

Der Beitrag der Regelungstechnik zum Entwurf und Betrieb von adaptiven Tragwerken

Michael Böhm, Oliver Sawodny

Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart

Zusammenfassung: Adaptive Tragwerke sind ca. 50 % leichter und erlauben somit ein nachhaltiges Bauen. Damit die Aktoren und Sensoren die Robustheit und Langlebigkeit des Tragwerks erhöhen, sind neben dem klassischen Reglerentwurf dazu auch Methoden der Aktor- und Sensorplatzierung sowie der Fehlererkennung und -isolation nötig. Dieser Artikel gibt einen Überblick über diese Methoden und ihren Beitrag zu Entwurf, Betrieb und Sicherheit eines adaptiven Tragwerks.

1 Einleitung

Die Möglichkeit, Tragwerke mit Aktoren auszustatten wurde schon in den 1970er Jahren angedacht [16]. Die Idee wurde von Werner Sobek in einem im Jahr 2000 erschienenen Artikel weiterentwickelt und konkretisiert [12]. Seit 2009 werden adaptive Strukturen an der Universität Stuttgart erforscht. Zunächst entstand im Rahmen der *DFG-Forschergruppe FOR 981 - HIKE* die Stuttgart SmartShell, ein doppelt gekrümmtes Schalentragsystem, das eine Grundfläche von 10 m × 10 m überspannt [9, 15]. Seit 2017 arbeiten verschiedene Disziplinen in Stuttgart im Rahmen des *Sonderforschungsbereichs SFB 1244* zusammen, um Methoden für den Entwurf, den Betrieb und die Sicherheit adaptiver Tragwerke zu erforschen. Erste Ergebnisse aus der ersten Förderperiode haben gezeigt, dass mit adaptiven Tragwerken in vielen Anwendungsfällen (u. a. bei Hochhäusern) etwa 50 % der Bauwerksmasse eingespart werden können [10]. Da das Bauen für einen sehr großen Teil der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich ist, besteht mit adaptiven Tragwerken ein großer Hebel für eine deutliche Reduktion der globalen Emissionen.

Die Integration von Aktorik und Sensorik in Tragwerken ist der Schlüssel zum Übergang vom Leichtbau zum Ultraleichtbau. Durch die Reduktion der Tragwerksmasse wird eine solche Struktur bei dynamischen Lasten jedoch mit größerer Amplitude schwingen. Die reduzierte Steifigkeit sorgt außerdem für größere Auslenkungen auch bei statischen Lasten. Geeignete

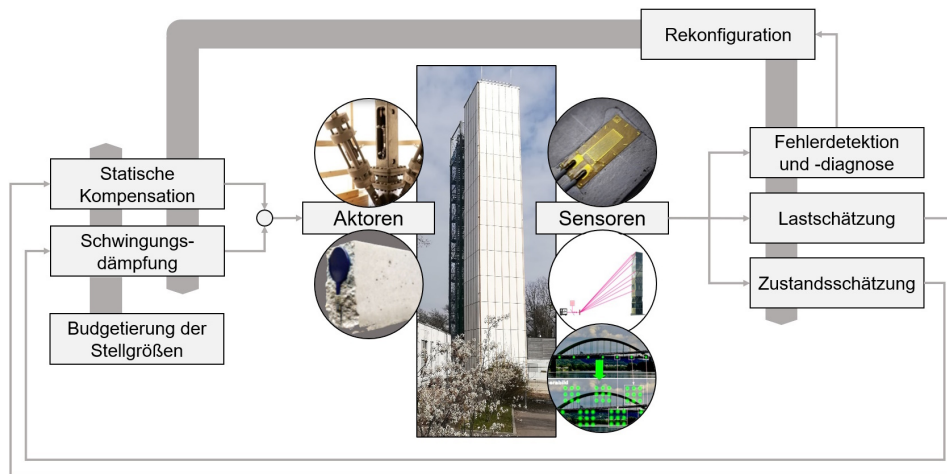


Abbildung 1: Regelkreis für adaptive Tragwerke.

Algorithmen zur Ansteuerung fügen dem Tragwerk durch die Aktorik daher virtuelle Dämpfung und virtuelle Steifigkeit hinzu. Neben Konstrukteuren, Architekten, Bauingenieuren und Zuverlässigkeitsexperten werden daher auch Regelungstechniker beim Entwurf und Bau von adaptiven Tragwerken benötigt.

In einer solchen interdisziplinären Zusammenarbeit entstanden in den letzten Jahren Methoden um u. A. die Beantwortung der folgenden Fragen für adaptive Tragwerke voranzutreiben:

- Wo müssen Aktoren platziert werden und wie müssen diese ausgelegt werden?
- Welche Tragwerke eignen sich gut für eine Adaption?
- Wo müssen Sensoren für eine gute Rekonstruktion des Systemzustands und der einwirkenden Lasten platziert werden?
- Wie kann im Falle des Ausfalls von Komponenten oder des ganzen Systems trotzdem ein sicherer Betrieb gewährleistet werden?

In Abb. 1 ist der Regelkreis eines adaptiven Tragwerks dargestellt. Im Folgenden sollen die verschiedenen Elemente der modellbasierten Entwurfskette näher beleuchtet werden, wobei vor allem auf den modellbasierten Entwurf, speziell die Aktorplatzierung, sowie auf die Rückführung und die Fehlererkennung und Rekonfiguration eingegangen wird. Im nächsten Abschnitt wird dazu zunächst ein einfaches Modell für adaptive Tragwerke vorgestellt.

2 Modellierung

Als dynamisches Modell adaptiver Tragwerke kommt ein lineares Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) zum Einsatz. Die einzelnen Elemente zwischen den Tragwerksknoten werden

dabei als je ein finites Element modelliert, so dass die Freiheitsgrade (FHG) des vollständigen Modells gerade den Knotenverschiebungen und -verdrehungen entsprechen. Aus der FE ergeben sich die Massenmatrix $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ und die Steifigkeitsmatrix $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Das Modell ergibt sich dann zu

$$M\ddot{q} + Kq = Bu + Ez. \quad (1)$$

Da es sich um ein adaptives Tragwerk handelt, enthält die rechte Seite neben den externen Lasten Ez auch die durch die Aktorik eingebrachten Kräfte Bu , wobei die Eingangsmatrix $B \in \mathbb{R}^{n \times n_u}$ die n_u Aktorkräfte auf die n FHG verteilt. In der Simulation wird häufig auf der linken Seite noch eine Massen- und Steifigkeits-proportionale Dämpfung eingefügt, mit $D = \alpha_1 M + \alpha_2 K$ nach [13]. In der Praxis wird vor der Implementierung die Dämpfung der niedrigsten Moden experimentell bestimmt. Für den Entwurf der Zustandsschätzung und Regelung muss das hoch-dimensionale Modell (1) mittels Modal-Transformation reduziert werden. Die Eigenmoden Φ ergeben sich aus dem verallgemeinerten Eigenwertproblem

$$M\omega_i^2 \varphi_i = K\varphi_i, \quad i \in 1, \dots, n. \quad (2)$$

Die Matrix $\Phi_r = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r]$ ist dabei die Transformationsmatrix der reduzierenden Modaltransformation mit den modalen Amplituden $\eta = \Phi_r^\top q$ bzw. $q = \Phi_r \eta$. Die Eigenmoden sind dabei nach Frequenz aufsteigend sortiert, sodass $\omega_1 \leq \omega_2 \leq \dots \leq \omega_r$ gilt. Die Dynamik wird damit auf den durch die 5 ersten Moden aufgespannten r -dimensionalen Unterraum projiziert. Es folgt das reduzierte Modell mit

$$\Phi_r^\top M \Phi_r \ddot{q} + \Phi_r^\top D \Phi_r \dot{q} + \Phi_r^\top M \Phi_r q = \Phi_r^\top B u + \Phi_r^\top E z. \quad (3)$$

Mit $M_r = \Phi_r^\top M \Phi_r$, $D_r = \Phi_r^\top D \Phi_r$ und $K_r = \Phi_r^\top K \Phi_r$ kann das DGL-System zweiter Ordnung (3) in ein DGL-System erster Ordnung mit $2r$ FHG überführt werden:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\eta}_r \\ \dot{\eta}_r \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} & I^{r \times r} \\ M_r^{-1} D_r & M_r^{-1} K_r \end{bmatrix}}_{A_r} \underbrace{\begin{bmatrix} \eta_r \\ \dot{\eta}_r \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ M_r^{-1} \Phi_r^\top B \end{bmatrix}}_{B_r} u + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ M_r^{-1} \Phi_r^\top E \end{bmatrix}}_{E_r} z \quad (4)$$

3 Entwurf

Ziel des modellbasierten Entwurfs ist die Bestimmung der Modellparameter, so dass das System in Bezug auf eine zu definierende Gütefunktion optimal in seinen Eigenschaften ist. Für die Optimierung der Topologie wird in [8] auf Basis der in [5] beschriebenen Redundanzmatrix für lineare Stabtragwerke vorgestellt.

Aus Sicht der Regelungstechnik ist die Platzierung von Aktoren und Sensoren für adaptive Tragwerke eine zentrale Fragestellung. Übliche Gütefunktionen für die Platzierung basieren dabei auf Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitsmaßen. So wird in [11] ein Verfahren zur Sensorplatzierung auf Basis der Beobachtbarkeits-Gramschen beschrieben. Die Auswahl der Sensorik erfolgt darin mittels Greedy-Algorithmus. Die Platzierung der Aktorik auf Basis der Steuerbarkeits-Gramschen wird in [7] beschrieben. Für diese Maße liefert der Greedy-Algorithmus, bei dem immer das Element der Aktor- bzw. Sensormenge hinzugefügt

wird, mit dem die größte Verbesserung der Gütefunktion erreicht wird, nachweislich eine optimale Lösungen.

Bei steifigkeitsdomierten adaptiven Tragwerken ist allerdings nicht die Dämpfung, sondern die Kompensation von Verschiebungen auf Grund statischer Lasten maßgebend für die Möglichkeit, Masse im Tragwerk einzusparen. Es ist somit entscheidend, die Aktorik für diese statische Kompensation optimal zu platzieren. Zu diesem Zweck wird von einem zweistufigen Optimierungsproblem ausgegangen. Die Platzierung erfolgt dabei auf Basis der maximal möglichen Kompensationsgüte K^* , wobei sich diese als Lösung eines unterlagerten Optimierungsproblems mit Gütefunktion J ergibt. Die optimale Aktormenge \mathcal{S}_k^* für k Aktoren ist formal gegeben als:

$$\mathcal{S}_k^* = \operatorname{argmin}_{\mathcal{S}_k \subset \mathcal{P}_k} K^*(\mathcal{S}_k) \quad (5)$$

mit dem unterlagerten Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen (\mathbf{A}, \mathbf{b})

$$\mathcal{K}_k^* = \min_{\mathbf{u}} J^*(\mathbf{u}), \quad \text{s. t. } \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b} \geq \mathbf{0}. \quad (6)$$

In [14] wird beispielsweise $J = \mathbf{y}^\top \mathbf{y}$ verwendet, ohne zusätzliche Nebenbedingungen. Dabei wird die Verformung mit den vorhandenen Aktoren minimiert. Die Aktormenge, mit der sich die geringste residuale Verformung unter einer bestimmten Last einstellen lässt, wird als die optimale Aktormenge bezeichnet. Bessere Ergebnisse liefert jedoch eine unterlagerte Optimierung der Aktorkräfte, also $J = -\mathbf{u}^\top \mathbf{u}$, wobei eine maximale residuale Verformung (statisch) als Nebenbedingung verwendet wird. Ein Vergleich dieser und gemischter Gütekriterien findet sich in [4]. Um die zulässige Verformung zu erreichen, reicht die halbe Aktorkraft aus, im Vergleich zur maximal möglichen Kompensation.

Das unterlagerte Optimierungsproblem ist kontinuierlich und wird daher mit Gradientenbasierten Verfahren gelöst, während für das überlagerte Optimierungsproblem der diskreten Aktorplatzierung weiterhin ein Greedy-Algorithmus eingesetzt wird. In [17] wird als Alternative ein genetischer Algorithmus und eine Kombination aus genetischem und Greedy-Algorithmus vorgeschlagen. Obwohl bei der zweistufigen Optimierung keine Garantie für die Optimalität des Greedy-Algorithmus gegeben werden kann, zeigt der Vergleich der Ergebnisse dieser verschiedenen Ansätze, dass mit dem numerisch deutlich aufwendigeren genetischen Algorithmus keine signifikante Verbesserung des Gütekriteriums erreicht wird. Für symmetrische Tragwerke führt der genetische Algorithmus jedoch zu symmetrischen Lösungen, was als Vorteil gewertet werden kann. Dies wird aber auch erreicht, wenn die numerisch weniger aufwendige Kombination aus Greedy- und genetischem Algorithmus genutzt wird.

4 Regelung

Wie Abb. 1 zeigt, hat die Regelung zwei Ziele – die Dämpfung von Schwingungen des Tragwerks sowie die Kompensation von Verformungen aufgrund statischer Lasten. Aufgabe der Stellgrößenbudgetierung ist es, die beiden Ziele in Einklang zu bringen. In [2] wurde dazu eine modellprädiktive Regelung (MPC) entworfen, die das Stellgrößenbudget so aufteilt, dass

zu jeder Zeit die Verformungen mindestens auf die für die Gebrauchstauglichkeit notwendigen Werte begrenzt werden. Für die Dämpfung stehen dann noch die nicht verwendeten Stellreserven zur Verfügung. D. h. die besten Ergebnisse erzielt ein *Main-Secondary*-Ansatz, wobei die statische Kompensation die Primärregelung ist, und die Schwingungsdämpfung als Sekundärregelung mit dem verbleibenden Budget auskommen muss.

In [1] konnte gezeigt werden, dass es mit einer MPC für die Schwingungsdämpfung außerdem möglich ist, die Elementabnutzung durch gezielte Gewichtung der Elementlänge im Gütekriterium der MPC zu verringern oder zu vergrößern. Dazu wird ein Ausgang $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{q}$ definiert, wobei $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n_e \times n}$ so gewählt wird, dass der Ausgang \mathbf{y} die Länge eines jeden der n_e Tragwerkselemente angibt. Für das modal reduzierte System (4) folgt $\mathbf{C}_r = \mathbf{C}\Phi$. Bei der MPC wird die Stellgröße als Lösung des folgenden Optimierungsproblems bestimmt:

$$\mathbf{u}_{(\cdot)|k}^* = \underset{\hat{\mathbf{u}}_{(\cdot)|k}}{\operatorname{argmin}} \sum_{\hat{k}=k}^{k+N} \left(\bar{\mathbf{y}}_{\hat{k}|k}^\top \mathbf{Q} \bar{\mathbf{y}}_{\hat{k}|k} + \bar{\mathbf{u}}_{\hat{k}|k}^\top \mathbf{R} \bar{\mathbf{u}}_{\hat{k}|k} \right), \quad (7a)$$

mit den Nebenbedingungen

$$\text{s. t. } \bar{\mathbf{x}}_{\hat{k}+1|k} = \mathbf{F}_r \bar{\mathbf{x}}_{\hat{k}|k} + \mathbf{G}_r \bar{\mathbf{u}}_{\hat{k}|k} \quad \forall \hat{k} \in \{k, \dots, k+N-1\} \quad (7b)$$

$$\bar{\mathbf{y}}_{\hat{k}|k} = \mathbf{C}_r \bar{\mathbf{x}}_{\hat{k}|k}, \quad \forall \hat{k} \in \{k, \dots, k+N-1\} \quad (7c)$$

$$\bar{\mathbf{x}}_{k|k} = \mathbf{x}_k, \quad (7d)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_{\hat{k}|k} \in \mathcal{U} \quad \forall \hat{k} \in \{k, \dots, k+N\}. \quad (7e)$$

Die Matrizen \mathbf{F}_r und \mathbf{G}_r ergeben sich durch exakte Diskretisierung des Systems (4) als

$$\mathbf{F}_r = e^{\mathbf{A}_r \Delta t}, \quad (8)$$

$$\mathbf{G}_r = \int_0^{\Delta t} e^{\mathbf{A}_r(\Delta t - \tau)} \mathbf{B}_r dt. \quad (9)$$

Dabei ist Δt die Abtastzeit des diskretisierten Systems bzw. der Regelung und $N \cdot \Delta t$ ist der Zeithorizont, den die MPC in die Zukunft blickt für die Optimierung. Die Optimierung wird in jedem Zeitschritt ausgehend vom aktuellen Systemzustand \mathbf{x}_k neu berechnet und der erste Wert $\mathbf{u}_{k|k}$ der berechneten optimalen Eingangstrajektorie $\mathbf{u}_{(\cdot)|k}$ als Stelleingang auf das System gegeben.

Die Matrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} werden diagonal gewählt mit $\mathbf{Q} = q_0 \mathbf{I}^{n_e \times n_e}$ und $\mathbf{R} = \mathbf{I}^{n_e \times n_e}$. Soll ein Element im Betrieb entlastet werden, beispielsweise wenn es durch hohen Verschleiß bald getauscht werden muss, bzw. um den Verschleiß im Tragwerk zu homogenisieren, so wird für Element $i \in \{1, \dots, n\}$ der Diagonaleintrag $Q_{(i,i)} = \alpha q_0$ gesetzt. Die Parameter q_0 und α sind dabei Designparameter für die Regelung. In Abb. 2 sind exemplarisch Simulationsergebnisse für verschiedene Werte von α dargestellt. Das Tragwerk wurde dabei durch eine charakteristische Windstörung angeregt, die aus [6] entnommen wurde.

Damit die hydraulischen Aktoren die angeforderte Sollkraft bereitstellen, ist eine unterlagerte Druckregelung nötig. Deren Performance ist mitentscheidend für die Gesamteffizienz eines adaptiven Tragwerks. Bei dessen Auslegung muss die Nichtlinearität der Hydraulik

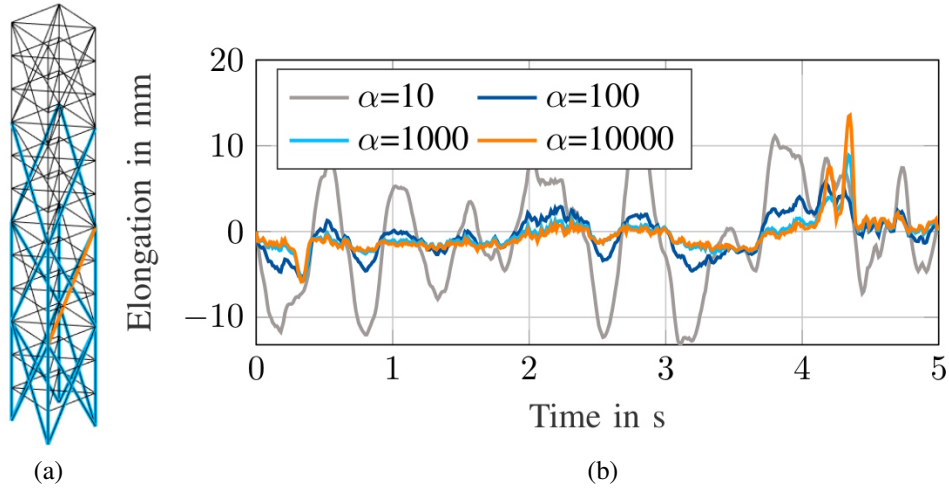


Abbildung 2: (a) Beispieltragwerk mit 24 Aktoren (blau). Die Belastung eines passiven Elementes (orange) soll reduziert werden. (b) Längung des Elementes für verschiedene Werte von α .

und ggf. auch die Kopplung der Aktoren über das hydraulische System berücksichtigt werden. In einem ersten Ansatz wurde für das adaptive Testgebäude D1244 auf dem Campus der Universität Stuttgart eine Regelung auf Basis einer differentialgeometrischen Systeminversion entworfen, mit der bis etwa 2 Hz eine gutes Folgeverhalten erreicht werden konnte [3].

5 Sicherheit

Adaptive Tragwerke müssen auch im passiven Zustand in der Lage sein, allen angreifenden Lasten standzuhalten. Daher eignen sich steifigkeitsdominierte Tragwerke wie Hochhäuser zunächst besonders für eine Adaption. Bei diesen kann das Tragwerk signifikant reduziert werden, ohne die Standsicherheit zu gefährden. Die Gebrauchstauglichkeit wird über die Adaption sichergestellt. Um die langfristige Funktion sicherzustellen und eine Fehlfunktion der Regelung zu vermeiden, ist es trotzdem unerlässlich, defekte Teile der Sensorik und Aktorik zu identifizieren und die Regelung entsprechend anzupassen sowie einen Austausch einzuplanen.

Für den Entwurf der Fehlerdetektion und -identifikation bei adaptiven Tragwerken können gängige Verfahren der Residuengenerierung als Grundlage genommen werden. Wie in [6] beschrieben, wird dazu das Modell (4) mit der Abtastzeit Δt analog dem Vorgehen in Abschnitt 4 diskretisiert und die Systemdynamik über ein Zeitfenster von $n \cdot \Delta t$ formuliert:

$$Lz = Hx + Ff + v + e. \quad (10)$$

Dabei bezeichnet z die in dem Zeitfenster gemessenen Ausgänge und Eingänge, x die n Zustandsvektoren und f die betrachteten Fehlerfälle. Die vektoren v und e beschreiben

die unbekannten Störgrößen bzw. das Sensorrauschen. Ein Ansatz zur Generierung von rein Messgrößen-basierten Residuen ist die Elimination des unbekanntes Zustandes in (10), indem (10) von links mit dem Kern der Matrix \mathbf{H} , \mathcal{N}_H , multipliziert wird. Damit bleibt:

$$\mathbf{r}_k = \mathcal{N}_H \mathbf{L} \mathbf{z} = \mathcal{N}_H \mathbf{F} \mathbf{f} + \mathcal{N}_H (\mathbf{v} + \mathbf{e}). \quad (11)$$

Damit sind die Residuen nur noch von den Fehlern \mathbf{f} und den stochastischen Störungen \mathbf{v} und \mathbf{e} abhängig. Der Einfluss der stochastischen Größen kann beispielsweise über datenbasierte Verfahren minimiert werden. In [6] wird dazu eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) von Daten des fehlerfreien Betriebs durchgeführt, bei der die 9 Hauptrichtungen mit den größten Singulärwerten 99,99 % der Abweichungen in den Residuen beschreiben. Durch die Projektion der Residuen auf die restlichen Hauptkomponenten kann der Einfluss der Störungen im Wesentlichen eliminiert werden, wodurch die Detektierbarkeit aber nur um weniger als 1 % abnimmt.

Als Variante können die Störrichtungen beispielsweise auch mittels Auto-Encoder ermittelt werden. Das Rekonstruktionsergebnis des Auto-Encoders wird dann von den eigentlichen Residuen abgezogen, was den Einfluss der Störungen auf die Residuen analog zur PCA minimiert. Diese Arbeiten sind Gegenstand der aktuellen Forschung im Bereich Fehlerdiagnose für adaptive Tragwerke im SFB 1244.

Über einen CUMSUM-Algorithmus werden die Residuen integriert und das Überschreiten eines Schwellwertes als Fehler erkannt. Für die Fehlerisolation wird ausgewertet, welche Residuen auslösen [6].

Literatur

- [1] DAKOVA, S. ; HEIDINGSFELD, J. L. ; BÖHM, M. ; SAWODNY, O. : An Optimal Control Strategy to Distribute Element Wear for Adaptive High-Rise Structures. In: *American Control Conference*, 2022
- [2] DAKOVA, S. ; KOHL, K. ; HEIDINGSFELD, J. ; SAWODNY, O. ; BÖHM, M. : Optimal Input Distribution Over Multiple Control Objectives for Adaptive High-Rise Structures. In: *Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2023
- [3] DAKOVA, S. ; SAWODNY, O. ; BÖHM, M. : Force Tracking Control for Hydraulically Actuated Adaptive High-Rise Buildings. In: *Control Engineering Practice* (2024)
- [4] FRIZ, F. ; ZELLER, A. ; BÖHM, M. ; SAWODNY, O. : Actuator Placement in Adaptive Structures for Static Compensation – Minimizing Displacements Versus Minimizing Actuator Forces. In: *2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, Jun. 2023
- [5] GEIGER, F. ; GADE, J. ; VON SCHEVEN, M. ; BISCHOFF, M. : Anwendung der Redundanzmatrix bei der Bewertung adaptiver Strukturen. In: *Manfred Bischoff, Malte von Scheven, Bastian Oesterle (Hrsg.) Berichte der Fachtagung Baustatik – Baupraxis 14, 23. und 24. März 2020, Universität Stuttgart, 2020*

- [6] GIENGER, A. ; WAGNER, J. ; BÖHM, M. ; SAWODNY, O. ; TARÍN, C. : Robust Fault Diagnosis for Adaptive Structures With Unknown Stochastic Disturbances. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology (TCST)* (2020)
- [7] 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)*, IEEE, Jul. 2017
- [8] KRAUSS, L.-M. ; MAIERHOFER, M. ; PROKOSCH, T. ; TRAUTWEIN, A. ; SCHEVEN, M. von ; MENGES, A. ; BISCHOFF, M. : Baustatische Methoden für Entwurf, Auslegung und Betrieb adaptiver Tragwerke. In: OESTERLE, B. (Hrsg.) ; BÖGLE, A. (Hrsg.) ; WEBER, W. (Hrsg.): *Baustatik–Baupraxis 15* Bd. 15. Hamburg : Institut für Baustatik, Technische Universität Hamburg, 2024
- [9] NEUHÄUSER, S. ; HAASE, W. ; WEICKGENANNT, M. ; SAWODNY, O. : Adaptive Tragwerke – Aktuelle Forschungen im Ultraleichtbau. In: *Stahlbau* 82 (2013), Jun., Nr. 6, S. 428–437
- [10] OSTERTAG, A. ; DAZER, M. ; BERTSCHE, B. ; ADEL, F. van d. ; ALBRECHT, S. ; LEISTNER, P. ; GIENGER, A. ; WAGNER, J. ; TARÍN, C. ; SAWODNY, O. : Reliable Design of Adaptive Load-Bearing Structures with Focus on Sustainability. In: *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL)*, 2020, S. 4703–4710
- [11] RAPP, P. ; HEIDINGSFELD, M. ; BÖHM, M. ; SAWODNY, O. ; TARÍN, C. : Multimodal sensor fusion of inertial, strain, and distance data for state estimation of adaptive structures using particle filtering. In: *IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2017
- [12] SOBEK, W. ; HAASE, W. ; TEUFFEL, P. : Adaptive Systeme. In: *Stahlbau* 69 (2000), Jul., Nr. 7, S. 544–555
- [13] STRUTT (BARON RAYLEIGH), J. W.: *The Theory of Sound*. Macmillan, 1877
- [14] 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* (2018)
- [15] WEICKGENANNT, M. ; SAWODNY, O. ; NEUHÄUSER, S. ; SOBEK, W. : Active Vibration Control of a Double-Curved Shell Structure Using the Example of Stuttgart Smartshell. In: *Volume 4: Dynamics, Control and Uncertainty, Parts A and B*, American Society of Mechanical Engineers, Nov. 2012 (IMECE2012)
- [16] YAO, J. T. P.: Concept of structural control. In: *Journal of the Structural Division* 98 (1972), Nr. 7, S. 1567–1574
- [17] ZELLER, A. ; BÖHM, M. ; SAWODNY, O. : A Genetic and a Greedy-Genetic Algorithm for Steady-State Disturbance Compensability Actuator Placement for Adaptive Structures. In: *2022 American Control Conference (ACC)*, IEEE, Jun. 2022