieses stellt den prinzipiellen Aufbau zur Erfüllung einer Funktion dar [GERICKE21, S. 21]. Die Lösungsprinzipien werden bspw. in einem morphologischen Kasten zusammengeführt. Durch deren geeignete Kombination wird das Konzept festgelegt. In der Phase des Entwerfens wird das Konzept detailliert und in eine funktionsfähige und herstellbare Gestalt gebracht. In der letzten Phase wird der Entwurf ausgearbeitet. Hier

werden alle Unterlagen zur Herstellung, Beschaffung, Verwendung etc. erstellt. [GERICKE21, S. 67 ff.]

Zur Erarbeitung von Lösungsprinzipien für die Entwicklung aktuierbarer Tragwerkselemente sind zuerst die Anforderungen zu bestimmen. Hier zeigt sich die bereits in Kapitel 3.4 genannte Schwierigkeit, dass es aus dem aktuellen Stand der Forschung nicht möglich ist, generell gültige Anforderungen bzw. Anforderungsbereiche zu definieren. Daher beginnt der erste Teil der Arbeit mit der Konzeption der zu aktuierenden Tragwerkselementen.

Nach dem gewählten Vorgehen, bzw. auch nach VDI 2221 [VDI 2221-1 2019, S. 30 ff.], ist zuerst die Funktion zu definieren. Ausgehend vom Gesamtsystem „Aktuierbares Tragwerkselement“ werden hierzu die Funktionen der Teilsysteme definiert. Dazu werden in Kapitel 5.1 Funktionsstrukturen zur Aktuierung von Tragwerkselementen aufgestellt. Aufbauend darauf erfolgt das Ableiten von prinzipiellen Aufbaustrategien, die bei der Planung von adaptiven Tragwerkselementen zum Einsatz kommen.

Um die Teilsysteme detaillieren zu können, hat zuerst die Konzeption des Gesamtsystems zu erfolgen, d. h. die Frage nach der Art und Weise der Aktuierung des Tragwerkselements ist zu beantworten. Da aus der Literatur nur einzelne Aktuierungsmöglichkeiten bekannt sind (s. Kapitel 3), erfolgt in Kapitel 5.2 eine umfängliche Betrachtung und Aufarbeitung dieses Themas. Die bereits bekannten Aktuierungskonzepte werden mittels einer systematischen Variation von Auflagerbedingungen und Belastungsszenarien zu einer Sammlung potenzieller Aktuierungskonzepte für lineare Tragwerkselemente zusammengeführt. Aus diesem Schritt gehen Anforderungen an den zu entwickelnden Aktor hervor. So wird bspw. die Richtung der zu erzeugenden Bewegung definiert.

In Kapitel 5.3 erfolgt die Betrachtung der Hauptkomponenten des Aktors (vgl. Kapitel 2.4). Für die jeweiligen Komponenten wird ein Katalog mit Lösungsprinzipien erstellt. Mit diesen kann das Gesamtkonzept eines Aktors und des zu aktuierenden Tragwerkselements erstellt werden.

Die Anwendung dieser prinzipiellen Lösungen wird an vier Beispielen gezeigt. Diese wurden innerhalb des Sonderforschungsbereichs 1244 (SFB 1244) „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ [SOBEK21] erarbeitet. Die Entwicklung der Komponenten erfolgt in Anlehnung an die Hauptphasen der Produktentwicklung nach Pahl und Beitz [GERICKE21, S. 66 ff.]. Dabei ist zuerst die Aufgabe zu planen und zu

präzisieren, indem Informationen bzgl. des zu entwickelnden Produkts zusammengetragen werden. Das Ergebnis dieser Phase stellt die Anforderungsliste dar, die sämtliche benötigten Informationen für die weitere Entwicklung beinhaltet. Im nächsten Schritt erfolgt die Konzeption des Produkts. Auf Basis der Ergebnisse aus Kapitel 5 werden Funktionsstrukturen erstellt und geeignete Wirkprinzipien identifiziert.

In Kapitel 6 wird eine aktuierbare Aussteifung entwickelt. Hier ist der Aktor in den direkten Kraftfluss des Lastabtrags zu integrieren. Die Entwicklung einer aktuierbaren Stütze wird in Kapitel 7 vorgestellt. Um Schwingungen zu dämpfen, ist der Aktor parallel zum lastabtragenden Teil der Stütze zu positionieren. In Kapitel 8 ist das Verformungsverhalten eines Biegebalkens aus Stahlbeton zu beeinflussen. Dazu sind Aktoren direkt in den tragenden Querschnitt des Balkens zu integrieren. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung einer robusten und zuverlässigen Lösung. Dies führt jedoch dazu, dass nur Teilkomponenten des Aktorsystems integriert werden, z. B. der Stellübertrager. Aufgrund dessen wird in Kapitel 9 ein weiteres Aktorkonzept ausgearbeitet. Das Ziel ist die Integration aller Aktorkomponenten in den Balken.

5 Lösungsprinzipien zur Aktuierung linearer Tragwerkselemente

In diesem Kapitel werden Lösungsprinzipien für aktuierbare lineare Tragwerkselemente erarbeitet. Dazu erfolgt die Betrachtung des aktuierten linearen Tragwerkselements mit einem systemtechnischen Ansatz. Zuerst werden die Funktionen des Gesamt- und der Teilsysteme definiert (s. Kapitel 5.1). Anschließend werden Lösungsprinzipien zur Erfüllung der Funktionen aufgezeigt (s. Kapitel 5.2 und 5.3). Durch deren systematische Variation lassen sich tragwerksintegrierte Aktoren sowie lineare aktuierbare Tragwerkselemente konzipieren und ausarbeiten.

5.1 Funktionsstrukturen von aktuierbaren Tragwerkselementen

Funktionsstrukturen dienen dazu, Aufgaben von technischen Systemen auf abstrakter Ebene darzustellen. Unter Berücksichtigung des Signal-, Stoff- und Energieflusses wird der Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems beschrieben. Durch das Aufteilen von Haupt- in Teilfunktionen werden komplexe Systeme in übersichtlichere Teilsysteme gegliedert. Das Ziel besteht u. a. im Schaffen eines besseren Systemverständnisses und im Aufbau einer potenziellen Produktarchitektur [GERICKE21, S. 241]. Die im folgenden gezeigten Funktionsstrukturen stellen die Basis zum Aufzeigen möglicher Lösungsprinzipien dar.

Nach Moro [MORO21, S. 33] besteht die Hauptaufgabe eines Tragwerks im Abtragen von Kräften. Dies geschieht, indem die Kräfte von Tragwerkselementen aufgenommen und weitergeleitet werden (Funktion „Energie leiten“). Die Aktuierung dieser passiven Elemente zielt darauf ab den Energiefluss zu manipulieren. Dabei werden die Energieflüsse im passiven Tragwerkselement miteinander verknüpft und geleitet. Das Gesamtsystem „Aktuiertes Tragwerkselement“ setzt sich somit aus den Teilsystemen „Passive Struktur“ und „Aktor“ zusammen. Der Fokus liegt auf den mechanischen Teilsystemen des adaptiven Tragwerkselements (s. Kapitel 4.1). Die zum Aufbau eines adaptiven Tragwerkselements benötigten Funktionen für die Regelung und die Sensorik werden nicht betrachtet.

Die Hauptaufgabe eines Aktors ist das Wandeln einer Energie [ISERMANN08, S. 442]. Ausgehend von den in Kapitel 2.4 gezeigten Hauptkomponenten lässt sich diese Funktion in die drei Teilfunktionen „Signal umformen“, „Energie in mechanische Energie

wandeln“ und „Mechanische Energie ändern und leiten“ unterteilen. Die Funktionen sind in Kapitel 2.4 beschrieben.

Die Verbindung der Teilsysteme „Passive Struktur“ und „Aktor“ hängt von den jeweiligen Anforderungen an das zu aktuierende Tragwerkselement ab. Ausgehend von diesen beiden Teilsystemen werden unterschiedliche Aufbauarten aufgezeigt. In Anlehnung an Roth [ROTH00, S. 93] werden hierzu die Ströme der mechanischen Energie variiert, d. h. die Reihenfolge der Teilfunktionen, sowie die Systemgrenzen verschoben.

Bild 5.1 zeigt die Ausgangsstruktur, bei der der Hauptenergiefluss ($E_{\text{mech},T} \rightarrow E_{\text{mech},T'}$) durch die Aktorfunktion „Energie ändern und leiten“ (Funktion A3) und das Teilsystem „Passive Struktur“ verläuft. In der gezeigten Darstellung ist ein Stoffstrom eingezeichnet. Dessen Existenz ist vom Wandlerprinzip abhängig und zur Vollständigkeit eingezeichnet. Aufgrund der einzelnen Schnittstelle zwischen „Passiver Struktur“ und „Aktor“ geht die Trennung der Funktionen klar hervor. In Anlehnung an die in Kapitel 2.2 vorgestellten Leichtbauweisen, bietet sich die Realisierung in Differenzialbauweise an.

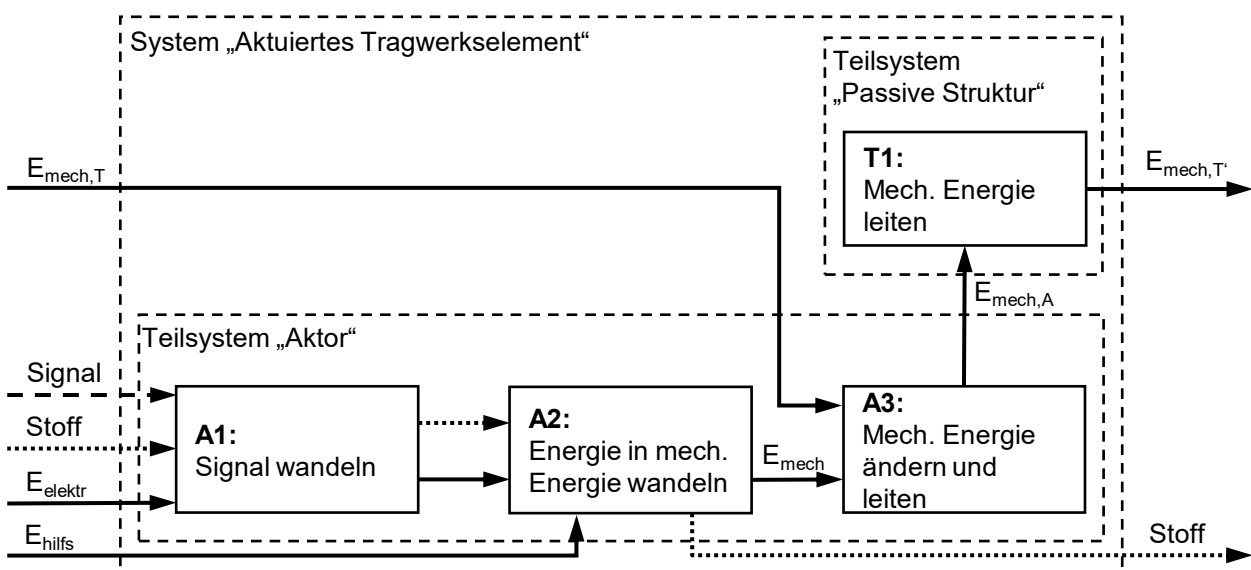


Bild 5.1: Funktionsstruktur mit im Hauptenergiefluss positioniertem Aktor

Die Ausgangsenergie $E_{\text{mech},T'}$ kann auf ein anderes Element innerhalb des Gesamttragwerks geleitet oder in die Umgebung abgeführt werden. Die Weiterleitung auf ein anderes Element entspricht bspw. dem Aufbau von Reinhorn et al. [REINHORN92, S. 2-1 ff.] zur Aktuierung von Aussteifungen (s. Kapitel 3.1). Bei diesem befindet sich die Aktoreinheit zwischen der zu kürzenden Aussteifung („Passive Struktur“) und dem angrenzenden Knotenelement. Ein Beispiel zur Ableitung der Energie in die Umgebung des Gesamttragwerks stellt die Auflageraktuierung der biegebeanspruchten Struktur von Connor [CONNOR03, S. 442 f.] dar (s. Kapitel 3.2).

Das Teilsystem „Aktor“ kann auch außerhalb des Hauptenergieflusses stehen. Wie in Bild 5.2 dargestellt, wird der Hauptenergiefluss über die durch die Aktorausgangsenergie $E_{\text{mech,A}}$ beeinflusste Funktion T1 geleitet. Dabei erfolgt das Vereinigen der Kraftflüsse innerhalb des Wirkraums. Die verknüpfte Energie wird über die Funktion T2 aus dem System geleitet. Die mechanische Verbindung des Teilsystems „Aktor“ mit der Umgebung wird durch die „Reaktionsenergie“ $E_{\text{mech,A}'}$ definiert, die entgegengesetzt zur Aktorausgangsenergie $E_{\text{mech,A}}$ wirkt. Aufgrund der einzelnen Schnittstelle zwischen den Teilsystemen ist die Umsetzung in Differenzialbauweise zweckmäßig.

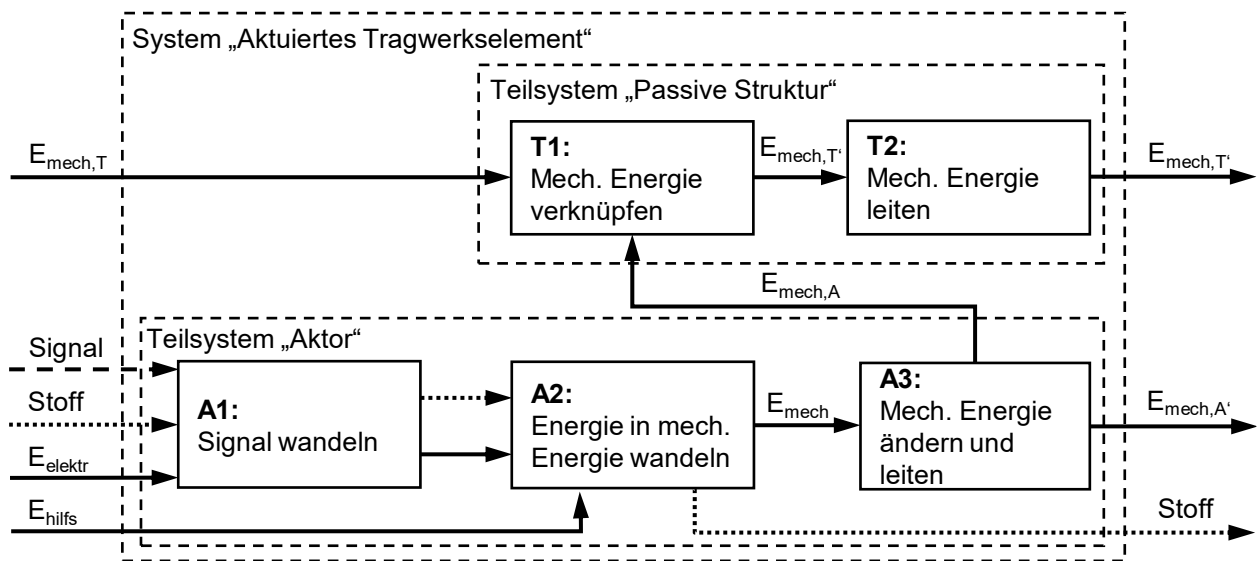


Bild 5.2 Funktionsstruktur mit außerhalb des Hauptenergieflusses positioniertem Aktor

Ein Beispiel für diese Funktionsstruktur stellt der in [DE19745341A1] beschriebene Aufbau dar. Dabei wird das Schwingen einer Struktur (Teilsystem „Passive Struktur“) gedämpft, indem ein weiteres Tragwerkselement über einen Aktor mit dieser temporär verbunden wird, d. h. die Aktorausgangsenergie $E_{\text{mech,A}'}$ wirkt auf ein angrenzendes, ansonsten unbelastetes Bauteil. Das Prinzip ist in Bild 5.3 dargestellt. Wird die Struktur zum Schwingen angeregt und bewegt sich nach rechts, wird das Aussteifungselement kurzzeitig mitbewegt (s. Bild 5.3 b) und dann durch den Aktor entkoppelt. Das Aussteifungselement schwingt schneller zurück als die Struktur. Am Umkehrpunkt seiner Schwingung wird das Aussteifungselement wieder mit der Struktur verbunden, die inzwischen nach links schwingt. Dieses entgegengesetzt gerichtete Schwingen des Elements dämpft die Bewegung der Struktur (s. Bild 5.3 c). Sobald das Aussteifungselement und die Struktur in die gleiche Richtung schwingen, wird das Aussteifungselement entkoppelt und der Vorgang wiederholt sich, bis die Struktur nicht mehr schwingt.

Das System dient ausschließlich der Schwingungsreduktion. Eine aktive Formänderung ist nur durch die Rückkehr in einen stabilen Ausgangszustand möglich.

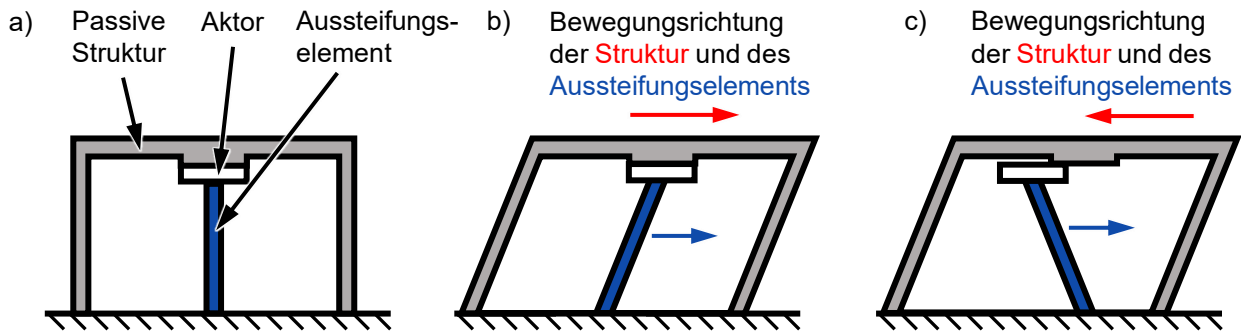


Bild 5.3: Ausgangsstellung (a), Schwingen der passiven Struktur und „Vorspannen“ des Aussteifungselements (b) und entgegengesetztes Schwingen der Struktur und des Aussteifungselements (c) nach [DE19745341A1, Zeichnungen S. 5 ff.]

Eine weitere Aufbaustrategie besteht darin, die Aktorausgangsenergie $E_{\text{mech,A}'}$ auf die „Passive Struktur“ zurückzuleiten. Dies ist in Bild 5.4 dargestellt. Wie hier bereits auf funktionaler Ebene zu sehen ist, wird dabei der Energiefluss innerhalb des Teilsystems „Passive Struktur“ manipuliert ($E_{\text{mech,T}} \rightarrow E_{\text{mech,T1}} \rightarrow E_{\text{mech,T}'}$).

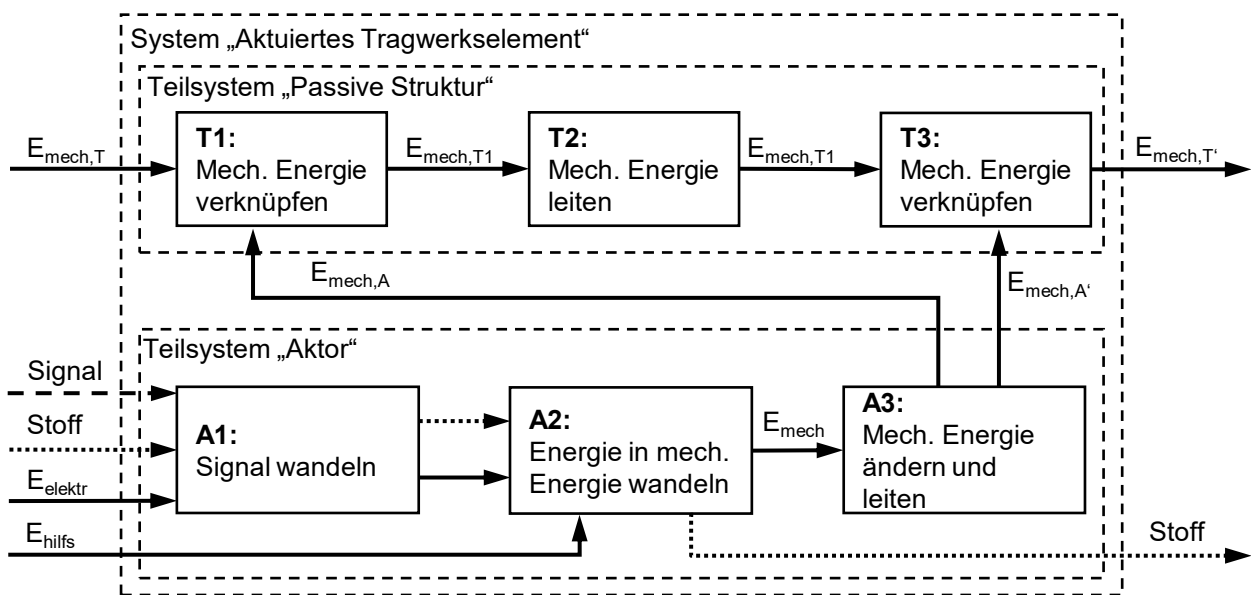


Bild 5.4: Funktionsstruktur mit Rückleitung der Aktorausgangsenergie auf das passive Strukturelement

Dieses Konzept wird auch von Connor [CONNOR03, S. 442 f.] angedacht. Dort werden Aktoren auf der Oberfläche von biegebeanspruchten Bauteilen angebracht, um den Bereich des Tragwerkselements zwischen den Befestigungspunkten zu beeinflussen (s. Bild 3.5). Im Vergleich zu den oben beschriebenen Funktionsstrukturen, besitzt das Teilsystem „Aktor“ mechanische Schnittstellen nur zur „Passiven Struktur“. Daher bietet

sich hier neben der Differenzialbauweise auch die Modulbauweise an (s. Kapitel 2.2), wodurch eine stärkere räumliche Funktionsintegration erreicht wird.

Neben der Variation der Energieflüsse lassen sich die Positionen einzelner Funktionen zur Ermittlung weiterer Aufbaumöglichkeiten ändern. Dies kann in Kombination mit jeder der oben vorgestellten Funktionsstrukturen erfolgen. Am Beispiel der Funktionsstruktur mit einem im Hauptfluss positionierten Aktor (s. Bild 5.1) ist in Bild 5.5 die Teilfunktion A1 als eigenes Teilsystem separiert. Dies ermöglicht die Abgrenzung der ausschließlich „mechanischen“ Teilsysteme „Aktor“ und „Passive Struktur“. Ein Beispiel hierzu stellt der Biegebalken von Schnellenbach-Held und Steiner [SCHNELLENBACH-HELD14] dar (s. Kapitel 3.2), bei dem die zur Ansteuerung der Hydraulikzylinder genutzten Ventile nicht Teil des mechanischen Versuchsaufbaus sind. Diese räumliche Trennung spiegelt sich im Teilsystem „Signalumformer“ wider.

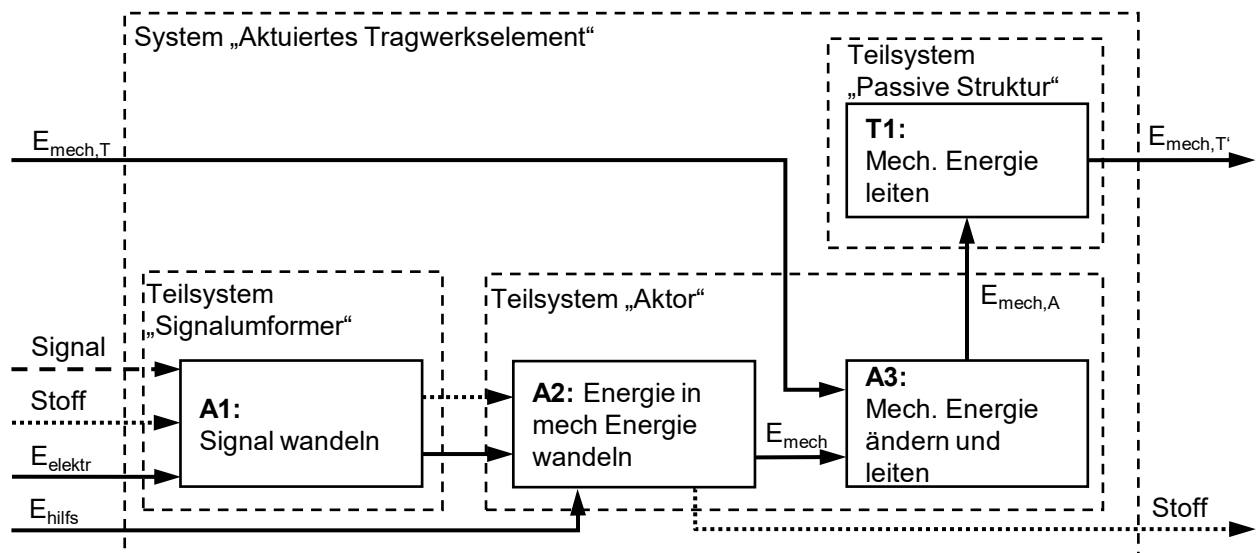


Bild 5.5: Funktionsstruktur mit separiertem Signalumformer

Analog dazu kann zusätzlich die Teilfunktion „Energie wandeln“ separiert werden. Bild 5.6 zeigt die entsprechende Funktionsstruktur mit einem im Hauptfluss positionierten Aktor.

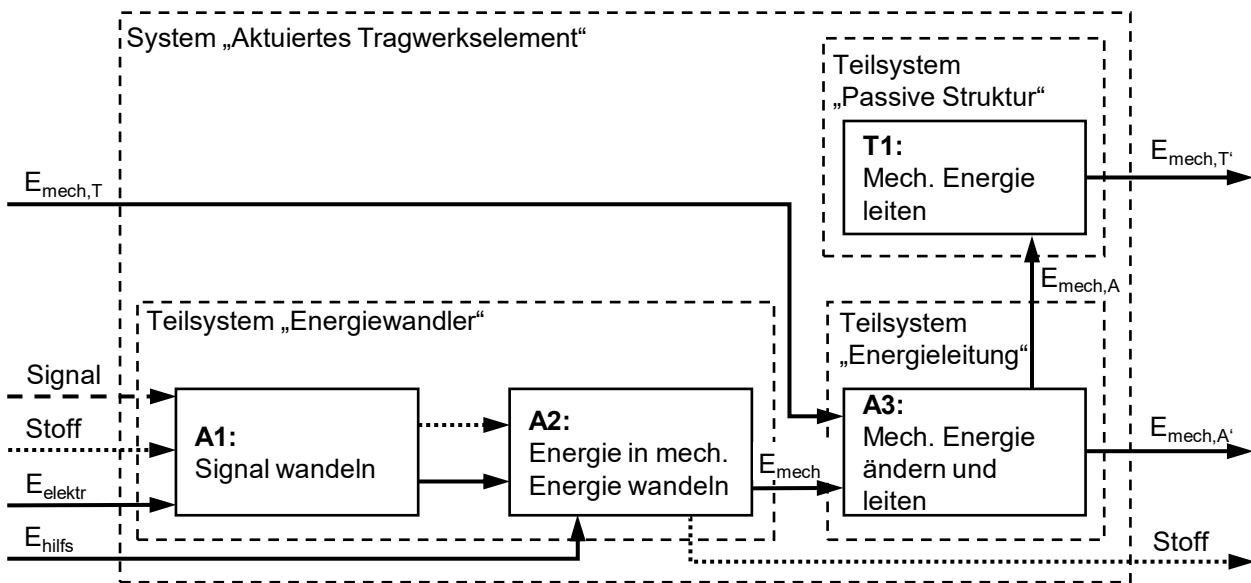


Bild 5.6: Funktionsstruktur mit separiertem Energiewandler

Dieser Aufbau liegt bswp. bei der von Motro [MOTRO03, S. 147 ff.] vorgestellten Tensegrity-Struktur vor, bei der die Kraft erzeugende Einheit räumlich von der Struktur getrennt ist. Die erzeugten Kräfte werden über Seile zu den entsprechenden Angriffspunkten in der Struktur geleitet (s. Kapitel 3.1).

Die vorgestellten Funktionsstrukturen sind allgemein gültig und grundsätzlich auf alle Tragwerkstypen anwendbar. Da ein Tragwerk aus mindestens einem (aktuierbaren) Tragwerkselement besteht, können die vorgestellten Funktionsstrukturen innerhalb des Gesamttragwerk-Systems mehrmals auftreten.

5.2 Lösungsprinzipien zur Aktuierung linearer Tragwerkselemente

Das Ziel der in diesem und in Kapitel 5.3 folgenden Konkretisierung ist es, Wirk- und Lösungsprinzipien zu entwickeln, die die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Funktionen erfüllen. Dazu werden die Teilsysteme der Ausgangsstruktur (s. Bild 5.1) „Passive Struktur“ (Funktion T1 und ggf. T2 und T3) und „Aktor“ (Funktionen A1 bis A3) nacheinander detailliert betrachtet. In diesem Kapitel liegt der Fokus auf dem Teilsystem „Passive Struktur“. Hier werden die Möglichkeiten zur Aktuierung des Tragwerkelements erarbeitet. Vom Teilsystem „Aktor“ wird nur die auf die „Passive Struktur“ wirkende Energie betrachtet.

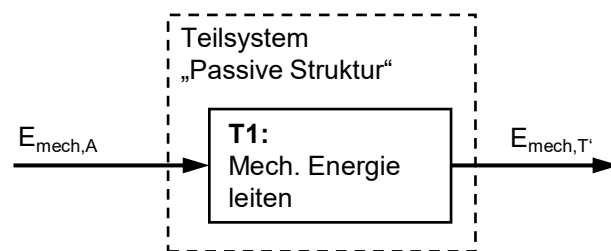
Die Ausgangslage stellt sich wie folgt dar:

- Es wird in diesem Kapitel ein mechanisches System betrachtet.
- Das System beinhaltet ausschließlich Funktionen, die nur Schnittstellen für mechanische (potenzielle und kinetische) Energieströme besitzen.

- Ein linearer, elastisch-plastischer Festkörper stellt den Wirkraum dar.
- Der lineare Festkörper ist hinsichtlich der maßgebenden Beanspruchungen (Normalkraft- und Biegebeanspruchung (s. Kapitel 2.1)) zu beeinflussen.

Zur weiteren Konkretisierung ist es zweckmäßig, die allgemeine Funktionsstruktur in eine geometrische Funktionsstruktur zu überführen. Geometrische Funktionsstrukturen werden verwendet, um den Ort der Funktionserfüllung (Wirkraum) unter Zuweisung von Eigenschaften, wie z. B. der Masse, Steifigkeit und Dämpfung, zu beschreiben. Anhand sogenannter Struktur-Funktions-Elemente werden der Wirkraum und die Schnittstellen in einer abstrakten, schematischen Form dargestellt. Die Struktur-Funktions-Elemente stellen somit eine erste Konkretisierung der Topologie einer physischen Struktur dar. Die den Wirkraum beeinflussenden Funktionsgrößen, z. B. Kräfte F_{mech} und Geschwindigkeiten v_{mech} , werden mittels Vektoren dargestellt. [ROTH00, S. 336 ff.] In Bild 5.7 Mitte ist beispielhaft ein Struktur-Funktions-Element zum Leiten einer mechanischen Energie in Elementrichtung gegeben.

Allgemeine Funktionsstruktur:



Geometrische Funktionsstruktur:



Konkretisiertes Aktuierungskonzept:



- Beeinflussung durch das Teilsystem „Aktor“
- Verformungsrichtung der „Passiven Struktur“

Bild 5.7: Beschreibung des Leitens einer mechanischen Energie in Elementrichtung in Form einer allgemeinen (oben) und einer geometrischen Funktionsstruktur [Roth00, S. 338] (Mitte) sowie die in dieser Arbeit konkretisierten Darstellung (unten)

Mittels geometrischer Funktionsstrukturen werden die Aktuierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Wahl der Aktuierung ermöglicht eine gezielte Entwicklung von geeigneten Aktoren.

Zur Erzeugung von verschiedenen prinzipiellen Lösungen werden die Eigenschaften der Energieströme (Kraft oder Moment) sowie der räumlichen Beziehung der Ein- und Ausgangsenergie (koaxial, parallel, senkrecht, windschief) variiert [ROTH00, S. 336 ff.]. Eine Sammlung von Struktur-Funktions-Elementen für die Grundfunktionen „Speichern“, „Ändern“ und „Leiten“ ist in [ROTH00, S. 340 f.] gegeben. Ebenfalls sind dort die möglichen Operationen aufgeführt, wie bspw. das Verbinden und Zusammenlegen der Struktur-Funktions-Elemente.

In Anlehnung an die von Roth [ROTH00, S. 340 f.] identifizierten Möglichkeiten zum Leiten einer Kraft werden die Aktuierungskonzepte in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Über die mechanischen Schnittstellen zur Umgebung, bspw. zu anderen Elementen innerhalb eines Tragwerks, erfolgt die Hauptbelastung der „Passiven Struktur“. Um den Einfluss der Aktuierung hervorzuheben, wird die durch das Tragwerk geleitete Energie ($E_{\text{mech},T}$ und $E_{\text{mech},T'}$ (s. Kapitel 5.2)) nicht dargestellt. Stattdessen wird die durch das Teilsystem „Aktor“ verursachte Verformung des Wirkraums abgebildet.² Die Freiheitsgrad-einschränkungen durch die Umgebung werden als Auflager piktografisch dargestellt (s. Bild 5.7 unten). Weiterhin werden die Wirkräume der Funktionen T1 bis T3 (s. Bild 5.4) gemäß den Operationen nach Roth [ROTH00, S. 345] zu einem Körper zusammengefügt. Die Sammlung ist anhand der Position des Teilsystems „Aktor“ in Bezug auf die „Passive Struktur“ sowie der räumlichen Beziehung zwischen der Wirkrichtung des Aktors und der verursachten Verformung gegliedert.

Da mit einer Aktuierung teilweise mehrere Verformungsrichtungen des Wirkraums erzeugt werden, sind manche Aktuierungsprinzipien mehrfach aufgeführt. So wird beispielsweise beim Prinzip 2.2b durch die Aktuierung eine Rotation um die Auflager erzeugt. Die Rotationsachse steht parallel zur Achse, um die das Aktuierungsmoment wirkt. Durch die Biegung des Wirkraums wird dieser in Längsrichtung kürzer und verformt sich senkrecht zur Längsachse. Beide Verformungsrichtungen stehen senkrecht zur Momentenachse. Daher ist dieses Prinzip ebenfalls in Zelle 2.3b dargestellt. Gleiches gilt für das Prinzip 3.2b und 3.3c.

2 Korrekterweise wird hierdurch die Funktion „Energie leiten“ in die Funktion „Potenzielle Energie speichern“ geändert. Allerdings ist mit der hier gewählten Darstellung der Einfluss der Aktuierung direkt ersichtlich und erleichtert den Zugang zu den Aktuierungsprinzipien.

Position des Aktors	Räumliche Beziehung zwischen der Wirkrichtung des Aktors und der Verformungsrichtung des Wirkraums			
	koaxial	parallel	senkrecht	windschief
Wirkflächen zur Umgebung und zum Teilsystem „Passive Struktur“	1.1 	1.2a 	1.3a 	1.4
	2.1 X	2.2a 	2.3a 	2.4 X
Wirkflächen zum Teilsystem „Passive Struktur“	3.1 / 3.2a 	3.2b 	3.3a 	3.4 X
	3.1 / 3.2a	3.2b 	3.3b 	3.3c

Beanspruchungsrichtung durch das Teilsystem „Aktor“ auf den Wirkraum
 Verformungsrichtung des Wirkraums

Tabelle 5.1: Aktuierungsprinzipien für lineare Tragwerkselemente in Anlehnung an [ROTH00, S. 337 ff.]

Neben der Materialelastizität und Bauteilsteifigkeit kann auch die Querkompression des zu verwendenden Werkstoffs zur Aktuierung ausgenutzt werden. In den Prinzipien 2.3a und 3.3b wird der Wirkraum durch die durch das Teilsystem „Aktor“ verursachte Beanspruchung zusammengepresst. Die Materialausdehnung erfolgt durch die Querkompression senkrecht zur Beanspruchungsrichtung.

Tabelle 5.2 zeigt die Zuordnung der Aktuierungskonzepte aus dem Stand der Forschung und Technik (s. Kapitel 3). Besonders häufig wurde das Konzept umgesetzt, bei dem sich der Aktor zwischen Umgebung und Tragwerkselement befindet und die erzeugte Kraft koaxial auf das Tragwerkselement wirkt (Zelle 1.1). Dagegen sind zu anderen Aktuierungskonzepten keine Publikationen bekannt. Die erstmalige Umsetzung der Konzepte aus Zelle 3.1/3.2a und 3.2b/3.3c erfolgt im Rahmen dieser Arbeit (s. Kapitel 7 bzw. 8 und 9).

Durch die Aktuierung, d. h. Beaufschlagung mit einer Kraft, wird das passive Tragwerkselement verformt. Nach Koller [KOLLER94, S. 53 ff.] beruht der Zusammenhang von Krafteinwirkung und erzeugter Verformung (Effekt) auf der elastischen oder plastischen Verformung sowie der Querkompression. Durch die Eingrenzung auf lineare Tragwerkselemente (s. Kapitel 4.1) wurde der Effektträger bereits bestimmt. Mit der Vorgabe des Effekts und des Effektträgers, ist auch das Lösungs-/Wirkprinzip der Festkörperleitung definiert. Mit diesem Wirkprinzip werden die beiden Funktionen der Energieleitung und der Energieverknüpfung des Teilsystems „Passive Struktur“ erfüllt.

Position des Aktors	Räumliche Beziehung zwischen der Wirkrichtung des Aktors und der Verformungsrichtung des Wirkraums					
	koaxial	parallel	senkrecht	1.3b	windschief	
Wirklflächen zur Umgebung und zum Teilsystem „Passive Struktur“	1.1 [DOMKE81] [ABDEL-ROHMAN83] [REINHORN92] [BANI-HANI99] [KORVINK00] [BOSENS01] [SOBEK01] [SHEA02] [CONNOR03] [MOTRO03] [FEST04] [BINZ16] [SENATORE18] [WAGNER20] [REKSOWAR-DOJO22]	1.2a X	1.2b [CONNOR03] [SOBEK06]	1.3a [CONNOR03] [DOMKE08]	1.3c [CONNOR03] [SOBEK06]	1.4 X
	Außerhalb des Wirkraums	2.2a [CONNOR03] [BLEICHER12]	2.2b [SCHNELLEN BACH-HELD14]	2.3a X	2.3b [SCHNELLEN BACH-HELD14]	
Wirklflächen zum Teilsystem „Passive Struktur“	3.1 / 3.2a X	3.2b X	3.3a [STEFFEN21]	3.3b [STEFFEN21]	3.3c X	

Tabelle 5.2: Zuordnung der Aktuierungsprinzipien aus dem Stand der Forschung und Technik

5.3 Lösungsprinzipien für Aktoren

Wie in den Kapiteln 2.4 und 5.1 erläutert, besteht ein Aktor aus den Hauptkomponenten Signalumformer, Energiewandler und Stellübertrager, die die Funktionen „Signal umformen“, „Energie wandeln“ und „Energie ändern und leiten“ erfüllen. Die Ansteuerung eines Aktors erfolgt über ein energiearmes, elektrisches Signal [ISERMANN08, S. 442]. Die Funktion „Signal umformen“ sorgt dafür, dass das Signal in eine zur Energiewandlung nutzbare Form überführt wird, z. B. in eine getaktete Spannung. Dies bedeutet, dass das Lösungsprinzip zum Wandeln von Signalen immer vom Energiewandler vorgegeben wird. Der Raum für Kombinationsmöglichkeiten von Lösungsprinzipien für beide Hauptfunktionen ist somit stark eingeschränkt. Zwar ist die Funktion des Signalumformers innerhalb des Aktorsystems erforderlich, zur Konzeption des mechanischen Systems, die in dieser Arbeit erfolgt (s. Kapitel 4.1), jedoch von untergeordneter Bedeutung. Daher wird hier nicht näher auf die Funktion „Signal umformen“ eingegangen. Somit werden im Folgenden Lösungsprinzipien für Energiewandler und Stellübertrager aufgezeigt.

5.3.1 Lösungsprinzipien für Energiewandler

Der Energiewandler hat zur Aufgabe eine nicht-mechanische Hilfsenergie in eine mechanische Ausgangsenergie zu überführen. Hierzu nutzbare Wirkprinzipien wurden in Kapitel 5.2 vorgestellt. Die Konkretisierung dieser Wirkprinzipien führt zu Lösungsprinzipien. Eine Auflistung von Lösungsprinzipien zur Erzeugung von Kräften und Momenten ist in Tabelle 5.3 gegeben. Dabei sind nur solche aufgeführt, die für die Aktuierung von Tragwerkselementen nutzbar sind. So werden bspw. irreversible Aktorprinzipien ausgeschlossen. In einigen Fällen sind nur die bereits aus Kapitel 2.4.2 bekannten Wirkprinzipien dargestellt, z. B. bei den elektro- und magnetorheologischen Wirkprinzipien. Ohne weitere bekannte Anforderungen, wie bspw. der nutzbare Bauraum und die zu erzeugende Kraft, würde deren Konkretisierung zu Lösungsprinzipien die Anzahl an möglichen Varianten den Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

Viele der in Tabelle 5.3 aufgeführten Prinzipien beinhalten mehrere Energiewandler. So wird z. B. bei einem thermischen Dehnstoffaktor zuerst Wärme erzeugt, die anschließend in die Bewegung eines Körpers überführt wird.

Schematische Darstellung des Lösungsprinzips und Anwendungsbeispiel bzw. Bauform							
Lösungsprinzip für...	Beschreibende Eigenschaft	Einfachwirkender Zylinder	Differentialzylinder	Gleichlaufzylinder	Einfachwirkender Teleskop-/Mehrfachzylinder	Teleskopzylinder	
... fluid-mechanische Aktoren	Verdrängungsprinzip, translatorische Bewegung	Membranzylinder	Fluidischer Muskel				
		Schrägscheibenmotor	Radialkolbenmotor	Rollflügelmotor	Flügelzellenmotor	Sperrschiebermotor	
		Zahnringmotor	Zahnradmotor	Schraubmotor			
	Strömungsprinzip, rotatorische Bewegung	Kreiselturbine					
		Schrittmotor	Einphasen-Synchronmotor	Drehstrommotor			
		Gleichstrommotor	Reihenschlussmotor	Einphasen-Asynchronmotor			
... elektro-dynamische Aktoren	lastunabhängige Drehbewegung						
	lastabhängige Drehbewegung						

Tabelle 5.3: Lösungsprinzipien für Energiewandler (Quelle: s. Tabelle A.2)

Lösungsprinzip für...	Beschreibende Eigenschaft	Schematische Darstellung des Lösungsprinzips und Anwendungsbeispiel					
	E-förmiger Magnetkörper, translatorische Bewegung						
	U-förmiger Magnetkörper, translatorische Bewegung						
... elektro-magnetische Aktoren	Topfform, translatorische Bewegung						
	E-förmiger Magnetkörper, rotatorische Bewegung						
	U-förmiger Magnetkörper, rotatorische Bewegung						
	Topfform, rotatorische Bewegung						
... magneto- und elektro-rheologische Aktoren	Schermodus						
	Fließmodus						
	Quetschmodus						

Tabelle 5.3: Lösungsprinzipien für Energiewandler (Quelle: s. Tabelle A.2) (Fortsetzung)

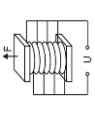
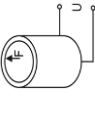
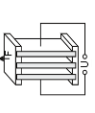
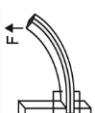
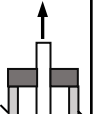
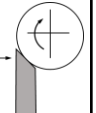

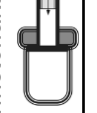
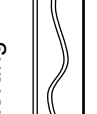
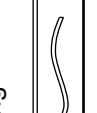
Schematische Darstellung des Lösungsprinzips und Anwendungsbeispiel bzw. Bauform			
Lösungsprinzip für...	Beschreibende Eigenschaft	Stapelaktor 	Rohraktor 
	... piezo-elektrische Aktoren	Streifenaktor 	Biegeaktor 
... thermische Aktoren	begrenzte Auslenkung	Wurmantrieb 	Ultraschallmotor 
	unbegrenzte Auslenkung	Thermobimetall 	Thermischer Dehnstoffaktor 
		Schreittrieb 	
		Formgedächtnislegierung 	

Tabelle 5.3: Lösungsprinzipien für Energiewandler (Quelle: s. Tabelle A.2) (Fortsetzung)

5.3.2 Lösungsprinzipien für Stellübertrager

Der Stellübertrager leitet die vom Energiewandler erzeugte mechanische Energie zu der Stelle, an der der Prozess stattfindet. Dabei wird die Energie in eine für den anschließenden Prozess nutzbare Größe geändert. Analog zum Teilsystem „Passive Struktur“ ist auch hier der Effekt der Teilfunktion „Energie leiten“ von der elastischen und plastischen Verformung sowie des Querkompressionsverhaltens des Effekträgers abhängig (s. Kapitel 5.2). Die Teilfunktion der Energieänderung beinhaltet zwangsläufig die Leitung von Energie. Daher werden hier beide Teilfunktionen gemeinsam betrachtet. Bei der Findung von Lösungsprinzipien wurden diskursive, intuitive und recherchierende Methoden angewendet. Hierzu wurde u. a. auf die Konstruktionskataloge in [SCHNEIDER87] und [ROTH01] zugegriffen. Weiterhin fließen die Teillösungen aus den in Kapitel 3 vorgestellten Beispielen in die Sammlung mit ein. Die als zweckmäßig erachteten Lösungen sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Eine Kombination dieser Lösungsprinzipien ist möglich, z. B. zur mehrstufigen Kraftmultiplikation (s. [ROTH01, S. 97]). Eine bewertete Auswahl von Lösungsprinzipien kann aufgrund der allgemeinen Betrachtung bzw. aufgrund fehlender Anforderungen an einen möglichen Anwendungsfall an dieser Stelle nicht erfolgen. Diese ist stets anwendungsspezifisch zu treffen.

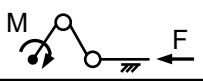
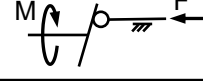

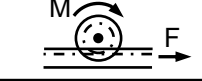
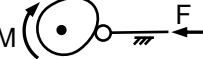
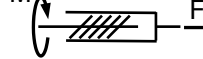
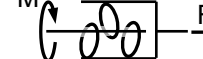


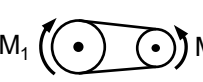
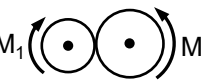
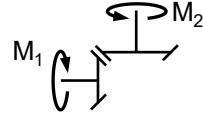
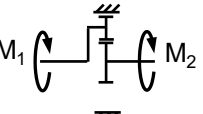
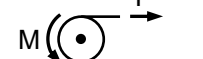


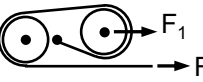
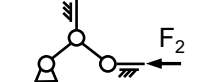
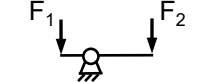
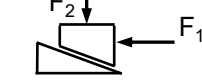
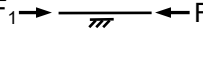
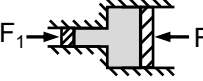
Art der Energie- änderung und -leitung	Lösungsprinzipien			
Rotation in Translation	1.1 Schubkurbel 	1.2 Taumel- scheibengetriebe 	1.3 Seilzug 	1.4 Ritzel- Zahnstange 
	1.5 Kurven- getriebe 	1.6 (Kugel-) Gewindetrieb 	1.7 Rollringgetriebe 	1.7 Kombination —
Rotation in Rotation	2.1 Schnecken- radgetriebe 	2.2 Stirnrad- getriebe 	2.3 Hülltrieb 	2.4 Reibrad- getriebe 
	2.5 Kegelrad- getriebe 	2.6 Umlaufgetriebe 	2.7 Nur Änderung der Drehrichtung (2.2 bis 2.5 ohne Übersetzung)	2.8 Kombination —
Translation in Rotation	3.1 Seilzug 	3.2 Ritzel- Zahnstange 	3.3 Kurbelgetriebe 	3.4 Kombination —
Translation in Translation	4.1 Flaschenzug 	4.2 Kniehebel 	4.3 Hebel 	4.5 Keil 
	4.5 Leitung durch Festkörper 	4.6 Hydraulische Druckübersetzung 	4.7 Kombination —	

Tabelle 5.4: Lösungsprinzipien für Stellübertrager

5.4 Zwischenfazit

Mit den in diesem Kapitel aufgezeigten Lösungsprinzipien lassen sich aktuierbare, lineare Tragwerkselemente konzipieren. Basierend auf einer zuvor erfolgten Aufgabendefinition und Anforderungsermittlung, wird mittels der geometrischen Funktionsstrukturen aus Kapitel 5.2 die Art der Aktuierung festgelegt. Eine Vorauswahl der Aktuierungskonzepte zur Eingrenzung des Lösungsraums ist zweckmäßig. Die Randbedingungen gehen aus der Beantwortung folgender Leitfragen hervor:

- Wie ist das zu aktuierende Tragwerkselement in die Umgebung eingebunden (Befestigung/Lagerung des Elements)?
- Welcher durch äußere Einflüsse verursachten Beanspruchung ist entgegenzuwirken?
- Ist die Aktuierung des Tragwerkselements als Ganzes ausreichend oder sind lokale Bereiche zu beeinflussen, z. B. zur Vermeidung von Spannungsspitzen?
- Kann das Teilsystem „Aktor“ mechanische Anbindungspunkte zur Umgebung haben?

Ebenso ist bei der Betrachtung der Hauptfunktionen des Teilsystems „Aktor“ (s. Kapitel 5.3) zu verfahren. Lösungsprinzipien, die im Widerspruch mit den zuvor definierten Anforderungen stehen, z. B. eine nicht reversible Aktuierung, sind auszuschließen. Durch einen Vergleich mit Datenbanken und/oder Konstruktionskatalogen (s. Kapitel 2.4.3) können Lösungsprinzipien mit höherer Realisierungschance Vorrang erhalten. Die Kombination mit den vorausgewählten Aktuierungsmöglichkeiten führt zu einem breiten Spektrum an ersten Grobkonzepten. Die Wahl des weiter zu detailierenden Konzepts ist fallspezifisch anhand der Anforderungen an das Gesamtsystem zu treffen.

Das hier beschriebene Vorgehen bei der Konzeption ist Bestandteil einer übergeordneten Entwicklungsmethode. Anhand der in den folgenden Kapiteln vorgestellten Entwicklungsprojekte wird beispielhaft die Anwendbarkeit gezeigt.

6 Aktuierung eines Aussteifungselements

Um das Potential adaptiver Strukturen und Fassaden zu zeigen, wird an der Universität Stuttgart innerhalb des SFB 1244 ein Demonstrator-Hochhaus gebaut. Dieses Projekt wird in Kapitel 6.1 vorgestellt. Ein Teil dieses Projekts besteht in der Entwicklung eines aktuierbaren Aussteifungselements. Hierfür wird zunächst die Anforderungsdefinition vorgestellt (s. Kapitel 6.2), auf die die Konzeption (s. Kapitel 6.3) und der Entwurf (s. Kapitel 6.4) folgen.

6.1 Vorstellung des Demonstrator-Hochhauses

Die Inhalte dieses Kapitels sind Teil der Arbeit der Mitarbeiter*innen des Instituts für Systemdynamik (ISYS) und des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) an der Universität Stuttgart sowie der Werner Sobek AG. Hier wird die Ausgangssituation für die nachfolgende Entwicklung eines aktuierbaren Aussteifungselements (Kapitel 6.2 bis 6.4) und einer Stütze (Kapitel 7) aufgezeigt.

Das Gebäude ist ein 36,5 m hoher, 12-stöckiger Turm mit einer Grundfläche von ca. 5 m x 5 m [WEIDNER18, S. 110]. Die zu Beginn angebrachte temporäre Fassade wird im Laufe der Forschungstätigkeit des SFB 1244 durch neu entwickelte, adaptive Fassadenelemente ersetzt. Hier wird u. a. die Anpassung der Raumtemperatur, der Luftfeuchtigkeit und des Lichteinfalls untersucht [BLANDINI22, S. 4].

Eine Stahlkonstruktion dient als Tragwerk. Dieses besteht aus Stützen, die auf Stockwerkshöhe durch Träger miteinander verbunden sind. Als Stützen dienen Hohlprofile. Über diagonal zwischen den Stützen verlaufende Windverbände wird das Tragwerk versteift. Die Aussteifungen bestehen aus kettenartig, mit Bolzen verbundenen Flachstählen. Diese sind leicht vorzuspannen, um das Spiel in den Verbindungen auszugleichen. Die Stützen und Aussteifungen reichen über jeweils drei Stockwerke. Diese Stockwerke werden zu einem Modul zusammengefasst (s. Bild 6.1 links). An den Stellen, an denen Stützen, Aussteifungen und Träger zusammenlaufen, befindet sich das Knotenelement. Durch die Integration von aktiven Tragwerkselementen wird das Verformungsverhalten des Gebäudes beeinflusst. Sowohl das aktive Herbeiführen einer Verformung wie auch die Kompensation der durch äußere Einflüsse hervorgerufenen Verformung wird ermöglicht.

Das Demonstrator-Hochhaus wird über den benachbarten Treppenturm erschlossen. Um die Aktuierung des Tragwerks nicht zu beeinflussen, ist das Hochhaus vom Treppenturm

entkoppelt. Die Stockwerke werden über herunterklappbare Stege betreten. Über den Treppenturm gelangen alle Strom-, Signal- und Hydraulikleitungen in das Hochhaus. Das Demonstrator-Hochhaus und der Treppenturm sind auf der rechten Seite in Bild 6.1 dargestellt.

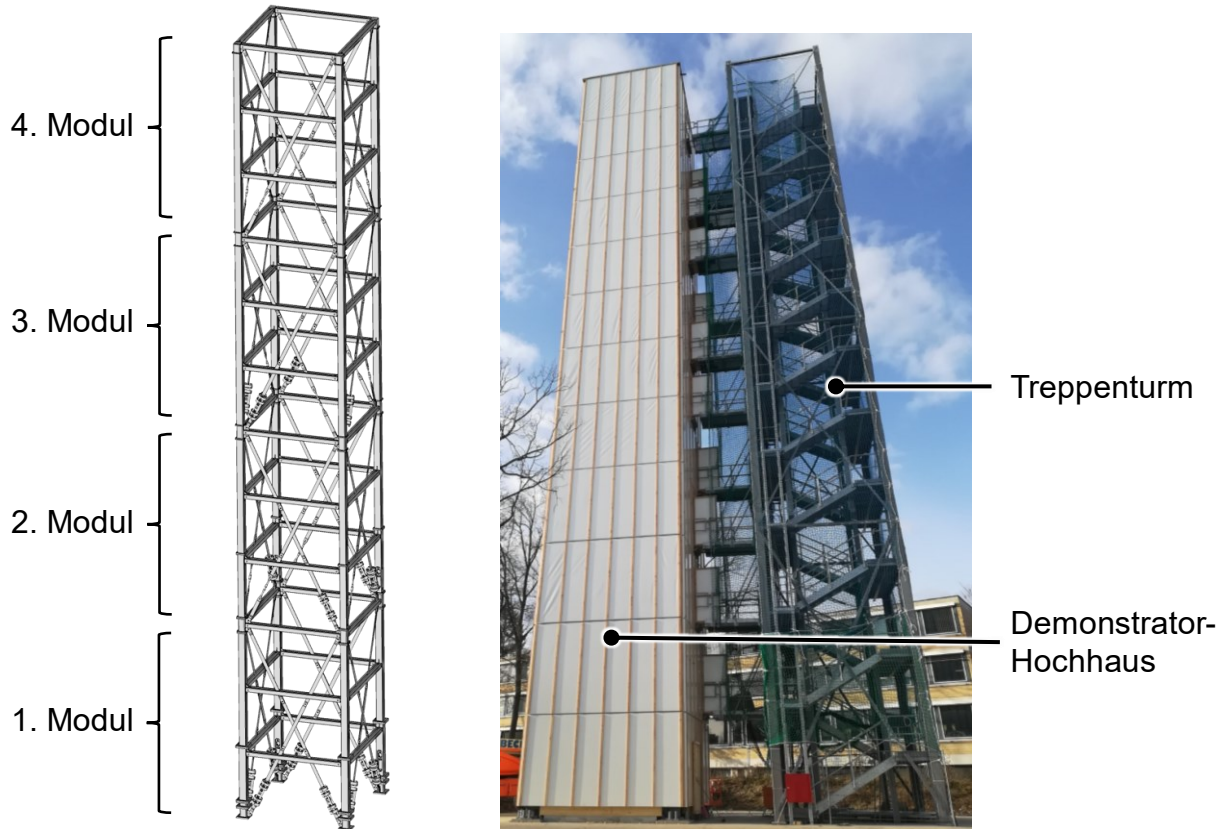


Bild 6.1: Tragwerk (links) und Demonstrator-Hochhaus mit temporärer Fassade und Treppenturm (rechts) nach [BURGHARDT23, S. 69]

Um die optimale Position und Anzahl an Aktoren zu bestimmen, wird das statische und dynamische Verhalten des Tragwerks mittels der Finiten-Elemente-Methode (FEM) untersucht. Dazu wird der oben beschriebene Tragwerksaufbau mit Stab- und Balkenelementen modelliert. Das Finden der optimalen Aktorplatzierung erfolgt mit einem Greedy-Verfahren. Bei diesem Optimierungsverfahren wird in jedem Schritt immer das modellierte Tragwerkselement gegen ein Aktorelement ausgetauscht, mit dem ein definiertes Gütekriterium am besten erfüllt wird. Als Gütekriterium dienen Kostenfunktionen auf Basis skalarer Maße von Gramschen Matrizen. Damit wird z. B. die Auslastung einzelner Tragwerkselemente [BÖHM19] oder die Größe des Effekts einer Aktuierung [WAGNER18] beschrieben. Die Betrachtung von Zustandsänderungen aufgrund von statischen (stationären) und dynamischen Lasten erfolgt zunächst getrennt. Die Bewertung der Kompensation von dynamischen Lasten erfolgt nach Heidingsfeld et

al. [HEIDINGSFELD17] durch die Maximierung der Spur der Gramschen Steuerbarkeitsmatrix. Zur Bewertung der statischen Lastkompensation wird ein skalares Maß aus der stationären Störgrößenkompensierbarkeitsmatrix verwendet. Die zu verwendende Anzahl an Aktoren ist erreicht, wenn die Gütefunktion nicht mehr steigt oder die erreichbare Steigerung nur noch mit einer unverhältnismäßig größeren Anzahl an Aktoren einhergeht [WAGNER18]. Durch die Überlagerung der Ergebnisse aus der Aktorplatzierung zur Kompensation statischer und dynamischer Lasten sowie durch Berücksichtigung von Symmetrieeigenschaften der Gebäudestruktur wird die Gesamtanzahl an Aktorelementen und deren Positionen festgelegt [WEIDNER18, S. 112 f.]. Das Ergebnis der optimierten Aktorplatzierung für das Demonstrator-Hochhaus ist in Bild 6.2 dargestellt.

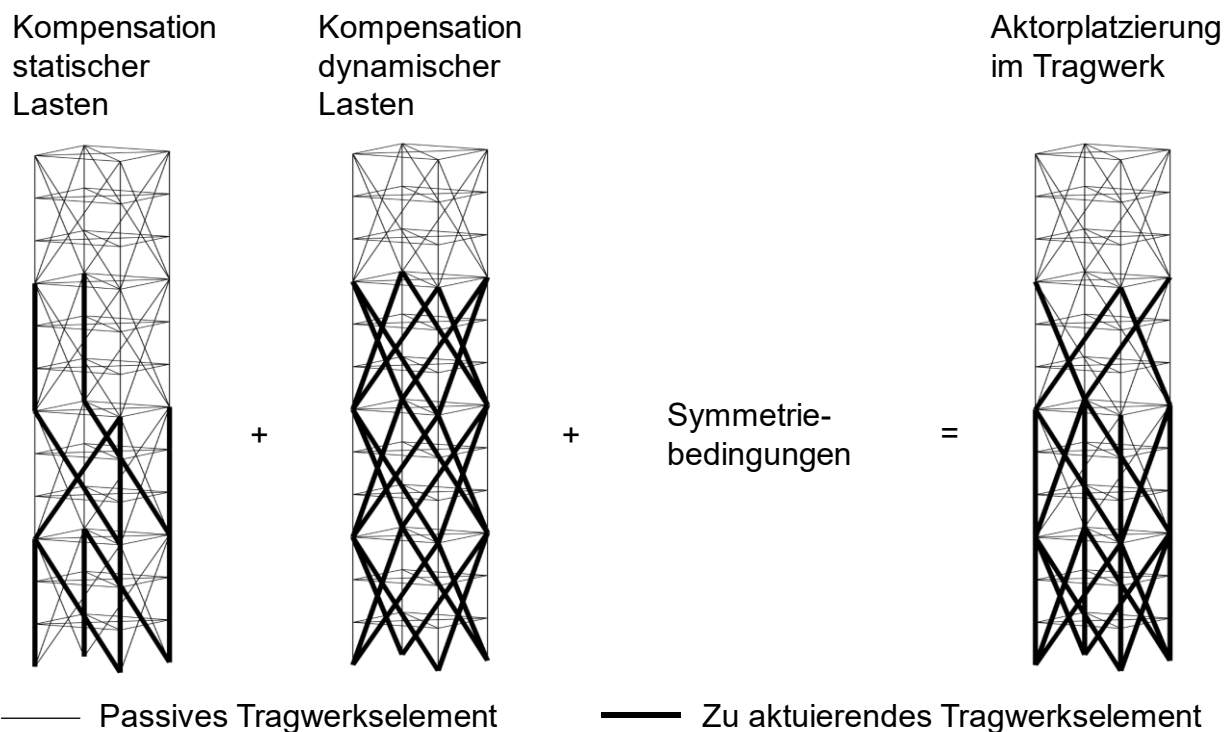


Bild 6.2: Ergebnis der Aktorplatzierung für das Demonstrator-Hochhaus nach [BURGHARDT21, S. 67]

Insgesamt sind 16 Aussteifungselemente und acht Stützen zu aktieren [WEIDNER18, S. 112]. Zur Kompensation von dynamischen Lasten (Schwingungsdämpfung) werden nur Aussteifungselemente aktiert. Gemäß dem Optimierungsalgorithmus sind diese hierfür besser geeignet. Insgesamt sind mehr Elemente in Bodennähe zu aktieren, da dort der Einfluss einer Aktuierung auf die Gesamtverformung am größten ist. Durch die Auswertung der Simulationsergebnisse werden die Leistungsanforderungen an die Aktoren ermittelt. [BURGHARDT21, S. 66 ff.]

6.2 Planen und Klären der Aufgabe

In diesem Teil der Arbeit ist ein aktuierbares Aussteifungselement zu entwickeln, mit dem die Gebäudeschwingungen gedämpft und die Steifigkeit des Tragwerks erhöht wird. Die passiven Aussteifungen im Demonstrator-Hochhaus wurden durch die Tragwerksplanung festgelegt und setzen sich aus jeweils drei Elementen zusammen, die aus Flachstählen gefertigt sind. Die einzelnen Elemente sind durch Bolzen miteinander verbunden. Das unterste Element ist jeweils durch das aktuierbare Aussteifungselement zu ersetzen.

Mittels der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen FE-Simulationen werden die zur Aktuierung benötigten Stellkräfte und -wege ermittelt. Ebenso wird die Stellgeschwindigkeit bestimmt, die besonders bei der Dämpfung der Gebäudeschwingung eine Rolle spielt. Weitere Anforderungen ergeben sich aus der Architektur, wie bspw. der zulässige Bauraum, und den zur Verfügung stehenden Fertigungsmöglichkeiten. Die Anforderungsliste an die aktuierbare Aussteifung ist in Tabelle 6.1 gegeben und ist auszugsweise in [BURGHARDT21, S. 68] veröffentlicht.

F W	Nr.	Anforderungen Forderung (F), Wunsch (W)	Quantifizierung
	1	Geometrie	
F	1.1	Nutzbare Bauraumbreite b zwischen Fassade und Innenraum	$b = 400 \text{ mm}$
F	1.2	Anzahl der Aktoreinheiten je Aussteifung n	$n = 1$
F	1.3	Aktoreinheit befindet sich innerhalb eines Geschosses.	
F	1.4	Befestigung des adapt. Aussteifungselements mittels Bolzenverbindungen am Knotenelement und am angrenzenden Aussteifungselement	
F	1.5	Querschnitt des angrenzenden Aussteifungselements	$120 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$
W	1.6	Integration der Aktoreinheit in den für Tragwerkselemente (Aussteifung, Stütze, Träger) vorgesehenen Bauraum	
	2	Kinematik	
F	2.1	Lineare Zugsbewegung in Richtung der Aussteifung	
F	2.2	Max. Stellweg s_{max}	$s_{\text{max}} = 14 \text{ mm}$
	3	Kräfte	
F	3.1	Stufenlose Zugkraftherzeugung (Rückstellung erfolgt passiv) <ul style="list-style-type: none"> • Nahezu sofortiges Anliegen der Maximalkraft F_{max} erforderlich (keine „Anfahrkraft“) • Max. zu erzeugende Zugkraft F_{max} • Max. Aktuierungsfrequenz f_{max} 	$F_{\text{max}} = 400 \text{ kN}$ $f_{\text{max}} = 8 \text{ Hz}$
F	3.2	Max. zu übertragende Kraft (im passiven Zustand) F_{pass}	$F_{\text{pass}} = 780 \text{ kN}$

Tabelle 6.1: Anforderungen an den Aktor zur Aktuierung des Aussteifungselement

F	3.3	Vorspannung der Aussteifung <ul style="list-style-type: none"> • Stufenlos manuell einstellbar • Kein Energiebedarf beim Halten der Vorspannung notwendig • Max. Vorspannkraft F_{vor} 	$F_{\text{vor}} = 5 \text{ kN}$
W	3.4	Max. Masse des zu aktuierenden Aussteifungselements m_{max} (entspricht der Masse eines passiven Aussteifungselements)	$m_{\text{max}} = 100 \text{ kg}$
	4	Energie	
F	4.1	Leistung des zur Verfügung stehenden Stromanschlusses P_{elektr}	$P_{\text{elektr}} = 15 \text{ kW}$
	5	Signal	
F	5.1	Messung des Stellwegs mit einem Wegaufnehmer	
F	5.2	Sensorelemente sind lösbar mit der adapt. Aussteifung zu verbinden.	
F	5.3	Die Aktoreinheit wird über eine Schnittstelle für digitale oder analoge Signale gesteuert.	
	6	Sicherheit	
F	6.1	Das Lösen von Verbindungen kraftübertragender Bauteile ist konstruktiv zu verhindern.	
W	6.2	Ein Klemm-/Eingriffsschutz wird nicht benötigt, da im Betriebsfall die Zugänglichkeit der Räumlichkeiten bautechnisch nicht möglich ist.	
	7	Ergonomie	
F	7.1	Die Zugänglichkeit der Befestigungspunkte und der Anschlüsse ist sicherzustellen.	
F	7.2	Zulässiger Zeitbedarf t_{vor} zum Einstellen der Vorspannung	$t_{\text{vor}} = 10 \text{ min}$
W	7.3	Das Design soll dem industriellen Experimentalcharakter des Demonstrator-Hochhauses entsprechen.	
	8	Fertigung	
F	8.1	Anzahl n_{ges} der zu fertigenden aktuierenden Aussteifungen	$n_{\text{ges}} = 16$
W	8.2	Fertigungsteile <ul style="list-style-type: none"> • Herstellung an der Universität Stuttgart • Spanende Bearbeitung bevorzugt 	
	9	Kontrolle	
F	9.1	Lösbare Verbindungen, die im passiven Zustand am Lastabtrag des Gebäudes beteiligt sind, sind mit Sicherungslack zu versehen.	
F	9.2	Die Festigkeitsnachweise der kraftübertragenden Bauteile und Verbindungen müssen die Anforderungen der Baustatik erfüllen. Anwendbare Normen werden durch einen externen Prüfstatiker definiert, dem auch die Festigkeitsnachweise vorzulegen sind.	
	10	Montage	
W	10.1	Vormontage und Lagerung in witterungsgeschütztem Bereich	
F	10.2	Endmontage auf der Baustelle des Demonstrator-Hochhauses	
F	10.3	Die Montageanleitung ist zu erstellen.	
F	10.4	Montage- und Transporthilfen sind vorzusehen, z. B. Befestigungsösen.	

Tabelle 6.1: Anforderungen an den Aktor zur Aktuierung des Aussteifungselement (Fortsetzung)

	11	Gebrauch	
F	11.1	Einsatzort im witterungsgeschützten Innenraum des Demonstrator-Hochhauses	
F	11.2	Betriebsbedingung bei Umgebungstemperatur T_U	T_U zwischen -15 °C und +40 °C
	12	Instandhaltung	
F	12.1	Sichtkontrolle der adapt. Aussteifung ermöglichen	
W	12.2	Wartungsarme bzw. -freie Konstruktion	
F	12.3	Die Austauschbarkeit der adapt. Aussteifung und deren Komponenten ist zu gewährleisten.	
	13	Termin	
F	13.1	Ende der Entwicklungszeit für den Prototyp	01.07.2018
F	13.2	Montage des ersten Prototyps	01.11.2018

Tabelle 6.1: Anforderungen an den Akteur zur Aktuierung des Aussteifungselement (Fortsetzung)

6.3 Konzeption

Auf Basis der im vorhergehenden Kapitel definierten Anforderungen wird in diesem Kapitel das Konzept für die aktuierbare Aussteifung erarbeitet. Entsprechend der in Kapitel 5.4 genannten Vorgehensweise wird zunächst die Art der Aktuierung festgelegt. Unter Verwendung eines morphologischen Kastens werden Gesamtkonzepte aufgestellt. Anschließend erfolgt deren Bewertung und die Auswahl des weiter zu verfolgenden Konzepts.

6.3.1 Funktionsstruktur

Das aktuierbare Aussteifungselement ist das unterste Glied der kettenartigen Aussteifung. Eine Integration des Teilsystems „Akteur“ in ein bestehendes Aussteifungselement ist aufgrund dessen Abmaße (s. Tabelle 6.1) nicht möglich. Eine Abstützung der bei der Aktuierung erzeugten Gegenkräfte am umgebenden Tragwerk ist aus statischen Gründen nicht zulässig. Daher besteht eine mechanische Verbindungsstelle nur zum benachbarten Aussteifungselement und zum Befestigungspunkt der gesamten Aussteifung (am Knotenelement). Da es sich hier um einen Experimentalaufbau handelt, wird eine Trennung der Funktionseinheiten bevorzugt, d. h. die mechanischen Komponenten sind Teil der aktuierbaren Aussteifung, wohingegen der Signalumformer separat anzubringen ist. Zusätzlich zu den in Kapitel 5.1 vorgestellten Funktionen ist die Aussteifung vorzuspannen. Daraus ergeben sich zwei zu betrachtende Zustände:

- Passiver Zustand: Die Funktionseinheit zur Aufbringung der Vorspannung befindet sich im Kraftfluss der Lastabtragung durch die Aussteifung.

- Aktiver Zustand: Das aktuierebare Aussteifungselement verkürzt aktiv die gesamte Aussteifung, sobald die erzeugte Kraft größer als die Vorspannung ist.

Die Funktionsstruktur für den aktiven Zustand ist bereits in Bild 5.5 gegeben. Bild 6.3 zeigt die Funktionsstruktur im passiven Zustand. Hier wurde das Teilsystem „Aktor“ durch die Funktionen „Vorspannung erzeugen“ und „Vorspannung halten“ erweitert. Das Aufbringen und Ändern der Vorspannung geschieht unter Einsatz der Energie $E_{\text{mech},v}$. Zum Halten der Vorspannung wird diese nicht benötigt³.

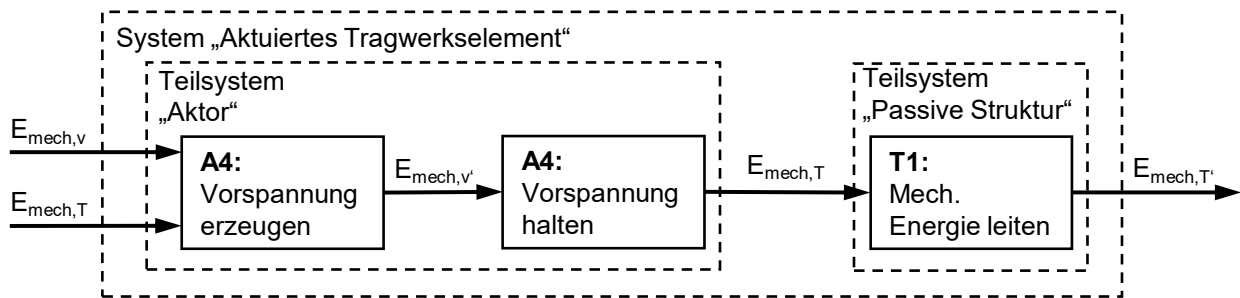


Bild 6.3: Funktionsstruktur für den passiven Zustand des zu aktuierenden Aussteifungselements

Durch die Positionierung des aktuierbaren Aussteifungselements zwischen dem Knotenelement und dem benachbarten Aussteifungselement sowie der Erzeugung der Zugkraft koaxial bzw. seriell zur Aussteifung, ist das Aktuierungskonzept vorgegeben. Dieses ist schematisch in Tabelle 5.1, Position 1.1 dargestellt.

6.3.2 Teillösungen und Konzepterstellung

Die Energie $E_{\text{mech},T}$ wird innerhalb der „Passiven Struktur“ durch Festkörper geleitet. Die Form des Körpers hat den Aussteifungselementen ohne Aktuierung zu entsprechen, d. h. die Form entspricht einem länglichen Flachstahl. Der Körper kann als Verlängerung des Teilsystems „Aktor“ angesehen werden. Die „Passive Struktur“ entfällt, wenn keine Verlängerung benötigt wird und der „Aktor“ direkt mit den angrenzenden, passiven Tragwerkselementen verbunden wird.

Eine erste Chancenabschätzung der Realisierung der Zugkraftherzeugung erfolgt mit einem Vergleich zwischen unterschiedlichen Aktortypen (s. Bild 2.10). Die Verwendung des elektromechanischen oder hydraulischen Wirkprinzips erscheint mit den geforderten

³ Genau genommen ergeben sich hieraus drei Zustände: Montagesituation, passiver und aktiver Zustand. Die Montagesituation und der passive Zustand werden gemeinsam behandelt, da diese sich lediglich durch das zeitliche Auftreten der Vorspannung unterscheiden.

Leistungsdaten zielführend. Jedoch weisen hydraulische Aktoren eine höhere Leistungsdichte auf, wodurch der Bauraum kleiner ausfallen kann. Nicht zuletzt aufgrund der Erfahrung der Forschungsgruppe des SFB 1244 in ähnlichem Kontext, z. B. der Stuttgart SmartShell, erfolgt die Aktuierung hydraulisch. Die weitere Eingrenzung des Lösungsraums zur Funktion „Energie wandeln“ ist möglich. Nach erfolgter Aktuierung geht die Aussteifung in den Ausgangszustand zurück, d. h. das aktuierbare Aussteifungselement wird dabei zurückgezogen. Daher ist die Kraft nur in eine Richtung zu erzeugen.

Ausgehend von den identifizierten Teilfunktionen und der Eingrenzung auf bestimmte Lösungsprinzipien erfolgt die Findung eines Gesamtkonzepts unter Verwendung eines morphologischen Kastens (s. Tabelle 6.2). In diesen fließen die aus Kapitel 5 sowie weitere, mittels diskursiver, intuitiver und recherchierender Methoden ermittelte Teillösungen ein.

Die Konzepte für das aktuierbare Aussteifungselement werden durch die Kombination von einzelnen Teillösungen gebildet. Aufgrund der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten werden hier nur die Konzepte vorgestellt, die als zielführend erachtet werden. Die Kombinationen, die zu den im Folgenden vorgestellten Lösungsvarianten führen, sind in Tabelle 6.3 dargestellt.

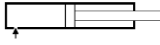

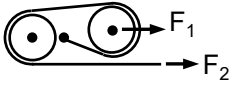
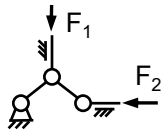
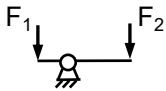
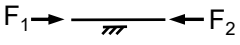
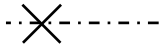
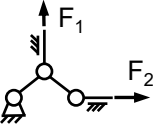
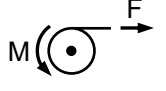


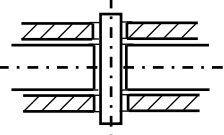
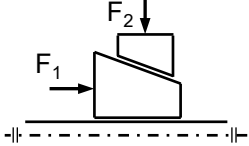
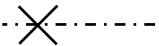
T1: Mech. Energie leiten	1.1 Flachstahl	1.2 Direktbefestigung		
	2.1 Einfachwirkender Zylinder 	2.2 Einfachwirkender Teleskopzylinder 		
A3: Mech. Energie ändern und leiten	3.1 Flaschenzug 	3.2 Kniehebel 	3.3 Hebel 	3.4 Leitung durch Festkörper 
	4.1 Gewindestange 	4.2 Kniehebel 	4.3 Seilzug 	4.4 Ritzel-Zahnstange 
A5: Vorspannung halten	5.1 Freilaufkupplung 	5.2 Stiftverbindung 	5.3 Klemmverbindung 	5.4 Schraub- verbindung 
	5.5 Selbsthemmender Mechanismus mit vorhandenen Komponenten			

Tabelle 6.2: Morphologischer Kasten für das zu aktuiierende Aussteifungselement

Konzeptvariante	Teillösungen				
1	1.1	2.1	3.4	4.1	5.4
2	1.1	2.1	3.4	4.1	5.4
3	1.2	2.1	3.1	4.2	5.4
4	1.1	2.1	3.3	4.1	5.4

Tabelle 6.3: Kombination der Teillösungen zu Konzeptvarianten

6.3.2.1 Konzeptvariante 1

Bei der Konzeptvariante 1 befindet sich der einfachwirkende Hydraulikzylinder zwischen zwei Verbindungsplatten, an denen, neben dem Zylinder, auch die angrenzenden Aussteifungselemente befestigt sind. Parallel zum Hydraulikzylinder verlaufende Zugstangen verhindern, dass die Zylinderstange durch Querkräfte belastet wird. Durch Anziehen bzw. Lösen von Muttern am Ende der Zugstangen wird die Länge des aktuierbaren Aussteifungselements geändert und somit die Vorspannung eingestellt (s. Bild 6.4 links).

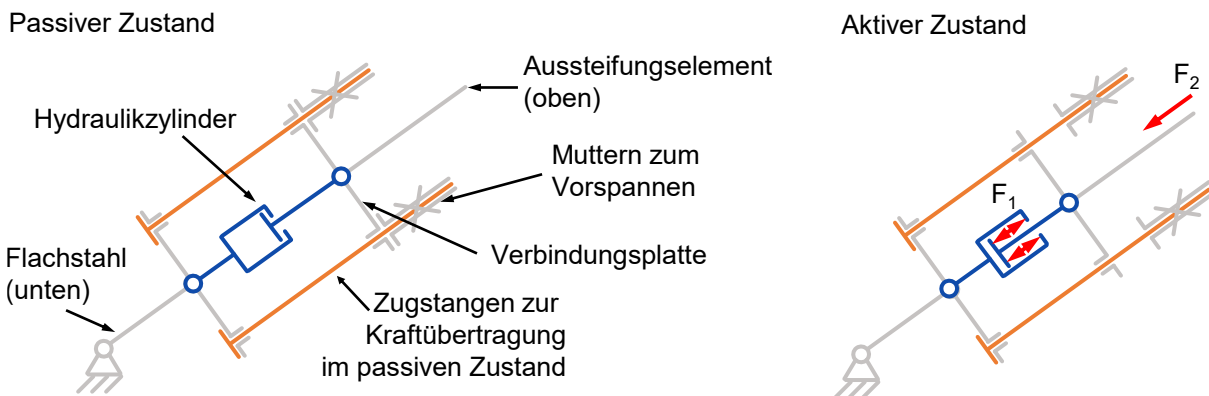


Bild 6.4: Konzeptvariante 1 im passiven (links) und aktiven Zustand (rechts)

Im aktiven Zustand (s. Bild 6.4 rechts) wird die Zylinderkammer mit Druck beaufschlagt und der Zylinder fährt ein. Diese Längenänderung resultiert in einer Verkürzung der gesamten Aussteifung. Weiterhin wird der Kontakt zwischen den Vorspannmuttern und der Verbindungsplatte aufgehoben. Durch die Reduzierung des hydraulischen Drucks wird die Baugruppe aufgrund der Rückverformung der Aussteifung wieder auseinandergezogen bis die Muttern anschlagen. Zwischen der aktiven Baugruppe und dem Befestigungspunkt am Tragwerk befindet sich analog zu den passiven Aussteifungselementen als Abstandshalter ein Flachstahl-Element.

6.3.2.2 Konzeptvariante 2

Der wesentliche Unterschied zwischen Konzeptvariante 1 und 2 ist, dass bei Konzeptvariante 2 der Hydraulikzylinder drückend eingesetzt wird. Da der hydraulische Druck kolbenseitig wirkt, kann bei gleichem Druck und gleicher Baugröße des Zylinders eine größere Kraft erzeugt werden als im ziehenden Einbauzustand. Dadurch wird ein schmalere Aufbau im Vergleich zu Konzeptvariante 1 erreicht. Über eine Hilfskonstruktion wird die vom Zylinder erzeugte Druckkraft F_1 in eine resultierende Zugkraft F_2 umgeleitet (s. Bild 6.5 rechts). Die Vorspannung wird über eine Gewindestange und Muttern eingestellt, wie auch bei Konzeptvariante 1.

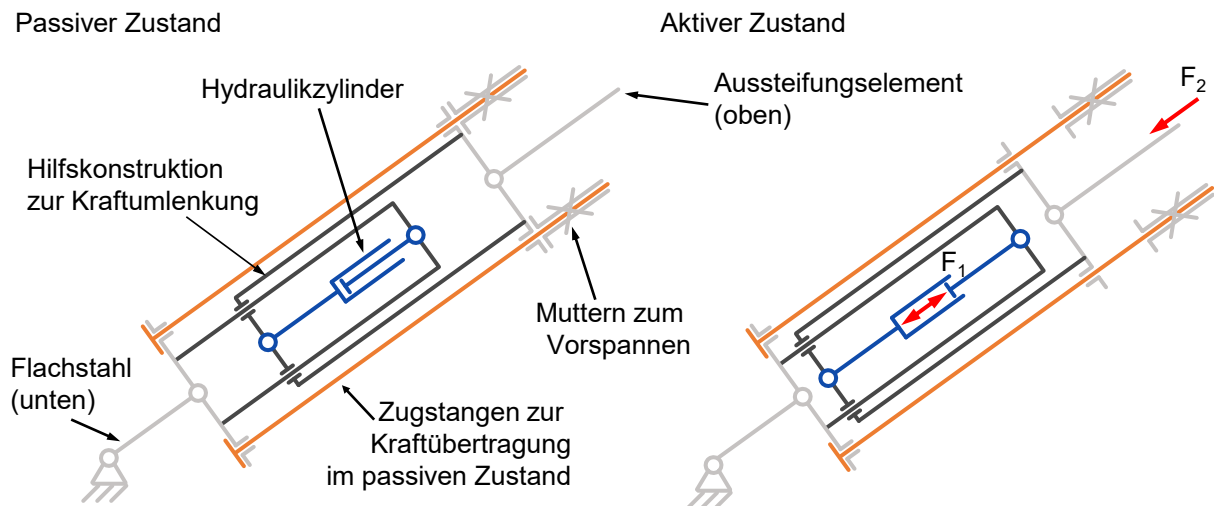


Bild 6.5: Konzeptvariante 2 im passiven (links) und aktiven Zustand (rechts) nach [BURGHARDT23, S. 71]

6.3.2.3 Konzeptvariante 3

Bei der in Bild 6.6 gezeigten Konzeptvariante wird die von einem Hydraulikzylinder erzeugte Zugkraft über ein Seil in die Aussteifung geleitet.

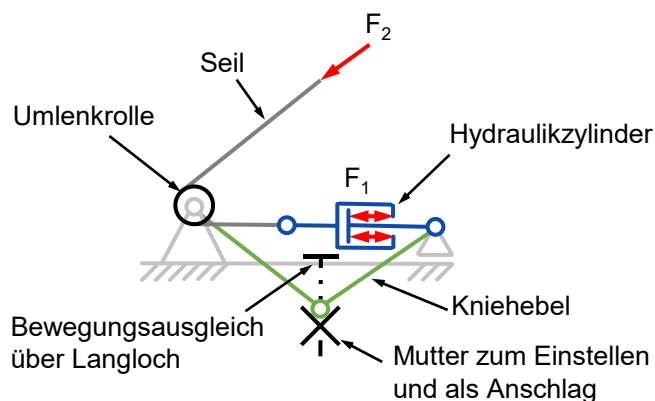


Bild 6.6: Konzeptvariante 3

Die Aussteifungselemente werden an einem Seil befestigt, das über eine Umlenkrolle zum Hydraulikzylinder geführt wird. Dieser befindet sich parallel zum Boden und ist an einer Seite beweglich gelagert. Über einen Kniehebel lässt sich der Abstand zwischen der Umlenkrolle und der gelagerten Seite einstellen. Hierzu wird die Kniehöhe über eine auf einer Gewindestange aufgeschraubte Mutter verändert. Über ein Langloch wird die Querbewegung ausgeglichen. Bei der Aktuierung fährt der Zylinder zusammen und die Aussteifung wird verkürzt.

6.3.2.4 Konzeptvariante 4

Grundlage dieses Konzepts ist ein Hebelmechanismus. Über diesen wird die Zugkraft vom Hydraulikzylinder auf die Aussteifung übertragen. Das Konzept ist schematisch in Bild 6.7 dargestellt.

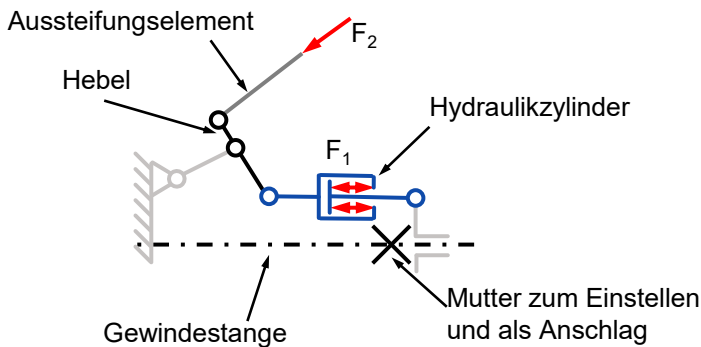


Bild 6.7: Konzeptvariante 4

Über eine Gewindestange wird die Ausgangslänge des Zylinders eingestellt. Eine Mutter dient als Anschlag. Im aktiven Zustand fährt der Zylinder zusammen und der Hebel wird zurückgezogen. Diese Bewegung überträgt sich auf die Aussteifung, wodurch diese auf Zug belastet wird. Der Hebel ermöglicht eine Übersetzung der Kräfte, sodass bspw. ein kleinerer Zylinder mit größerem Hub verwendet werden kann.

6.3.3 Bewertung und Auswahl

Tabelle 6.4 enthält die Bewertung der Konzeptvarianten. Die Bewertungskriterien werden anhand der Anforderungen an das aktuierbare Aussteifungselement abgeleitet. Die Gewichtung erfolgt durch einen paarweisen Vergleich (s. Anhang A.3). Zur Bewertung wird eine Skala von 0 bis 4 Punkte vorgegeben. Die höchste Punktzahl bedeutet den höchsten Grad der Erfüllung des entsprechenden Kriteriums. Die Bewertung wurde unter Einbezug von Mitgliedern des SFB 1244 durchgeführt.

Bewertungskriterien	Gewichtung	Konzept-variante 1		Konzept-variante 2		Konzept-variante 3		Konzept-variante 4	
		Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert
geringer Bauraum	11,11%	3	0,33	1	0,11	2	0,22	3	0,33
gute Integrationsmöglichkeit in umgebende Tragstruktur	2,78%	0	0	0	0	1	0,03	4	0,11
geringer Entwicklungsaufwand	2,78%	4	0,11	3	0,08	2	0,06	1	0,03
hohe Ausfallsicherheit	16,67%	4	0,67	3	0,50	2	0,33	0	0
geringe Herstellkosten / einfache Fertigung	11,11%	4	0,44	2	0,22	1	0,11	1	0,11
einfache Montage	2,78%	4	0,11	3	0,08	2	0,06	2	0,06
geringer Wartungsaufwand	19,44%	4	0,78	3	0,58	2	0,39	1	0,19
gute Steuerbarkeit	11,11%	1	0,11	1	0,11	1	0,11	4	0,44
gute Designverträglichkeit mit der Architektur	22,22%	0	-	4	0,89	2	0,44	3	0,67
Summe		24	2,56	20	2,58	15	1,75	19	1,94
Rangfolge		2		1		4		3	

Tabelle 6.4: Bewertung der Konzeptvarianten für das zu aktuierende Aussteifungselement

Die Konzeptvarianten 3 und 4 schneiden aufgrund deren Komplexität und der damit einhergehenden Fehler- bzw. Wartungsanfälligkeit schlecht ab. Eine Integrationsmöglichkeit ist bei diesen Konzepten gegeben, da der Hydraulikzylinder und die ihn umgebenden Bauteile in die Geschosdecke eingelassen werden können. Die Hebelübersetzung bei der Konzeptvariante 4 kann derart gewählt werden, dass kleinere Kräfte erzeugt werden müssen und der Bauraum entsprechend verkleinert werden kann. Der damit einhergehende größere Stellweg wirkt sich positiv auf die Ansteuerung aus. Dieses Konzept wurde in [BENALI19] ausgearbeitet. Aus technischen Gesichtspunkten wird die Konzeptvariante 1 am besten bewertet, jedoch aus architektonischen und design-technischen Gründen abgelehnt. Die beste Bewertung erhält Konzeptvariante 2 und wird nachfolgend detailliert.

6.4 Entwurf

In diesem Kapitel wird zuerst der Entwurf vorgestellt. Dieser wird in einem Prototyp umgesetzt und getestet. Auf Basis der Versuchsergebnisse erfolgt eine Überarbeitung des Entwurfs, der schlussendlich für den Einsatz im Demonstrator-Hochhaus realisiert wird.

6.4.1 Erstentwurf

Zur Erzeugung der Kraft wird von einem Unternehmen ein Differenzialzylinder zur Verfügung gestellt. Der Entwurf orientiert sich an den Maßen des Zylinders. Die Festlegung der geometrischen Ausprägungen zielt darauf ab, eine möglichst kompakte Bau- gruppe zu gestalten. Bild 6.8 zeigt den Entwurf des Aktors für die zu aktuierende Aus- steifung.

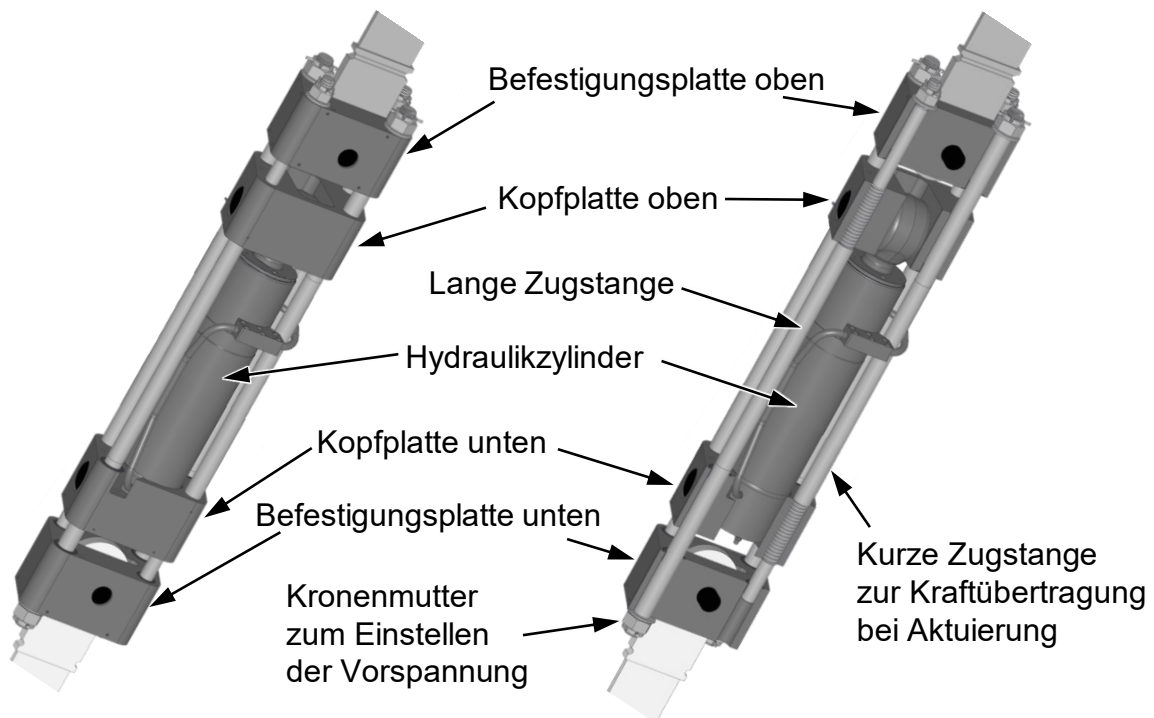


Bild 6.8: Entwurf des Aktors für das zu aktuierende Aussteifungselement in ungeschnittener (links) und geschnittener Darstellung (rechts)

Die Baugruppe wird an den Befestigungsplatten mit Bolzen mit den angrenzenden Tragwerkselementen verbunden. Die Befestigungsplatten sind im passiven Fall über zwei Zugstangen gekoppelt. Neben dem Übertragen von Zugkräften nehmen die Zugstangen auch Querkräfte auf. Durch das Festziehen bzw. Lösen der Muttern am Ende der Zugstangen wird die Länge der Baugruppe und damit die Vorspannung eingestellt. Der Zylinder befindet sich zwischen den Befestigungsplatten. An den Zylinderenden befinden

sich Kopfplatten. Durch Schraubverbindungen und zwei weitere Zugstangen werden die Kopfplatten mit der jeweils gegenüber liegenden Befestigungsplatte verbunden. Fährt der Zylinder bei der Aktuierung aus, überträgt sich dessen Bewegung über die Zugstangen auf die Befestigungsplatten. Ist die Kraft des Zylinders größer als die auf die Baugruppe wirkende Vorspannung, löst sich der Kontakt zwischen den Einstellmuttern und der Befestigungsplatte. Um diese Bewegung zu ermöglichen, sind die Zugstangen in dieser Befestigungsplatte mit Gleitlagern gelagert. Beim Nachlassen der Aktuierungskraft wird die Baugruppe wieder gelängt, bis die Einstellmutter anschlagen und der Ausgangszustand erreicht ist. Zur Verdeutlichung der Funktion ist in Bild 6.9 der Kraftfluss in den beiden Zuständen eingezeichnet.

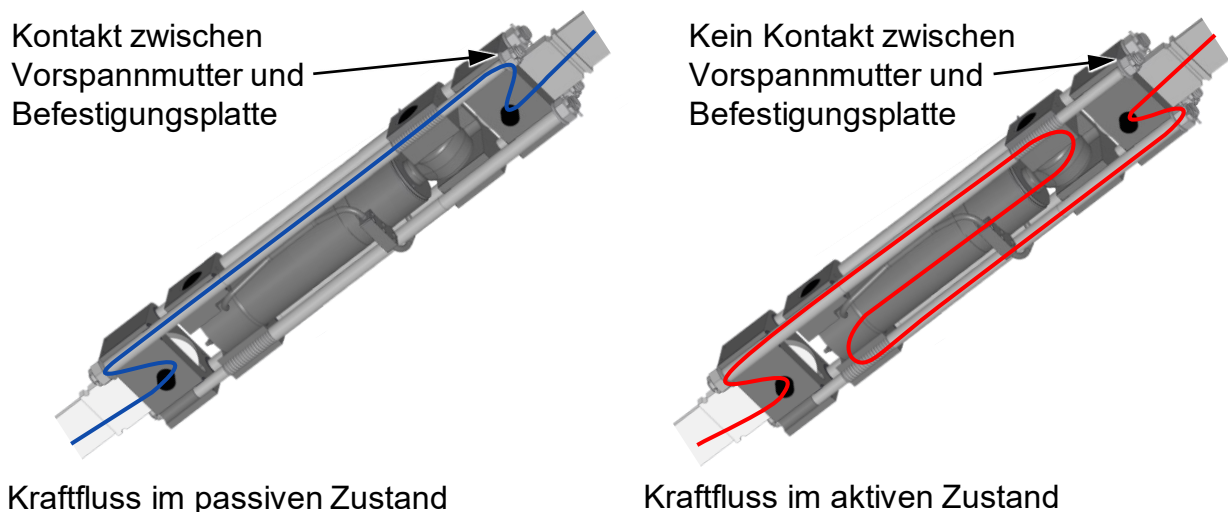


Bild 6.9: Kraftfluss im passiven (links) und aktiven Zustand (rechts)

Die Bolzen- und Schraubverbindungen sowie die Zugstangen werden mit analytischen Berechnungsverfahren ausgelegt. Die Dimensionierung der Befestigungs- und Kopfplatten erfolgt numerisch mittels FEM-Simulation. Als Teil des Nachweises der Gebäudestatik sind die Auslegungen entsprechend zu dokumentieren und den beteiligten Personen zur Verfügung zu stellen, z. B. der Tragwerksplanung und der Prüfstatik. Da die Berechnungen keinen wissenschaftlichen Neuheitswert beinhalten, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter darauf eingegangen.

6.4.2 Maßstabsgetreuer Prototyp der Tragwerksstruktur

Zur Validierung von Arbeitsergebnissen zur Tragwerksaktuierung, die innerhalb des SFB 1244 erzielt wurden, wird ein Prototyp gebaut (s. Bild 6.10). Dieser entspricht einer Seitenfläche des Demonstrator-Hochhauses. Der Prototyp besteht aus einer passiven und einer adaptiven Stütze (s. Kapitel 7). Die Stützen sind durch Aussteifungen und

Querträger miteinander verbunden. Der Prototyp zum oben vorgestellten Entwurf des aktuierbaren Aussteifungselements ist in eine der Aussteifungen eingebaut. Alle Stützen und Aussteifungen sind mit Dehnmessstreifen (DMS) ausgestattet.

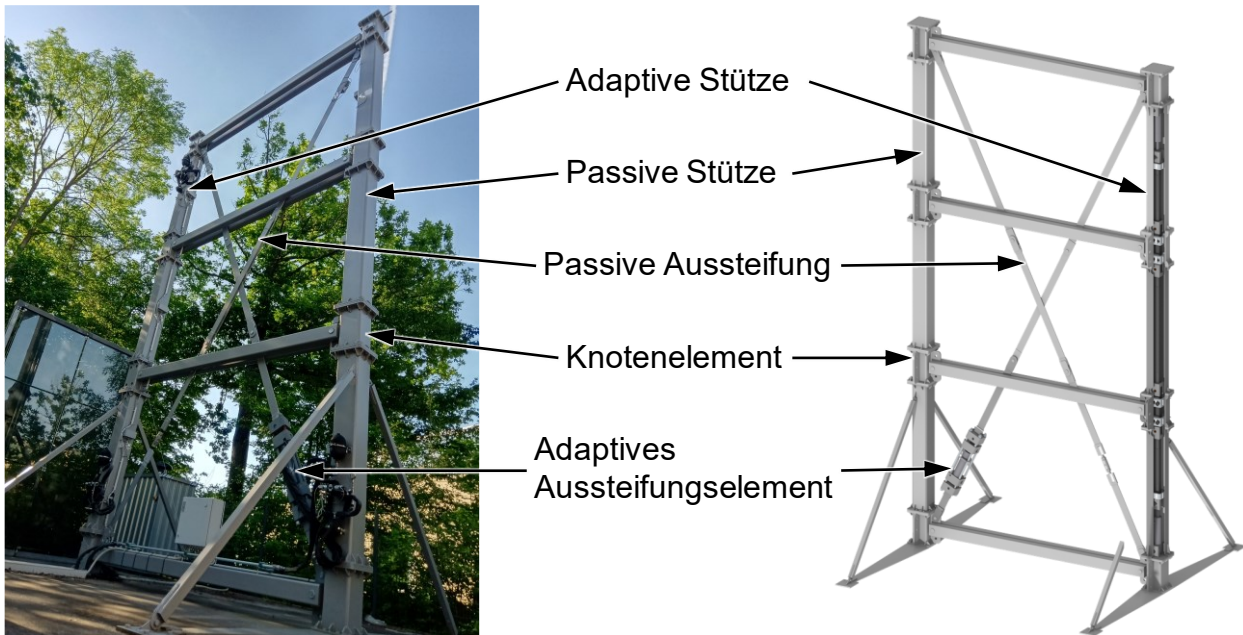


Bild 6.10: Maßstabsgetreuer Prototyp der Tragwerksstruktur

Mit dem Prototyp wird die Funktion der aktuierbaren Tragwerkselemente nachgewiesen. Zusätzlich erfolgt die Validierung des Simulationsansatz, der für die Bemessung der Gebäudestatik des Demonstrator-Hochhauses verwendet wird. Hierzu werden die bei der Aktuierung gemessenen Spannungen mit den Ergebnissen einer Finite-Element-Simulation verglichen. Die fünf zur Evaluation verwendeten Lastfälle sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst. Die Zugkraft in der aktuierbaren Aussteifung wird vom Lastfall 1 bis 4 in 50 kN-Schritten von 0 kN auf 200 kN erhöht. Zur Vollständigkeit werden die Messergebnisse der aktuierbaren Stütze bereits hier gezeigt. Im Lastfall 5 fährt zusätzlich der Aktor in der aktuierbaren Stütze aus (s. Kapitel 7). Dies führt zu einer Zugbelastung im äußeren Teil der Stütze und wirkt der Druckbelastung durch die Verkürzung der aktiven Aussteifung entgegen. [WEIDNER19, S. 99]

Lastfall		1	2	3	4	5
Aktorkraft in kN	Aussteifung	50	100	150	200	200
	Stütze	0	0	0	0	-200

Tabelle 6.5: Aktorkräfte in den verschiedenen Lastfällen [WEIDNER19, S. 99]

Der Vergleich der gemessenen und der simulierten Spannungen ist in Bild 6.11 dargestellt. Nach dem Aufbringen der Vorspannungen in den Aussteifungselementen wurden die DMS tariert. Dies erklärt die konstante Differenz der gemessenen und

simulierten Werte (s. Bild 6.11 Mitte und rechts), da bei den gemessenen Spannungen die Vorspannung und das Eigengewicht nicht berücksichtigt werden. Die Abweichungen der Werte der aktuierten Stütze (s. Bild 6.11 links) zeigen, dass deren Steifigkeit geringer ist als in der Simulation angenommen.

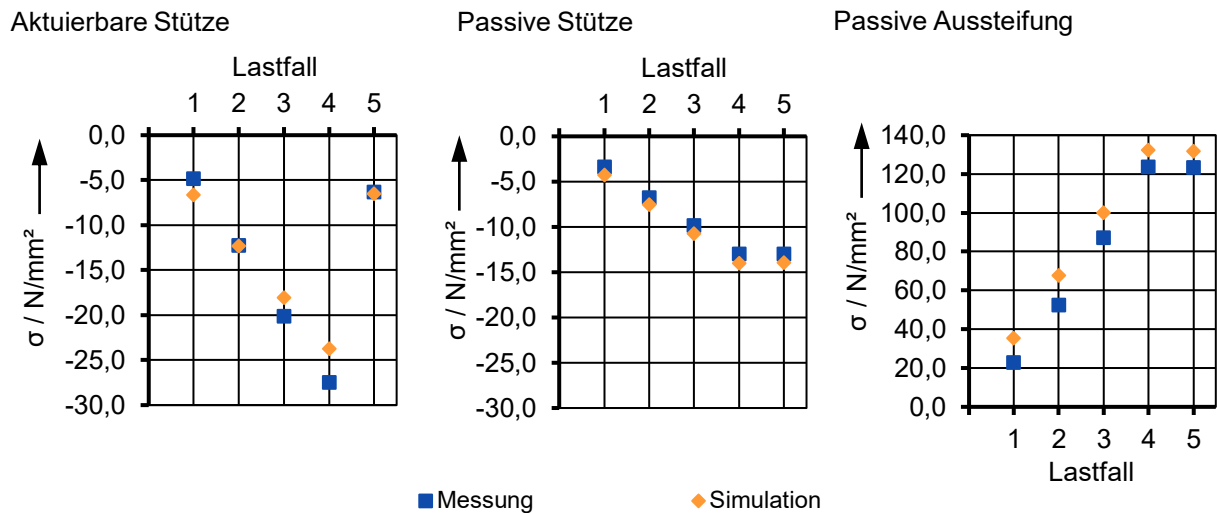


Bild 6.11: Vergleich der gemessenen und simulativ ermittelten Spannungen an der aktuierten Stütze (links), der passiven Stütze (Mitte) und der passiven Aussteifung (rechts) [WEIDNER19, S. 99]

Die Wirkung der aktuierten Tragwerkselemente auf die Prototypenstruktur entspricht den Annahmen in den Simulationen. Damit ist der Funktionsnachweis erfüllt.

6.4.3 Finaler Entwurf und Einsatz im Demonstrator-Hochhaus

Zum Bau des Demonstrator-Hochhauses stehen andere Hydraulikzylinder zur Verfügung. Der Entwurf wird daher angepasst. Ein Vergleich zwischen dem Erstentwurf und dem finalen Design ist in Bild 6.12 gegeben. Von der Änderung ist maßgeblich die Breite der Baugruppe betroffen, die von 190 mm auf 380 mm ansteigt. Zusätzlich wird der Einbau eines Wegmessumformers (Hydac HLT 2500-F1-M08-C01-3200-000) vorgesehen, der den Abstand zwischen der oberen Befestigungsplatte und der sich darunter befindenden Kopfplatte misst. Somit wird die Längenänderung des aktuierten Aussteifungselements überwacht.

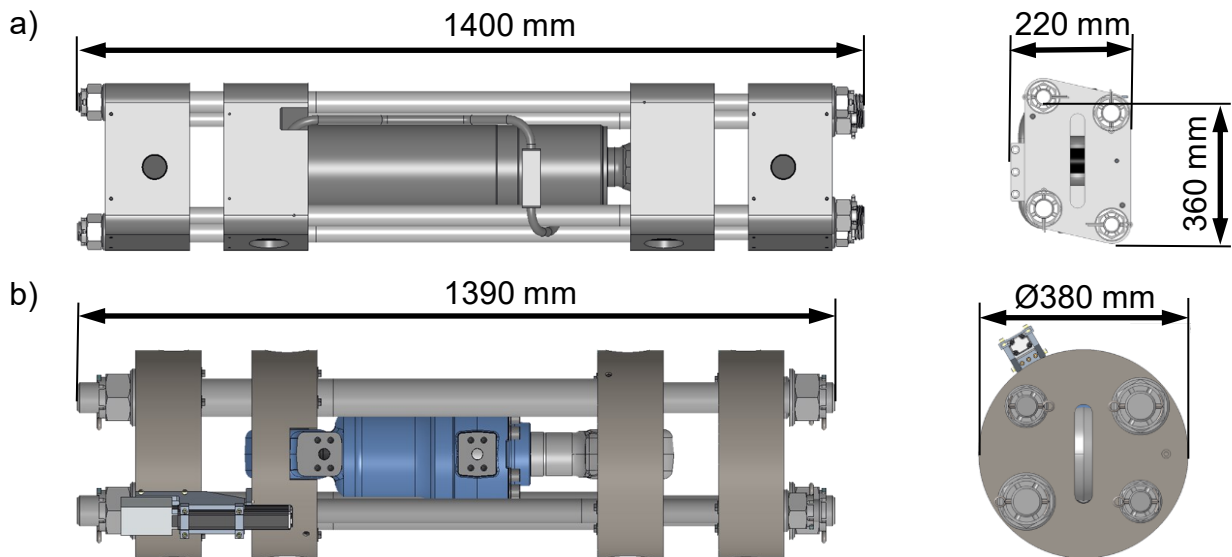


Bild 6.12: Vergleich zwischen dem Erstentwurf (a) und dem finalen Entwurf (b)

Beim Bau des Demonstrator-Hochhauses werden die bereits vormontierten aktuierbaren Aussteifungselemente zeitgleich mit den passiven Tragwerkselementen eingebaut. Die Einstellung der Vorspannung erfolgt nach Fertigstellung der Tragstruktur. Zur Ermöglichung der Sichtprüfung werden die Positionen aller Verbindungselemente mit Sicherungslack markiert. Der Anschluss der Hydraulik und der Sensorik erfolgt nach Fertigstellung des Baus. Der eingebaute Zustand ist in Bild 6.13 zu sehen.

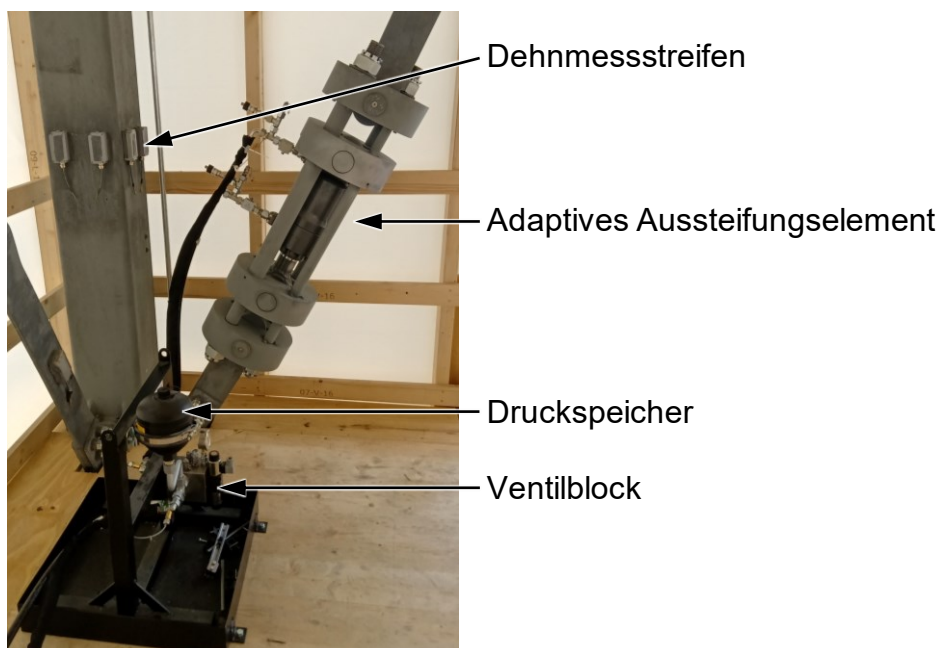


Bild 6.13: Adaptives Aussteifungselement im Demonstrator-Hochhaus

Zur Steuerung des hydraulischen Drucks werden Proportionalventile verwendet. Diese befinden sich in räumlicher Nähe zu den Hydraulikzylindern. Druckspeicher gleichen Bedarfsspitzen aus. Die Druckölversorgung erfolgt über im Treppenturm verlegte

Steigleitungen. Mit diesen wird das Öl von einem in einem benachbarten Technikcontainer stehenden Hydraulikaggregat an die Bedarfsstellen gefördert.

6.5 Zwischenfazit

Anhand dieses Beispiels wird gezeigt, dass die Variation der in Kapitel 5 vorgestellten Lösungsprinzipien zur Konzeption des Aktors für das zu aktuierte Aussteifungselement genutzt werden kann. Die Umsetzung des daraus resultierenden Entwurfs erfolgt zur Anwendung in einer Prototyp-Struktur. Mit diesem Prototyp wird die Funktion des Aktors gezeigt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt eine Überarbeitung des Entwurfs für den Einsatz im Demonstrator-Hochhaus. Zum Zeitpunkt der Einreichung dieser Arbeit ist eine experimentelle Evaluation der adaptiven Aussteifung noch nicht erfolgt.

7 Aktuierung einer Stütze

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der aktuierbaren Stütze des Demonstrator-Hochhauses (s. Kapitel 6.1) vorgestellt. Analog zum vorhergehenden Beispiel werden zuerst die Aufgabenstellung geklärt und die Anforderungen definiert. Anschließend erfolgen die Konzeption und der Entwurf der aktuierbaren Stütze.

7.1 Planen und Klären der Aufgabe

Im Demonstrator-Hochhaus sind die Stützen im ersten und zweiten Modul (s. Bild 6.1) zu aktuieren, d. h. deren Länge ist zu beeinflussen. Bei diesem Beispiel ist der generelle Aufbau durch das architektonische Gesamtkonzept vorgegeben. Jede Stütze besteht aus Hohlprofilen aus Baustahl und reicht über drei Stockwerke. An den Profilenden sind Montageflansche angeschweißt, über die die Profile miteinander verschraubt werden.

Die krafterzeugende Einheit ist in den Innenraum der Stütze zu integrieren und somit parallel zum Hohlprofil positioniert. Damit ist die Art der Aktuierung vorgegeben. Die parallele Aktuierung ist bei hohen statischen Lasten zweckmäßig, da diese durch die Hohlprofile abgeleitet werden. Die Dämpfung der dynamischen Lasten erfolgt durch die dämpfenden Eigenschaften der passiven Struktur und durch die geeignete Aktuierung der Profile. Dabei werden Kräfte derart in das Profil eingeleitet, dass diese den dynamischen Lastanteilen (Schwingungen) entgegenwirken. Im Vergleich zu einer seriellen Aktuierung (s. Kapitel 6) kann bei gleicher Aktorgröße mehr Energie dissipiert werden. Die Wirkung der Aktuierung entspricht somit einer Steifigkeitsanpassung der Stütze. [BÖHM20, S. 1596 ff.]

Zu Versuchszwecken ist die Einleitung der Aktuierungskraft jeweils auf Stockwerkshöhe in die äußere Stützenstruktur vorzusehen. Dies soll über eine lösbare mechanische Verbindung realisiert werden. Diese Funktion wird im Folgenden innerhalb des Teilsystems „Kupplung“ erfüllt und ermöglicht die Aktuierung der Stütze über die gesamte Länge oder eines Stockwerksabschnitts.

Analog zur Aktuierung der Aussteifung werden die Leistungsanforderungen simulativ ermittelt. Tabelle 7.1 zeigt die Anforderungsliste zur Aktuierung der Stütze. Die Liste ist auszugsweise in [BURGHARDT21, S. 68] veröffentlicht.

F W	Nr.	Anforderungen Forderung (F), Wunsch (W)	Quantifizierung
	1	Geometrie	
F	1.1	Kantenlänge a des nutzbaren, quadratischen Innenraums der Stütze	a = 270 mm
F	1.2	Länge l der Stütze	l = 7860 mm
	2	Kinematik	
F	2.1	Lineare Zug- und Druckbewegung in Längsrichtung der Stütze	
F	2.2	Stellbereich s	s = +/- 5 mm
	3	Kräfte	
F	3.1	Stufenlose Krafterzeugung (Rückstellung erfolgt passiv) <ul style="list-style-type: none"> • Nahezu sofortiges Anliegen der Maximalkraft erforderlich (keine „Anfahrkraft“) • Abzudeckender Kraftbereich F • Max. Aktuierungsfrequenz f_{max} 	F = +/- 300 kN f_{max} = 8 Hz
F	3.2	Die Länge des beeinflussten Bereichs der Stütze kann im passiven Zustand stockwerkweise eingestellt werden.	
F	3.3	Eine Belastung des Hohlprofils durch Querkräfte ist nicht zulässig.	
	4	Energie	
F	4.1	Leistung des zur Verfügung stehenden Stromanschlusses P_{elektr}	P_{elektr} = 15 kW
W	4.2	Verwendung der gleichen Hilfsenergie wie zur Aktuierung der Aussteifung (s. Kapitel 6)	
	5	Signal	
F	5.1	Messung des Stellwegs mit einem Wegaufnehmer	
F	5.2	Sensorelemente sind lösbar zu befestigen.	
F	5.3	Die Aktoreinheit wird über eine Schnittstelle für digitale oder analoge Signale gesteuert.	
	6	Sicherheit	
F	6.1	Das Lösen von Verbindungen kraftübertragender Bauteile ist konstruktiv zu verhindern.	
W	6.2	Ein Klemm-/Eingriffsschutz wird nicht benötigt, da im Betriebsfall die Zugänglichkeit der Räumlichkeiten bautechnisch nicht möglich ist.	
	7	Ergonomie	
F	7.1	Die Zugänglichkeit der Anschlüsse ist sicherzustellen.	
	8	Fertigung	
F	8.1	Anzahl n_{ges} der zu fertigenden aktuierenden Stützen	n_{ges} = 16
W	8.2	Fertigungsteile <ul style="list-style-type: none"> • Herstellung an der Universität Stuttgart • Spanende Bearbeitung bevorzugt 	

Tabelle 7.1: Anforderungen an den Aktor zur Aktuierung der Stütze

	9	Kontrolle	
F	9.1	Die Festigkeitsnachweise der kraftübertragenden Bauteile und Verbindungen müssen die Anforderungen der Baustatik erfüllen. Anwendbare Normen werden durch einen externen Prüfstatiker definiert, dem auch die Festigkeitsnachweise vorzulegen sind.	
	10	Montage	
W	10.1	Vormontage und Lagerung in witterungsgeschütztem Bereich	
F	10.2	Endmontage auf der Baustelle des Demonstrator-Hochhauses	
F	10.3	Die Montageanleitung ist zu erstellen.	
F	10.4	Montage- und Transporthilfen sind vorzusehen, z. B. Befestigungsösen.	
	11	Gebrauch	
F	11.1	Einsatzort im witterungsgeschützten Innenraum des Demonstrator-Hochhauses	
F	11.2	Betriebsbedingung bei Umgebungstemperatur T_U	T_U zwischen -15 °C und +40 °C
	12	Instandhaltung	
W	12.1	Wartungsarme bzw. -freie Konstruktion	
	13	Termin	
F	13.1	Ende der Entwicklungszeit für den Prototyp	01.07.2018
F	13.2	Montage des ersten Prototyps	01.11.2018

Tabelle 7.1: Anforderungen an den Aktor zur Aktuierung der Stütze (Fortsetzung)

7.2 Konzeption

Wie bereits in Kapitel 6.3 gezeigt, erfolgt zuerst die funktionelle Beschreibung der Teilsysteme. Mittels eines morphologischen Kastens werden anschließend Teillösungen aufgezeigt und zu Gesamtkonzepten kombiniert. Durch ein Bewertungsverfahren wird das weiter zu detaillierende Konzept ausgewählt.

7.2.1 Funktionsstruktur

Wie oben bereits geschildert, dient das äußere Hohlprofil zur ständigen Lastableitung. Die krafterzeugende Einheit, die sich innerhalb des Profils befindet, be- oder entlastet das Profil und passt damit die Steifigkeit der Stütze an. Ebenso wie bei der Aussteifungsaktuierung ist der Signalumformer von der Einheit zur Energiewandlung räumlich zu trennen. Die Funktionsstruktur ist in Bild 7.1 dargestellt.

Der prinzipielle Aufbau und die Funktionen T1 bis T3 sowie A1 bis A3 wurden in Kapitel 5.1 erläutert. Zusätzlich kommt hier die Funktion K1 „Krafteinleitungspunkt ändern“ hinzu. Unter Zuhilfenahme der mechanischen Energie E_{mech} wird hier die mechanische Verbindungsstelle zwischen den Teilsystemen „Energiewandler“ und

„Passive Struktur“ geändert, d. h. eine mechanische Verbindung ist zu lösen und an einer anderen Stelle erneut zu setzen. Diese Funktion wird nur im passiven Zustand ausgeführt. Im Betriebszustand erfolgt die Kraftleitung über die voreingestellte Position. Aus Trivialitätsgründen werden beide Zustände in einer Struktur dargestellt.

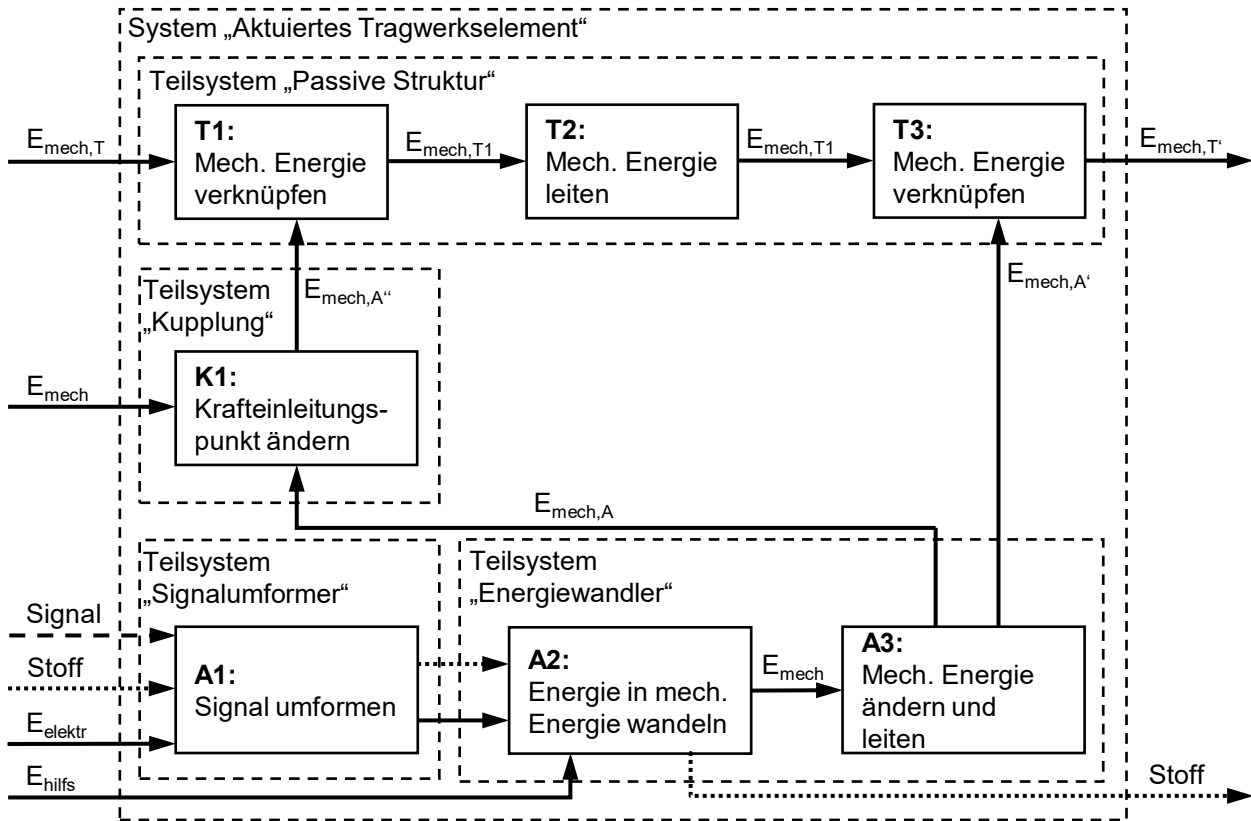


Bild 7.1: Funktionsstruktur der zu aktuierenden Stütze

7.2.2 Teillösungen und Konzepterstellung

Durch die Vorgabe, dass sich das Aktorsystem innerhalb der passiven Hohlstütze befinden soll, ist die Art der Aktuierung bereits festgelegt. Die schematische Darstellung ist in Tabelle 5.1, Zelle 3.1/3.2a zu finden. Dieses Konzept wurde bisher noch nicht umgesetzt.

Unter der Prämisse, dass die Art der Energiewandlung bei den aktuibaren Stützen und Aussteifungen (s. Kapitel 6) gleich ist, kommt als Energiewandler ebenfalls ein Hydraulikzylinder zum Einsatz. Da hier Zug- und Druckkräfte zu erzeugen sind, wird ein Differenzialzylinder verwendet. Auch bei diesem Beispiel wird das Teilsystem „Signalumformer“ nicht berücksichtigt. Tabelle 7.2 zeigt den morphologischen Kasten mit Teillösungen für die Funktionen.



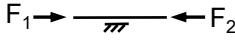
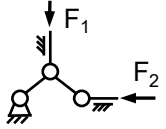
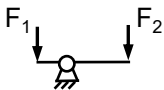
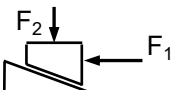
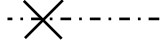
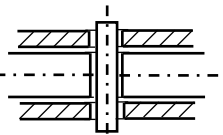
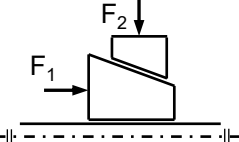
T1 bis T3: Mech. Energie verknüpfen und mech. Energie leiten	1.1 Hohlprofil 			
A2: Energie in mech. Energie wandeln	2.1 Differential- zylinder 			
A3: Mech. Energie ändern und leiten	3.1 Leitung durch Festkörper 	3.2 Kniehebel 	3.3 Hebel 	3.4 Keil 
	3.5 Kombination			
K1: Krafteinleitungs- stelle ändern	4.1 Schraub- verbindung 	4.2 Bolzenverbindung 	4.3 Klemmverbindung 	

Tabelle 7.2: Morphologischer Kasten für die zu aktuiierende Stütze

Um die Anforderung zu erfüllen, dass alle drei Stockwerksbereiche unabhängig voneinander aktuiierbar sind, muss sich innerhalb dieser Bereiche mindestens eine Aktoreinheit befinden. Aus Komplexitätsgründen wurde auf die Aktoreinheit im mittleren Bereich verzichtet. Somit befinden sich bei allen Konzeptvarianten an jedem Ende der Stütze eine Aktoreinheit. Die Kombinationen zu Gesamtkonzepten sind in Tabelle 7.3 aufgelistet.

Konzeptvariante	Teillösungen			
1	1.1	2.1	3.1	4.2
2	1.1	2.1	3.2	4.1
3	1.1	2.1	3.3	4.2

Tabelle 7.3: Kombination der Teillösungen zu Konzeptvarianten

7.2.2.1 Konzeptvariante 1

Bei dieser Konzeptvariante befindet sich ein Hydraulikzylinder am jeweils am oberen und unteren Ende der Stütze (s. Bild 7.2 links).

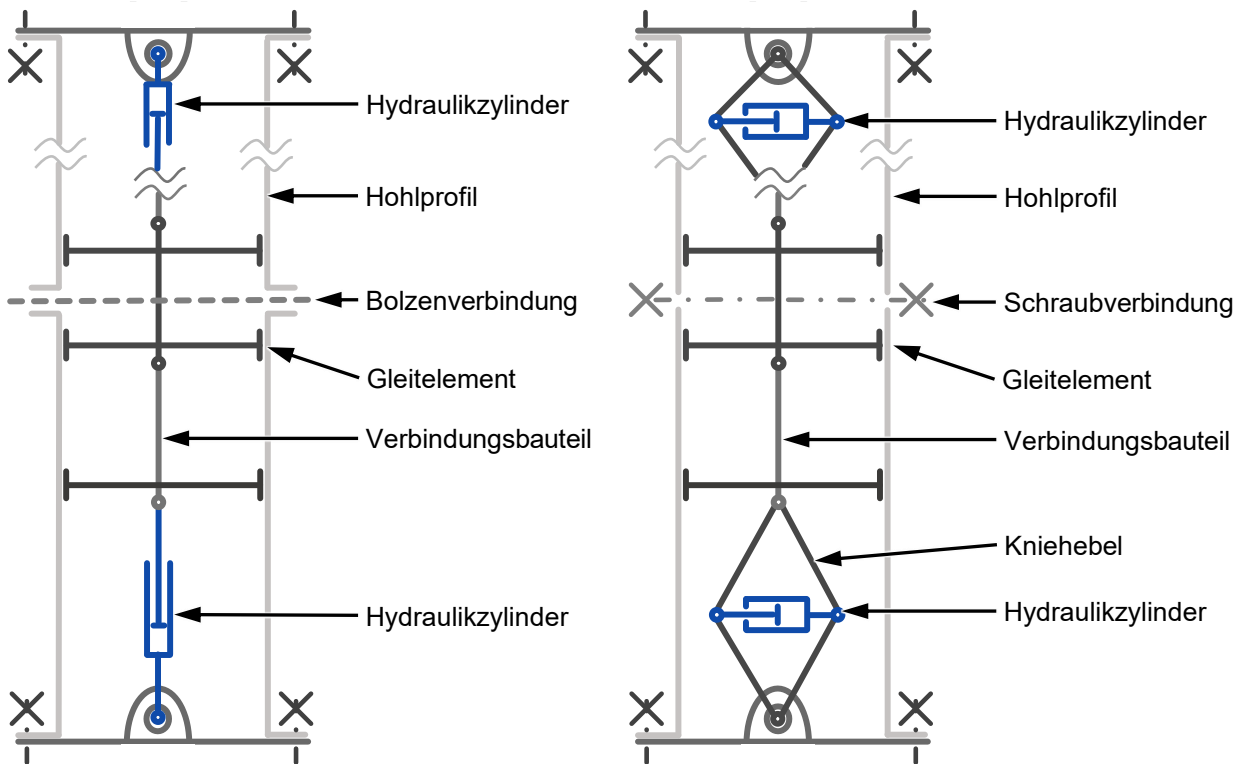


Bild 7.2: Schematische Darstellung von Konzeptvariante 1 (links) und Konzeptvariante 2 (rechts)

Die Hydraulikzylinder sind über Verbindungsbauteile miteinander gekoppelt. Zur Verbindung der Bauteile im Inneren des Hohlprofils werden Bolzen verwendet. Um ein Ausknicken der kettenartigen Struktur zu verhindern, stützt sich der innere Aufbau am äußeren Hohlprofil ab. Jeweils auf Geschosshöhe befinden sich Öffnungen im Hohlprofil. Dort kann dieses mit der inneren Struktur verbolzt werden. Somit wird nur der Teil der Stütze zwischen dieser Bolzenverbindung und den Hydraulikzylindern aktuiert. Werden keine Bolzen gesetzt, arbeiten die Zylinder gegeneinander und die gesamte Stütze wird beeinflusst.

7.2.2.2 Konzeptvariante 2

Der Aufbau im Inneren des Hohlprofils ist ähnlich zu dem der Konzeptvariante 1 (s. Bild 7.2 rechts). Jedoch wird hier die vom Hydraulikzylinder erzeugte Kraft über einen Kniehebel verstärkt. Durch die Übersetzung kann ein kleinerer Zylinder gewählt werden. Der größere Hub wirkt sich positiv auf die Steuerbarkeit aus. Anstelle der Bolzenverbindungen wird die innere Kettenstruktur mit dem Hohlprofil verschraubt.

7.2.2.3 Konzeptvariante 3

Der Aufbau von Konzeptvariante 3 ist in Bild 7.3 schematisch dargestellt. Die durch den Hydraulikzylinder erzeugte Kraft wird über eine Hebelübersetzung verstärkt. Über die bereits beschriebene, kettenartige Struktur wird die Kraft entweder über die Bolzenverbindungen in das Hohlprofil oder an das gegenüberliegende Ende der Stütze geleitet.

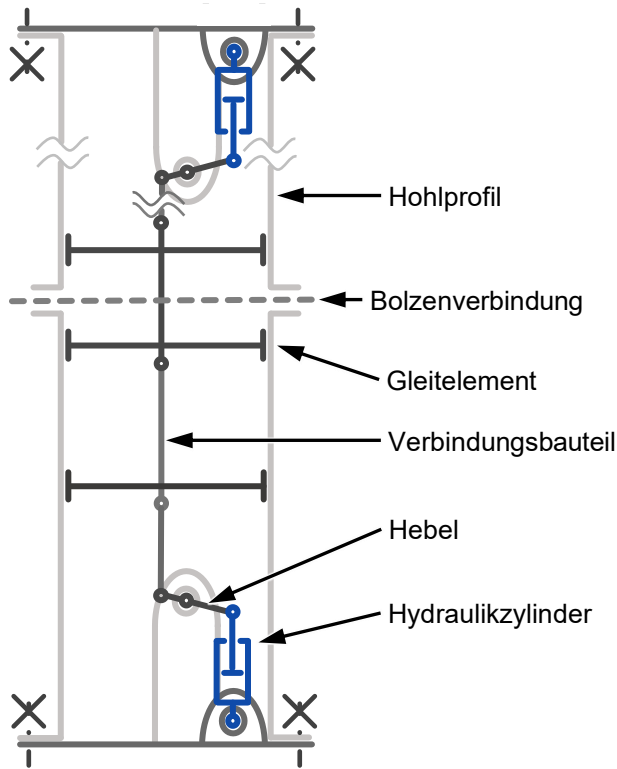


Bild 7.3: Schematische Darstellung von Konzeptvariante 3

7.2.3 Bewertung und Auswahl

Die Bewertung erfolgt nach dem gleichen Schema wie in Kapitel 6.3.3 und ist in Tabelle 7.4 gegeben. Die Bewertungskriterien werden ebenfalls mit einem paarweisen Vergleich gewichtet (s. Anhang A.3).

Bewertungskriterien	Gewichtung	Konzept-variante 1		Konzept-variante 2		Konzept-variante 3	
		Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert
hohe Realisierungschance im gegebenen Bauraum	25,00%	4	1,00	2	0,50	1	0,25
geringer Entwicklungsaufwand	3,57%	4	0,14	2	0,07	1	0,04
hohe Ausfallsicherheit	21,43%	2	0,43	1	0,21	1	0,21
geringe Herstellkosten / einfache Fertigung	7,14%	4	0,29	3	0,21	2	0,14
einfache Montage	10,71%	3	0,32	1	0,11	1	0,11
geringer Wartungsaufwand	17,86%	2	0,36	1	0,18	1	0,18
gute Steuerbarkeit	7,14%	0	0	3	0,21	2	0,14
gute Designverträglichkeit mit der Architektur	7,14%	3	0,21	4	0,29	3	0,21
Summe		22	2,75	17	1,79	12	1,29
Rangfolge		1		2		3	

Tabelle 7.4: Bewertung der Konzeptvarianten für die zu aktuierende Stütze

Die Konzeptvarianten 2 und 3 haben aufgrund der zusätzlichen Hebelelemente eine erhöhte Komplexität, die sich negativ auf die Herstellung und Montage auswirkt. Durch die größere Anzahl an relativbewegten Bauteilen steigt der Wartungsaufwand und die Ausfallsicherheit sinkt. Dadurch, dass Konzeptvariante 1 keine Hebelkinematik o. ä. benötigt, ist hier eine hohe Realisierungschance gegeben. Insgesamt wurde Konzeptvariante 1 am besten bewertet und wird im folgenden Kapitel detailliert.

7.3 Entwurf

Bild 7.4 zeigt den Entwurf der aktuierbaren Stütze. Der äußere Aufbau besteht aus Hohlprofilen aus dem Baustahl S235, die über Flansche miteinander verschraubt sind. Auf Stockwerkshöhe befindet sich jeweils ein Knotenelement, an dem die Querträger und Aussteifungen befestigt werden. Die Knotenelemente haben eine größere Wandstärke als die Hohlprofile. Diese wird benötigt, um genügend Auflagefläche für die Bolzen zu bieten, mit denen die Knotenelemente und die sich im Inneren befindende Struktur verbunden werden. Im Inneren der Stütze sind die Hydraulikzylinder an Fußplatten montiert. Die inneren Verbindungsbauteile bestehen aus Hohlprofilen aus Baustahl (S235), an deren Enden Gabeln angeschweißt sind. Über Gleitelemente aus PTFE wird der innere Aufbau im äußeren Hohlprofil bzw. Knotenelement geführt.

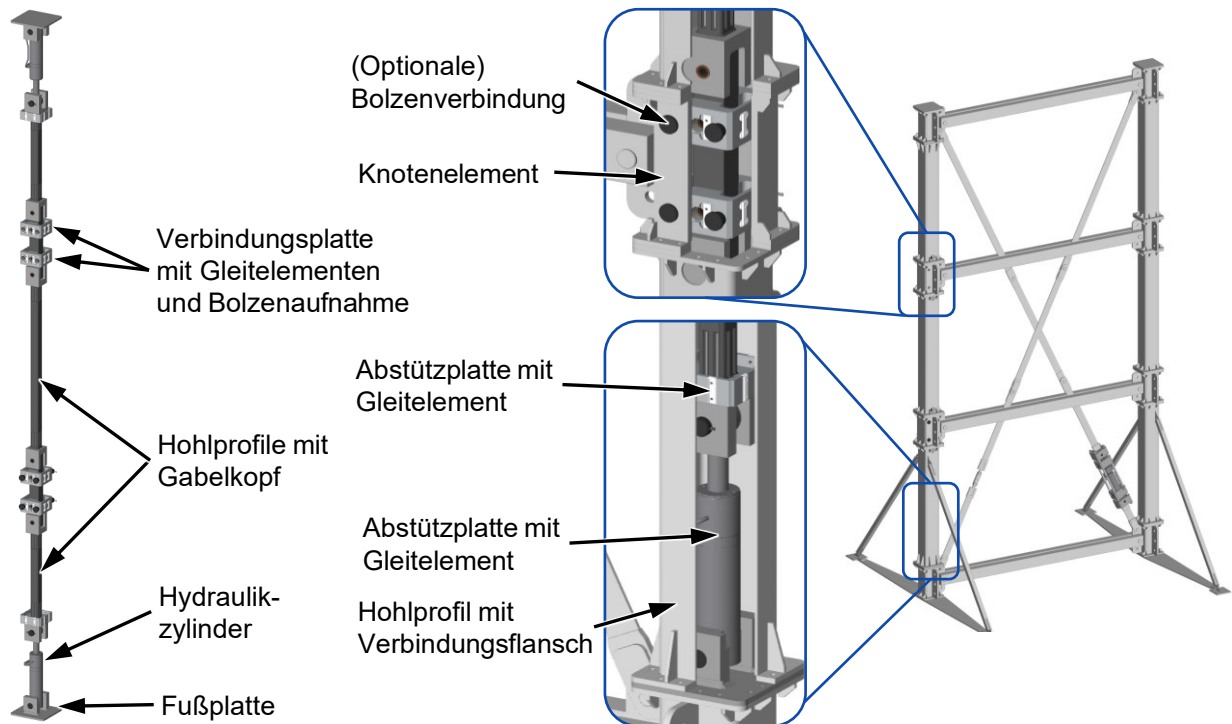


Bild 7.4: Erstentwurf der aktuierten Stütze und Umsetzung im Prototyp

Die Auslegung der äußeren Struktur erfolgt durch die Tragwerksplanung. Zur Dimensionierung der inneren Struktur werden analytische (für Verbindungselemente, Schweißnähte und Profile) und numerische Verfahren (für Verbindungsplatten und Gabelköpfe) verwendet. Da die Auslegung dem aktuellen Stand der Technik entspricht wird in dieser Arbeit nicht darauf eingegangen.

Die Montage der Stütze erfolgt im liegenden Zustand. Dabei werden die Bauteile der inneren Struktur in die entsprechenden äußeren Hohlprofile und Knotenelemente hineingeschoben. Anschließend wird die äußere Struktur verschraubt. Öffnungen in den Hohlprofilen ermöglichen das Verbinden der Komponenten der inneren Struktur miteinander durch Bolzen. Nach Einbau der Stütze in das Tragwerk werden die Hydraulikleitungen an die Zylinder angeschlossen. Hierzu befinden sich Aussparungen in den Hohlprofilen. Die Öffnungen werden nach Montageende verschlossen.

Die Umsetzung erfolgt zum Bau der Prototyp-Struktur (s. Bild 6.10). An dem Prototyp wird die Funktion validiert. Wie bereits in Kapitel 6.4.2 gezeigt, ist die Steifigkeit der aktuierten Stütze geringer als simulativ ermittelt. Insgesamt bestätigen die Versuche die Funktion der Aktuierung und die Gültigkeit des Simulationsansatzes.

Aufgrund der großen Anzahl der zu fertigenden Teile und der aufwändigen Montage erfordert der Bau des Prototyps einen enormen Ressourcenaufwand. Um diesen zu

reduzieren, wird bei Bau des Demonstrator-Hochhauses auf die Verbindungsmöglichkeiten zwischen äußerer und innerer Struktur verzichtet. Die innere Struktur wird dahingehend vereinfacht, dass sich am unteren Ende ein Hydraulikzylinder befindet, der über ein durchgehendes Profil mit dem oberen Stützenende verbunden ist. Um eine bessere Zugänglichkeit und ggf. einen Austausch des Hydraulikzylinders zu gewährleisten, werden Öffnungen in der äußeren Struktur eingebracht. Die dadurch entstehende Schwächung der Stütze wird durch eine erhöhte Wandstärke des äußeren Hohlprofils im Bereich des Zylinders ausgeglichen. Somit besteht die äußere Struktur aus zwei Hohlprofilen mit unterschiedlichen Wandstärken. Das angepasste Konzept, der geänderte Entwurf sowie die Umsetzung im Demonstrator-Hochhaus sind in Bild 7.5 dargestellt.

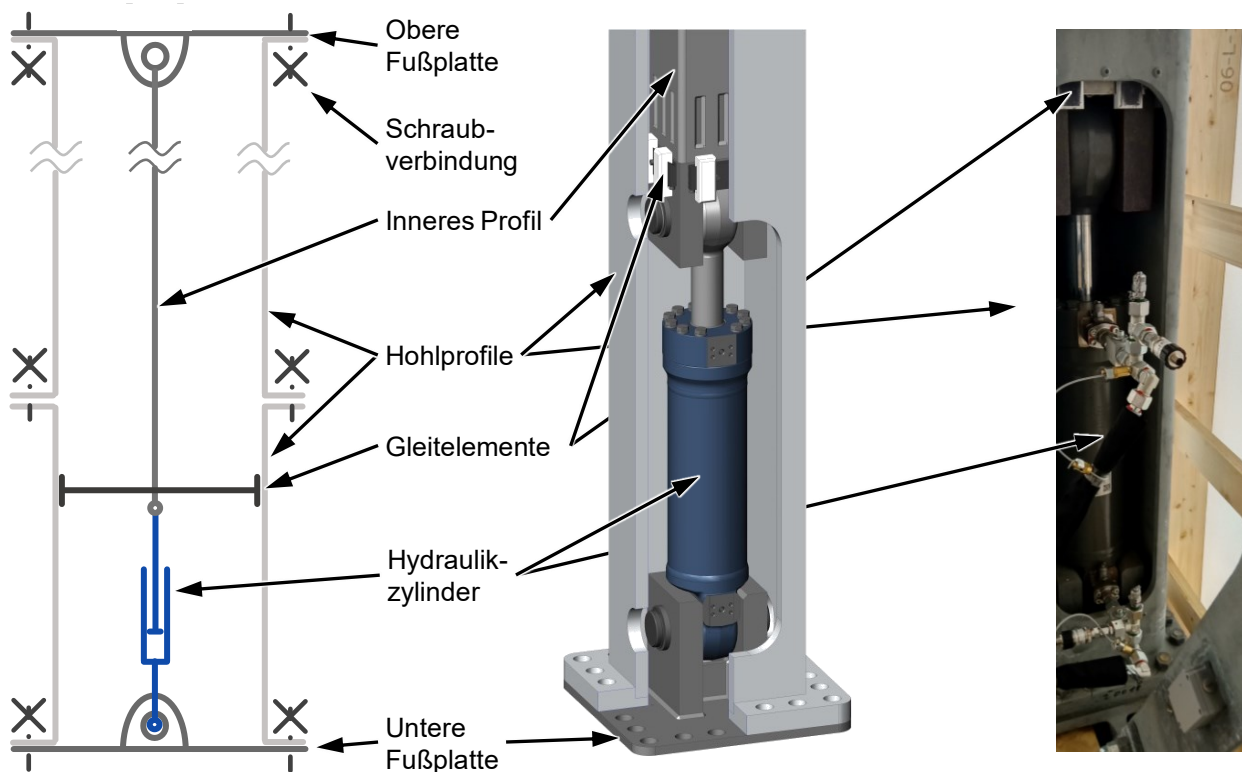


Bild 7.5: Geändertes Konzept (links) und Entwurf (Mitte) sowie Umsetzung im Demonstrator-Hochhaus (rechts) nach [BLANDINI22, S. 6]

7.4 Zwischenfazit

Für die zu aktuierende Stütze wird ein weiteres Aktuierungskonzept für ein normalkraftbeanspruchtes Tragwerkselement umgesetzt. Auch hier erfolgt die Erstellung des Lösungsraums zur Konzeption der Aktoren mit den Lösungsprinzipien aus Kapitel 5. Die Variation der Teillösungen ermöglicht das Erstellen von Gesamtkonzepten. Die Funktion des umgesetzten Entwurfs wird an einer Prototyp-Struktur gezeigt. Hier erfolgt

ebenfalls eine Überarbeitung des Entwurfs für den Einsatz des Aktors im Demonstrator-Hochhaus. Eine experimentelle Evaluation der aktuierbaren Stütze im Demonstrator-Hochhaus steht zum Zeitpunkt der Einreichung dieser Arbeit noch aus.

8 Aktuierung eines Biegebalkens

Das nachfolgende Beispiel wurde im Rahmen des Teilprojekts C02 „Integrierte Fluidaktoren“ des SFB 1244 zusammen mit dem Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) erarbeitet. Dabei ist ein auf Biegung beanspruchter Balken zu aktuieren. Im Vergleich zu dem in Kapitel 3.2 vorgestellten Stand der Forschung und Technik, ist die Aktorik in den Balken zu integrieren. Das Ziel ist die Tragfähigkeit des Balkens durch die integrierte Aktorik zu steigern, indem die durch äußere Belastungen verursachten Verformungen minimiert werden.

8.1 Planen und Klären der Aufgabe

Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von auf Biegung beanspruchter Tragwerke und Tragwerkselemente ist zumeist die Verformung maßgebend. Hierzu sind in [DIN EN 1992-1-1 2011, S. 135] Grenzwerte definiert. Zur Steigerung der Gebrauchstauglichkeit ist die Minimierung oder vollständige Kompensation der Durchbiegung mittels einer Aktuierung zielführend.

Die Wirkung der Aktuierung lässt sich durch die Beschreibung zweier Zustände erklären und ist in Bild 8.1 dargestellt. Der Balken biegt sich im passiven Fall unter einer äußeren Last durch. Oberhalb der neutralen Faser befindet sich die Druckzone, in der maßgeblich Druckspannungen vorliegen. In der Zugzone unterhalb der neutralen Faser liegen Zugspannungen vor. Ohne eine äußere Last wird der Balken bei einer Aktuierung (aktiver Zustand) in die entgegengesetzte Richtung verformt. Die Zugspannungen befinden sich dabei im oberen und die Druckspannungen im unteren Bereich. Die Überlagerung beider Zustände (Superposition) führt zum adaptiven Zustand. In diesem Fall kompensieren sich die Spannungen und die Durchbiegung wird (idealerweise vollständig) reduziert.

Da die Belastung zeitlich und/oder räumlich variieren kann, z. B. durch eine bewegte Last, soll die Aktuierung in der Lage sein, sämtlichen Lastfällen in möglichst optimaler Weise entgegenzuwirken. Dies kann nur erreicht werden, indem die durch die Aktuierung und durch äußere Kräfte verursachte Biegemomentenverläufe identisch sind. Die im Stand der Forschung und Technik zumeist erfolgte Aktuierung über die Auflager (s. Kapitel 3.2) beeinflusst immer das gesamte Tragwerkselement. Ein beliebiger Biegemomentenverlauf kann damit nicht erzeugt werden. Dies ist nur mit mehreren Aktoren möglich, die entlang der Balkenlängsachse verteilt sind und eine lokale Manipulation erlauben [WEIDNER18, S. 115]. In [KELLETER22, S. 16 ff.] sind hierzu mehrere Beispiele gegeben.

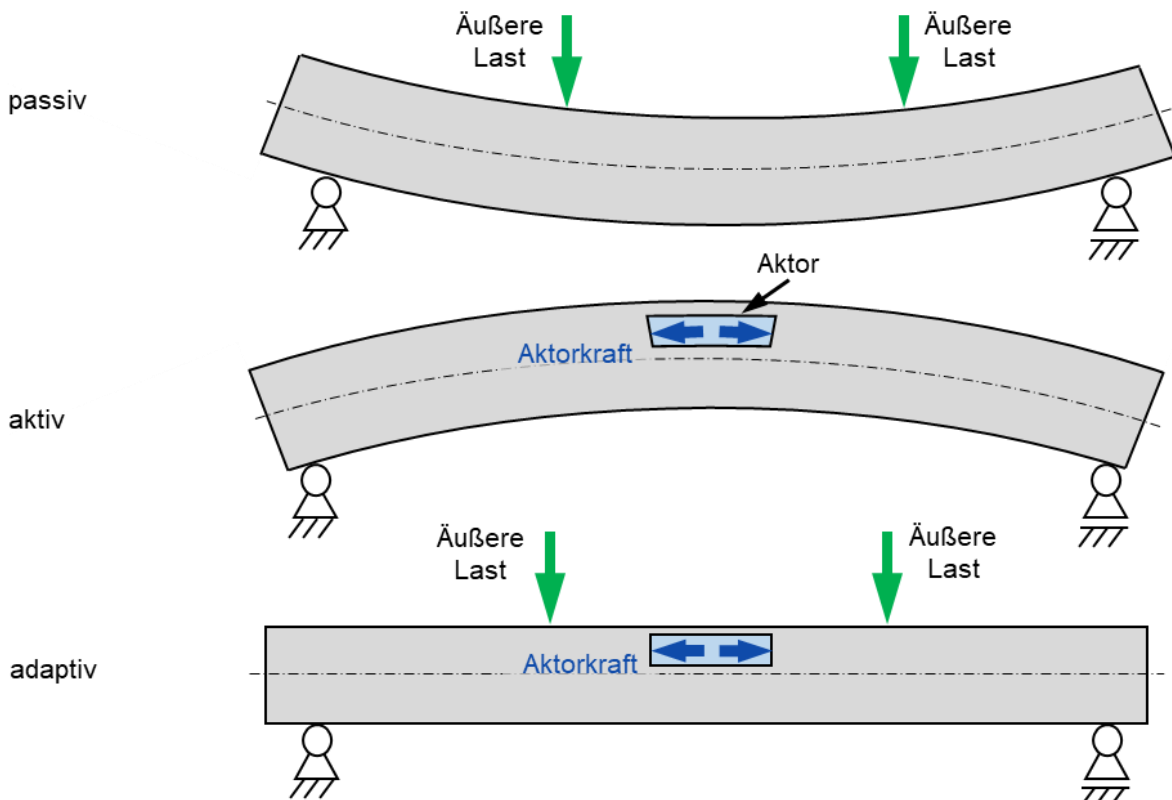


Bild 8.1: Zustände und deren Superposition nach [WEIDNER18, S. 115]

Ziel dieses Teilprojekts ist es zu zeigen, dass eine Verformungsminimierung eines auf Biegung beanspruchten Balkens mittels einer lokalen Aktuierung möglich ist. Aus architektonischen Gründen sind die Aktoren in den Balken zu integrieren. Die Funktion soll in einem Vier-Punkt-Biegeversuch an einem Prototyp mit realitätsnahen Abmessungen nachgewiesen werden. Um die Anwendbarkeit mit gängigen Baumaterialien zu zeigen, ist der Balken aus Stahlbeton zu fertigen. Die Anforderungen an den aktuierbaren Balken sind in Tabelle 8.1 aufgeführt.

F W	Nr.	Anforderungen Forderung (F), Wunsch (W)	Quantifizierung
	1	Geometrie	
F	1.1	Abmaße des Balkens (Länge x Breite x Höhe) <ul style="list-style-type: none"> • Länge l • Breite b • Höhe h 	l = 4400 mm b = 150 mm h = 300 mm
F	1.2	Integration der Aktoren in den Querschnitt des Balkens	
F	1.3	Abstand a zwischen den Auflagern	a = 4000 mm
F	1.4	Abstand b zwischen den Kräfteinleitungspunkten an der Balkenoberseite	b = 1500 mm
F	1.5	Auflager und Kräfteinleitungspunkte sind symmetrisch zur Balkenmitte.	
	2	Kinematik	
F	2.1	Bewegung des Balkens entgegen der Durchbiegung	

Tabelle 8.1: Anforderungen an den Aktor zur Aktuierung des Biegebalkens

	3	Kräfte	
F	3.1	Maximale Masse m zur Belastung des Balkens im quasistatischen Vier-Punkt-Biegeversuch	$m = 1000 \text{ kg}$
F	3.2	Max. Aktuierungsfrequenz f_{\max}	$f_{\max} = 5 \text{ Hz}$
F	3.3	Die Rückstellung des Balkens erfolgt passiv.	
	4	Energie	
F	4.1	Leistung des zur Verfügung stehenden Stromanschlusses P_{elektr}	$P_{\text{elektr}} = 15 \text{ kW}$
	5	Stoff	
F	5.1	Der Balken ist aus Beton mit Stahlarmierungen herzustellen.	
	6	Signal	
F	6.1	Messung der Durchbiegung mit einem Abstandssensor und DMS	
F	6.2	Die Aktoreinheiten werden über eine Schnittstelle für digitale oder analoge Signale gesteuert.	
	7	Ergonomie	
F	7.1	Die Zugänglichkeit der Anschlüsse ist sicherzustellen.	
F	7.2	Einsatz von Hebwerkzeugen für den Balken ist sicherzustellen.	
	8	Fertigung	
F	8.1	Anzahl n_{ges} der zu fertigenden Balken	$n_{\text{ges}} = 1$
W	8.2	Möglichst große Anzahl an Gleichteilen	
W	8.3	Herstellung von Fertigungsteilen und Betonage an der Universität Stuttgart	
	9	Montage	
W	9.1	Vormontage und Lagerung in witterungsgeschütztem Bereich	
F	9.2	Endmontage auf der Demonstrator-Plattform des SFB 1244	
F	9.3	Montage- und Transporthilfen sind vorzusehen.	
	10	Gebrauch	
F	10.1	Einsatzort auf der Demonstrator-Plattform des SFB 1244 in vor Witterung ungeschützter Umgebung	
F	10.2	Betriebsbedingung bei Umgebungstemperatur T_U	$T_U = 10 \text{ °C}$ bis 40 °C
	11	Instandhaltung	
F	11.1	Sichtkontrolle des aktuierten Balkens ermöglichen	
F	11.2	Wartungsarme bzw. -freie Konstruktion	
	12	Kosten	
F	12.1	Zulässige Gesamtkosten	20.000 €
	13	Termin	
F	13.1	Durchführung von Versuchen am Prototyp	Juni 2020

Tabelle 8.1: Anforderungen an den Aktor zur Aktuierung des Biegebalkens (Fortsetzung)

8.2 Konzeption

8.2.1 Funktionsstruktur

Um die Chance der Funktionsfähigkeit zu erhöhen, wird nur die krafterzeugende (Energiewandler) und -leitende Einheit (Stellübertrager) in den Balken einbetoniert. Ähnlich zu den vorherigen Beispielen ist der Signalumformer nicht integriert. Dies ermöglicht dessen Austausch im Schadensfall. Die Einleitung der Aktuierungsenergie je Aktor erfolgt innerhalb des Balkens an zwei entgegengesetzt gerichteten Flächen (für Kraft- und Gegenkraft bzw. Moment und Gegenmoment). Zwischen diesen Flächen wird die Kraft geleitet. Der hier beschriebene Aufbau entspricht einer Kombination der in Bild 5.4 und Bild 5.5 dargestellten Basis-Funktionsstrukturen. Die daraus resultierende Funktionsstruktur ist in Bild 8.2 dargestellt.

Die Anzahl der benötigten Aktoren ist vom Aktuierungs- und Aktorkonzept abhängig und wird in der Entwurfsphase bestimmt (s. Kapitel 8.3). Zur Reduzierung der Systemkomplexität sowie des Herstellungsaufwands sind dieselben Aktoreinheiten zu verwenden. Die Funktionen zur Krafterzeugung und -übertragung (Funktionen A1 bis A3) sind daher in den Teilsystemen „Signalumformer x“ und „Aktor x“ identisch. Weiterhin werden die Energiewandler in den Teilsystemen „Aktor 1“ bis „Aktor n“ von der gleichen Hilfsenergie E_{hilf} versorgt. Im Gegensatz dazu erfolgt die Ansteuerung individuell, d. h. die Eingänge in das Teilsystem „Signalumformer x“ sind unterschiedlich. Um hier den Lösungsraum für unterschiedliche Aktorkonzepte offen zu halten, sind Stoffströme in der Funktionsstruktur berücksichtigt, die ggf. nicht auftreten.

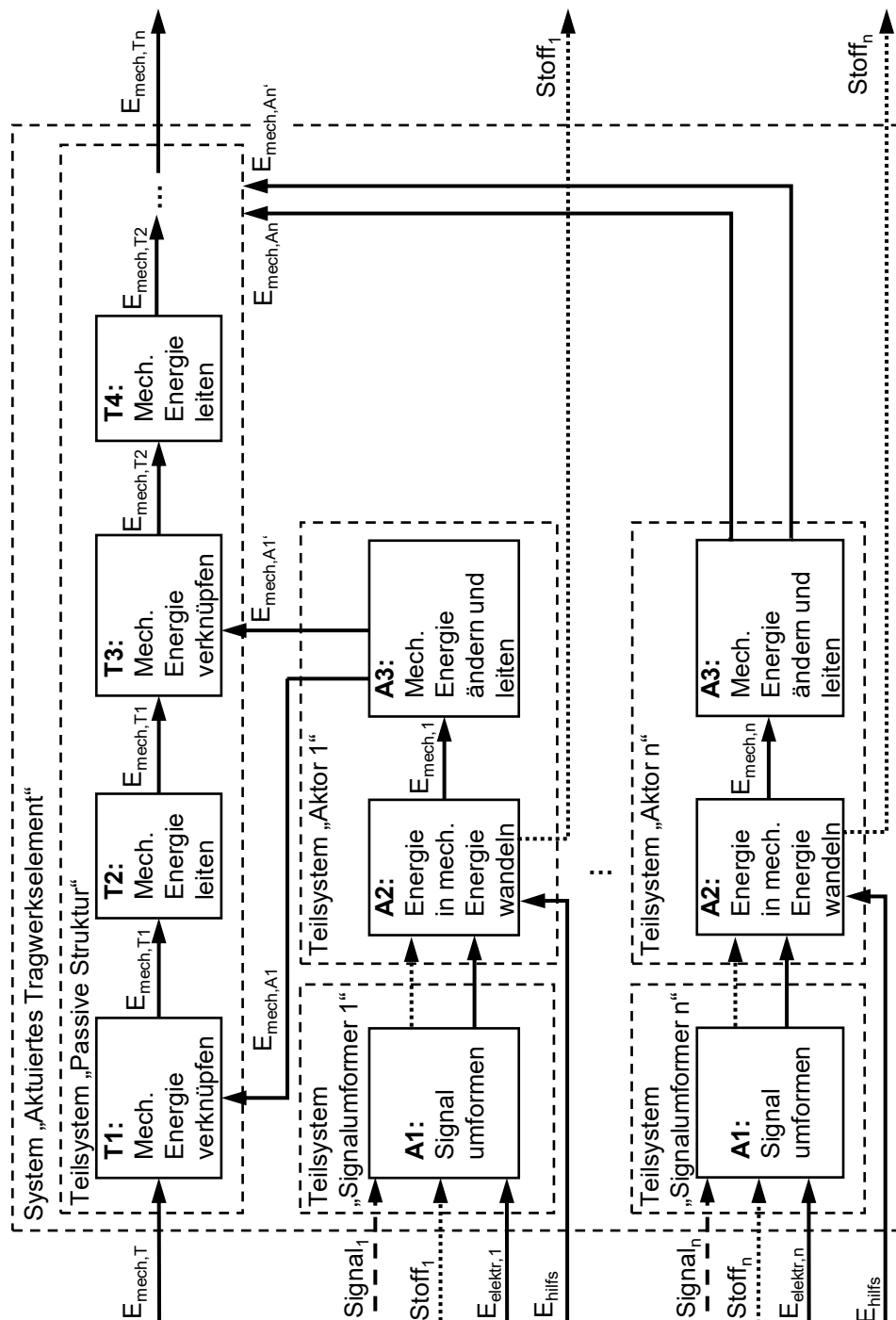


Bild 8.2: Funktionsstruktur des zu aktuierenden Balkens

8.2.2 Teillösungen und Konzepterstellung

Die Aktoren, zumindest deren mechanische Teilsysteme, sind in den Wirkraum zu integrieren. Bei Einleitung eines Momentes verformt sich der Bereich um die Momenteneinleitung. Durch die getrennte Ansteuerung der Aktoren wird der resultierende Biegemomentverlauf eingestellt. Idealerweise wirkt dieser dem durch eine äußere Last verursachten Momentverlauf entgegen. Diese Art der Aktuierung ist in Tabelle 5.1, Zelle 3.2b bzw. 3.3c gegeben und wird erstmalig im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt. In

Anlehnung daran zeigt Bild 8.3 schematisch das Aktuierungskonzept mit mehreren Aktoren. Das in die Tragstruktur (Wirkraum) eingeleitete Moment ist rot dargestellt. Die resultierende Verformungsrichtung ist mit blauen Pfeilen gekennzeichnet.

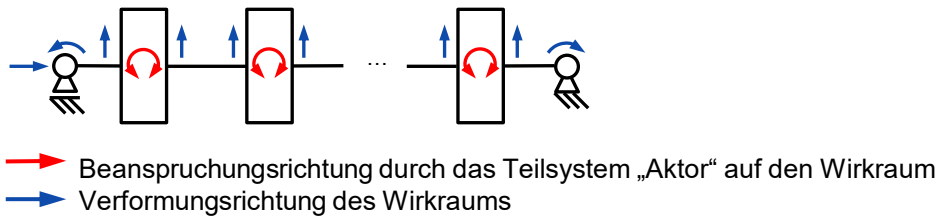


Bild 8.3: Aktuierungskonzept des Balkens

Zur Erzeugung der Momente eignen sich Wandlerprinzipien für rotatorische und translatorische Bewegungen. Die translatorischen Bewegungen sind über geeignete Lösungsprinzipien für den Stellübertrager derart zu ändern, dass ein Ausgangsmoment auf den Balken wirkt. Weiterhin können Lösungsprinzipien, die eine translatorische Bewegung erzeugen, mit solchen kombiniert werden, die diese Bewegung in eine Rotation umformen. Teillösungen zu den in Bild 8.2 beschriebenen Funktionen sind in Tabelle 8.2 aufgeführt.

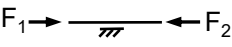
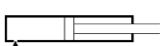
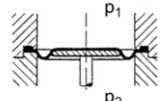
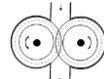



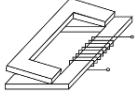



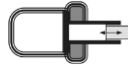
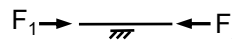
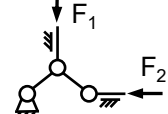
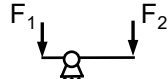
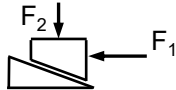
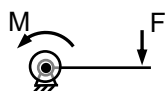
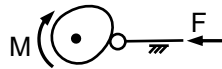
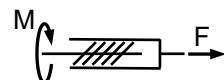

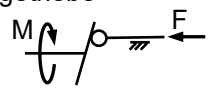

<p>T1 bis Tn: Mech. Energie leiten und mech. Energie verknüpfen</p>	<p>1.1 Leitung durch Festkörper </p>			
<p>A2: Energie in mech. Energie wandeln</p>	<p>2.1 Einfachwirkender Zylinder </p>	<p>2.2 Membranzylinder </p>	<p>2.3 Zahnradmotor </p>	<p>2.4 Sperrschieber- motor </p>
	<p>2.5 Schrittmotor </p>	<p>2.6 Elektromagnet für transl. Bew. </p>	<p>2.7 Elektromagnet für rot. Bew. </p>	<p>2.8 Piezo- Stapelaktor </p>
	<p>2.9 Piezo- Streifenaktor </p>	<p>2.10 Piezo- Biegeaktor </p>	<p>2.11 Therm. Dehnstofffaktor </p>	
<p>A3: Mech. Energie ändern und leiten</p>	<p>3.1 Leitung durch Festkörper </p>	<p>3.2 Kniehebel </p>	<p>3.3 Hebel </p>	<p>3.4 Keil </p>
	<p>3.5 Kurbelgetriebe </p>	<p>3.6 Kurvengetriebe </p>	<p>3.7 Gewindetrieb </p>	<p>3.8 Seilzug </p>
	<p>3.9 Taulscheiben- getriebe </p>	<p>3.10 Stirnradgetriebe </p>	<p>3.11 Kombination —</p>	

Tabelle 8.2: Morphologischer Kasten für den zu aktuierenden Balken

Durch die Kombination von Teillösungen werden Gesamtkonzepte aufgestellt. Ein Überblick über die Kombination zu den im folgenden betrachteten Gesamtkonzepten ist in Tabelle 8.3 gegeben.

Konzeptvariante	Teillösungen		
1	1.1	2.5	3.11 (bzw. 3.6 und 3.10)
2	1.1	2.2	3.1
3	1.1	2.1	3.1
4	1.1	2.8	3.1
5	1.1	2.5	3.7
6	1.1	2.5	3.10

Tabelle 8.3: Kombination der Teillösungen zu Konzeptvarianten

8.2.2.1 Konzeptvariante 1

Bei Konzeptvariante 1 wird ein Moment durch einen Schrittmotor erzeugt und über ein Stirnradgetriebe auf einen Exzenter übertragen (s. Bild 8.4). Durch die Drehung drückt der Exzenter gegen eine Druckwalze. Somit entsteht eine Druckkraft zwischen den Anbindungspunkten des Exzenter und der Druckwalze. Diese Druckkraft wird über Druckplatten exzentrisch in den Balken eingeleitet. Dadurch entsteht das Aktuierungsmoment. Im passiven Zustand kehrt der Balken in die Ausgangslage zurück. Dabei wird der Exzenter zurückgedrückt.

Der Schrittmotor ermöglicht die genaue Steuerung des Drehwinkels des Exzenter. Die winkelgenaue Ansteuerung wird durch die Getriebeübersetzung $i \geq 1$ verbessert, da sich die Ausgangsdrehgeschwindigkeit verringert. Gleichzeitig wird das Ausgangsmoment am Exzenter und somit die erzeugte Druckkraft vergrößert. Zur Ermittlung der optimalen Getriebeübersetzung sind auch mehrstufige Getriebe zu berücksichtigen.

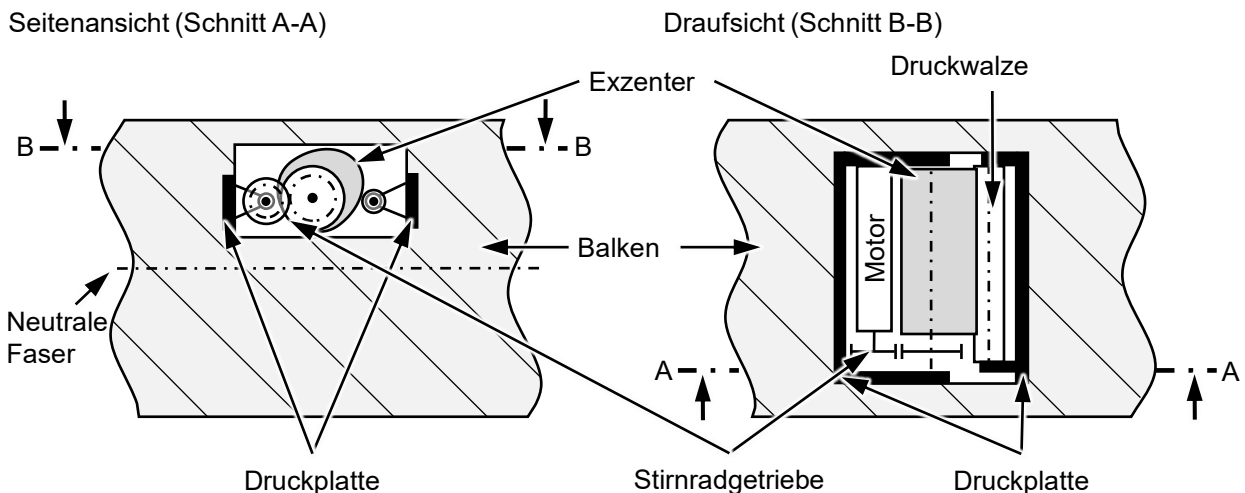


Bild 8.4: Konzeptvariante 1

8.2.2.2 Konzeptvariante 2

Die krafterzeugende Einheit der Konzeptvariante 2 besteht aus einem in den Balken einbetonierten Hohlkörper (Druckkammer), der mit Hydrauliköl gefüllt ist (s. Bild 8.5). Außerhalb des Balkens befindet sich ein Hydraulikaggregat. Durch Leitungen wird die Druckkammer mit Drucköl versorgt. Steigt der hydraulische Druck an, dehnt sich diese elastisch aus. Der Druck wird als Druckkraft auf den Balken übertragen. Durch eine geeignete Gestaltung der Druckkammer wird die Verformungsrichtung beeinflusst (Prinzip eines Membranzylinders). Dies geschieht, indem die Steifigkeit der Kammer bzw. die durch den Innendruck beaufschlagten Flächen in die jeweiligen Raumrichtungen angepasst werden. Im Verhältnis zu den anderen Raumrichtungen ist die Steifigkeit in Balkenlängsrichtung deutlich zu minimieren, sodass eine resultierende Krafrichtung vorliegt. Durch die Positionierung der Druckkammer oberhalb der neutralen Faser wird die resultierende Kraft exzentrisch in den Balken eingeleitet. Dadurch entsteht das Aktuierungsmoment. Lässt der Druck nach, verformen sich der Balken und die Druckkammer wieder zurück.

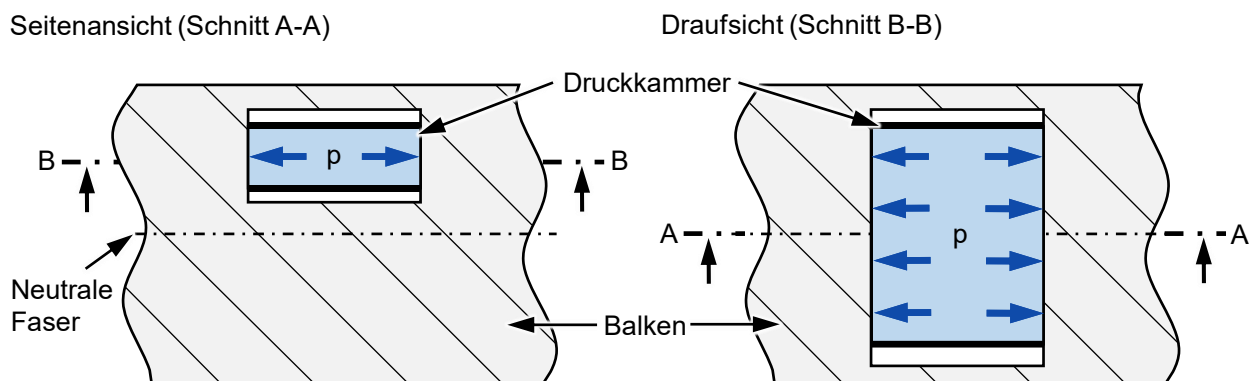


Bild 8.5: Konzeptvariante 2

8.2.2.3 Konzeptvariante 3

Wie bei der Konzeptvariante 2 erfolgt die Druckkraftherzeugung bei der Konzeptvariante 3 hydraulisch. Der Unterschied ist, dass mittels eines Zylinders eine Zugkraft erzeugt wird. Der Zylinder ist unterhalb der neutralen Faser in den Balken einbetoniert. Die Einleitung der Zugkraft in den Balken erfolgt über Zuganker (s. Bild 8.6). Denkbar ist auch eine Anbindung der Zylinderenden an die Stahlarmierungen. Die Wahl der Krafteinleitung ist bei der Bemessung des Balkens bzw. der Ausarbeitung des Aktorkonzepts zu treffen. Durch die Zuganker bzw. Armierungen kann der Abstand der Krafteinleitungspunkte zueinander deutlich vergrößert werden. Dadurch wird die Beeinflussung eines längeren Balkenabschnitts ermöglicht.

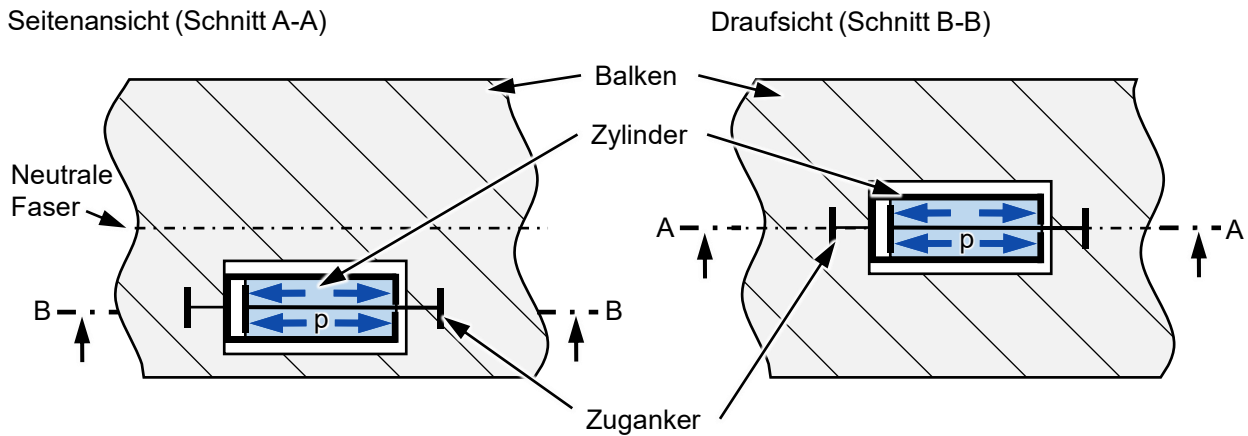


Bild 8.6: Konzeptvariante 3

8.2.2.4 Konzeptvariante 4

Konzeptvariante 4 unterscheidet sich zur Konzeptvariante 2 durch die Wahl des Energiewandlers. In diesem Fall wird die Druckkraft mit Piezokeramiken erzeugt, die zu einem Stapel zusammengefügt sind. Der Piezostapel ist oberhalb der neutralen Faser in den Balken eingelassen. Die exzentrische Kraft resultiert in dem zu erzeugenden Aktuierungsmoment. Der Aufbau ist in Bild 8.7 dargestellt.

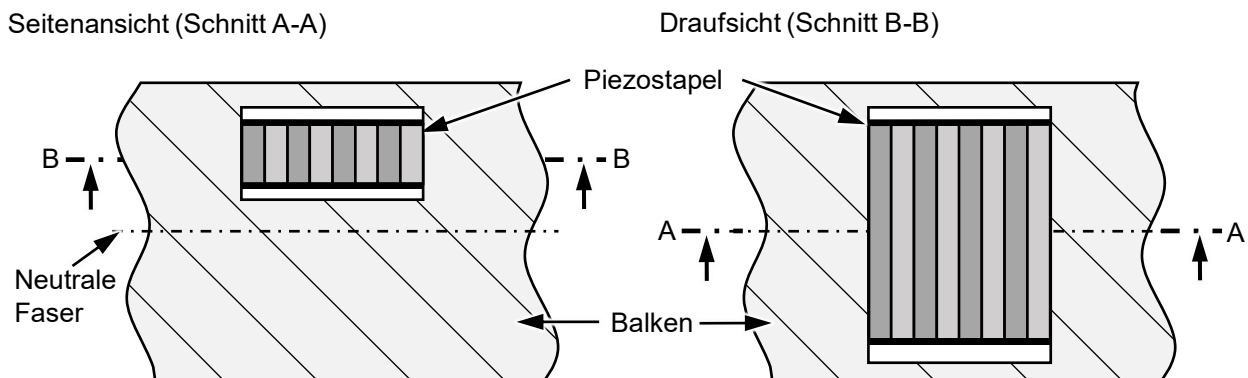


Bild 8.7: Konzeptvariante 4

8.2.2.5 Konzeptvariante 5

Bei Konzeptvariante 5 wird ein Moment von einem Schrittmotor erzeugt und über einen Gewindetrieb in eine Kraft übersetzt (s. Bild 8.8). Im Gegensatz zu den vorherigen Konzeptvarianten kann je nach Drehrichtung des Motors eine Zug- oder Druckkraft erzeugt werden. Die Kräfteinleitung erfolgt über Druckplatten, die mittels Zuganker mit dem Balken verbunden sind. Die Aktoreinheit ist parallel zur Balkenlängsachse ausgerichtet und kann oberhalb und unterhalb der neutralen Faser positioniert werden. Dadurch wirkt die Kraft immer exzentrisch. Die Erzeugung von Zug- und Druckkräften

ermöglicht eine effektive Dämpfung von Biegeschwingungen, da sowohl der Durchbiegung als auch dem Aufstellen des Balkens entgegengewirkt wird.

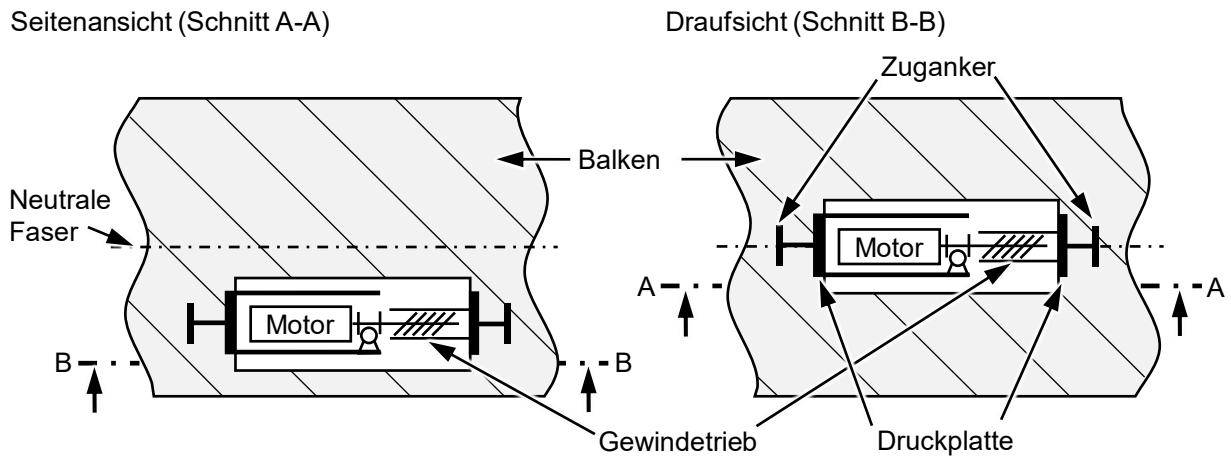


Bild 8.8: Konzeptvariante 5

8.2.2.6 Konzeptvariante 6

Bei Konzeptvariante 6 erzeugt ein Schrittmotor das Aktuierungsmoment. Dieses wird mittels eines Stirnradpaars direkt auf den Balken übertragen. Dazu ist das Abtriebsrad und der Motor über Befestigungsplatten mit dem Balken verbunden (s. Bild 8.8). Durch die Drehung des Motors verkippen die Platten zueinander und das Moment wird induziert. Die Einleitung des Moments erfolgt auf Höhe der neutralen Faser. Entsprechend der Motordrehrichtungen kann das Moment in beide Richtungen wirken.

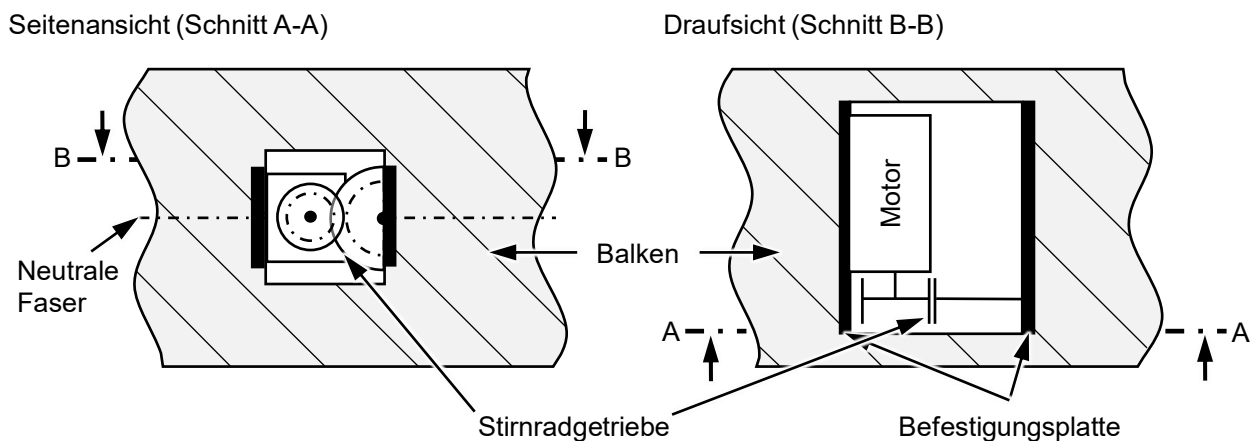


Bild 8.9: Konzeptvariante 6

8.2.3 Bewertung und Auswahl

Für die nachfolgende Ausarbeitung wird eine der genannten Konzeptvarianten ausgewählt. Dazu werden diese zunächst bewertet. Die Bewertungskriterien werden aus der Anforderungsliste abgeleitet und mittels eines paarweisen Vergleichs gewichtet

(s. Anhang A.3). Aufgrund der Integration der Aktorbaugruppe in den Balken und der daraus resultierenden erschwerten Zugänglichkeit, wird die Zuverlässigkeit und Lebensdauer als besonders wichtig erachtet. Analog zu den Kapiteln 6.3.3 und 7.2.3 erfolgt die Bewertung auf einer Skala von 0 bis 4 Punkte. Die Bewertung ist in Tabelle 8.4 gegeben.

Bewertungskriterien	Gewichtung	Konzept-variante 1		Konzept-variante 2		Konzept-variante 3		Konzept-variante 4		Konzept-variante 5		Konzept-variante 6	
		Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert
hohe Realisierungschance im gegebenen Bauraum	14,29 %	1	0,14	4	0,57	4	0,57	4	0,57	3	0,43	3	0,43
geringe Anschaffungs- und Herstellungskosten	14,29 %	1	0,14	4	0,57	3	0,43	0	0	2	0,29	3	0,43
einfache Fertigung	7,14 %	2	0,14	3	0,21	3	0,21	4	0,29	3	0,21	3	0,21
einfache Montage	3,57 %	2	0,07	4	0,14	4	0,14	4	0,14	2	0,07	3	0,11
lange Lebensdauer	17,86 %	1	0,18	4	0,71	2	0,36	2	0,36	2	0,36	2	0,36
geringe Systemkomplexität	7,14 %	1	0,07	4	0,29	4	0,29	4	0,29	3	0,21	3	0,21
hohe Ausfallsicherheit	21,43 %	0	0	3	0,64	2	0,43	2	0,43	1	0,21	1	0,21
geringer Entwicklungsaufwand	14,29 %	2	0,29	3	0,43	4	0,57	3	0,43	2	0,29	4	0,57
Summe		10	1,04	29	3,57	26	3,00	23	2,50	18	20,7	22	2,54
Rangfolge		6		1		2		3		5		4	

Tabelle 8.4: Bewertung der Konzeptvarianten für den zu aktuierenden Balken

Die Konzeptvarianten 1, 5 und 6 beinhalten bewegliche Bauteile. Im Vergleich zu den anderen Varianten wird dies bei der Bewertung der Lebensdauer und Ausfallsicherheit als kritisch erachtet. Weiterhin erfordern diese Konzepte einen größeren Bauraum. Die auf einem Piezoaktor basierende Konzeptvariante 4 enthält zwar keine beweglichen Bauteile, allerdings kann die Funktionsfähigkeit über einen mehrjährigen Zeitraum von Herstellerseite aus nicht gewährleistet werden. Hinzu kommt, dass die durch einen Hersteller abgeschätzten Kosten zur Herstellung und Anschaffung der Piezoaktoren sowie der dazu benötigten Elektronikkomponenten das Projektbudget übersteigen. Als zielführend stellen sich die Konzeptvarianten 2 und 3 heraus. Aufgrund der hohen Leistungsdichte der Hydraulik ist die Umsetzung innerhalb des Balkens realisierbar. Konzeptvariante 3 schneidet aufgrund der abzudichtenden Kolbenstange in Bezug auf Ausfallsicherheit und Lebensdauer schlechter ab. Das am besten bewertete Konzept ist die Konzeptvariante 2. Diese wird im folgenden Kapitel ausdetailliert.

8.3 Entwurf

Die Aufgabe des Aktors ist die Erzeugung einer Druckkraft in Richtung der Balkenlängsachse. Da der hydraulische Druck in alle Raumrichtungen wirkt, ist dieser entsprechend zu kanalisieren. Hierfür werden die durch den Druck beaufschlagten Flächen der Druckkammer in der zu erzeugenden Krafrichtung möglichst groß gestaltet, wohingegen alle anderen Innenflächen minimiert werden. Die Druckkammer ist als Schweißbaugruppe gestaltet. Diese besteht aus zwei kreisförmigen Deckblechen, die durch einen Ring als Abstandhalter voneinander getrennt sind. Die Bleche sind jeweils 2 mm dick und bestehen aus dem Baustahl S235. Durch die Ringbreite von 5 mm wird die Steifigkeit der Druckkammer in radialer Richtung erhöht, sodass die Hauptausdehnung senkrecht zu den Deckblechen erfolgt. Der Durchmesser der Druckkammer von 100 mm wird so gewählt, dass mindestens 15 mm Betonüberdeckung zur Balkenoberseite vorhanden sind. Die Versorgung mit Drucköl erfolgt über die von unten kommende Druckleitung. Die Druckleitung wird zur besseren Zugänglichkeit für den Versuchsbetrieb direkt nach außen geführt und nicht innerhalb des Balkens gebündelt. Daher tritt die von der Druckkammer kommende Leitung auf Höhe der neutralen Faser aus dem Balken aus. In diesem Bereich liegt die geringste Beanspruchung vor und der Einfluss auf die Festigkeit des Balkens ist durch die eingebrachte Kerbe vernachlässigbar. Um die vollständige Befüllung der Druckkammer mit Öl zu gewährleisten, ist ein weiteres Rohr zur Entlüftung angebracht. Dieses wird genau

zwischen zwei benachbarten Aktoren aus dem Balken herausgeführt, da in direkter Umgebung der Druckkammer die Beanspruchung des Betons durch die Aktuierung am größten ist. Mit dieser Position wird die Kerbwirkung möglichst minimiert. Nach Entweichen der Luft wird das Rohr mit einem Verschlussstopfen abgedichtet. Der Aufbau ist in Bild 8.10 dargestellt. [BURGHARDT22, S. 38]

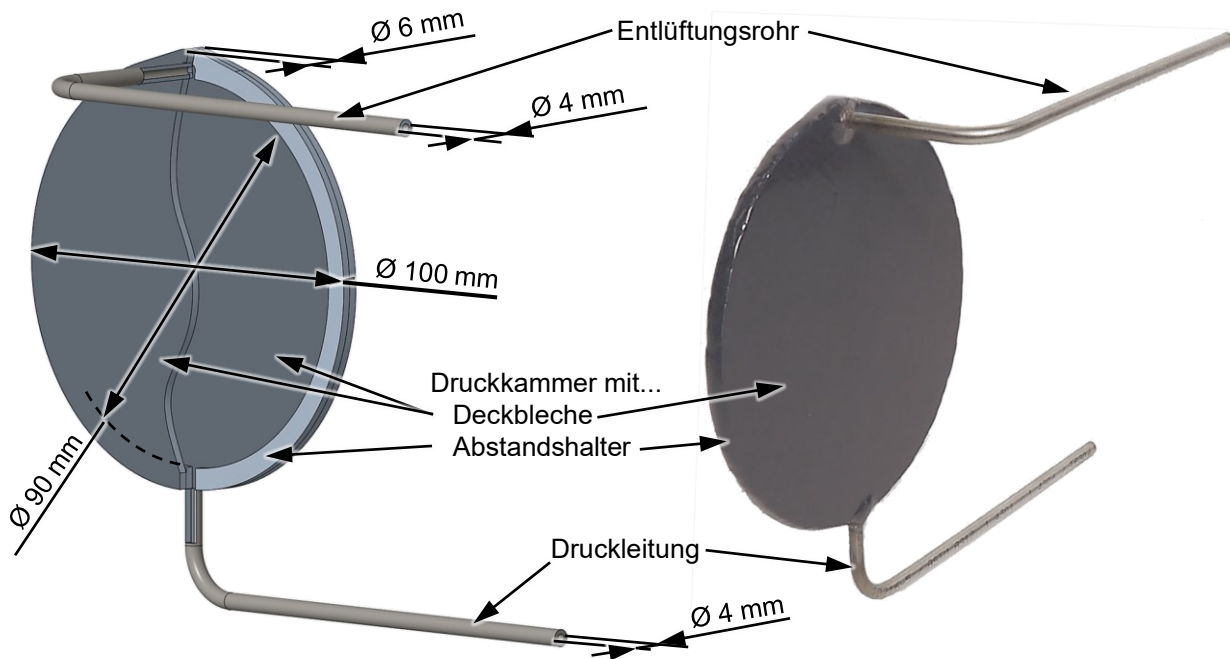


Bild 8.10: Entwurf (links) und Prototyp (rechts) der Druckkammer nach [BURGHARDT22, S. 38]

Zur Auslegung der Komponenten ist zuerst der notwendige hydraulische Druck zu bestimmen. Dies erfolgt, indem das durch äußere Belastungen F verursachte Biegemoment $M_q(x)$ mit dem mittels der Aktoren erzeugten Moment $M_{A,j}$ gleichgesetzt wird. Die Evaluation der Balkenaktuierung erfolgt in einem Vier-Punkt-Biegeversuch mit äquidistantem Abstand zwischen den Auflagern bzw. Kräfteinleitungspunkten. Mit dem Abstand l zwischen den unteren Auflagepunkten ergibt sich aus der Schnittgrößenbestimmung das Biegemoment $M_{q,j}$ an der Stelle x ($0 \leq x \leq l$) zu:

$$M_{q,j}(x) = \begin{cases} \frac{F}{2}x, & x \leq \frac{l}{3} \\ \frac{F}{6}l, & \frac{l}{3} < x \leq \frac{2 \cdot l}{3} \\ \frac{F}{2}(l-x), & \frac{2 \cdot l}{3} \leq x \end{cases} \quad (8.1)$$

Die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und des Verlaufs des Biegemoments ist in Bild 8.11 gegeben.

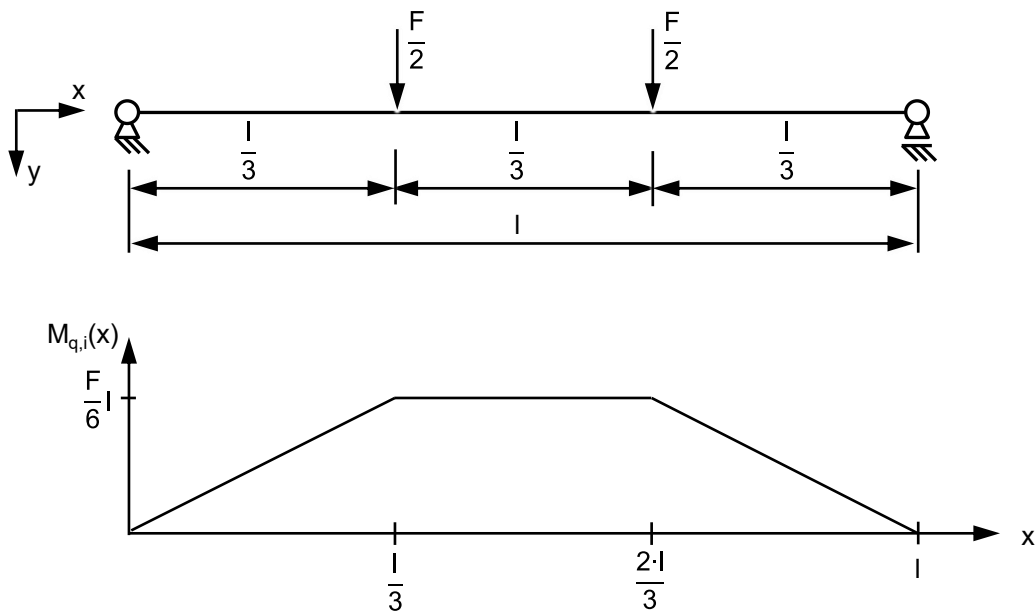


Bild 8.11: Schematische Darstellung des Vier-Punkt-Biegeversuchs (oben) und Verlauf des Biegemoments (unten)

Ein Aktor j besitzt die Druckflächen $A_{A,j}$, an denen der hydraulische Druck $p_{A,j}$ wirkt, und ist mit der Exzentrizität zur neutralen Faser $h_{A,j}$ positioniert. Das erzeugte Aktuierungsmoment $M_{A,j}$ ist [KELLETER20, S. 5]:

$$M_{A,j} = A_{A,j} \cdot h_{A,j} \cdot p_{A,j} \quad (8.2)$$

Durch das Gleichsetzen der Momente aus den Gleichungen (8.1) und (8.2) wird der zur Aktuierung der Stelle x benötigte Druck $p_{A,j}$ berechnet [KELLETER20, S. 6]:

$$p_{A,j}(x) = \frac{M_{q,j}(x)}{A_{A,j} \cdot h_{A,j}} \quad (8.3)$$

Mit der Länge $l = 4000$ mm zwischen den unteren Auflagern, der Exzentrizität $h_{A,j} = 85$ mm (15 mm Betonüberdeckung), der Druckfläche mit dem Durchmesser $d = 90$ mm und der Gesamtbelastung von $F = 10$ kN ergibt sich ein benötigter Maximaldruck von ca. 123,5 bar. Mit diesem wird das Hydrauliksystem ausgelegt. Die Überprüfung der zulässigen elastischen Verformung der Druckkammer erfolgt mittels FEM-Simulation.

Weiterhin ist die Anzahl der benötigten Aktoren bzw. der Abstand zwischen den Kräfteinleitungsflächen zu bestimmen. Für einen gleichmäßigen Verformungsverlauf (idealerweise liegt nach der Aktuierung keine Verformung vor) ist ein homogener Spannungsverlauf innerhalb des Balkens anzustreben. Durch die Aktuierung werden im Bereich der Kräfteinleitungsflächen lokal Spannungen erzeugt. Gemäß dem Prinzip von

St. Venant homogenisiert sich der Spannungsverlauf innerhalb eines Körpers, ausgehend vom Kräfteinleitungspunkt [MISES45]. Dies bedeutet, dass der optimale Abstand vorliegt, wenn der Spannungsverlauf zwischen den Kräfteinleitungsflächen zweier benachbarter Aktoreinheiten konstant ist. Die Ermittlung des Abstands erfolgt in [KELLETER20, S. 6 ff.] mittels einer numerischen FE-Simulation. In [BOSCH22] wird hierzu ein analytischer Ansatz vorgestellt. Beide Ansätze führen zu einem Abstand von ca. 100 mm zwischen den Aktoren. Die Darstellung eines Balkens mit integrierten Aktoren ist in Bild 8.12 gegeben.

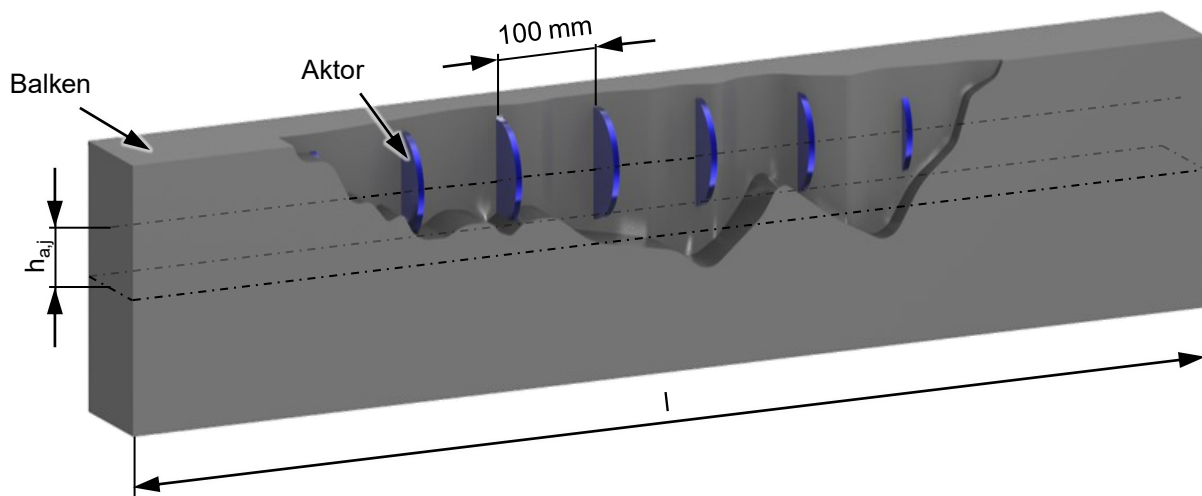


Bild 8.12: Darstellung eines Balkens mit integrierten Aktoren

8.4 Experimentelle Evaluation

Vor der Evaluation an einem Balken mit realitätsnahen Abmessungen, wird die Funktion an kleineren Balken im Laborversuch getestet. Im folgenden Kapitel wird der Aufbau dieser Versuche vorgestellt. Weiterhin wird exemplarisch das Ergebnis einer der Untersuchungen unter Laborbedingungen gezeigt. In Kapitel 8.4.2 erfolgt die experimentelle Evaluation an einem Prototyp mit realitätsnahen Abmessungen.

8.4.1 Versuche unter Laborbedingungen

8.4.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Balken für die Vorversuche sind 1200 mm lang, 200 mm hoch und 100 mm breit. Als Material wird ein Beton der Festigkeitsklasse C35/35 verwendet. Die Balken sind mit Stahlarmierungen verstärkt (BSt 500; Durchmesser: 6 mm). Genauere Informationen zur Bewehrung, Schalung und Herstellung der Balken sind in [KELLETER22, S. 80] gegeben. Aufgrund der geringeren Breite des Balkens wird der Außendurchmesser des Aktors auf

80 mm reduziert. Da der Balken beim Befüllen der Druckkammern mit Öl manuell bewegt werden kann, wird das Entlüftungsrohr nicht benötigt. Vor den Versuchen sind die Druckkammern einzeln mit Öl zu befüllen. Dabei werden die Balken bewegt, bis keine Luft mehr aus den Druckleitungen austritt. Anschließend werden die Leitungen mit der Druckversorgungseinheit verbunden.

Der Versuchsaufbau ist in Bild 8.13 dargestellt. Folgende Komponenten werden verwendet [KELLETER22, S. 83 ff.]:

- Zug-Druck-Prüfmaschine (Materialprüfmaschine Zwick 1474) zur Aufbringung der Last
- Auflager, bestehend aus:
 - halbierten Stahlzylindern, die eine Drehung um die Auflagerachse ermöglichen,
 - Stahlplatten, auf denen der Balken aufliegt,
 - Polytetrafluorethylen (PTFE)-Platten, die die Stahlbauteile voneinander trennen und reibungsbedingte Auflagerreaktionen minimieren.
- Hydraulikaggregat (Hydac Hybox Basic) zur Erzeugung des hydraulischen Drucks
- Proportionalventile zur Drucksteuerung
- Drucksensoren (SICK PBT-RB400) zur Druckmessung
- Messung der Balkendurchbiegung in Feldmitte mittels eines Laserdistanzsensor (SICK OD5000) und auf der Ober- und Unterseite des Balkens angebrachter DMS
- Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS; Bachmann M1-Steuerungssystem) zur Erfassung und Verarbeitung der Sensorsignale sowie zur Ansteuerung der Ventile
- Programmierung der Steuerungs-/Regelungseinheit mit Matlab/Simulink

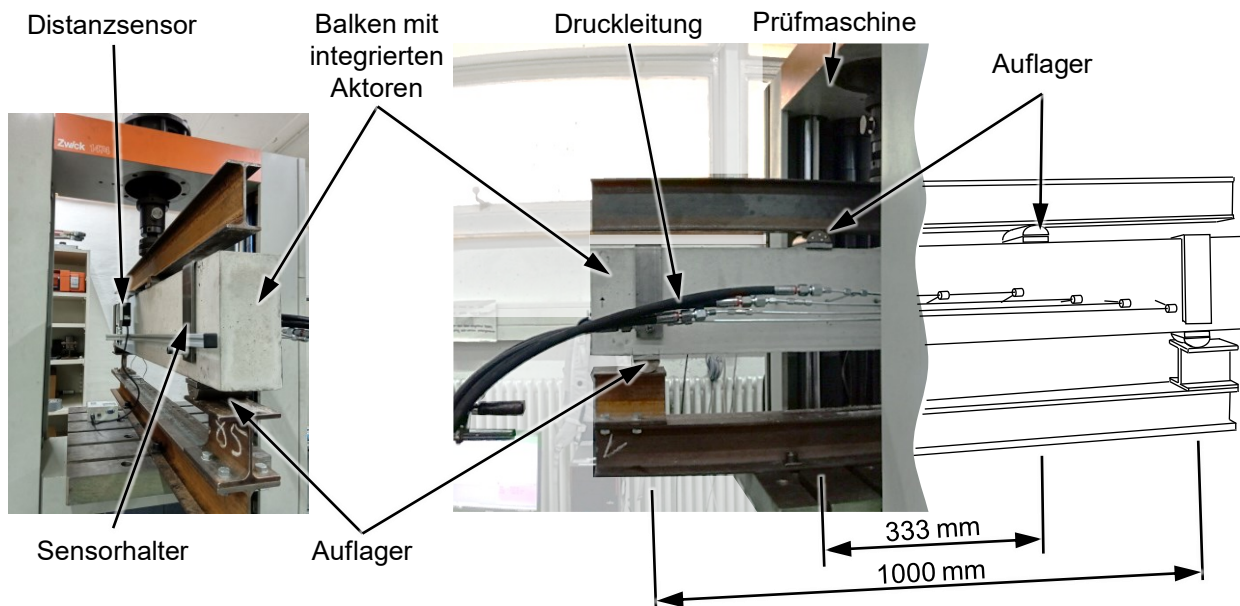


Bild 8.13: Versuchsaufbau im Labor

Zum Funktionsnachweis werden unterschiedliche Versuche durchgeführt. Dabei wird gezeigt, dass mittels Aktuierung eine bereits bestehende Durchbiegung kompensiert werden kann. Ebenso ist ein geregelter Betrieb möglich, bei dem die Durchbiegung aufgrund einer dynamischen Belastung stets minimal ist. Weiterhin werden verschiedene Konfigurationen mit einem oder mehreren Aktoren und unterschiedlichen Belastungen getestet. Anhand von Versuchen, bei denen gezielt fehlerhaft gegen eine Belastung aktuiert wird, werden Schädigungsmechanismen untersucht, z. B. die Rissbildung. Die Versuche sowie die Vergleiche mit Simulationsergebnissen werden detailliert in [KELLETER22, S. 83 ff.] vorgestellt.

8.4.1.2 Versuchsergebnis

Beispielhaft wird hier das Ergebnis eines Versuchs gezeigt. Zur besseren Vergleichbarkeit wird zunächst der Versuch anhand eines passiven Balkens ohne integrierte Aktoren vorgestellt. Der passive und der zu aktuierte Balken besitzen die gleichen Abmaße und bestehen aus demselben Material (C35/45). Ebenso ist der Prüfaufbau identisch. Der passive Balken wird mit einer zunehmenden Kraft bis $F = 8 \text{ kN}$ belastet. Mit steigender Belastung nimmt die Durchbiegung bis zu einem Maximum von $u = 0,062 \text{ mm}$ zu. Nach einer Haltedauer von 300 Sekunden wird der Balken bis zum Versagen belastet. Da zum Vergleich mit dem zu aktuierten Balken nur die Durchbiegung bei der Maximallast relevant ist, zeigt Bild 8.14 die ersten 150 Sekunden des Versuchs. [KELLETER22, S. 85 ff.]

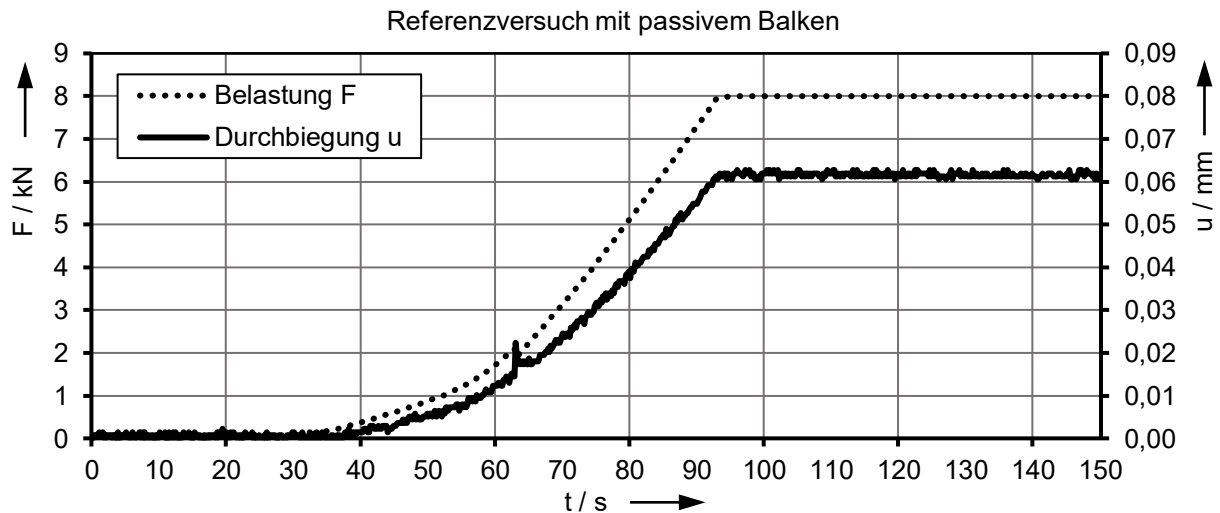


Bild 8.14: Belastung F und Durchbiegung u in Abhängigkeit der Zeit t bei einem Versuch mit einem passiven Referenzbalken nach [KELLETER22, S. 86]

In dem zu aktierenden Balken sind zehn Aktoren mit einem Abstand von jeweils 100 mm zueinander einbetoniert. Der Druck in den Druckkammern wird individuell eingestellt. Die Aktuierung erfolgt geregelt. Bild 8.15 zeigt die von der Prüfmaschine aufgebraachte Kraft F und die Durchbiegung u des Balkens. Bei $t = 4 \text{ s}$ wird die Regelung eingeschaltet. Danach liegt der minimal einstellbare Systemdruck von $p = 5 \text{ bar}$ an. Diese Druckerhöhung bewirkt das Hochbiegen des Balkens auf etwa $u = -0,15 \text{ mm}$. Ab $t = 118 \text{ s}$ nimmt die Belastung zu. Die Maximallast liegt ab $t = 158 \text{ s}$ bis $t = 218 \text{ s}$ an. In diesem Zeitraum schwingt die Belastung zwischen $F = 7,77 \text{ kN}$ und $F = 8,28 \text{ kN}$ sowie die Durchbiegung zwischen $u = 0,01 \text{ mm}$ und $u = -0,035 \text{ mm}$. Danach erfolgt die vollständige Entlastung des Balkens. [KELLETER22, S. 100 ff.]

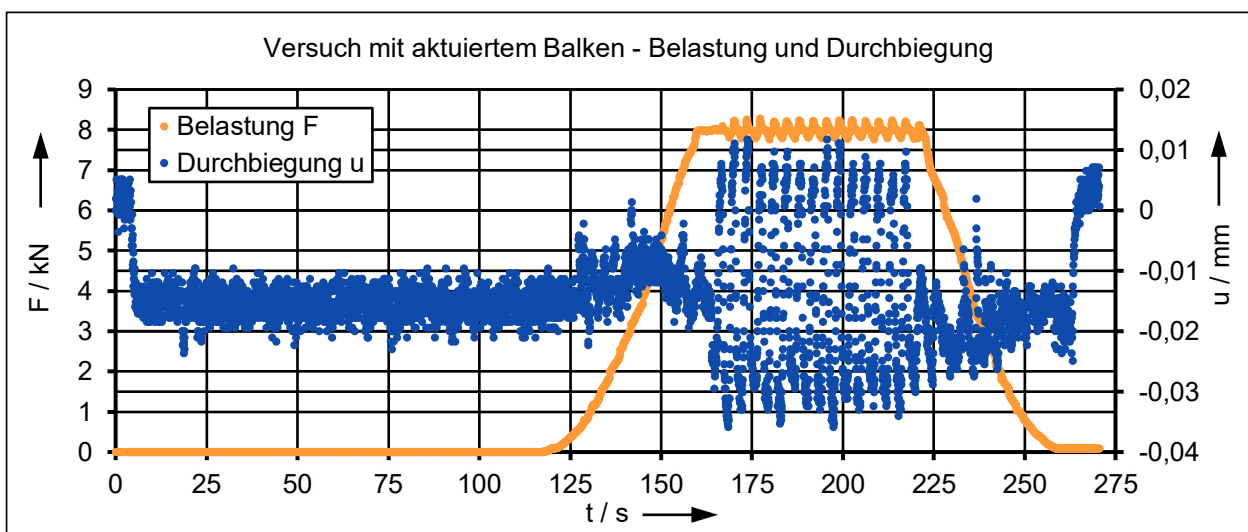


Bild 8.15: Belastung F und Durchbiegung u in Abhängigkeit der Zeit t mit einem aktuierten Balken nach [KELLETER22, S. 85 ff.]

In Bild 8.16 wird der Verlauf der Drücke in den Aktoren gezeigt. Der Druckanstieg auf den Systemdruck bei $t = 4$ s ist erkennbar. Ab $t = 125$ s steigen die Drücke leicht zeitverzögert an. Im Zeitraum der maximalen Belastung schwanken die Drücke deutlich. In den mittleren Aktoren betragen die gemessenen Werte $p = 73 \pm 6$ bar. Eine Vermutung ist, dass die Regelungen der Prüfmaschine und der Aktuierung sich gegenseitig anregen. Eine genaue Ursache konnte nicht identifiziert werden. Mit nachlassender Belastung sinken die Drücke in den Aktoren. [KELLETER22, S. 100 ff.]

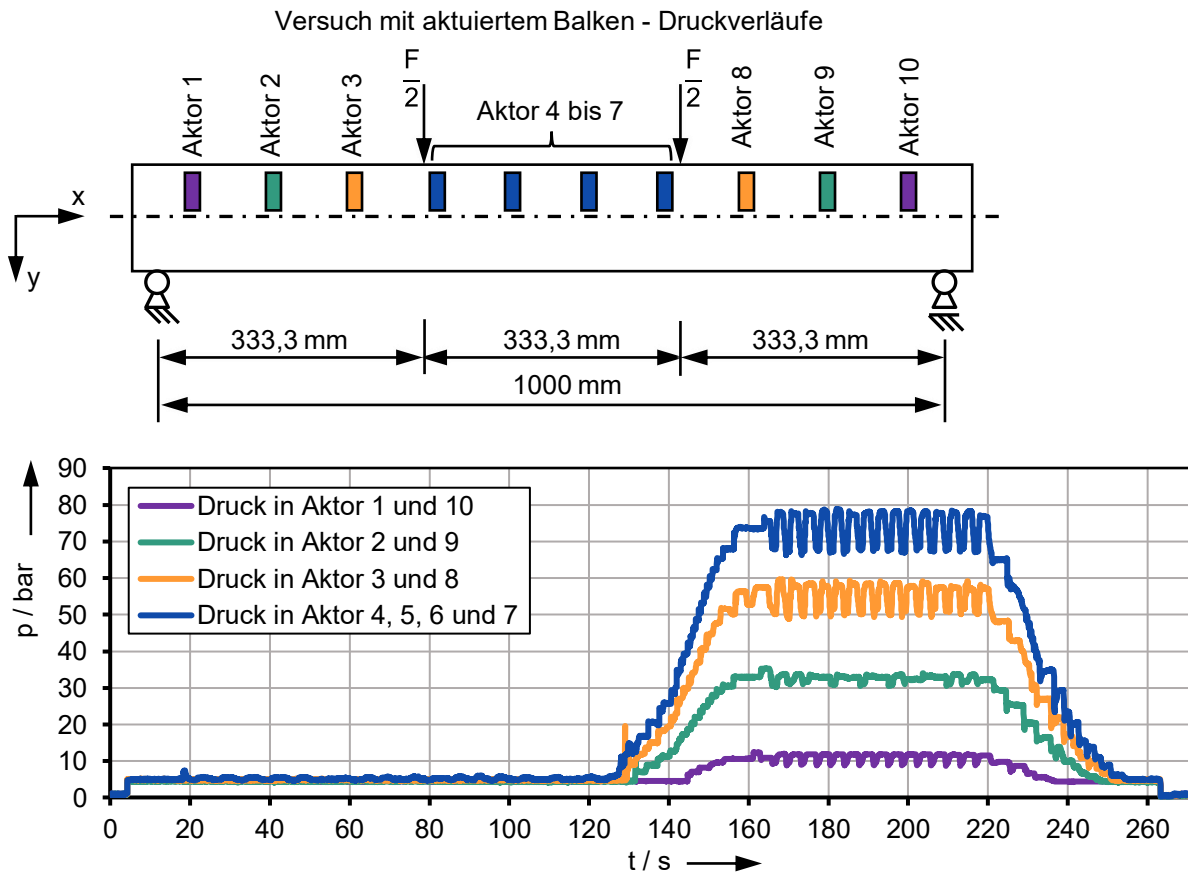


Bild 8.16: Druckverläufe in den Aktoren nach [KELLETER22, S. 103]

Insgesamt zeigen die Versuche, dass die Funktion der Aktoren gegeben und eine Minimierung der Durchbiegung möglich ist.

8.4.2 Versuch mit einem Balken mit realitätsnahen Abmessungen

8.4.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Versuche zur experimentellen Evaluation finden auf der Experimentalplattform des SFB 1244 statt. Wie auch bei den Versuchen unter Laborbedingungen werden Vier-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Das Forschungsobjekt ist ein Balken aus Stahlbeton, der 4,4 m lang, 0,3 m hoch und 0,15 m breit ist. Der Beton hat die Festigkeitsklasse

C35/45. Zur Aufnahme von Zugspannungen werden 10 mm dicke Bewehrungsstähle (B500 S) eingesetzt, die parallel zur Längsrichtung des Balkens verlaufen. Zusätzlich befindet sich jeweils ein Querkraftbügel mit einem Stabdurchmesser von 6 mm zwischen zwei Aktoren. Das Gewicht des Balkens beträgt ca. 490 kg. Im Versuch wird der Balken mit einer Maximallast von einer Tonne (ca. 9,81 kN) belastet. Damit ist die Belastung doppelt so groß wie das Eigengewicht des Balkens. Bei gewöhnlichen Wohn- oder Bürogebäuden ist das Verhältnis bei biegebeanspruchten Tragwerkselementen umgekehrt. In den Balken sind insgesamt 43 der in Kapitel 8.3 vorgestellten Aktoren integriert. Diese sind in der oberen Hälfte (Druckzone bei passiven Balken) mit einem Abstand von 100 mm zueinander positioniert. Bild 8.17 zeigt eine Skizze des Balkens mit den integrierten Aktoren und den entsprechenden Abmessungen. [BURGHARDT22, S. 3 f.]

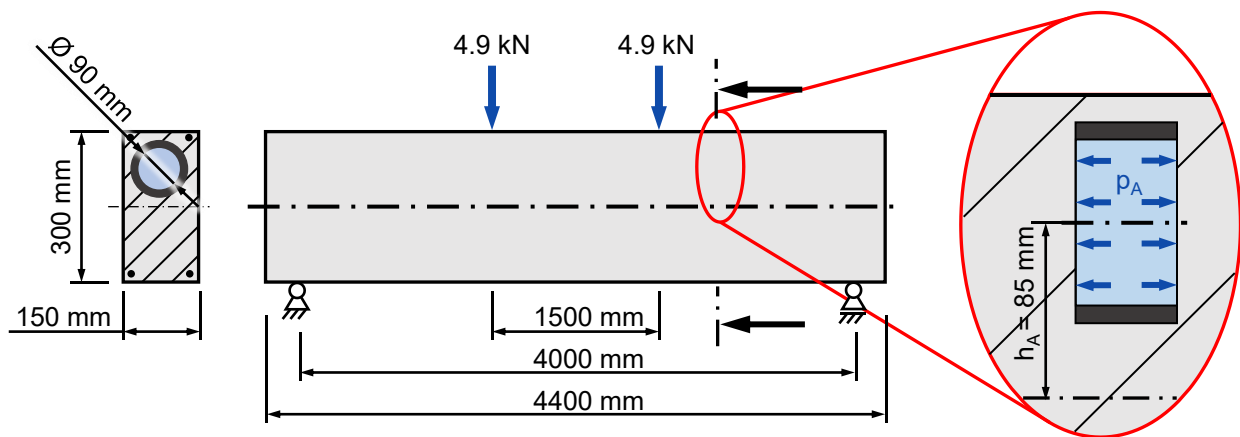


Bild 8.17: Relevante Abmessungen des Balkens mit integrierten Aktoren im Vier-Punkt-Biegeversuchs nach [BURGHARDT22, S. 4 f.]

Durch die seitlich aus dem Balken herauskommenden Druckleitungen besteht die Möglichkeit einer individuellen Ansteuerung jeder Druckkammer. Somit ist eine Aktuierung hinsichtlich jedes beliebigen Lastfalls denkbar. Dies erfordert jedoch viele Komponenten, z. B. ein Proportionalventil pro Druckkammer und entsprechende Hardware zum Ansteuern. Da bei den Versuchen der Lastfall bekannt ist, werden die Druckkammern zu insgesamt sechs Druckstufen zusammengeschaltet, um den erforderlichen Aufwand an Verbindungs-, Ventil- und Steuerungstechnik zu reduzieren. In Bild 8.18 ist die Zusammenschaltung veranschaulicht. Die angegebenen Maximaldrücke werden mit der Gleichung (8.3) und den in Bild 8.17 gezeigten Maßen berechnet. Bei einer Last von $F = 9,81 \text{ kN}$ beträgt der maximale hydraulische Druck $p_{A,6,\max} = 120,5 \text{ bar}$. [BURGHARDT22, S. 4 f.]

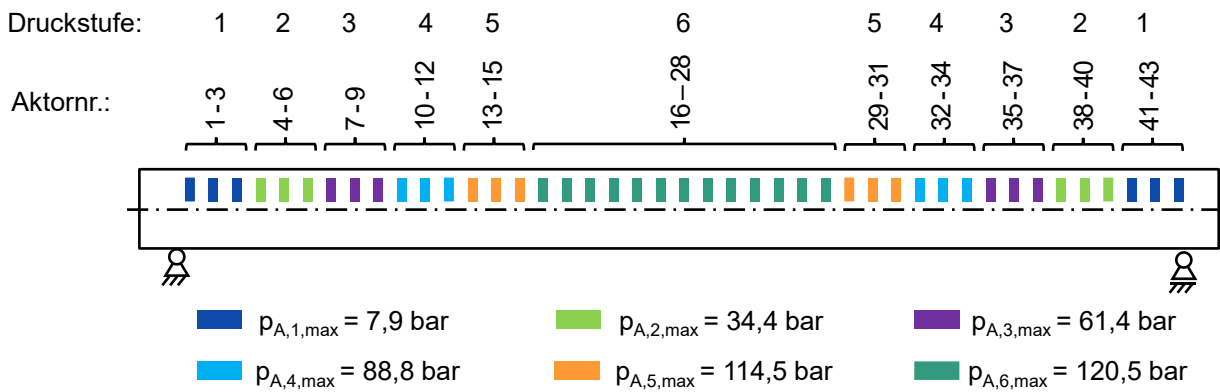


Bild 8.18: Zusammenlegung der Aktoren zu Druckstufen nach [BURGHARDT22, S. 5]

Der Balken liegt mit beiden Enden auf Stützen auf. Die Auflager lassen eine Bewegung in Längsrichtung zu. Die Belastung des Balkens erfolgt mit Gewichten. Dazu werden Stahlbarren über Federn an den Kräfteinleitungspunkten aufgehängt. Durch das Ablassen der Barren wird der Balken belastet. Zum Absenken und Anheben wird ein Hubwagen eingesetzt. Die Position der Barren wird mit einem Laserdistanzsensor (SICK OD Max) erfasst. Über die davor experimentell bestimmte Federrate wird die wirkende Last berechnet. Wie auch bei den Laborversuchen ist zur Messung der Durchbiegung jeweils ein DMS an der Ober- und Unterseite des Balkens in Feldmitte angebracht. Zusätzlich wird die Durchbiegung in Balkenmitte mit einem Laserdistanzsensor (SICK OD5000-C30T05) detektiert. Der Druck in den Druckstufen wird mittels Sensoren (SICK PBT-RB400) gemessen und über Proportionalventile eingestellt. Ein Hydraulikaggregat (Hydac Hybox Basic) erzeugt den benötigten Druck. Zur Erfassung der Sensordaten sowie zur Ansteuerung des Aggregats und der Ventile wird eine SPS (Bachmann M1-Steuerungssystem) verwendet. Die Steuerung erfolgt mit Matlab/Simulink. Der Versuchsaufbau ist in Bild 8.19 dargestellt. [BURGHARDT22, S. 5]

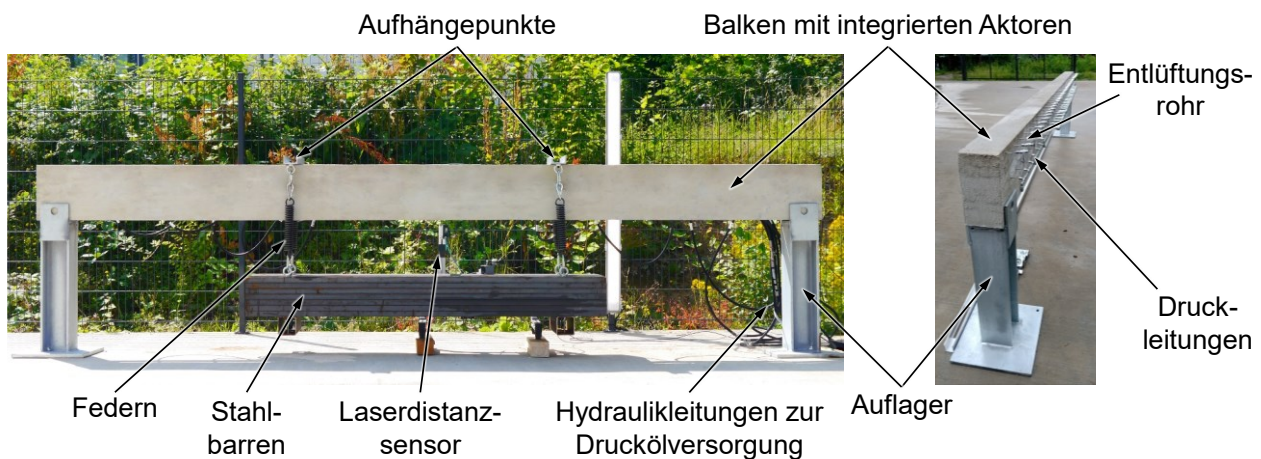


Bild 8.19: Versuchsaufbau nach [BURGHARDT22, S. 6]

Mit dem Balken werden Vier-Punkt-Biegeversuche mit unterschiedlichen Gewichten durchgeführt. Zunächst wird die Verformung des Balkens ohne Aktuierung untersucht. Mit diesen Referenzversuchen werden die Versuche mit Aktuierung verglichen. Die Versuche mit Aktuierung erfolgen geregelt. Dabei ist das Ziel die Verformung des Balkens zu verhindern und diesen stets in der Ausgangslage zu halten. [BURGHARDT22, S. 5 f.]

8.4.2.2 Versuchsergebnis

Bei dem zunächst vorgestellten Referenzversuch beträgt die Maximallast $F = 9,81 \text{ kN}$. Der Lastabtrag erfolgt passiv, d. h. der Balken wird nicht aktuiert. Das Versuchsergebnis ist in Bild 8.20 zu sehen. Die Belastung des Balkens erfolgt ab $t = 11 \text{ s}$. Innerhalb von 4 s wird die Last vollständig aufgebracht und bis $t = 40 \text{ s}$ gehalten.

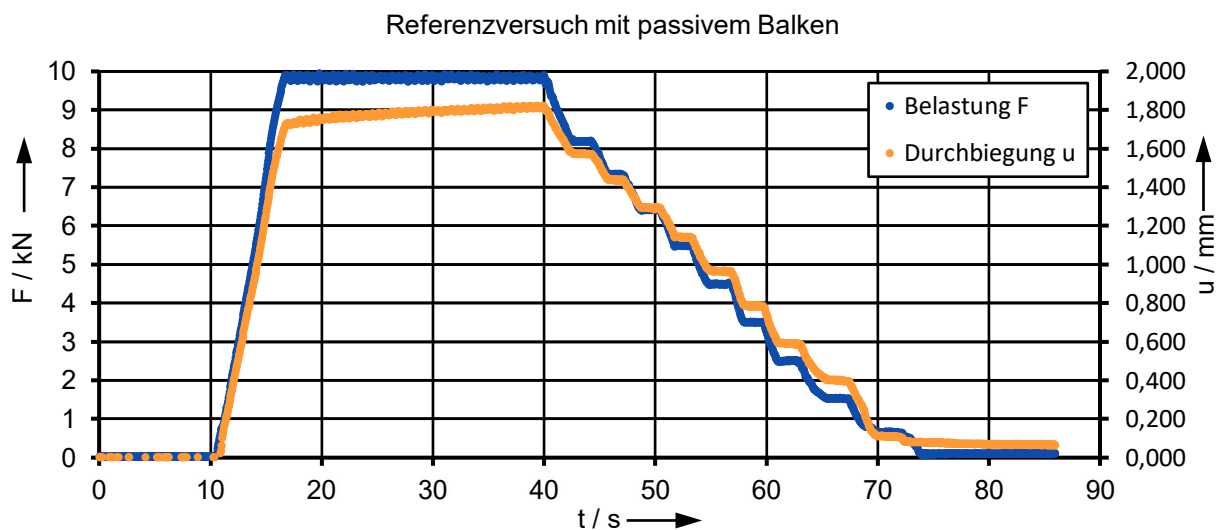


Bild 8.20: Belastung F und Durchbiegung u in Abhängigkeit der Zeit t bei einem Versuch mit einem passiven Referenzbalken nach [BURGHARDT22, S. 6]

Aufgrund der federnden Aufhängung werden die Gewichte beim Ablassen, d. h. beim Aufbringen der Last, in Schwingung versetzt. Die Schwingung überträgt sich auf den Balken und ist im Verformungsverlauf erkennbar (s. Bild 8.21). Während der Zeit, in der die vollständige Maximallast anliegt, nimmt die Durchbiegung weiterhin zu. Dies ist auf Setzerscheinungen in den Auflager- und Aufhängungspunkten zurückzuführen. Die maximale Durchbiegung beträgt $u = 1,8 \text{ mm}$. Die stufenweise Entlastung ist auf die Pumpbewegung des Hubwagens zurückzuführen, mit dem die Gewichte angehoben werden. Das Setzen des Balkens ist nach Versuchsende erkennbar, da die gemessene Durchbiegung nicht auf den Ausgangswert zurückkehrt. [BURGHARDT22, S. 6]

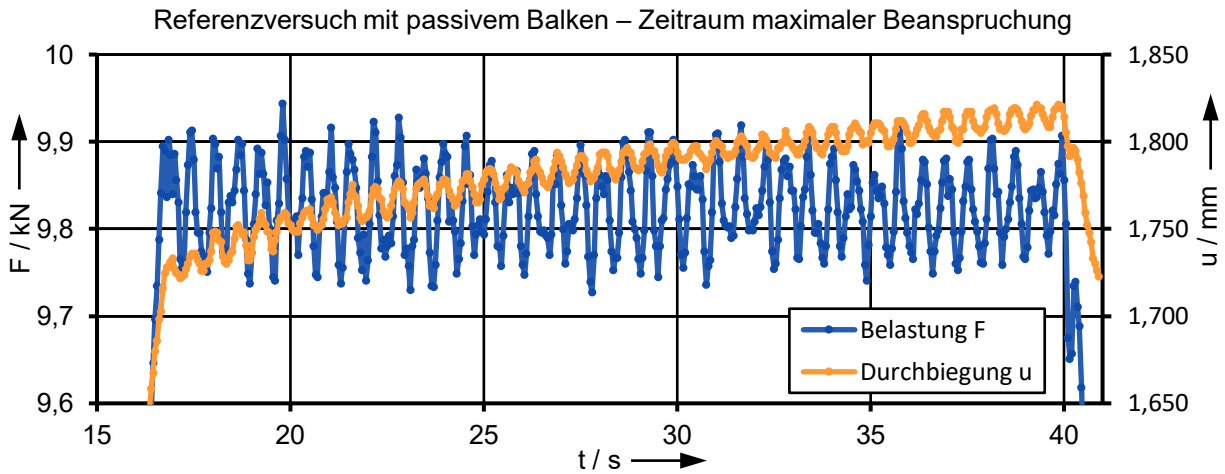


Bild 8.21: Schwingende Belastung F und Durchbiegung u

Der Versuch wird mit geregelter Aktuierung wiederholt, d. h. die hydraulischen Drücke in den Druckkammern werden entsprechend der Balkendurchbiegung angepasst. Bild 8.22 zeigt die Verläufe der Belastung F und der Durchbiegung u in Abhängigkeit von der Zeit t. Die Last wird ab t = 5 s aufgebracht. Zwischen t = 8 s und t = 50 s liegt die Maximallast von F = 9,81 kN an. Auch hier zeigt sich ein Schwingen der Last. Beim Entlasten ist wieder die stufenförmige Bewegung erkennbar. Die Durchbiegung des Balkens schwankt während des Versuchs um $u = 0,0 \pm 0,2$ mm, d. h. die Durchbiegung wird kompensiert. [BURGHARDT22, S. 6 f.]

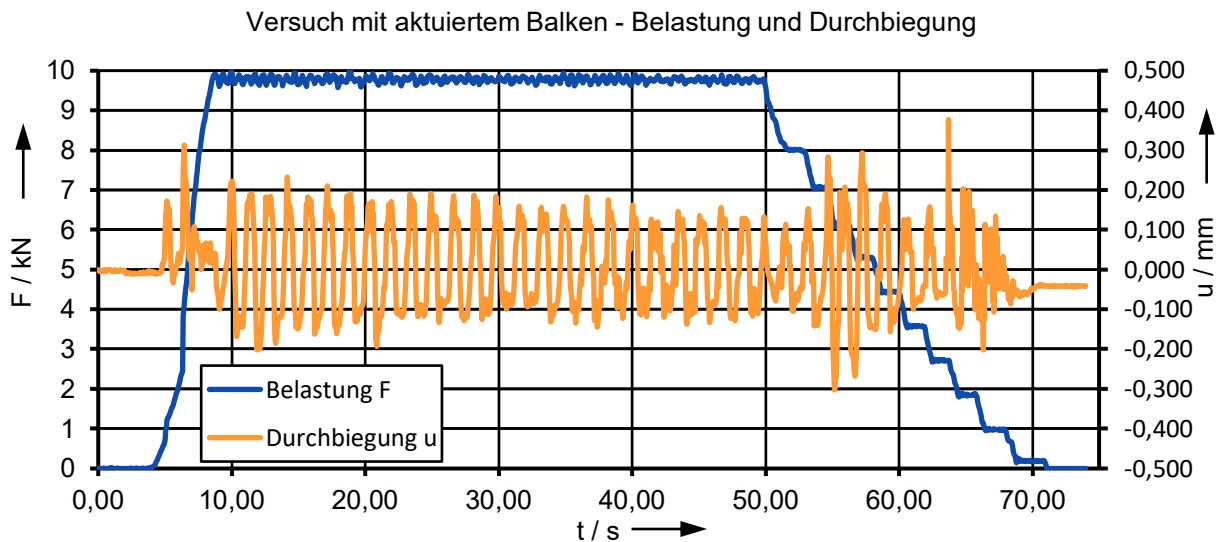


Bild 8.22: Belastung F und Durchbiegung u in Abhängigkeit der Zeit t mit einem aktuierten Balken nach [BURGHARDT22, S. 7]

Wie in Bild 8.23 zu sehen ist, reagiert die Druckregelung entsprechend der Belastung. Die hydraulischen Drücke schwanken jedoch stark, besonders in den mittleren Aktoren

(s. Bild 8.18; Druckstufen 5 und 6). Ein möglicher Grund ist, dass die Proportionalventile zu groß gewählt wurden, um das zur Aktuierung benötigte geringe Ölvolumen zu kontrollieren. Aufgrund der Größe reagieren die Ventile träge auf die Steuersignale und fangen zu schwingen an. Der dadurch entstehende pulsierende Druck zeigt sich dann im Schwingen der Balkendurchbiegung (s. Bild 8.22). [BURGHARDT22, S. 6 f.]

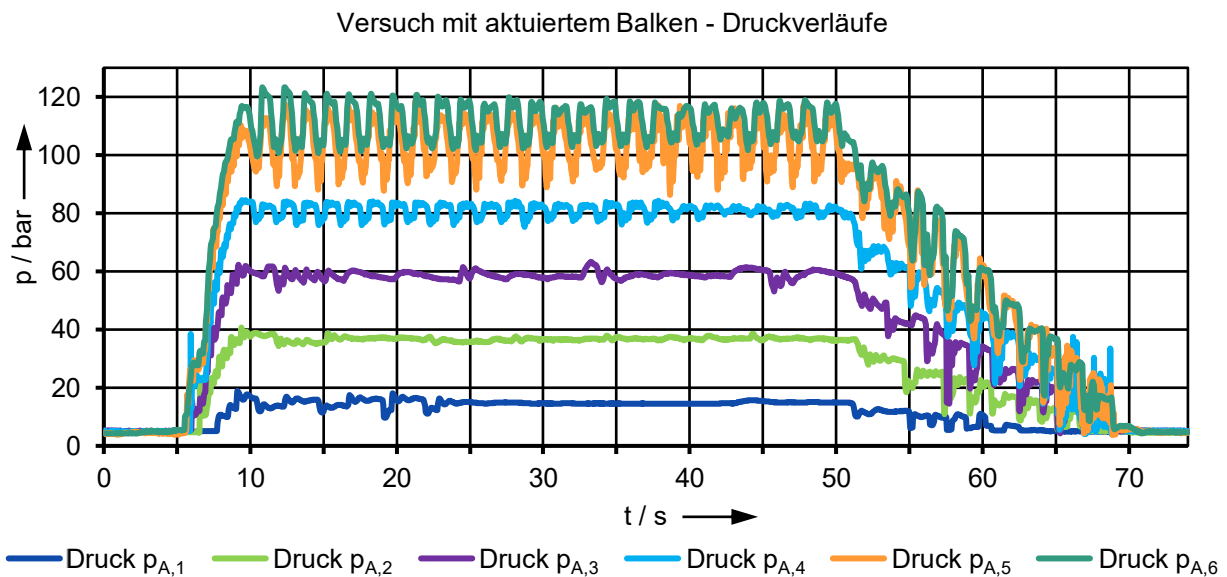


Bild 8.23: Druckverläufe in den Aktoren nach [BURGHARDT22, S. 7]

Ein Vergleich zwischen den berechneten und den gemessenen hydraulischen Drücken ist in Bild 8.24 (a) gegeben. Die Werte stimmen gut überein. Eine erste Näherung, z. B. zur Auslegung des Hydrauliksystems, ist mit dem analytischen Ansatz möglich. [BURGHARDT22, S. 6]

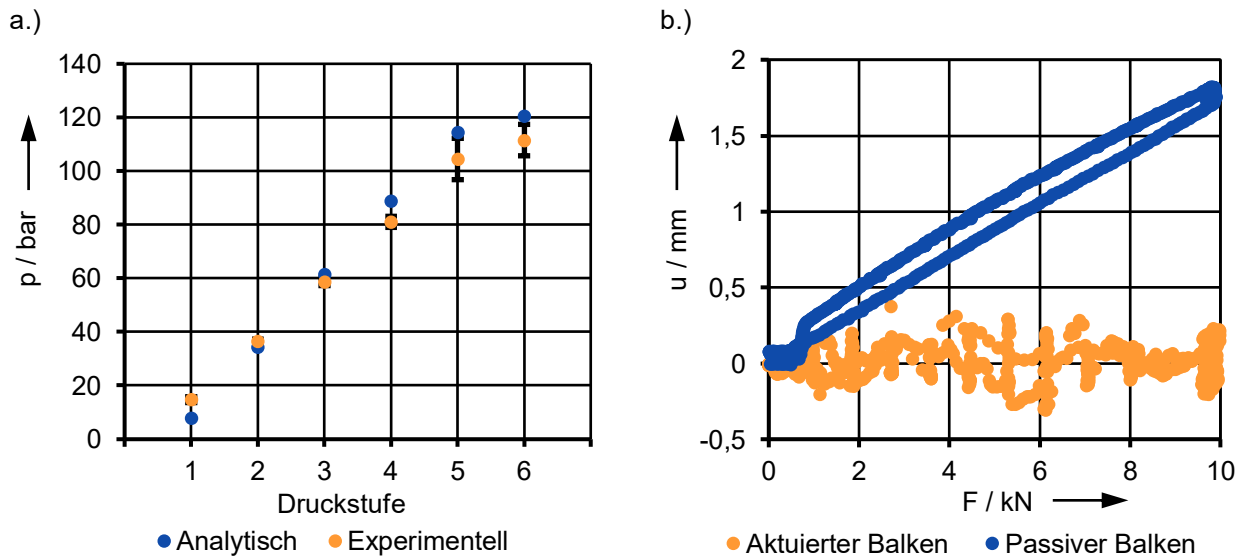


Bild 8.24: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Drücken (a) sowie Durchbiegung u in Abhängigkeit der Belastung F für den passiven und den aktuierten Balken (b) nach [BURGHARDT22, S. 7]

Bild 8.24 (b) zeigt einen Vergleich zwischen dem Referenzversuch mit passivem Balken und dem aktuierten Balken. Hierzu ist die Durchbiegung u in Abhängigkeit der Belastung F aufgetragen. Beim Kurvenverlauf des passiven Balkens ist die Hysterese aufgrund der Setzerscheinungen sichtbar. Gut zu erkennen ist, dass beim passiven Balken die Durchbiegung mit der Belastung zunimmt. Im Gegensatz dazu schwingt die Durchbiegung beim aktuierten Balken um die Null-Verformung herum und wird somit kompensiert. [BURGHARDT22, S. 6 f.]

8.5 Zwischenfazit

Im Unterschied zu den in den Kapiteln 6 und 7 vorgestellten Entwicklungsbeispielen zur Aktuierung eines normalkraftbeanspruchten Tragwerkselements ist hier ein auf Biegung beanspruchter Stahlbetonbalken zu aktuieren. Die Aktoren werden in den tragenden Querschnitt des biegebeanspruchten Strukturelements integriert. Die Konzeption erfolgt unter Verwendung der in Kapitel 5 vorgestellten Lösungsprinzipien. Zur Bestätigung der ersten Forschungsfrage werden Gesamtkonzepte durch die Variation der Teillösungen erstellt. Das am besten bewertete Konzept wird ausgearbeitet. Der Aktor besteht aus einer Druckkammer, die in den Balken einbetoniert wird. Durch die Beaufschlagung mit einem hydraulischen Innendruck wird eine Kraft erzeugt, die der Balkendurchbiegung entgegenwirkt. Die Funktion der Aktoren wird in Laborversuchen getestet. Die Evaluation erfolgt an einem Balken mit realitätsnahen Abmaßen in einem Vier-Punkt-Biegeversuch.

Mit den Versuchen wird die Leistungsfähigkeit des Aktors demonstriert. Dabei werden die Anforderungen an die gestellte Aktorik erfüllt. Allerdings besteht Optimierungspotenzial bei der Regelung. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse sind die hydraulischen Komponenten zur Druckbereitstellung, besonders im Bereich der Ventiltechnik, neu auszuwählen.

Nachteilig bei dem ausgearbeiteten Konzept ist die hohe Anzahl an zusätzlichen Komponenten, die zur Energieleitung und -bereitstellung erforderlich sind. Bei einer Weiterentwicklung können Rohre und Leitungen innerhalb des Balkenquerschnitts gelegt werden. Platztechnisch ist auch die Integration der Hydraulikventile möglich. Aufgrund der sich darin befindenden beweglichen Komponenten ist eine Wartung und ggf. ein Austausch während des mehrjährigen Betriebs erforderlich. Daher sind Zugangsmöglichkeiten vorzusehen, die sich ggf. negativ auf die Architektur des Gebäudes und die Tragfähigkeit des Tragwerkselements auswirken können. Zusätzlich sind eine zentrale oder mehrere dezentral verteilte Druckerzeugungseinheiten vorzusehen. Als kritisch wird deren Integration in ein Tragwerkselement erachtet. Kann dies erfolgen, besteht auch hier das Problem hinsichtlich der Lebensdauer bzw. der Zugänglichkeit.

9 Aktuierung eines Biegebalkens mit integriertem Energiessteller

Dieses Beispiel baut auf dem vorherigen Projekt auf und wird in Kooperation mit dem ILEK im Rahmen des SFB 1244 durchgeführt. Hier ist ebenfalls ein auf Biegung beanspruchter Balken aus Stahlbeton zu aktuieren. Ziel ist es, einen Aktor für quasistatische Anwendungen zu entwickeln, der möglichst kompakt und vollständig in den Balken integrierbar ist.

9.1 Planen und Klären der Aufgabe

Mit dem in Kapitel 8 vorgestellten hydraulischen Aktor werden die Leistungsanforderungen zur Aktuierung des Balkens vollständig erfüllt. Aufgrund der in Kap. 8.5 genannten Nachteile ist in diesem Beispiel ein Aktor zu entwickeln, der einschließlich aller zur Aktuierung benötigten mechanischen Komponenten in den Balken integrierbar ist. Durch die Balkenoberflächen ins Innere bzw. aus diesem heraus sind nur Energie- und Signalflüsse zulässig. Stoffflüsse innerhalb des Balkens und durch dessen Oberflächen sollen aufgrund des erhöhten Platzbedarfs für Leitungen etc. vermieden werden. Da das Konzept der exzentrischen Krafteinleitung in Kapitel 8 erfolgreich getestet wurde, ist dieses beizubehalten. Für den Aktor sind Konzepte zu bevorzugen, die einen möglichst langen wartungsfreien Betrieb gewährleisten. Die Funktionsfähigkeit ist unter Laborbedingungen für quasistatische Beanspruchungen zu demonstrieren. In einem realen Anwendungsfall können quasistatische Beanspruchungen z. B. Schneelasten sein. Durch die Versuche mit hydraulischer Aktuierung ist bekannt, dass die Funktionsfähigkeit bereits mit einem in den Balken integrierten Aktor gezeigt werden kann. Die Optimierung des Lastabtrags durch die Verwendung mehrerer Aktoren ist in diesem Fall nicht notwendig.

Um die Entwicklungsaufgabe zu lösen, werden zunächst Anforderungen an den Aktor definiert. Von besonderer Bedeutung ist die Vorgabe des Aktuierungsprinzips und die Forderung der Wartungsfreiheit. Der aus Kapitel 8.4.1 bekannte Vier-Punkt-Biegeversuch wird zum Nachweis der Funktion gewählt. Der Einfachheit halber sind die gleichen Vorrichtungen zu nutzen. Somit wird auch die Größe des Balkens beibehalten. Aus der Balkengröße ergibt sich der zur Verfügung stehende Bauraum für den Aktor. Mit der aus den hydraulischen Versuchen bekannten Druckfläche ($d_{\text{innen}} = 70 \text{ mm}$) und dem Druck ($p_{\text{max}} = 80 \text{ bar}$) wird die benötigte Druckkraft des Aktors ($F_{\text{Aktor}} = 30,8 \text{ kN}$)

berechnet. Da nur die grundsätzliche Funktion nachzuweisen ist, wird nur ein Aktor in Balkenmitte einbetoniert. Die Anforderungen sind in Tabelle zusammengefasst.

F W	Nr.	Anforderungen Forderung (F), Wunsch (W)	Quantifizierung
	1	Geometrie	
F	1.1	Abmaße des Balkens (Länge x Breite x Höhe) <ul style="list-style-type: none"> • Länge l • Breite b • Höhe h 	l = 1200 mm b = 100 mm h = 200 mm
F	1.2	Integration des Aktors in den Querschnitt des Balkens	
F	1.3	Abstand a zwischen den unteren Auflagern	a = 1000 mm
F	1.4	Abstand b zwischen den Krafteinleitungspunkten an der Balkenoberseite	b = 333,3 mm
F	1.5	Auflager und Krafteinleitungspunkte sind symmetrisch zur Balkenmitte.	
	2	Kinematik	
F	2.1	Bewegung des Balkens entgegen der Durchbiegung	
	3	Kräfte	
F	3.1	Maximale Belastung F_{max} des Balkens im quasistatischen Vier-Punkt-Biegeversuch	$F_{max} = 8 \text{ kN}$
F	3.2	Die Rückstellung des Balkens erfolgt passiv.	
F	3.3	Aktuierung der Druck- bzw. Zugzone durch Einbringen von Kräften in Balkenlängsrichtung	
F	3.4	Max. zu erzeugende Druckkraft F_{Aktor}	$F_{Aktor} = 30,8 \text{ kN}$
	4	Energie	
F	4.1	Leistung des zur Verfügung stehenden Stromanschlusses P_{elektr}	$P_{elektr} = 15 \text{ kW}$
	5	Stoff	
F	5.1	Der Balken ist aus dem Beton C35/45 mit Stahlarmierungen herzustellen.	
	6	Signal	
F	6.1	Messung der Durchbiegung mit einem Laserdistanzsensor und Dehnmessstreifen	
F	6.2	Die Aktoreinheit wird über eine Schnittstelle für digitale oder analoge Signale gesteuert.	
	7	Ergonomie	
F	7.1	Die Zugänglichkeit der Anschlüsse an der Balkenaußenseite ist sicherzustellen.	
	8	Fertigung	
F	8.1	Anzahl der zu fertigenden Balken $n_{ges,Balken}$	$n_{ges,Balken} = 1$
F	8.3	Anzahl der zu fertigenden Aktoren $n_{ges,Aktor}$	$n_{ges,Aktor} = 1$
W	8.2	Möglichst große Anzahl an Gleichteilen für den Aktor	
W	8.3	Herstellung von Fertigungsteilen und Betonage in den Werkstätten des IKTD und ILEK	

Tabelle 9.1 Anforderungen an den Aktor zur Aktuierung des Biegebalkens

	9	Montage	
F	9.1	Lagerung in den Räumen des IKTD und ILEK	
F	8.2	Vormontage in den Räumen des IKTD und ILEK	
	10	Gebrauch	
F	10.1	Experimentelle Untersuchung in der Werkstatt des ILEK	
F	10.2	Betriebsbedingung bei Raumtemperatur T_U	$T_U = 15\text{ °C}$ bis 25 °C
F	10.3	Aufbringen der Last mit der Zug-Druck-Prüfmaschine des ILEK	
	11	Instandhaltung	
F	11.1	Sichtkontrolle des aktuierten Balkens ermöglichen	
F	11.2	Wartungsarme bzw. -freie Konstruktion	
	12	Kosten	
F	12.1	Zulässige Gesamtkosten	1.000 €
	13	Termin	
F	13.1	Durchführung von Versuchen am Prototyp	November 2019

Tabelle 9.1: Anforderungen an den Aktor zur Aktuierung des Biegebalkens (Fortsetzung)

9.2 Konzeption

Analog zum Vorgehen bei den vorherigen Entwicklungsbeispielen wird zuerst die Funktionsstruktur aufgestellt. Als Teillösungen für die jeweiligen Funktionen werden Wirkprinzipien aus Kapitel 5 übernommen. Mit der Variation dieser Teillösungen werden Gesamtkonzepte aufgestellt. Durch eine Bewertung wird das erfolversprechendste Konzept ausgewählt.

9.2.1 Funktionsstruktur

In diesem Beispiel sind alle Teilfunktionen des Aktors in den Balken zu integrieren. Der grundsätzliche Aufbau entspricht der Struktur in Bild 5.4. Im Gegensatz dazu sind Stoffflüsse nicht vorgesehen. Die dahingehend angepasste Funktionsstruktur ist in Bild 9.1 dargestellt. Wie im Beispiel mit der hydraulischen Aktuierung des Balkens gezeigt (s. Kapitel 8), wird die Kraft und die Reaktionskraft direkt in die lastabtragende Struktur („Passive Struktur“) geleitet. Die einzelnen Funktionen zur Energieleitung, Energieumwandlung etc. wurden bereits in den vorhergehenden Kapiteln besprochen.

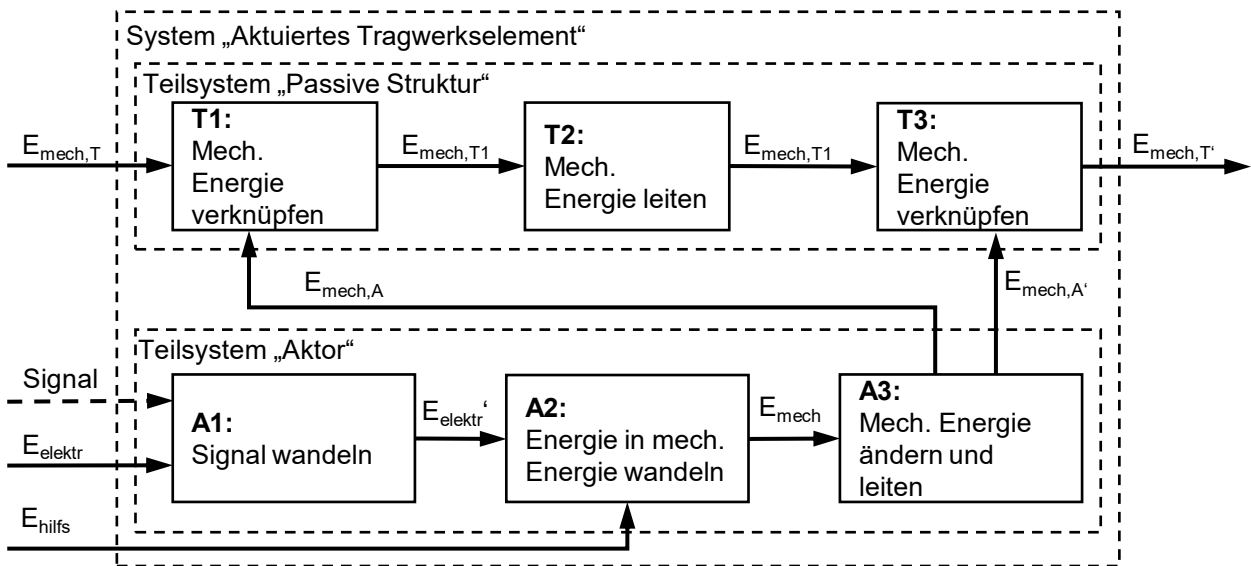


Bild 9.1: Funktionsstruktur des zu aktuierenden Balkens

9.2.2 Teillösungen und Konzepterstellung

In der Aufgabenstellung ist bereits das Aktuierungskonzept vorgegeben. Um das Aktuierungsmoment zu erzeugen, ist die Kraft parallel, d. h. exzentrisch, zur neutralen Faser in den Balken einzuleiten. Dabei ist die Einleitung einer Druckkraft in die Druckzone und/oder einer Zugkraft in die Zugzone des Balkens möglich. Die diesbezügliche Konkretisierung des in Tabelle 5.1, Zelle 3.2b gezeigten Konzepts ist in Bild 9.2 dargestellt.

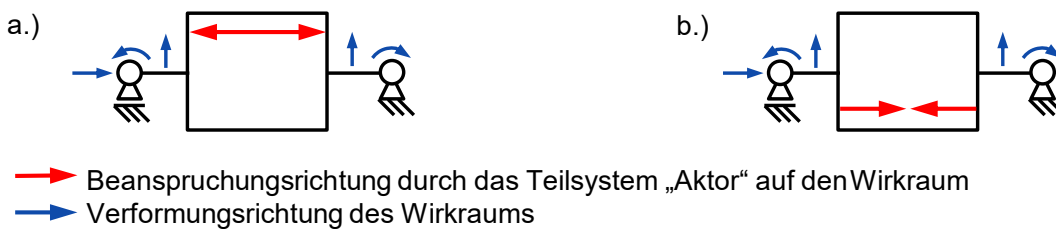


Bild 9.2: Aktuierungskonzepte mit Krafteinleitung in der Druckzone (a) und der Zugzone (b)

Die Lastableitung durch den Balken erfolgt innerhalb der Betonstruktur, ebenso wie die Zusammenführung dieses Kraftflusses und der durch das Teilsystem „Aktor“ erzeugten Kraft. Zur Reduzierung des Ausfallrisikos durch Verschleiß wird bei der Zusammenstellung von Teillösungen darauf geachtet, dass nur solche aufgenommen werden, die keine relativbewegten Komponenten beinhalten. Dies betrifft die Funktionen der Energiewandlung und der Energieänderung bzw. -leitung. Unter dieser Prämisse und ohne

weitere Detaillierung reduziert sich die Auswahl der in Kapitel 5.3 aufgeführten Lösungsmöglichkeiten deutlich. Die als zielführend erachteten Teillösungen sind in Tabelle 9.2 aufgeführt.

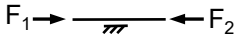


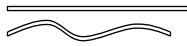
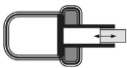
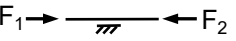
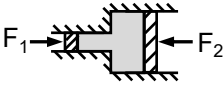
T1 bis T3: Mech. Energie leiten und mech. Energie verknüpfen	1.1 Leitung durch Festkörper 			
A2: Energie in mech. Energie wandeln	2.1 Elektromagnet für transl. Bew. 	2.2 Piezo-Stapelaktor 	2.3 Formgedächtnislegierung 	2.4 Therm. Dehnstofffaktor 
A3: Mech. Energie ändern und leiten	3.1 Leitung durch Festkörper 	3.2 Hydraulische Druckübersetzung 	3.3 Kombination —	3.4 Direktbefestigung —

Tabelle 9.2: Morphologischer Kasten für den zu aktuerenden Balken

Tabelle 9.3 zeigt die zu Gesamtkonzepten zusammengeführten Kombinationen der Teillösungen. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Konzeptvariante	Teillösungen		
1	1.1	2.1	3.2
2	1.1	2.2	3.2
3	1.1	2.3	3.1
4	1.1	2.4	3.4
5	1.1	2.3	3.4

Tabelle 9.3: Kombination der Teillösungen zu Konzeptvarianten

9.2.2.1 Konzeptvariante 1

Die Konzeptvariante 1 ist in Bild 9.3 schematisch dargestellt. Bei dieser wird eine Druckkraft erzeugt, die in die Druckzone des Balkens eingeleitet wird. Die Erzeugung der Kraft erfolgt elektromagnetisch. Dabei wird der Magnetanker im Inneren einer mit einer Druckflüssigkeit gefüllten Kammer bewegt. Der Anker ist an einem Ende eines Metallbalgs befestigt, der bei der Bewegung elastisch gelängt oder gestaucht wird. Das andere Ende des Balgs ist mit der Kammer verschweißt. Die Druckflüssigkeit kann somit nicht austreten. Die durch die Bewegung erzeugte Volumenänderung führt zu einem Druckanstieg. Analog zur Druckkammer bei der hydraulischen Aktuierung des Balkens (s. Kapitel 8) wird der Druck über die Seitenflächen in den Balken geleitet. Die

Übertragung der Bewegung des Balgs auf die Seitenflächen mittels der Flüssigkeit entspricht dem Prinzip der hydraulischen Druckübertragung. Die Dimensionierung der Bauteile hat derart zu erfolgen, dass die zur Aktuierung erforderliche Kraft unter Zuhilfenahme der hydraulischen Übersetzung vom Elektromagnet erzeugt wird. Daher ist das Verhältnis zwischen Balgdurchmesser und druckübertragenden Seitenflächen in Kombination mit der durch den Elektromagnet erzeugten Kraft zweckmäßig zu bestimmen.

Seitenansicht

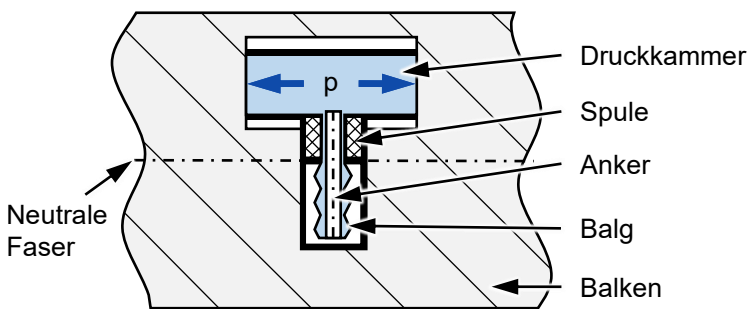


Bild 9.3: Konzeptvariante 1

9.2.2.2 Konzeptvariante 2

Konzeptvariante 2 ähnelt der vorhergehenden Konzeptvariante. Auch hier befindet sich eine Druckflüssigkeit in einer Kammer, die durch einen elastischen Metallbalg verschlossen ist. Der Metallbalg wird über einen von außen anliegenden Piezokristall nach innen gedrückt. Der erzeugte Druck überträgt sich auf die Seitenflächen der Kammer und wird in den Balken weitergeleitet. Somit beruht die Kraftübertragung auf dem Prinzip der hydraulischen Druckübertragung. Wie bei der Konzeptvariante 1 ist das Verhältnis zwischen der Bewegung des Balgs und der Verformung der Kammer bzw. der druckübertragenden Seitenflächen maßgebend. Das Konzept ist in Bild 9.4 dargestellt.

Seitenansicht

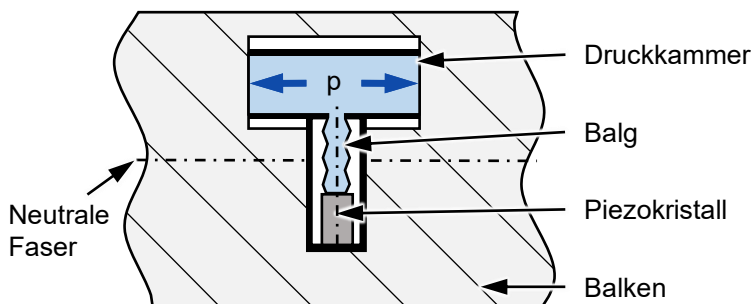


Bild 9.4: Konzeptvariante 2

9.2.2.3 Konzeptvariante 3

Bei dieser Konzeptvariante erfolgt ebenfalls die Kräfteinleitung in die Druckzone des Balkens. Die Funktion beruht auf dem Effekt der temperaturabhängigen Volumenänderung. Durch die Zuführung von Wärme, z. B. über einen Heizstab, dehnt sich der Dehnstoff aus. Um eine möglichst große Ausdehnung zu erreichen, sollte als Dehnstoff ein Material mit großem Wärmeausdehnungskoeffizient gewählt werden. Der Dehnstoff befindet sich innerhalb eines geschlossenen Körpers. Durch die temperaturbedingte Ausdehnung wird ein Druck erzeugt, der auf die umgebende Struktur übertragen wird. Durch die Anpassung des Körpers wird die Hauptdruckrichtung festgelegt, wie bspw. bei der Druckkammer in Kapitel 8. In Bild 9.5 ist dieses Konzept skizziert.

Seitenansicht

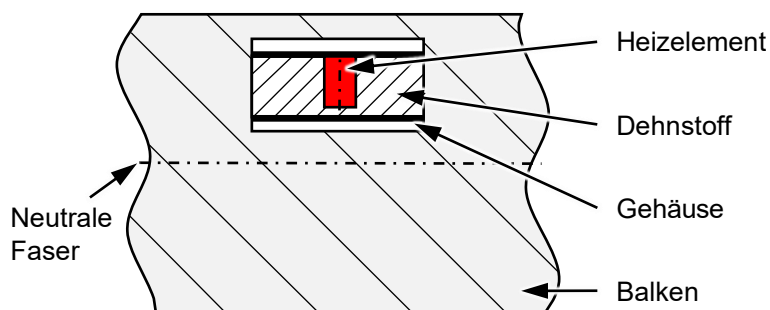


Bild 9.5: Konzeptvariante 3

9.2.2.4 Konzeptvariante 4

Konzeptvariante 4 besteht aus zwei Metallplatten, die durch ein Elastomer voneinander getrennt sind. Zwischen den Metallplatten sind ein oder mehrere Drähte aus einer Formgedächtnis-Legierung (FGL) gespannt. Zur Aktuierung wird ein elektrischer Strom durch die Drähte geleitet, die sich dadurch erwärmen und zusammenziehen. Die Zugkraft wird auf die Platten übertragen. Durch die sich aufeinander zubewegende Platten wird das Elastomer gequetscht. Die Verformungsrichtung wird durch Begrenzungselemente definiert. Dies können z. B. seitlich angebrachte Bleche sein. Somit erfolgt die Ausbreitung des Elastomers in Balkenlängsrichtung. Dabei drückt das Elastomer gegen die umgebende Betonstruktur und der Balken wird aktuiert. Bild 9.6 zeigt schematisch das Konzept.

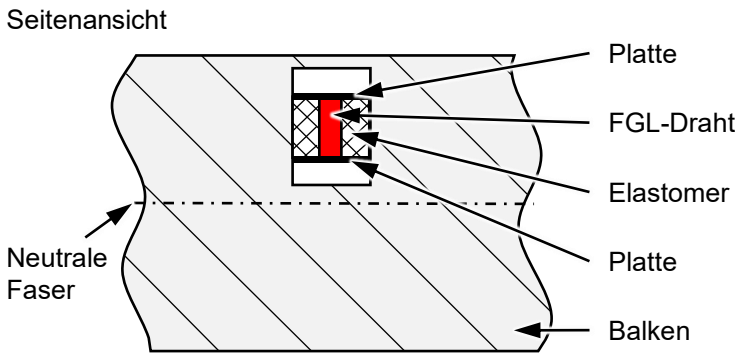


Bild 9.6: Konzeptvariante 4

9.2.2.5 Konzeptvariante 5

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Konzepten erfolgt bei Konzeptvariante 5 die Einleitung der Aktorkraft in die Zugzone des Balkens. Hierzu sind FGL-Drähte zwischen Zuganker bespannt. Unter Stromdurchfluss erwärmen sich die Drähte und ziehen sich zusammen. Die Zugkraft wird auf die Zuganker übertragen und in die Betonstruktur eingeleitet. Alternativ zu den Zugankern können die Drähte an der Bewehrung befestigt werden. Das Konzept ist in Bild 9.7 dargestellt.

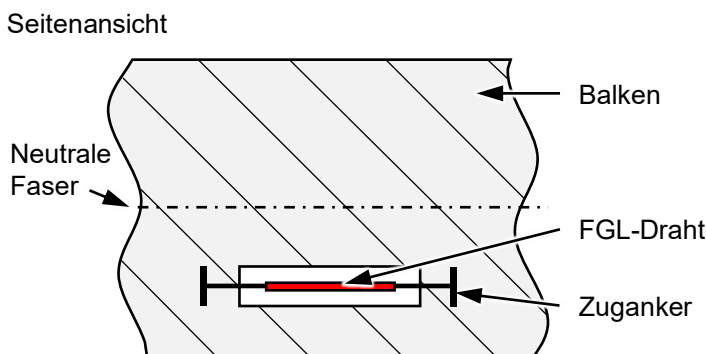


Bild 9.7: Konzeptvariante 5

9.2.3 Bewertung und Auswahl

Die Bewertung der Konzepte erfolgt entsprechend den vorherigen Beispielen. Aus den Anforderungen an die Aktuierungsaufgabe gehen die Bewertungskriterien hervor. Deren Gewichtung erfolgt mittels eines paarweisen Vergleichs (s. Anhang A.3). Die Konzepte werden auf einer Skala von 0 bis 4 bewertet, wobei die maximale Punktzahl dem höchsten Erfüllungsgrad des Kriteriums entspricht. Das Ergebnis der Bewertung ist in Tabelle 9.4 gegeben.

Bewertungskriterien	Gewichtung	Konzeptvariante 1		Konzeptvariante 2		Konzeptvariante 3		Konzeptvariante 4		Konzeptvariante 5	
		Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert	Bewertung	Gew. Wert
hohe Realisierungschance im gegebenen Bauraum	11,11%	1	0,11	3	0,33	4	0,44	3	0,33	4	0,44
hohe Chance der Funktionsfähigkeit	22,22%	1	0,22	2	0,44	3	0,67	1	0,22	1	0,22
geringe Anschaffungs- und Herstellungskosten	8,33%	1	0,08	0	0	4	0,33	3	0,25	3	0,25
einfache Fertigung	5,56%	1	0,06	2	0,11	4	0,22	4	0,22	4	0,22
einfache Montage	5,56%	1	0,06	2	0,11	4	0,22	3	0,17	4	0,22
lange Lebensdauer	13,89%	1	0,14	1	0,14	2	0,28	1	0,14	4	0,56
geringe Systemkomplexität	8,33%	1	0,08	2	0,17	4	0,33	4	0,33	4	0,33
hohe Ausfallsicherheit	19,44%	1	0,19	1	0,19	2	0,39	1	0,19	1	0,19
geringer Entwicklungsaufwand	5,56%	1	0,06	2	0,11	4	0,22	3	0,17	3	0,17
Summe		9	1,00	15	1,61	31	3,11	23	2,03	28	2,61
Rangfolge		5		4		1		3		2	

Tabelle 9.4: Bewertung der Konzeptvarianten für den zu aktuierenden Balken

Bei Konzeptvariante 1 und 2 wird die Dauerfestigkeit des unter Innendruck stehenden Metallbalks auf Grundlage einer Überschlagsrechnung kritisch bewertet. Insgesamt schneidet Konzeptvariante 1 am schlechtesten ab. Im Vergleich zu den anderen Aktorprinzipien ist hier das Risiko hoch, nicht genügend Kraft zu erzeugen (s. Bild 2.10). Durch die Aktuierung mittels eines Piezokristalls ist die Wahrscheinlichkeit der Funktionsfähigkeit eher gegeben. Allerdings sind die Materialkosten im Vergleich zu den anderen Konzepten hoch. Die Konzeptvarianten 4 und 5 beruhen auf dem Funktionsprinzip der FGL. Dieses kann als Drahtmaterial kostengünstig bezogen werden. Als kritisch wird die Größe der erzeugten Kraft gesehen. Zudem besteht die Gefahr der thermischen oder mechanischen Überbeanspruchung, die zum Reißen des Drahts führen kann. In Konzeptvariante 4 ist zudem die Abriebsfestigkeit und Beständigkeit des Elastomers fraglich. Das robusteste Konzept stellt die Konzeptvariante 3 dar, da diese ohne stark zu

verformende Teile auskommt. Weiterhin werden nur wenige und geometrisch einfache Bauteile benötigt. Durch das große Angebot an unterschiedlichen Heizelementen kann dieses kostengünstig als einsatzfertiges Bauteil bezogen werden. Auf Basis dieser Bewertung wird die Konzeptvariante 3 für die weitere Detaillierung ausgewählt.

9.3 Entwurf

Da der Effekt der Krafterzeugung auf der temperaturabhängigen Volumenänderung beruht, ist die Wahl des Dehnstoffs ausschlaggebend für die Funktionsfähigkeit. Je größer die Differenz der Wärmeausdehnungskoeffizienten des Dehnstoffs und des umgebenden Materials, desto stärker ist der Effekt. Durch die Integration des Aktors in den Balken dient der Wärmeausdehnungskoeffizient des Stahlbetons mit $\alpha_{\text{Stahlbeton}} \approx 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [DIN EN 1992-1-1 2011, S. 29] als Referenz. Als Dehnstoff wird das Hydrauliköl HLP 32 verwendet. Dieses besitzt mit $\alpha_{\text{Öl}} \approx 700 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [WILL14, S. 24] einen deutlich höheren Wärmeausdehnungskoeffizient.

Zur Erwärmung werden Heizpatronen mit einer Leistung von 100 W eingesetzt (Typ 8D50L230V100W1000 TLS+T+T8+T1W+TC"K"+TF AC der Fa. Maxi watt). Durch die Bestromung eines sich in der Patrone befindenden Heizdrahts wird diese erwärmt. Zusätzlich zum Heizdraht beinhaltet die Patrone ein Thermoelement (Typ K), das zur Temperaturregelung verwendet wird. Das Abkühlen des Öls erfolgt passiv durch Wärmeleitung in den Balken und freie Konvektion an der Balkenoberseite.

Das Öl wird in einer Druckkammer eingeschlossen. Eine direkte Erwärmung des Öls mit einer sich in der Druckkammer befindenden Heizpatrone ist nicht zielführend. Aufgrund der ungenügenden Wärmeleitfähigkeit des Öls kommt es zu lokalen Temperaturspitzen im Bereich der Heizpatrone. Dies zeigt sich bei Vorversuchen mit einem ersten Prototyp, bei denen Heizpatronen aufgrund von Überhitzung versagten.

Der in Bild 9.8 dargestellte Entwurf des Aktors wird in die Druckzone des Balkens einbetoniert. Die Druckkammer besteht aus 1 mm dicken Stahlblechen, die miteinander verschweißt sind. Im Gegensatz zur Druckkammer der hydraulischen Aktuierung (s. Kapitel 8) wird eine rechteckige Form gewählt, um eine möglichst große Druckfläche zur Kraftereinleitung in den Balken zu erhalten. Die großen Seitenflächen zeigen in Richtung der Balkenlängsachse. Im Inneren befindet sich das Öl. Durch dessen Expansion unter Wärmezufuhr dehnt sich die Kammer elastisch aus und überträgt den Druck auf den Balken. Das untere Ende der Druckkammer bildet ein Stahlkörper. In diesem befindet sich eine Gewindebohrung, über die die Kammer befüllt und

anschließend mit einer Verschlusschraube abgedichtet wird. Weiterhin wird dort die Heizpatrone eingeschraubt. Der Kontakt zwischen Heizpatrone und Druckkammer erfolgt nach Herstellerangaben über eine Passung. Eine Optimierung des Wärmeübergangs mittels eines Wärmeleitfettes o. ä. ist nicht erforderlich. Über das Stahlgehäuse wird das Öl erwärmt. Zur schnelleren und gleichmäßigeren Erwärmung wird die Druckkammer sehr schmal ausgeführt. Dadurch steigt das Verhältnis von wärmender Gehäuseoberfläche zu dem zu erwärmenden Ölvolumen. Das untere Aktorende mit der Heizpatrone befindet sich nahezu mittig im Balkenquerschnitt. Die Kabel (Leitungen für den zum Heizen benötigten Strom und Signalleitungen der Temperaturmessung) werden auf Höhe der neutralen Faser aus dem Balken herausgeführt. [BURGHARDT21, S. 342]

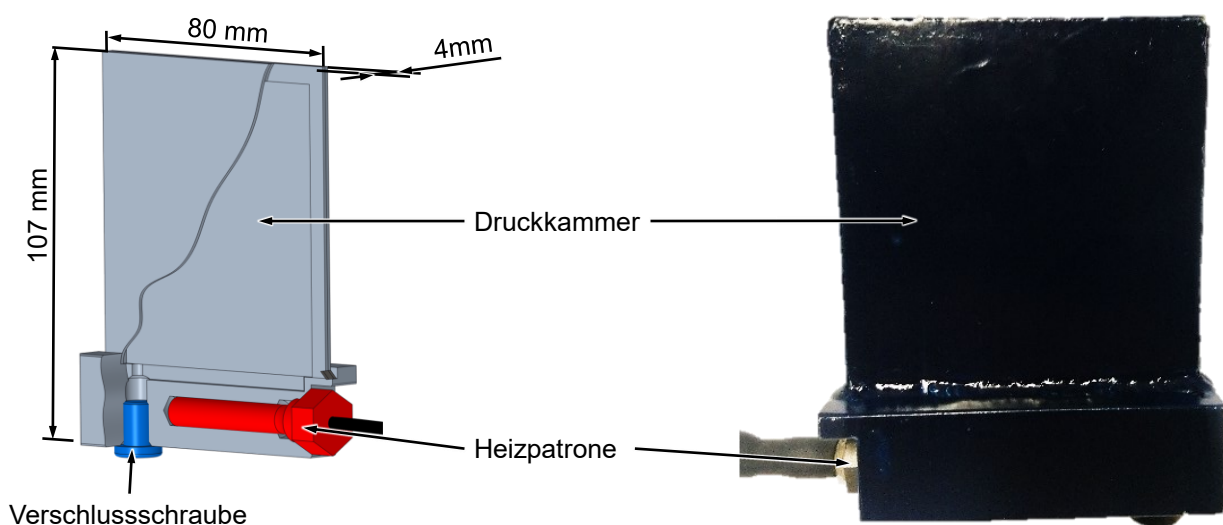


Bild 9.8: Entwurf (links) und Prototyp (rechts) des thermomechanischen Aktors nach [BURGHARDT21, S. 342]

Die Messung des Drucks im Kammerinneren ist bei diesem Entwurf nicht möglich. Bei Versuchen mit einem Prototyp mit integriertem Drucksensor konnte die Druckkammer nicht leakagefrei abgedichtet werden oder der Druckaufbau erwies sich aufgrund der nachgebenden elastischen Dichtungen als zu gering zur Aktuierung des Balkens.

9.4 Experimentelle Validierung

Vor der Betonage des Balkens werden die Heizpatronen auf Funktionsfähigkeit und die Druckkammer auf Dichtheit überprüft. Dazu werden die Aktoren in einer Aufnahme eingespannt und die Heizpatrone bestromt.

Der Balken entspricht mit den Abmessungen (1200 mm x 200 mm x 100 mm) sowie dem Material und dem Aufbau (Beton der Festigkeitsklasse C35/35 und Stahlarmierungen

BSt 500 mit 6 mm Durchmesser) dem in Kapitel 8.4.1 vorgestellten Balken. In die Druckzone des Balkens in Feldmitte ist der Aktor einbetoniert.

9.4.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau des Vier-Punkt-Biegeversuchs (s. Bild 9.9) ähnelt dem der hydraulischen Aktuierung in Kapitel 8.4.1. Die Lagerung und die Krafteinleitung erfolgen wie bereits vorgestellt. Die Durchbiegung des Balkens wird redundant mit einem Wegaufnehmer und einem Laserdistanzsensor gemessen. Zusätzlich sind DMS auf der Balkenober- und -unterseite angebracht. An der Balkenaußenseite in Feldmitte auf Höhe des integrierten Aktors ist ein Thermoelement Typ K befestigt, mit dem die Oberflächentemperatur des Balkens erfasst wird.

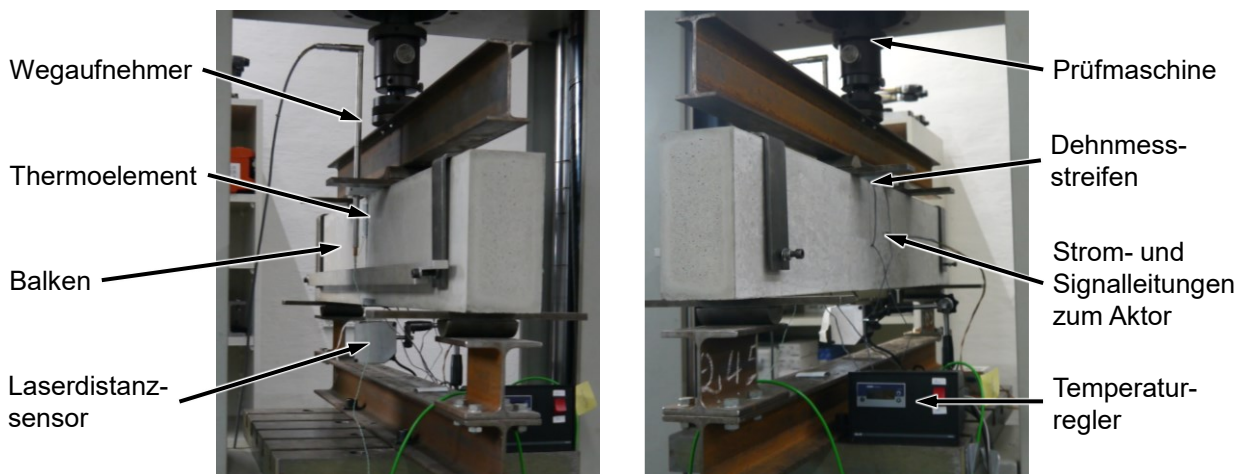


Bild 9.9: Versuchsaufbau nach [BURGHARDT21, S. 342]

Bei dem Versuch wird der Balken mit einer Kraft von $F = 8 \text{ kN}$ belastet. Anschließend wird der Aktuierungsvorgang durch Einschalten der Temperaturregelung manuell gestartet. Die Temperatur der Heizpatrone wird mit dem integrierten Temperatursensor erfasst und mit einem Zwei-Punkt-Regler zwischen 95 °C und 100 °C gehalten. Durch das manuelle Ausschalten der Heizpatrone wird die Aktuierung beendet. Beim Abkühlen geht die Durchbiegung wieder in den Ausgangszustand unter Last zurück.

9.4.2 Versuchsergebnis

Das Ergebnis eines der oben beschriebenen Versuche ist in Bild 9.10 dargestellt. Zu Beginn wird die Kraft von 8 kN aufgebracht. Dies führt zu einer Durchbiegung von $u = 0,065 \text{ mm}$. Die Aktuierung startet ab $t = 180 \text{ s}$. Ab diesem Zeitpunkt nimmt die Durchbiegung konstant ab. Die an der Balkenaußenseite gemessene Temperatur fängt mit einer kurzen Verzögerung an zu steigen. Die Durchbiegung ist bei $t = 472 \text{ s}$ vollständig kompensiert. Die Oberflächentemperatur hat dabei um ca. $2,3 \text{ °C}$ zugenommen.

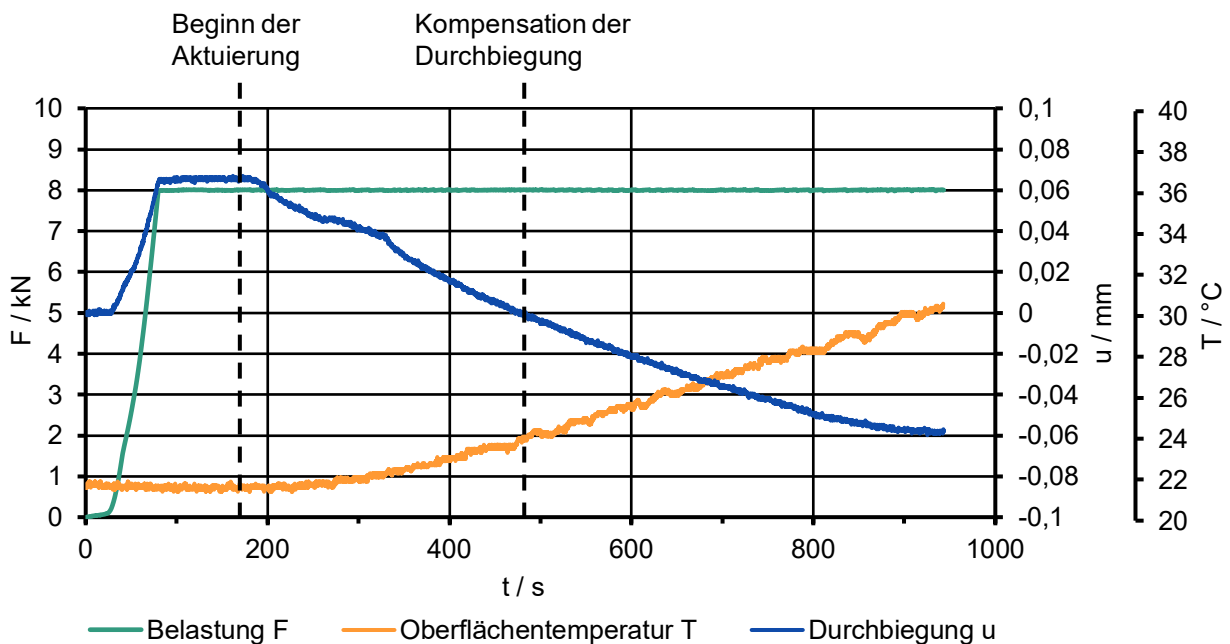


Bild 9.10: Belastung F , Oberflächentemperatur T und Durchbiegung u in Abhängigkeit der Zeit t bis $t = 945$ s nach [BURGHARDT21, S. 343]

Obwohl das Ziel der Durchbiegungskompensation erreicht ist, wird nach wie vor aktuiert, um das weitere Verhalten des Systems zu beobachten. Der vollständige Messaufschrieb ist in Bild 9.11 gegeben. Durch die fortwährende Erwärmung biegt sich der Balken nach oben. Die minimale Durchbiegung $u \approx -0,058$ mm ist bei $t = 944$ s erreicht. Zu diesem Zeitpunkt sackt der Balken plötzlich ab, d. h. die Durchbiegung steigt auf $u \approx -0,017$ mm. Sichtbare Risse bilden sich ausgehend von der Oberseite des Balkens. Aufgrund der Aktuierung liegen in diesem Bereich Zugspannungen vor. Da dort normalerweise Druckspannungen vorherrschen, ist hier keine Bewehrung zur Aufnahme der Zugkräfte vorgesehen. Zusätzlich tritt Öl aus den Rissen aus. Trotz weiterer Erwärmung ändert sich die Durchbiegung kaum. Bei $t = 1646$ s wird die Aktuierung beendet. Die Durchbiegung nimmt wieder zu und steigt bis über den Ausgangswert der passiven Belastung. Trotz beendeter Aktuierung steigt die Oberflächentemperatur weiter an. Die maximale Temperatur von $T = 38,25$ °C wird bei $t = 1926$ s gemessen. Von da an nimmt die Temperatur kontinuierlich ab.

Nach vollständiger Abkühlung des Balkens wird dieser aufgebrochen und der Aktor entnommen. Dabei zeigt sich, dass das Öl an der Bohrung ausgetreten ist, die die Verschlusschraube abdichten sollte.

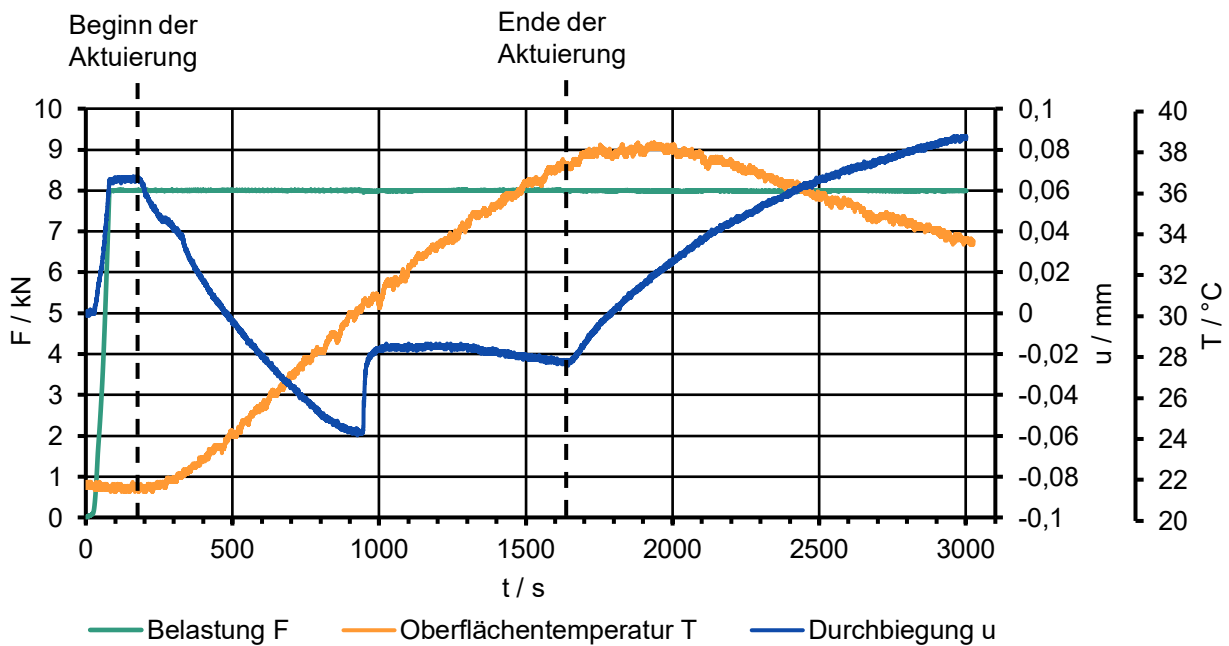


Bild 9.11: Belastung F, Oberflächentemperatur T und Durchbiegung u in Abhängigkeit der Zeit t bis $t = 3026$ s

9.5 Zwischenfazit

Bei dem hier vorgestellten Beispiel wird erneut gezeigt, dass die Entwicklung eines Aktors zur Aktuierung eines auf Biegung beanspruchten Balkens mit den in Kapitel 5 geschaffenen Grundlagen möglich ist. Unter Berücksichtigung der Anforderungen werden Teillösungen aus Kapitel 5.3 zu einem morphologischen Kasten zusammengetragen. Durch deren Variation werden Gesamtkonzepte aufgestellt. Wie bereits in Kapitel 5.3.1 erwähnt, beinhaltet das Konzept mit thermischer Aktuierung genau genommen zwei Energiewandler. Dieses Entwicklungsbeispiel zeigt, dass eine weitere Detaillierungstiefe bei der Konzeption nicht zwingend erforderlich ist. Die Zusammenlegung mehrerer physikalischer Effekte innerhalb der Funktion „Energie wandeln“ entspricht dem Black-Box-Ansatz aus der Systemtechnik und ist hier zielführend.

Mit dem Prototyp des Aktors wird der Funktionsnachweis in einem Vier-Punkt-Biegeversuch erfolgreich erbracht. Jedoch ist eine thermische Aktuierung hinsichtlich dynamischer Lasten nicht möglich, da die thermischen Massen beim Erwärmen bzw. Abkühlen zu träge sind. Zur Optimierung, d. h. zur schnelleren Erwärmung, kann die Heizfläche vergrößert werden, z. B. durch die Verwendung von Heizplatten. Somit wird gleichzeitig der Gefahr der lokalen Überhitzung des Heizelements und des damit einhergehenden schadensbedingten Ausfalls entgegengewirkt. Weiterhin weist der Aktor

eine geringe Zuverlässigkeit auf. Diese liegt vorrangig an der Versagensanfälligkeit der abzudichtenden Stelle. Eine Überarbeitung des Dichtungskonzepts ist daher erforderlich.

10 Zusammenfassung

Die Aktuierung von Tragwerkselementen ermöglicht die gezielte Beeinflussung des Lastabtrags und/oder der Reduzierung von Verformungen. Dadurch wird die Gebrauchstauglichkeit erhöht bzw. die nicht zur Steifigkeitserhaltung benötigte Tragwerksmasse eingespart. Im Kontext der Tragwerke ergibt sich für Aktoren ein neues Anwendungsgebiet. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Grundlage zur Entwicklung von Aktoren zur Aktuierung von linearen Tragwerkselementen geschaffen. Dazu werden Sammlungen von Teillösungen bereitgestellt, deren Variation die Konzeption der zu entwickelnden Aktorik ermöglicht. Aufbauend auf dieser Basis wird die Entwicklung von Aktoren zur Aktuierung linearer Tragwerkselemente anhand von vier Beispielen gezeigt.

Die aktuelle Forschung zu adaptiven Tragwerken fokussiert sich hauptsächlich auf das Adaptionverhalten, d. h. welche Auswirkung eine Aktuierung auf das Tragwerkselement oder die Tragstruktur hat bzw. wie aktuierbare Tragwerkselemente effizient eingesetzt werden können. Für eine effektive Aktuierung sind Tragwerkselement und Aktor gleichermaßen zu berücksichtigen. Eine entwicklungsseitige, allgemeine Betrachtung der Aktuierung wurde bisher nicht durchgeführt. Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von aktuierbaren Tragwerkselementen von Seite der Aktorik aus zu unterstützen. Die Eingrenzung des Themengebiets erfolgt durch die Betrachtung linearer Tragwerkselemente. Zu zeigen ist, wie aktuierbare Tragwerkselemente mittels Variation bereits bestehender Teillösungen entwickelt werden können.

Zur Ermittlung der Teillösungen wird zunächst der Aufbau des Gesamtsystems eines aktuierbaren Tragwerkselements sowie die darin enthaltenen Teilfunktionen analysiert und anhand von Funktionsstrukturen aufbereitet. Anhand dieser Strukturen werden die Aktuierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Dies ermöglicht die Spezifizierung der Aktuierungsaufgabe des Aktors. Für die Entwicklung des Aktors werden Sammlungen zu nutzbaren Lösungsprinzipien bereitgestellt. Die Variation dieser Prinzipien eignet sich zur Konzeption der Aktoren.

Die Beispiele der aktuierbaren Tragwerkselemente wurden im Rahmen des SFB 1244 bearbeitet. Dabei orientiert sich das Vorgehen am Entwicklungsprozess nach Pahl und Beitz [GERICKE21, S. 66 ff.]. Es wird gezeigt, dass die allgemeinen Funktionsstrukturen auf dem hier gewählten Abstraktionsgrad gültig sind. Die Konzeption baut auf den Sammlungen der Lösungsprinzipien auf. Die Möglichkeit des Erstellens von Gesamtkonzepten mittels Variation der Lösungsprinzipien wird bestätigt.

Im ersten Beispiel sind Aussteifungen des Demonstrator-Hochhauses des SFB 1244 zu aktuieren. Die Aussteifungen verlaufen diagonal zwischen zwei Stützen und über eine Höhe von drei Stockwerken. Eine Aussteifung besteht aus mehreren gelenkig miteinander verbundenen Flachstählen. Einer dieser Flachstähle wird durch den Aktor ersetzt, der sich somit im direkten Kraftfluss durch die Aussteifung befindet. Die Aktuierung erfolgt daher seriell. Ein drückend eingesetzter Hydraulikzylinder erzeugt die Aktuierungskraft. Über eine Hilfskonstruktion wird diese in eine nutzbare Zugkraft geändert. Durch die Aktuierung verkürzt sich die Aussteifung.

Weiterhin sind die ca. 9 m langen Stützen des Demonstrator-Hochhauses zu aktuieren. Die Aufgabe der Aktoren ist das Dämpfen der dynamischen Anteile der durch die Stütze abgetragenen Last. Die Leitung der statischen Lasten erfolgt durch quadratische Hohlprofile. In deren Inneren befinden sich die Aktoren. Diese bestehen aus Hydraulikzylindern, die über eine aus einem weiteren Profil bestehende Verlängerung die Enden der äußeren Hohlprofile miteinander verbinden. Entsprechend der Bewegung des Zylinders werden Zug- oder Druckkräfte in die Stütze eingeleitet.

Die zu aktuierenden Aussteifungen und Stützen werden im Originalmaßstab in einem Prototyp einer dreistöckigen Seitenfläche des Demonstrator-Hochhauses getestet. Identifizierte Verbesserungspotenziale werden bei der Überarbeitung der Entwürfe berücksichtigt. Die überarbeiteten Entwürfe werden zum Bau des Demonstrator-Hochhauses umgesetzt.

In einem weiteren Beispiel ist die Aktuierung eines auf Biegung beanspruchten Stahlbetonbalkens zu untersuchen. Dazu werden Druckkammern in die Druckzone des Balkens einbetoniert. Durch die Beaufschlagung mit einem hydraulischen Innendruck dehnen sich diese aus und erzeugen eine Kraft, die exzentrisch zur neutralen Faser in den Balken eingeleitet wird. Daraus resultiert ein Moment, das dem Biegemoment aufgrund der äußeren Last entgegenwirkt. Das Aktuierungskonzept und der Aktor werden anhand von ca. 1,2 m langen Balken in Vier-Punkt-Biegeversuchen unter Laborbedingungen untersucht. Die Evaluation erfolgt an einem ca. 4,4 m langen Balken. In diesen sind 43 Aktoren integriert. Die Anforderungen an die Aktuierung werden erfüllt.

Das im nächsten Beispiel zu untersuchende Objekt ist ebenfalls ein auf Biegung beanspruchter Balken. Während im vorhergehenden Beispiel die Funktionserfüllung im Vordergrund steht, ist hier das Ziel die Integration aller zur Aktuierung benötigter mechanischen Komponenten in den Balken. Die Art der Aktuierung erfolgt wie bei der oben beschriebenen hydraulischen Aktuierung mittels exzentrischer Krafteinleitung. Der

Aktor besteht aus einer mit Öl gefüllten, verschlossenen Kammer. Mittels einer Heizpatrone wird das Öl erwärmt und dehnt sich aus. Dadurch entsteht in der Kammer ein Innendruck, der zur Aktuierung des Balkens genutzt wird. Dieses Konzept beinhaltet genau genommen zwei Energiewandler. Das Beispiel zeigt, dass eine weitere Detaillierungstiefe bei der Konzeption, auf der die Wandler getrennt betrachtet werden, nicht zwingend erforderlich ist. Der Funktionsnachweis erfolgt an ca. 1,2 m langen Stahlbetonbalken in Vier-Punkt-Biegeversuchen.

Die Beispiele zeigen, dass die Entwicklung von Aktoren zur Aktuierung von linearen Tragwerkselementen auf Basis der erarbeiteten Lösungsprinzipien möglich ist.

11 Ausblick

Die Ausgangsbasis dieser Arbeit stellt die Betrachtung von allgemeinen zu aktuierenden Tragwerkselementen dar. Um in dem hier erfolgten ersten Schritt zur ganzheitlichen Betrachtung der Aktuierung die Systemkomplexität gering zu halten, bleibt die Konzeption auf einem hohen Abstraktionsgrad. Dies betrifft sowohl die Funktionsstrukturen wie auch die daraus resultierenden Teillösungen. Wie die Beispiele zeigen (Kapitel 6 bis 9), ist die Entwicklung geeigneter Aktoren auf dieser Basis möglich. Jedoch erlaubt eine detailliertere Aufschlüsselung der Teilfunktionen die Erzeugung eines größeren Lösungsraums. Erweiterungsmöglichkeiten des Forschungsfelds bietet die Einbeziehung weiterer Tragwerkselemente. Aufgrund ihres hohen Anteils an der Gesamtmasse eines Gebäudes von bis zu 50 % [BERGER13, S. 399] bieten Deckenplatten ein hohes Potenzial zur Einsparung von Material und damit auch Energie. Zudem ermöglicht der mehraxiale Lastabtrag von Platten die Untersuchung weiterer Aktuierungs- und Aktorkonzepte.

Durch das Aufzeigen der Aktuierungsmöglichkeiten und die Sammlung von Lösungsprinzipien für Aktoren wird die Entwicklung von zu aktuierenden linearen Tragwerkselementen unterstützt. Zu einem vollständigen adaptiven Tragwerk(-selement) gehören weitere Komponenten, z. B. Sensoren und informationsverarbeitende Systeme (Regelung etc.). Bei einer ganzheitlichen Entwicklung sind diese von Beginn an zu berücksichtigen. Der damit einhergehende erweiterte Funktionsumfang erfordert zusätzliche Unterstützungsmaßnahmen. Dies kann bswp. durch eine Sammlung von Sensorprinzipien erfolgen, die sich zur Integration in den tragenden Querschnitt von Strukturelementen eignen. Bei der Planung von Sensor- und Aktorfunktionen innerhalb einer Tragwerkskomponente lassen sich ggf. Effekte kombinieren und in Bauteilen mit hohem Grad an Funktionsintegration umsetzen. So sind z. B. Komponenten auf Piezo-Basis denkbar, die als Aktor und Sensor innerhalb einer Tragwerkskomponente verwendet werden.

Die Entwicklung eines adaptiven Tragwerks(-elements) macht eine stärkere interdisziplinäre Verknüpfung zwingend erforderlich. Schwierigkeiten zeigten sich besonders bei der Entwicklung der Aktoren für das Demonstrator-Hochhaus. Hier erfolgten die Planungs- und Entwicklungstätigkeiten der beteiligten Fachbereiche auf teilweise unterschiedlichen Grundlagen. Die Schaffung einer gemeinsamen Ausgangsbasis ist unerlässlich, z. B. in Form eines Regelwerks. Weiterhin ist das gemeinsame Vorgehen aufeinander abzustimmen. Hierzu werden erste Ansätze innerhalb des SFB 1244

erarbeitet. Die Anwendbarkeit neuer Entwicklungsmethoden ist noch nachzuweisen und in der Praxis, d. h. außerhalb von Forschungseinrichtungen, zu etablieren.

Die zum Bau der Aktoren für das Demonstrator-Hochhaus zur Verfügung gestellten Standard-Hydraulikzylinder weisen Eigenschaften auf, die für diesen Anwendungsfall nicht erforderlich sind. So besitzen die Zylinder z. B. einen unnötig großen Stellweg. Entsprechend ist hier Potenzial hinsichtlich einer Verkleinerung der Aktoren vorhanden.

Bei der hydraulischen Aktuierung des Biegebalkens sind die hydraulischen Komponenten zur Druckbereitstellung, besonders im Bereich der Ventiltechnik, auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse neu auszuwählen. Hierdurch lassen sich Leistungssteigerungen hinsichtlich der Systemdynamik erreichen. Dies wird durch eine Optimierung der Regelung unterstützt. Aus architektonischer Sicht stellt den größten Kritikpunkt der hohe Anteil an Komponenten dar, die sich außerhalb des Balkens befinden, z. B. das Hydraulikaggregat und die Ventile. Hier ist eine Integration in den Balken mit entsprechenden Wartungsmöglichkeiten anzustreben. Weiterhin ist eine Dezentralisierung der Druckversorgung aus Sicht der Zuverlässigkeit sinnvoll. Sowohl die Dezentralisierung als auch der Integrationsaspekt kann durch eine Miniaturisierung erfolgen. Ein elektrohydraulisches System zur Versorgung der einzelnen Druckkammern ist denkbar.

Der entwickelte thermomechanische Aktor weist eine geringe Zuverlässigkeit auf. Um diese zu verbessern, ist das Dichtungskonzept zu überarbeiten. Weiterhin sollte der Entwurf dahingehend angepasst werden, dass ein gleichmäßiger Wärmeeintrag über große Flächen erfolgt, z. B. durch Heizplatten. Dies führt zu einer schnelleren Erwärmung des Dehnstoffs und damit zu einer Verringerung der Reaktionszeit des Aktors. Zudem ist die Leistung bzw. die Maximaltemperatur des Heizelements zu begrenzen, um lokale Hotspots zu vermeiden. Dies schützt den Dehnstoff vor dem Verbrennen und das Heizelement vor Schäden durch thermisches Überschwingen.

Um den Einsatz von adaptiven Tragwerken in der Praxis zu erleichtern, bietet es sich an, Nutzern fertige Baukastenlösungen zur Verfügung zu stellen. Diese können einsatzbereite, aktuierbare Tragwerkselemente mit integrierten Aktoren enthalten. Zur Abdeckung verschiedener Anwendungsfälle ist zusätzlich eine Skalierung auf Basis eines Baureihenansatzes anzustreben.

Die Herstellung und die Verwendung von Aktoren stellen einen wesentlichen Faktor in der Material- und Energiebilanz von adaptiven Tragwerken dar. Die im Vergleich zu konventionellen Bauwerken möglichen Material- und Energieeinsparungen sind in weiteren Studien zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- ABDEL-ROHMAN83 Abdel-Rohman, M.; Leipholz, H. H.: Active Control of Tall Buildings. In: *Journal of Structural Engineering* 109 (1983), Nr. 3, S. 628-645.
- ADAM07 Adam, B.; Smith, I. F. C.: Tensegrity Active Control: Multiobjective Approach. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* 21 (2007), Nr. 1, S. 3-10.
- ALI07 Ali, M. M.; Moon, K. S.: Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. In: *Architectural Science Review*. Bd. 50 (3), 2007, S. 205-223.
- BANI-HANI98 Bani-Hani, K.; Ghaboussi, J.: Nonlinear Structural Control Using Neural Networks. In: *Journal of Engineering Mechanics* 124 (1998), Nr. 3, S. 319-327.
- BANI-HANI99 Bani-Hani, K.; Ghaboussi, J.; Schneider, S.: Experimental Study of Identification and Control of Structures using Neural Network. Part 1: Identification. In: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28 (1999), S. 995-1018.
- BAUER16 Bauer, G.: *Ölhydraulik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. – ISBN 978-3-658-12343-7
- BEL HADJ ALI10 Bel Hadj Ali, N.; Smith, I. F.C.: Dynamic behavior and vibration control of tensegrity structures. In: *International Journal of Solids and Structures* 47 (2010), Nr. 9, S. 1285-1296.
- BENALI19 Benali, M.: *Konstruktion eines adaptiven Aussteifungselements für ein Gebäudetragwerk*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Bachelorarbeit, 2019.
- BERGER13 Berger, T.; Prasser, P.; Reinke, H. G.: Einsparung von Grauer Energie bei Hochhäusern. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Nr. 6, S. 395-403.

- BINZ07 Binz, H.; Wagner, M.; Dennig, H.-J.: Schnell schaltende Aktoren. Ein Systemvergleich linearer Stellglieder. In: *Antriebstechnik* (2007), Nr. 07, S. 32-34.
- BINZ16 Binz, H. (Hrsg.): *Hybride Intelligente Konstruktionselemente (HIKE) - Abschlusskolloquium der DFG-Forschergruppe 981*. Stuttgart, Universität Stuttgart / Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Institutsbericht, 2016. – ISBN 978-3-922-82392-6
- BLANDINI22 Blandini, L.; Haase, W.; Weidner, S.; Böhm, M.; Burghardt, T.; Roth, D.; Sawodny, O.; Sobek, W.: D1244: Design and Construction of the First Adaptive High-Rise Experimental Building. In: *Frontiers in Built Environment* 8 (2022), S. 1-12.
- BLEICHER12 Bleicher, A.: Aktive Schwingungskontrolle einer Spannbandbrücke mit pneumatischen Aktuatoren. In: *Bautechnik* 2 (2012), Nr. 89, S. 89-101.
- BLOCK15 Block, P.; Gengnagel, C.; Peters, S.: *Faustformel Tragwerksentwurf*. München: Deutsche Verlags-Anstalt, 2015. – ISBN 978-3-421-4012-1
- BÖHM19 Böhm, M.; Wagner, J. L.; Steffen, S.; Sobek, W.; Sawodny, O.: Homogenizability of Element Utilization in Adaptive Structures. In: *2019 IEEE/15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. Vancouver, 2019, S. 1263-1268.
- BÖHM20 Böhm, M.; Wagner, J. L.; Steffen, S.; Gade, J.; Geiger, F.; Sobek, W.; Bischoff, M.; Sawodny, O.: Input modeling for active structural elements – extending the established FE-Workflow for modeling of adaptive structures. In: *2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Boston, 2020, S. 1595-1600.

- BOSCH22 Bosch, M. J.; Nitzlader, M.; Burghardt, T.; Bachmann, M.; Binz, H.; Blandini, L.; Kreimeyer, M.: Effective range of integrated fluidic actuators in structural elements. In: Koshizuka, S. (Hrsg.): *15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII)*. Yokohama, 2022, S. 1-12.
- BOSENS01 Bossens, F.; Preumont, A.: Active tendon control of cable-stayed bridges: a large-scale demonstration. In: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 30 (2001), S. 961-979.
- BURGHARDT21 Burghardt, T.; Honold, C.; Böhm, M.; Wagner, J. L.; Weidner, S.; Bachmann, M.; Roth, D.; Binz, H.; Sawodny, O.; Sobek, W.: Anforderungsermittlung für adaptive Stützen und Aussteifungselemente in Tragkonstruktionen. In: *Konstruktion* 73 (2021), Nr. 10, S. 64-70.
- BURGHARDT21 Burghardt, T.; Kelleter, C.; Bosch, M.; Bachmann, M.; Binz, H.; Blandini, L.; Sobek, W.: Adaptive Beams with Integrated Thermal Actuator. In: *ACTUATOR 2021 - International Conference and Exhibition on New Actuators Systems and Applications*. Berlin, Offenbach, VDE Verlag GmbH, 2021, S. 341-343.
- BURGHARDT22 Burghardt, T.; Kelleter, C.; Bosch, M.; Nitzlader, M.; Bachmann, M.; Binz, H.; Blandini, L.; Sobek, W.: Investigation of a large-scale adaptive concrete beam with integrated fluidic actuators. In: *Civil Engineering Design* 4 (2022), S. 35-42.
- BURGHARDT23 Burghardt, T.; Honold, C.; Böhm, M.; Heidingsfeld, J. L.; Bachmann, M.; Roth, D.; Binz, H.; Sawodny, O.; Kreimeyer, M.: Entwicklung von Aktoren für ein adaptives Hochhaustragwerk. In: *Konstruktion* 75 (2023), Nr. 01-02, S. 68-74.

- CHU05 Chu, S. Y.; Soong, T. T.; Reinhorn, A. M.: *Active, hybrid and semi-active structural control: A design and implementation handbook*. Hoboken [u.a.]: John Wiley & Sons Inc., 2005. – ISBN 13 978-0-470-01352-6
- CLARK98 Clark, R. L.; Saunders, W. R.; Gibbs, G. P.: *Adaptive Structures*. New York: John Wiley & Sons, 1998. – ISBN 0-471-12262-9
- CONNOR03 Connor, J. J.: *Introduction to structural motion control*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Pearson Education, Inc., 2003. – ISBN 978-0-130-09138-3
- CURBACH13 Curbach, M.: Bauen für die Zukunft. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Nr. 11, S. 751.
- CZICHOS19 Czichos, H.: *Mechatronik: Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme*. 4. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2019. – ISBN 978-3-658-26293-8
- DE19745341A1 Schutzrechte DE19745341A1 (23. Juli 1998). Shih, Ming-Hsiang, Taipeh/T'ai-pei, TW.
- DENNIG07 Dennig, H.-J.; Wagner, M.; Binz, H.: Schnell schaltende Aktoren - Ein Systemvergleich linearer Stellglieder. In: *Antriebstechnik* (2007), Nr. 7, S. 32-34.
- DESTANTIS22 Statistisches Bundesamt (Destantis): *Umwelt - Abfallbilanz 2020 (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen)*. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf;jsessionid=-6238BA1892BDC6E60DBF36AB87ACB9F0.-internet742?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft: 08.04.2023.
- DIN EN 1990 2021 DIN EN 1990 Oktober 2021: *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Berlin: Beuth Verlag, 2021.

- DIN EN 1991-1-3 2010 DIN EN 1991-1-3 Dezember 2010: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003 + AC:2009*. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- DIN EN 1992-1-1 2011 DIN EN 1992-1-1 Januar 2011: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochhausbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010*. Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- DIN ISO 16290 2016 DIN ISO 16290 September 2016: *Raumfahrtsysteme - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien (ISO 16290:2013)*. Berlin: Beuth-Verlag, 2016.
- DOMKE81 Domke, H.; Backé, W.; Meyr, H.; Hirsch, G.; Goffin, H.: Aktive Verformungskontrolle von Bauwerken. In: *Bauingenieur* 56 (1981), S. 405-412.
- DOMKE84 Domke, H.; Backé, W.; Theißen, H.; Meyr, H.; Bouten, H.; Zach, B.; Witte, B.; Busch, W.; Goffin, H.: Leistungssteigerung von Biegetragwerken durch aktive Verformungskontrolle. In: *Bauingenieur* 59 (1984), S. 1-8.
- DUDEN23 Cornelsen Verlag GmbH (Hrsg). URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/adaptiv>, zuletzt geprüft: 27.02.2023.
- DUNANT18 Dunant, C. F.; Drewniok, M. P.; Eleftheriadis, S.; Cullen, J. M.; Allwood, J. M.: Regularity and optimisation practice in steel structural frames in real design cases. In: *Resources, Conservation and Recycling* (2018), Nr. 134, S. 294-302.
- ERBE13 Erbe, T.: *Beitrag zur systematischen Aktor- und Aktorprinzipauswahl im Entwicklungsprozess*. Ilmenau, Universität Ilmenau, Dissertation, 2013. – ISBN 978-3-863-68060-0

- FEST04 Fest, E.; Shea, K.; Smith, I. F.C.: Active Tensegrity Structure. In: *Journal of Structural Engineering* 130 (2004), Nr. 10, S. 1454-1465.
- FISCO01 Fisco, N. R.; Adeli, H.: Smart structures: Part I — Active and semi-active control. In: *Scientia Iranica* 18 (2001), Nr. 3, S. 275-284.
- FISCO11 Fisco, N. R.; Adeli, H.: Smart structures: Part II — Hybrid control systems and control strategies. In: *Scientia Iranica* 18 (2011), Nr. 3, S. 285-295.
- FULLER75 Fuller, R. B.; Applewhite, E. J.: *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*. 2. Aufl. New York, London: Macmillan, 1975. – ISBN 0-02-541870-X
- GERICKE21 Gericke, K.; Bender, B.; Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 9. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2021. – ISBN 978-3-662-57302-0
- GERKE12 Gerke, W.: *Elektrische Maschinen und Aktoren - Eine anwendungsorientierte Einführung*. München, Oldenbourg: Oldenbourg Verlag, 2012. – ISBN 978-3-486-71265-0
- GIRMSCHIED13 Girmscheid, M.; Busse, D.; Zedler, T.; Empelmann, M.; Hamm, S.: Adaptive Brückenbauwerke unter Verwendung modularer Verstärkungskonzepte. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Nr. 4, S. 227-236.
- HAWE23 Hawe Hydraulik SE (Hrsg): *Fluidlexikon - Membrane*. Hawe Hydraulik SE. URL: <https://www.hawe.com/de-de/fluidlexikon/membrane/>, zuletzt geprüft: 11.02.2023.
- HEIDINGSFELD17 Heidingsfeld, M.; Rapp, P.; Böhm, M.; Sawodny, O.: Gramian-based actuator placement with spillover reduction for active damping of adaptive structures. In: *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (2017), S. 904-909.

- HERRMANN13 Herrmann, M.; Haase, W.: Tragverhalten biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Nr. 6, S. 382-394
- HOUSNER97 Housner, G. W.; Berman, L. A.; Caughey, T. K.; Chassiakos, A. G.; Claus, R. O.; Masri, S. F.; Skelton, R. E.; Song, T. T.; Yao, J.; Yao, J. T. P.: Structural Control: Past, Present, and Future. In: *Journal of Engineering Mechanics* 123 (1997), Nr. 9, S. 897-971. – ISSN 0733-9399
- HUBER97 Huber, J. E.; Fleck, N.; Ashby, M.: The selection of mechanical actuators based on performance indices. In: *Proceedings of the The Royal Society of London A: Mathematical and Physical Sciences* (1997), Nr. 453, S. 2185-2205.
- ISERMANN08 Isermann, R.: *Mechatronische Systeme: Grundlagen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2008. – ISBN 978-3-540-32336-5
- ISERMANN93 Isermann, R.; Keller, H.: Intelligente Aktoren. In: *Automatisierungstechnische Praxis - atp* 35 (1993), Nr. 11, S. 593-602.
- JANOCHA10 Janocha, H.: *Unkonventionelle Aktoren*. Oldenbourg: Wissenschaftsverlag GmbH, 2010. – ISBN 978-3-486-58915-3
- JENDRITZKA05 Jendritzka, D. J.: *Technischer Einsatz Neuer Aktoren: Grundlagen, Werkstoffe, Designregeln und Anwendungsbeispiele*. Renningen: expert Verlag, 2005.
- JENDRITZKA98 Jendritzka, D. J.: *Technischer Einsatz Neuer Aktoren*. 2. Aufl. Renningen-Malmsheim: expert Verlag, 1998. – ISBN 3-816-91589-2
- KALLENBACH12 Kallenbach, E.; Eick, R.; Quendt, P.; Ströhla, T.; Feindt, K.; Kallenbach, M.; Radler, O.: *Elektromagnete - Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*. 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg-Teubner Verlag, 2012. – ISBN 978-3-834-80968-1

- KELLETER20 Kelleter, C.; Burghardt, T.; Binz, H.; Blandini, L.; Sobek, W.: Adaptive Concrete Beams Equipped With Integrated Fluidic Actuators. In: *Frontiers in Built Environment* 6 (2020), S. 1-13.
- KELLETER22 Kelleter, C.: *Untersuchungen zur Manipulation des Lastabtrages biegebeanspruchter Betonbauteile durch integrierte fluidische Aktoren*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Dissertation, 2022.
- KHAN66 Khan, F. R.: Current Trends in Concrete High-Rise Buildings. In: *Proceedings of a Symposium on Tall Buildings with particular reference to Shear Wall Structures* (1966), S. 571-590.
- KLEIN13 Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-658-02271-6
- KOLLER94 Koller, R.; Kastrup, N.: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1994. – ISBN 3-540-58243-6
- KOPP11 Kopp, G.; Burkardt, N.; Majic, N.: *Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München Wien: Hanser Verlag, 2011. – ISBN 978-3-446-42267-4
- KORVINK00 Korvink, J. G.; Schlaich, M.: Autonome Brücken - ein Blick in die ferne Zukunft des Brückenbaus. In: *Bauingenieur* 75 (2000), Nr. 1, S. 29-34.
- KURATA99 Kurata, N.; Kobori, T.; Takahashi, M.; Niwa, N.; Midorikawa, H.: Actual seismic response controlled building with semi-active damper system. In: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28 (1999), S. 1427-1447.
- LANGBEIN13 Langbein, S.; Czechowicz, A.: *Konstruktionspraxis Formgedächtnistechnik - Potentiale - Auslegung - Beispiele*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-834-81957-4

- LIEDTKE72 Liedtke, K.: *Ein Beitrag zur Auswahl und Dimensionierung des Triebsystems bei der Entwicklung eines neuen Relais*. Ilmenau, TH Ilmenau, Dissertation, 1972.
- MADDEN05 Madden, J.; Filipozzi, L.: Web-based actuator selection tool. In: *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials (2005)*, Nr. 5759, S. 9-15.
- MISES45 Mises, R.v.: On Saint Venant's principle. In: *Bulletin of the American Mathematical Society* 51 (1945), S. 55-562.
- MOORED09 Moored, K. W.; Bart-Smith, H.: Investigation of clustered actuation in tensegrity structures. In: *International Journal of Solids and Structures* 46 (2009), S. 3272-3281.
- MORO21 Moro, J. L.: *Baukonstruktion - Vom Prinzip zum Detail: Band 1 Grundlagen*. Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2021. – ISBN 978-3-662-64154-5
- MOTRO03 Motro, R.: *Tensegrity - Structural Systems for the Future*. 1. Aufl. London, Sterling: Kogan Page Science, 2003. – ISBN 1-903996-37-6
- NEUHÄUSER13A Neuhäuser, S.; Weickgenannt, M.; Haase, W.; Sawodny, O.: Adaptive Tragwerke – Aktuelle Forschungen im Ultraleichtbau. In: *Stahlbau* 82 (2013), Nr. 6, S. 428-437.
- NEUHÄUSER13B Neuhäuser, S.; Weickgenannt, M.; Witte, C.; Haase, W.; Sawodny, O.; Sobek, W.: Stuttgart Smartshell – a Full Scale Prototype of an Adaptive Shell Structure. In: *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 54 (2013), Nr. 4, S. 259-270.
- NEUHÄUSER14 Neuhäuser, S.: *Untersuchungen zur Homogenisierung von Spannungsfeldern bei adaptiven Schalentragwerken mittels Auflagerverschiebung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Dissertation, 2014.

- PONS23 PONS Langenscheidt GmbH: Online-Wörterbuch. URL: <https://de.pons.com/übersetzung/latein-deutsch/adaptare>, zuletzt geprüft: 27.02.2023.
- RAAB90 Raab, U.; Isermann, R.: Actuator principles with low power. In: *Actuator 90.*, Bremen, 1990.
- RABUS16 Rabus, D.: *Vergleichende Untersuchung von Linearaktoren*. Stuttgart, Universität Stuttgart. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Masterarbeit, 2016.
- REINHORN92 Reinhorn, A. M.; Soong, T. T.; Lin, R. C.; Riley, M. A.; Wang, Y. P.; Aizawa, S.; Higashino, M.: *Active Bracing System: A Full Scale Implementation of Active Control*. Buffalo, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Technical Report NCEER-92-0020, 1992.
- REKSOWARDOJO22 Reksowardojo, A. P.; Senatore, G.; Srivastava, A.; Carroll, C.; Smith, I. F.C.: Design and testing of a low-energy and -carbon prototype structure that adapts to loading through shape morphing. In: *International Journal of Solids and Structures* 252 (2022), S. 111629.
- RODDECK17 Roddeck, W.: Sensoren und Aktoren. In: Böge, A.; Böge, W. (Hrsg.): *Handbuch Maschinenbau*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 675-700 – ISBN 978-3-658-12529-5
- ROTH00 Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 1: Konstruktionslehre*. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2000. – 978-3-642-62099-7
- ROTH01 Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 2: Konstruktionskataloge*. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2001. – ISBN 978-3-642-62100-0
- SCHNEIDER87 Schneider, J.: *Konstruktionskataloge als Hilfsmittel bei der Entwicklung von Antrieben*. Darmstadt, Technische Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1987. – ISBN 3-820-30127-5

- SCHNELLENBACH-HELD14 Schnellenbach-Held, M.; Steiner, D.: Self-Tuning Closed-Loop Fuzzy Logic Control Algorithm for Adaptive Prestressed Structures. In: *Structural Engineering International* 24 (2014), Nr. 2, S. 163-172.
- SENATORE13 Senatore, G.; Duffour, P.; Wise, C.; Winslow, P.; Sean, H.: Designing adaptive structures for whole life energy savings. In: *5th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*. Cape Town, Taylor and Francis Group, 2013, S. 2105-2110.
- SENATORE18 Senatore, G.; Duffour, P.; Winslow, P.; Wise, C.: Shape control and whole-life energy assessment of an 'infinitely stiff' prototype adaptive structure. In: *Smart Materials and Structures* 27 (2018), S. 015022.
- SENATORE19 Senatore, G.; Duffour, P.; Winslow, P.: Synthesis of minimum energy adaptive structures. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 60 (2019), S. 849-877.
- SHEA02 Shea, K.; Fest, E.; Smith, I. F.C.: Developing Intelligent Tensegrity Structures with Stochastic Search. In: *Advanced Engineering Informatics* 16 (2002), S. 21-40.
- SHRINIVASAN01 Shrinivasan, A. V.; McFarland, D. M.: *Smart Structures - Analysis and Design*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – ISBN 0-521-65026-7
- SOBEK00 Sobek, W.; Haase, W.; Teuffel, P.: Adaptive Systeme. In: *Stahlbau* 69 (2000), Nr. 7, S. 544-555.
- SOBEK01 Sobek, W.; Teuffel, P.: Adaptive systems in architecture and structural engineering. In: Lui, S.-C. (Hrsg.): *Spei 4330, Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures and Highways.*, Bd. 4330, Newport Beach, 2001, S. 35-45.

- SOBEK06 Sobek, W.; Teuffel, P.; Weilandt, A.; Lemaitre, C.: Adaptive and Lightweight. In: *Adaptables 2006 - International Conference on Adaptable Building Structures.*, Eindhoven, 2006, S. 6/38-6/42.
- SOBEK14 Sobek, W.: Ultraleichtbau. In: *Stahlbau* 83 (2014), Nr. 11, S. 784-789.
- SOBEK16 Sobek, W.: Ultraleichtbau. In: Graz, T. U. (Hrsg.): *GAM - Graz Architecture Magazine 12: Structural Affairs: Potenziale und Perspektiven der Zusammenarbeit in Planung, Entwurf und Konstruktion.* Berlin, Boston: Birkhäuser, 2016, S. 155-167 – ISBN 978-3-035-60983-7
- SOBEK21 Sobek, W.; Sawodny, O.; Bischoff, M.; Blandini, L.; Böhm, M.; Haase, W.; Klett, Y.; Mahall, M.; Weidner, S.; Burghardt, T.; Leistern, P.; Maierhofer, M.; Park, S.; Reina, G.; Roth, D.; Tarin, C.: Adaptive Hüllen und Strukturen - Aus den Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 1244. In: *Bautechnik* 3 (2021), Nr. 98, S. 208-221.
- SOBEK95 Sobek, W.: Zum Entwerfen im Leichtbau. In: *Bauingenieur* 70 (1995), S. 323-329.
- SOONG02 Soong, T. T.; Spencer Jr, B. F.: Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. In: *Engineering Structures* 24 (2002), Nr. 3, S. 243-259.
- SOONG90 Soong, T. T.: *Active Structural Control: Theory and Practice.* Burnt Mill, Harlow: Longman Scientific & Technical, 1990. – ISBN 0-582-01782-3
- SPENCER03 Spencer, B. F.; Nagarajaiah, S.: State of the Art of Structural Control. In: *Journal of Structural Engineering* 129 (2003), Nr. 7, S. 845-856.
- SPENCER97 Spencer, B. F.; Sain, M. K.: Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback. In: *IEEE Control Systems Magazine* 17 (1997), Nr. 6, S. 19-35.

- STEFFEN21 Steffen, S.; Nitzlader, M.; Burghardt, T.; Binz, H.; Blandini, L.; Sobek, W.: An Actuator Concept for Adaptive Concrete Columns. In: *Actuators* 10 (2021), Nr. 273, S. 1-16.
- STÖLTING04 Stölting, H.-D.: Electromagnetic Actuators. In: Janocha, H. (Hrsg.): *Actuators*. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2004, S. 85-153 – ISBN 978-3-540-61564-4
- TEUFFEL04 Teuffel, P.: *Entwerfen adaptiver Strukturen*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Dissertation, 2004.
- UNEP11 United Nations Environment Programme (UNEP) - Working Group on Decoupling: *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. United Nations Environment Programme (UNEP), 2011. – ISBN 978-9-280-73167-5
- UNEP 14 UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS): *Sand, rarer than one thinks*. United Nations Environment Programme (UNEP), 2014. Verfügbar unter: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8665?show=full>, zuletzt geprüft: 10.04.2023
- UNEP22 United Nations Environment Programme (UNEP): *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector - Executive Summary*. United Nations Environment Programme (UNEP) and Global Alliance for Buildings and Construction, 2022. Verfügbar unter: <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>, zuletzt geprüft: 10.04.2023
- UN19 United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division: *World Population Prospects 2019: Highlights*. United Nations (UN), New York, 2019. – ISBN 978-92-1-004235-2

- VDI 2221-1 2019 VDI 2221 Blatt 1 November 2019. Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2222-2 1982 VDI 2222 Blatt 2 Februar 1982: Konstruktionsmethodik - Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen. Berlin: Beuth Verlag.
- WADA90 Wada, B. K.: Adaptive structures - An overview. In: *Journal of Spacecraft and Rockets* 27 (1990), Nr. 3, S. 330-337.
- WAGNER18 Wagner, J. L.; Gade, J.; Heidingsfeld, M.; Geiger, F.; Von Scheven, M.; Böhm, M.; Bischoff, M.; Sawodny, O.: On steady-state disturbance compensability for actuator placement in adaptive structures. In: *at-Automatisierungstechnik* 66 (2018), Nr. 8, S. 591-603.
- WAGNER20 Wagner, J. L.; Gienger, A.; Stein, C.; Arnold, P.; Tarín, C.; Sawodny, O.; Böhm, M.: Optimal Static Load Compensation With Fault Tolerance in Nonlinear Adaptive Structures Under Input and State Constraints. In: *Frontiers in Built Environment* 93 (2020), Nr. 6, S. 1-18.
- WARGON85 Wargon, A.: Sydney tower at Centrepont (Australia). In: *IABSE Structures* (1985), Nr. 9, S. 24-26. – ISSN 0377-7286
- WEIDNER18 Weidner, S.; Kelleter, C.; Sernberg, P.; Haase, W.; Geiger, F.; Burghardt, T.; Honold, C.; Wagner, J. L.; Böhm, M.; Bischoff, M.; Sawodny, O.; Binz, H.: The Implementation Of Adaptive Elements Into An Experimental High-Rise Building. In: *Steel Construction* 11 (2018), Nr. 2, S. 109-117.
- WEIDNER19 Weidner, S.; Steffen, S.; Sobek, W.: The Integration of Adaptive Elements into High-Rise Structures. In: *International Journal of High-Rise Buildings* 8 (2019), Nr. 2, S. 95-100.
- WEILANDT07 Weilandt, A.: *Adaptivität bei Flächentragwerken*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Dissertation, 2007.

-
- WILL14 Will, D.; Gebhardt, N.: *Hydraulik - Grundlagen, Komponenten, Systeme*. 6. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – ISBN 978-3-662-44401-6
- WROLDSSEN09 Wroldsen, A. S.; Oliveira, M. C.d.; Skelton, R. E.: Modelling and control of non-minimal non-linear realisations of tensegrity systems. In: *International Journal of Control* 82 (2009), Nr. 3, S. 389-407.
- YAMAZAKI92 Yamazaki, S.; Nagata, N.; Abiru, H.: Tuned active dampers installed in the Minato Mirai (MM) 21 Landmark Tower in Yokohama. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 43 (1992), Nr. 1-3, S. 1937-1948.
- YAO72 Yao, J. T.P.: Concept of Structural Control. In: *ASCE Journal of the Structural Division* 98 (1972), Nr. 7, S. 1567-1574.
- ZILCH10 Zilch, K.; Zehetmaier, G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau - Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – e-ISBN 978-3-540-70638-0
- ZILCH13 Zilch, K.; Schneider, R.: *Konstruktiver Ingenieurbau und Hochbau*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-642-41839-6
- ZUPAN02 Zupan, M.; Ashby, M. F.; Fleck, N. A.: Actuator Classification and Selection - The Development of a Database. In: *Advanced Engineering Materials* 4 (2002), Nr. 12, S. 933-940.

Anhang

A.1 Technologie-Reifegrad nach [DIN ISO 16290 2016]

Technologie-Reifegrad (TRL)	Beschreibung
TRL 1: Grundlagen erfasst und dargelegt	Aufgrund von grundlegenden Beobachtungen werden mögliche Anwendungen identifiziert, jedoch noch kein Konzept formuliert.
TRL 2: Technologiekonzept und/oder Technologieanwendung formuliert	Ausformulierung von möglichen Anwendungen und vorläufiges Konzept des Elements. Noch kein Nachweiskonzept.
TRL 3: Analytisches und experimentelles Nachweiskonzept der kritischen Funktion und/oder der Ausprägung	Das Konzept des Elements ist ausgearbeitet, die erwartete Leistung wird durch analytische Modelle demonstriert, die durch experimentelle Daten/Ausprägungen gestützt werden.
TRL 4: Verifizierung der Komponente und/oder des Funktionsmodells im Laborumfeld	Das Funktionsverhalten des Elements wird mittels Funktionsmodelltests im Laborumfeld demonstriert.
TRL 5: Verifizierung der kritischen Funktionen der Komponente und/oder des Funktionsmodells in einer relevanten Umgebung	Kritische Funktionen des Elements werden identifiziert und die damit verbundene relevante Umgebung wird definiert. Für die Verifizierung der Leistung werden nichtmaßstäbliche Funktionsmodelle gebaut, um sie in der relevanten Umgebung in Abhängigkeit von Skalierungseffekten zu testen.
TRL 6: Modelldemonstration der kritischen Funktionen des Elements in einer relevanten Umgebung	Kritische Funktionen des Elements werden verifiziert, Leistungsnachweis in der relevanten Umgebung durch bezüglich Form, Passform und Funktion repräsentative/s Modell/e.
TRL 7: Modelldemonstration der Leistung des Elements in der Einsatzumgebung	Die Leistung für die relevanten Einsatzumgebung wird am Boden oder, falls erforderlich, im Weltraum demonstriert. Ein repräsentatives Modell, das alle Aspekte der Flugmodellkonstruktion in vollem Umfang widerspiegelt, wird gebaut und für den Leistungsnachweis mit geeigneten Fehlerspielräumen in der Einsatzumgebung getestet.

Tabelle A.1: Zusammenfassung der Technologie-Reifegrade [DIN ISO 16290 2016,

S. 16 f.]

Technologie-Reifegrad (TRL)	Beschreibung
TRL 8: Ist-System vollständig und abgenommen für den Flug („flugtauglich“)	Das Flugmodell ist qualifiziert und in das endgültige und flugbereite System integriert.
TRL 9: Ist-System „flugerprobt“ durch erfolgreichen Missionsbetrieb	Die Technologie ist ausgereift. Das Element ist in der tatsächlichen Einsatzumgebung erfolgreich für die vorgesehene Mission in Betrieb.

Tabelle A.1: Zusammenfassung der Technologie-Reifegrade [DIN ISO 16290 2016, S. 16 f.] (Fortsetzung)

A.2 Quellennachweis für Tabelle 5.3

Lösungsprinzip für...	Beschreibende Eigenschaft	Quellennachweis
... fluidmechanische Aktoren	Verdrängungsprinzip, translatorische Bewegung	<ul style="list-style-type: none"> Einfachwirkender Zylinder, Differenzial-, Gleichlauf-, (einfachwirkender) Teleskopzylinder nach [ISERMANN08, S. 474] Membranzylinder nach [HAWE23]
	Verdrängungsprinzip, rotatorische Bewegung	<ul style="list-style-type: none"> [SCHNEIDER87, S. 133]
	Strömungsprinzip, rotatorische Bewegung	<ul style="list-style-type: none"> [SCHNEIDER87, S. 133]
... elektrodynamische Aktoren	lastunabhängige Drehbewegung	<ul style="list-style-type: none"> [SCHNEIDER87, S. 133]
	lastabhängige Drehbewegung	<ul style="list-style-type: none"> [SCHNEIDER87, S. 133]
... elektromagnetische Aktoren		<ul style="list-style-type: none"> [KALLENBACH12, S. 264] nach [LIEDTKE72]
... magneto- und elektrorheologische Aktoren		<ul style="list-style-type: none"> [JANOCHA10, S. 107]
... thermische Aktoren		<ul style="list-style-type: none"> Dehnstoff-Aktor nach [CZICHOS19, S. 166]
... magneto- und elektrorheologische Aktoren		<ul style="list-style-type: none"> [JANOCHA10, S. 107]

Tabelle A.2: Quellennachweis für Tabelle 5.3

Lösungsprinzip für...	Beschreibende Eigenschaft	Quellennachweis
... piezo-elektrische Aktoren	begrenzte Auslenkung	<ul style="list-style-type: none"> • [JANOCHA10, S. 28 ff.]
	unbegrenzte Auslenkung	<ul style="list-style-type: none"> • Wurmantrieb nach [JANOCHA10, S. 40] • Schreitantrieb nach [JANOCHA10, S. 42] • Trägheitsantrieb nach [JANOCHA10, S. 43] • Ultraschallmotor nach [JANOCHA10, S. 47]

Tabelle A.2: Quellennachweis für Tabelle 5.3 (Fortsetzung)

A.3 Paarweiser Vergleich für die Konzeptauswahl

Im Folgenden sind die paarweisen Vergleiche zur Ermittlung der Gewichtung der Beurteilungskriterien aufgeführt.

wichtiger als	geringer Bauraum	gute Integrations- möglichkeit in umgebende Tragstruktur	geringer Entwicklungsaufwand	hohe Ausfallsicherheit	geringe Herstellkosten / einfache Fertigung	einfache Montage	geringer Wartungsaufwand	Gute Steuerbarkeit	gute Designverträglichkeit mit der Architektur	Summe	Anteil
	geringer Bauraum	-	1	1	0	0	1	0	1	0	4
gute Integrationsmöglichkeit in umgebende Tragstruktur	0	-	1	0	0	0	0	0	0	1	2,78 %
geringer Entwicklungsaufwand	0	0	-	0	0	1	0	0	0	1	2,78 %
hohe Ausfallsicherheit	1	1	1	-	1	1	0	1	0	6	16,67 %
geringe Herstellkosten / einfache Fertigung	1	1	1	0	-	1	0	0	0	4	11,11 %
einfache Montage	0	1	0	0	0	-	0	0	0	1	2,78 %
geringer Wartungsaufwand	1	1	1	1	1	1	-	1	0	7	19,44 %
gute Steuerbarkeit	0	1	1	0	1	1	0	-	0	4	11,11 %
gute Designverträglichkeit mit der Architektur	1	1	1	1	1	1	1	1	-	8	22,22 %
Gesamtsumme										36	100 %

Tabelle A.3: Paarweiser Vergleich für die Konzeptauswahl der zu aktuierenden Aussteifung

als wichtiger		hohe Realisierungschance im gegebenen Bauraum	geringer Entwicklungsaufwand	hohe Ausfallsicherheit	geringe Herstellkosten / einfache Fertigung	einfache Montage	geringer Wartungsaufwand	gute Steuerbarkeit	gute Designverträglichkeit mit der Architektur	Summe	Anteil
		hohe Realisierungschance im gegebenen Bauraum	-	1	1	0	0	1	0	1	4
geringer Entwicklungsaufwand	0	-	1	0	0	0	0	0	1	2,78 %	
hohe Ausfallsicherheit	0	0	-	0	0	1	0	0	1	2,78 %	
geringe Herstellkosten / einfache Fertigung	1	1	1	-	1	1	0	1	6	16,67 %	
einfache Montage	1	1	1	0	-	1	0	0	4	11,11 %	
geringer Wartungsaufwand	0	1	0	0	0	-	0	0	1	2,78 %	
gute Steuerbarkeit	1	1	1	1	1	1	-	1	7	19,44 %	
gute Designverträglichkeit mit der Architektur	0	1	1	0	1	1	0	-	4	11,11 %	
Gesamtsumme									36	100 %	

Tabelle A.4: Paarweiser Vergleich für die Konzeptauswahl der zu aktuierenden Stütze

als wichtiger		hohe Realisierungschance im gegebenen Bauraum	geringe Anschaffungs- und Herstellungskosten	einfache Fertigung	einfache Montage	lange Lebensdauer	geringe Systemkomplexität	hohe Ausfallsicherheit	geringer Entwicklungsaufwand	Summe	Anteil
		hohe Realisierungschance im gegebenen Bauraum	-	1	1	1	0	0	1	0	4
geringe Anschaffungs- und Herstellungskosten	0	-	1	1	0	1	0	1	4	14,29%	
einfache Fertigung	0	0	-	1	0	1	0	0	2	7,14%	
einfache Montage	0	0	0	-	0	0	0	1	1	3,57%	
lange Lebensdauer	1	1	1	1	-	1	0	0	5	17,86%	
geringe Systemkomplexität	1	0	0	1	0	-	0	0	2	7,14%	
hohe Ausfallsicherheit	0	1	1	1	1	1	-	1	6	21,43%	
geringer Entwicklungsaufwand	1	0	1	0	1	1	0	-	4	14,29%	
Gesamtsumme									28	100,00%	

Tabelle A.5: Paarweiser Vergleich für die Konzeptauswahl des zu aktuierenden Balkens in Kapitel 8

wichtiger als	hohe Realisierungschance im gegebenen Bauraum	hohe Chance der Funktionsfähigkeit	geringe Anschaffungs- und Herstellungskosten	einfache Fertigung	einfache Montage	lange Lebensdauer	geringe Systemkomplexität	hohe Ausfallsicherheit	geringer Entwicklungsaufwand	Summe	Anteil
	hohe Realisierungschance im gegebenen Bauraum		0	1	1	1	1	0	0	0	4
hohe Chance der Funktionsfähigkeit	1		1	1	1	1	1	1	1	8	22,22%
geringe Anschaffungs- und Herstellungskosten	0	0		1	1	0	1	0	0	3	8,33%
einfache Fertigung	0	0	0		1	0	0	0	1	2	5,56%
einfache Montage	0	0	0	0		0	1	0	1	2	5,56%
lange Lebensdauer	0	0	1	1	1		1	0	1	5	13,89%
geringe Systemkomplexität	1	0	0	1	0	0		0	1	3	8,33%
hohe Ausfallsicherheit	1	0	1	1	1	1	1		1	7	19,44%
geringer Entwicklungsaufwand	1	0	1	0	0	0	0	0		2	5,56%
Gesamtsumme										36	100 %

Tabelle A.6: Paarweiser Vergleich für die Konzeptauswahl des zu aktuierenden Balkens in Kapitel 9

Lebenslauf

Persönliche Angaben:

Name: Timon Valentin Burghardt
Geburtsdatum: 30.11.1987
Geburtsort: Stuttgart
Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung:

09/1998 – 06/2007 Zabergäu-Gymnasium in Brackenheim mit dem Abschluss Allgemeine Hochschulreife
09/2007 – 05/2008 Zivildienst im Rettungsdienst und Krankentransport beim Arbeiter-Samariter-Bund (ASB) Heilbronn-Franken e.V.
10/2008 – 03/2012 Studium des Maschinenbaus am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit Abschluss Bachelor of Science
04/2012 – 10/2014 Studium des Maschinenbaus am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit Abschluss Master of Science
05/2014 – 10/2014 Masterarbeit am Institut für Produktentwicklung (IPEK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), und der Hilti AG in Schaan

Berufserfahrung:

02/2015 – 03/2015 Forschungsingenieur bei der Avoris Personal AG, Schaan, im Einsatz bei der Hilti AG, Schaan, im Bereich Research Fastenings & Applications
04/2015 – 09/2022 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktions-technik und Technisches Design (IKTD), Universität Stuttgart
11/2022 – 04/2023 Konstruktionsingenieur bei der Xactools GmbH, Bönningheim
seit 05/2023 Konstruktionsleiter bei der Xactools GmbH, Bönningheim

