

## Adaptive Tragwerke: Energie als Baustoff

Julia L. Heidingsfeld<sup>2</sup>, Universität Stuttgart

**Zusammenfassung:** Der Bausektor verantwortet einen Großteil des weltweiten Ressourcenverbrauchs und der umweltschädlichen Emissionen. Um diese Branche in Zukunft nachhaltig aufzustellen ist eine drastische Reduktion des Materialeinsatzes notwendig. Dies kann durch adaptive Tragwerke ermöglicht werden, bei denen Akteure in die tragende Struktur des Bauwerks integriert sind. Nachhaltig gewonnene Energie sichert den klimafreundlichen Betrieb dieser Gebäude über die Zeit. Durch den stark reduzierten Materialeinsatz können Wind, Schnee oder Erdbeben das Gebäude verformen oder in Schwingung versetzen. Die Akteure ermöglichen es, dass sich das Bauwerk aktiv an die Lasten anpasst, um die Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit zu gewährleisten. Mit Sensoren wird ein adaptives Tragwerk lückenlos überwacht. Die Umsetzung adaptiver Tragwerke erfordert den Einsatz von Regelungstechnischen Methoden. Dabei wird eine mathematische Beschreibung des adaptiven Tragwerks erstellt. Diese dient als Grundlage zur Berechnung der Steuerung, die statische Verformungen kompensiert. Weiterhin wird eine Regelung entworfen, die Wind-induzierte Schwingungen dämpft. Mit dieser Technologie kann der Materialverbrauch bei Hochbauten um die Hälfte reduziert werden.

**Abstract:** The construction sector is responsible for a large proportion of global resource consumption and environmentally harmful emissions. In order to make this sector sustainable in the future, a drastic reduction in the use of materials is necessary. This is enabled by adaptive structures, incorporating actuators into the load-bearing structure of a building. Sustainably generated energy ensures the climate-friendly operation of these buildings. Due to the greatly reduced use of materials, wind, snow or earthquakes can deform a building or induce vibrations. Actuators allow the structure to actively adapt to loads, ensuring serviceability and ultimate loading criteria. Sensors enable complete monitoring. The implementation of adaptive structures requires the use of control engineering methods. A mathematical description of the adaptive structure serves as basis for calculating a feedforward control that compensates for static deformations. A feedback control is designed to damp wind-induced vibrations. With this technology, material consumption in building construction can be reduced by half.

### Einleitung

Die jüngst einberufene UN-Klimakonferenz in Glasgow vereinbarte die Reduktion klimaschädlicher Treibhausgase zur Einhaltung des 1,5 Grad Ziels des Pariser Klimaabkommens [1,2]. Die Klimabilanz des Bausektors zeigt diesbezüglich ein erschütterndes Bild: Die Branche verantwortet 50 Prozent des weltweiten Ressourcenverbrauchs, 35 Prozent des Energiebedarfs und 40 Prozent der globalen CO<sub>2</sub> Emissionen [3]. Neben der umweltschädigenden Wirkung durch die enorme Rohstoffentnahme sind bereits Versorgungsengpässe bei Baumaterialien spürbar [4].

Eine Problemverschärfung ergibt sich durch das prognostizierte Bevölkerungswachstum von 7,8 Mrd. auf 10,9 Mrd. Menschen bis Ende dieses Jahrhunderts [5]. Für ca. 3 Mrd. zusätzli-

---

<sup>2</sup> heidingsfeld@isys.uni-stuttgart.de

che Menschen müssen Wohnraum, Verkehrswege, Infrastruktur und öffentliche Gebäude geschaffen werden, wodurch der Ressourcenverbrauch und die einhergehenden CO<sub>2</sub> Emissionen in die Höhe getrieben werden. Ein steigender Lebensstandard, insbesondere in den Entwicklungs- und Schwellenländern steigert zusätzlich das Bauvolumen. Um die Branche langfristig nachhaltig aufzustellen, muss ein grundlegender Wandel in der Art und Weise des Bauens erfolgen.

Die Bekämpfung der Erderwärmung erfordert eine Vielzahl an Maßnahmen und ein gesellschaftliches Umdenken. Zur Evolution im Bausektor tragen alternative Baumaterialien, aber auch das möglichst vollständige Rezyklieren beim Rückbau von Bauwerken am Lebensende bei. Dennoch erscheint eine grundlegende Reduktion des Materialeinsatzes unumgänglich.

Der Blick auf heutige Bauvorschriften offenbart die aktuelle Herangehensweise beim Bau. Auf ein Bauwerk wirken unterschiedliche Lasten, wie Wind, Schnee, Erdbeben oder Nutzlasten. Das Tragwerk eines Bauwerks muss so ausgelegt sein, dass die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit auch unter den größten anzunehmenden Lasten gewährleistet sind. Bei den heute üblichen Tragwerken wird dies durch einen hohen Materialeinsatz erreicht. Da extreme Lasten über die Lebensdauer eines Bauwerks jedoch nur selten auftreten, bleibt das eingesetzte Material die meiste Zeit ungenutzt. Die für den Abbau, die Herstellung, den Transport, die Lagerung des Materials aufgewendete Energie wird als graue Energie bezeichnet<sup>[6]</sup>.

Der erste Schritt zur Reduktion sind Leichtbauten, die besonders wenig Masse beinhalten und das vorhandene Material optimal nutzen<sup>[7]</sup>. Aufgrund der Vielzahl an Lastszenarien stellen passive Leichtbauten jedoch immer eine Kompromisslösung dar. Der folgerichtige Schritt zur weiteren Reduktion der grauen Energie, besteht in der Verwendung adaptiver Tragwerke. Ein adaptives Tragwerk ist in der Lage sich kontinuierlich an die gerade wirkenden Lasten anzupassen. Dazu wird der Zustand des Tragwerks mit Hilfe von Sensoren erfasst und mit Hilfe von Aktoren so beeinflusst, dass die Lasten möglichst effizient abgetragen werden. Dadurch können bei adaptiven Tragwerken im Vergleich zu klassischen passiven Tragwerken große Materialeinsparungen erzielt werden<sup>[8]</sup>. Es wird ein Teil der dauerhaft im herkömmlichen Tragwerk gespeicherten grauen Energie durch nur bei Bedarf aufgewendete Betriebsenergie ersetzt:

## **Energie als Baustoff!**

Diese Technologie ist kommerziell noch nicht im Einsatz und Inhalt aktueller Forschung. Passive Schwingungstilger, wie sie seit 1978 in Hochbauten eingesetzt werden, sind eine

Vorstufe adaptiver Tragwerke und wurden erstmals 1911 patentrechtlich erwähnt<sup>[9,10]</sup>. Regelungstechnische Ansätze zu adaptiven Tragwerken folgten in den 1970er Jahren<sup>[11]</sup>. Heutzutage sind zur Reduktion von Wind-induzierten Schwingungen passive Schwingungstilger im Einsatz<sup>[12]</sup>. Die technische Weiterentwicklung sind semi-aktive Schwingungstilger, die durch den Einsatz sehr geringer Mengen an Betriebsenergie eine Dämpfung bewirken<sup>[13]</sup>.

Die Realisierung adaptiver Tragwerke erfordert einen interdisziplinären Ansatz. Im Sonderforschungsbereich 1244 – *Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen* werden adaptive Tragwerke in einem Verbund von 17 Instituten aus Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau und Informatik erforscht<sup>[14]</sup>.



**Abb. 1:**  
Erstes adaptives Hochhaus auf dem Campus  
der Universität Stuttgart, Bauzeit 2019-2021

Das erste adaptive Hochhaus der Welt in Abbildung 1 dient als experimenteller Versuchsbau zur Erforschung der adaptiven Bauwerke und Komponenten, sowie zur Validierung der entwickelten Konzepte. Das 36 Meter hohe Gebäude beinhaltet zwölf Stockwerke und steht auf einer quadratischen Grundfläche mit einer Seitenlänge von 5,1 Metern. Es zählt damit zu den Hochhäusern mit einem Schlankheitsverhältnis von ca. 7, womit die Übertragbarkeit auf größere Hochhäuser, wie sie in den Metropolen dieser Welt gebaut werden, gegeben ist.

In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt auf einer regelungstechnischen Betrachtungsweise adaptiver Tragwerke. In Kapitel 2 werden die regelungstechnischen Grundlagen mit dem Systemverständnis am Beispiel von adaptiven Tragwerken erläutert. Darauf folgt deren mathematische Modellbeschreibung in Kapitel 3. Anschließend wird auf den Betrieb adaptiver Tragwerke durch die methodischen Ansätze einer Steuerung und Regelung in Kapitel 4 und 5 eingegangen.

## 1. Einführung in die Regelungstechnik

Die Regelungstechnik als Teilbereich des Maschinenbaus, der Informatik und der Elektrotechnik kommt an vielen Stellen zur Anwendung. Diese Fachrichtung beschäftigt sich damit, wie Systeme mithilfe einer Steuerung und Regelung so beeinflusst werden können, dass sie ein gewünschtes Verhalten aufweisen. Die Regelungstechnikerinnen arbeiten dabei abstrahiert von der Fachdomäne, sodass ein System beispielsweise eine Maschine, ein Auto, ein Bioreaktor oder das sozio-ökonomische Verhalten einer Gesellschaft sein kann. Das betrachtete Objekt wird dabei als System aufgefasst. Ein System ist eine abgegrenzte Funktionseinheit, die über Massen-, Energie- und Informationsflüsse mit der Umgebung in Verbindung steht [15, 16].

In Abbildung 2 wird ein System schematisch veranschaulicht. Auf ein System wirken äußere Einflüsse, die als Störungen bezeichnet werden. Messungen, die Informationen über das System bereitstellen, werden Ausgang genannt. Mit dem Eingang kann das System durch Aktoren aktiv beeinflusst werden. Der Zustand sind innere Größen des Systems.

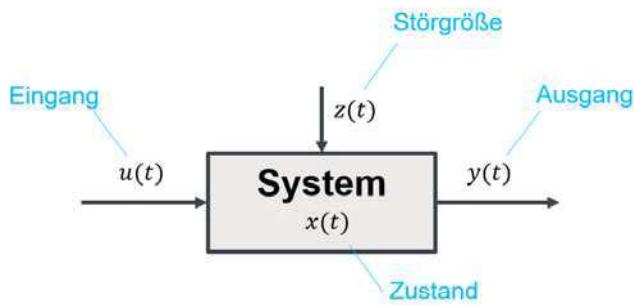


Abb. 2: Schematische Veranschaulichung eines Systems.

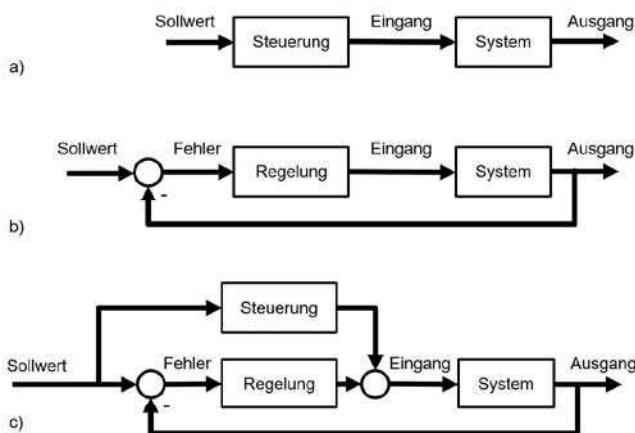
Anhand eines adaptiven Tragwerks wird der Systembegriff näher erläutert. Das adaptive Tragwerk wird als System verstanden, auf das Umwelteinflüsse, wie Wind, Schnee oder Erdbeben als *Störung* wirken. Darüber hinaus werden auch Nutzlasten als Störung aufgefasst, z.B. große Menschenansammlungen oder schwere Geräte. Die Störungen werden in quasi-statische und dynamische Lasten unterteilt. Erstere ändern sich nur sehr langsam über die Zeit, worunter u.a. Schneelasten oder besagte schwere Maschinen fallen. Diese führen zu unerwünschten permanenten Verformungen im Tragwerk. Dynamische Störungen verändern sich dagegen vergleichsweise schnell. Windböen zählen zu diesen Lasten und können das adaptive Tragwerk in Schwingungen versetzen, die den Bewohnerkomfort schmälern und zu Materialermüdung führen können.

Sensoren liefern ununterbrochen Informationen am *Ausgang* über das adaptive Tragwerk. Dabei kommen zwei Messprinzipien zum Einsatz: In jedem Element sind Dehnmessstreifen installiert, die die Ausdehnung einzelner Elemente messen. Des Weiteren kommen optische Messungen zum Einsatz. Es sind Lichtemitter außen am Gebäude angebracht, die mit einer Kamera detektiert werden. Dadurch kann die Verformung des Gebäudes in Echtzeit gemessen werden.

Der *Eingang* in Form von Aktoren ermöglicht es, das Tragwerk aktiv zu beeinflussen. Verteilt im Tragwerk sind 24 Hydraulikzylinder integriert, die mit Hydrauliköl unter Druck betrieben werden. Dadurch können Kräfte auf das Tragwerk ausgeübt werden. Der Betrieb der Aktoren erfordert Energie, die über die Lebenszeit des adaptiven Gebäudes aus nachhaltigen Quellen gewonnen werden muss.

Die Aufgabe der Regelungstechnik ist es, mit dem Eingang die Wirkung von quasi-statischen und dynamischen Störungen auf ein System zu reduzieren oder sogar vollständig zu kompensieren. Der Ausgang liefert dabei Informationen über das System und wird genutzt, um den Eingang zu berechnen. Dafür wird eine mathematische Beschreibung (s. Kapitel 3) verwendet.

Es kommen zwei Konzepte zu Einsatz: Eine Steuerung und eine Regelung. Bei beiden Konzepten wird ein Sollwert vorgegeben, der beschreibt, wie sich das System verhalten soll. Tragwerke sollen möglichst wenig verformt werden und nicht schwingen. Eine Steuerung wird bei einer bekannten Störung mit Hilfe der mathematischen Beschreibung berechnet, sodass das adaptive Tragwerk den Sollwert einhält (Abb. 3 a)). Eine Regelung verwendet die Abweichung zwischen Sollwert und gemessenem Wert. Sie wird so ausgelegt, dass die Abweichung möglichst gering gehalten wird (Abb. 3 b)). Beide Konzepte werden meist kombiniert eingesetzt (Abb. 3 c)) und werden in Kapitel 4 und 5 für adaptive Tragwerke erläutert.



**Abb. 3:** Regelungstechnische Konzepte:

a) Steuerung, b) Regelung, c) Kombination zur Zwei-Freiheitsgrade-Struktur.

## 2. Modellierung adaptiver Tragwerke

Zur Herleitung der Steuerungs- und Regelungsgesetze ist eine mathematische Beschreibung des Systems notwendig, die Modell genannt wird. Das Modell stellt einen Zusammenhang zwischen Eingang, Ausgang, Zustand und ggf. der Störung her. Dazu werden die für das System relevanten physikalischen Prinzipien herangezogen. Das Modell ist meist eine Differentialgleichung in der Form:

$$\dot{x}(t) = f(x, u, z, t), \quad t > 0, \quad x(0) = x_0 \quad y(t) = g(x, u, z, t),$$

Die zeitliche Ableitung des Zustands  $\dot{x}$  wird mit einer Funktion  $f(x, u, z, t)$  beschrieben, die vom Zustand  $x$ , dem Eingang  $u$ , der Störung  $z$  und der Zeit  $t$  abhängt. Die Ableitung repräsentiert die zeitliche Änderung des Zustands, bei einem adaptiven Tragwerk beispielsweise die Änderung der Verformung. Der Ausgang  $y$  wird mit der Funktion  $g(x, u, z, t)$  dargestellt.

Ein Modell ist eine Approximation der relevanten Effekte und soll das Systemverhalten ausreichend genau abbilden, darf jedoch nicht zu komplex sein, da die Berechnung einer Steuerung und Regelung sonst zu zeit- und rechenaufwändig wird. Ein wichtiger Teil des Regelungstechnischen Arbeitens ist es, eine adäquate Modellierung für ein System aufzustellen.

Druckschlaffe Elemente, die nur auf Zug belastet werden, bieten sich besonders zur Integration in adaptive Tragwerke an, da diese sich durch eine leichte Bauweise auszeichnen. Je nach Verformung des Gebäudes können einzelne Elemente schlaff werden und sind in diesen Momenten nicht am Lastabtrag beteiligt (Abb. 4). Die druckschlaffen Elemente verändern maßgeblich das Verhalten eines Tragwerks und führen zu nichtlinearen Modellgleichungen.

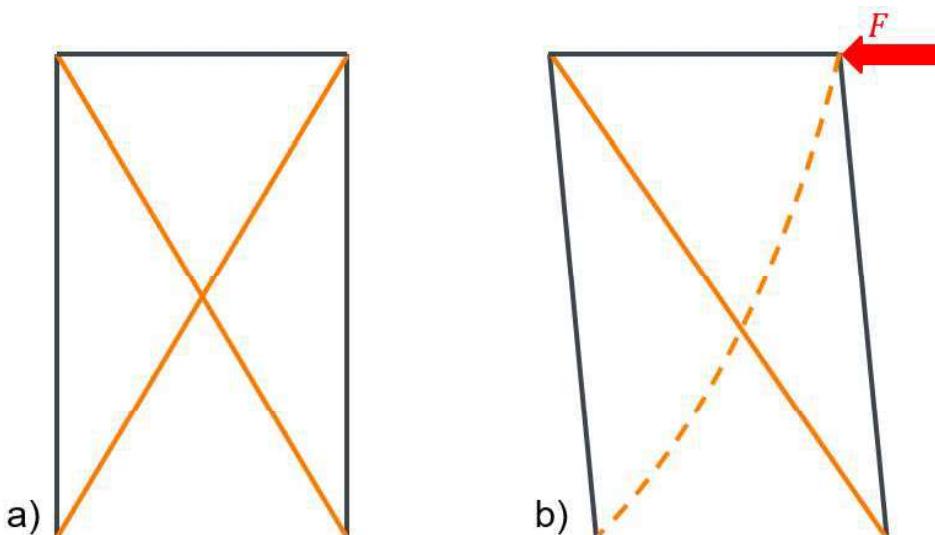
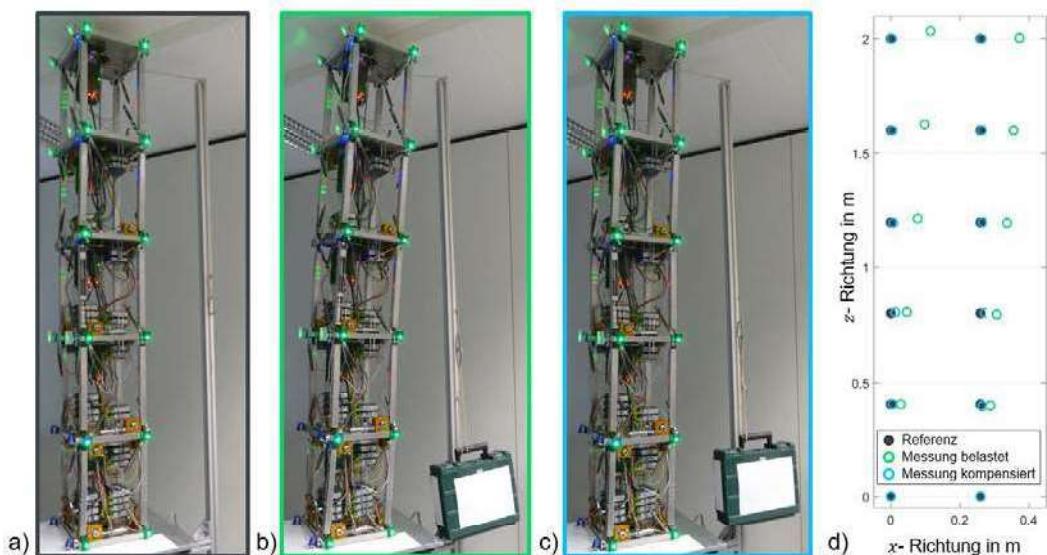


Abb. 4: 2D Beispiel eines Tragwerks mit druckschlaffen Elementen.

### 3. Statische Lastkompensation

Das Ziel der statischen Lastkompensation ist es, im Tragwerk auftretende Verformungen aufgrund quasi-statischer Lasten durch geeignete Ansteuerung der Aktoren zu minimieren. Die Last wird als bekannt vorausgesetzt, wobei Methoden existieren, die deren Bestimmung ermöglichen. Basierend auf den Modellgleichungen wird dazu eine Steuerung entworfen, die den Eingang  $u$  mit Hilfe optimierungsbasierter Verfahren bestimmt. Generell kann mit einer endlichen Anzahl an Aktoren die Verformungen nicht an allen Punkten des Tragwerks vollständig kompensiert werden. Des Weiteren sind bei der Optimierung Nebenbedingungen zu beachten. Die zuvor hergeleiteten Modellgleichungen müssen zu jedem Zeitpunkt erfüllt sein. Darüber hinaus sind die Kräfte, die die Aktoren aufbringen können, limitiert. Bei der Berechnung der Eingangssignale muss beachtet werden, diese Grenzen nicht zu verletzen.

Die statische Lastkompensation wird an einer maßstäblichen Version (Maßstab 1:18) des adaptiven Hochhauses aus Abb. 1 experimentell durchgeführt. Das Maßstabsmodell ist 2 Meter hoch und steht auf einer quadratischen Grundfläche mit einer Seitenlänge von 0,26 Metern. Die Sensorausstattung ist identisch zum Originalbau. Die 25 Aktoren sind mit Elektromotoren realisiert, die in den vertikalen und diagonalen Elementen im Tragwerk integriert sind. In Abb. 5 a) ist das maßstäbliche Gebäude in der nicht belasteten Referenzposition abgebildet. Eine Last von 4 kg greift oben in der Mitte des Tragwerks an und lenkt es aus, wie in Abb. 4 b) gezeigt. Die optimal berechneten Aktorsignale werden zur Kompensation der Last aufgebracht und bewirken eine beinahe vollständige Reduktion der Verformungen (Abb. 5 c)). In Abb. 5 d) sind die optisch erfassten Messwerte für die drei beschriebenen Fälle aufgetragen.



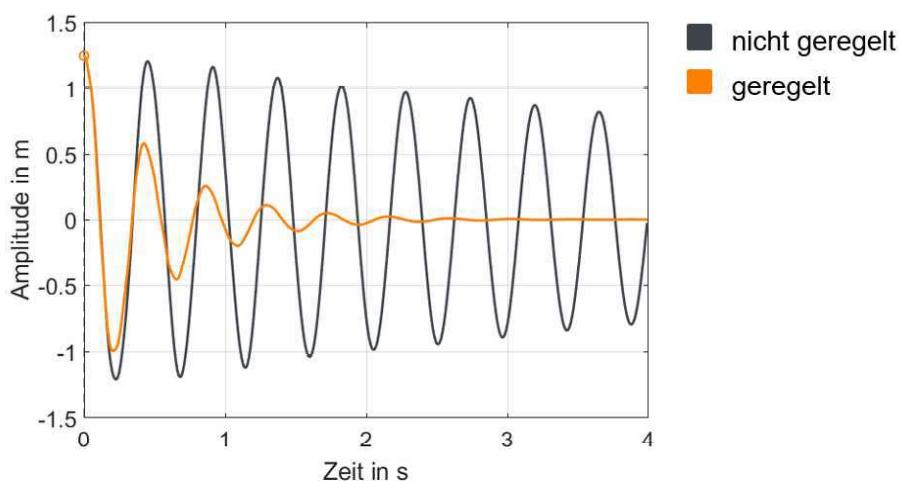
**Abb. 5:** Statische Lastkompensation am Maßstabsmodell. a) Referenzzustand, b) belasteter Zustand, c) kompensierter Zustand und d) Messwerte von a), b) und c).

Mit der optimierungsbasierten statischen Lastkompensation kann die Wirkung von quasi-statischen Lasten reduziert werden und ist ein Baustein für die Realisierung adaptiver Tragwerke. Eine detaillierte Beschreibung der Methode zur statischen Lastkompensation sowie die ausführlichen experimentellen Ergebnisse sind in <sup>[17]</sup> beschrieben.

#### 4. Aktive Schwingungsdämpfung

Bei Gebäuden in adaptiver Bauweise können dynamische Störungen Schwingungen anregen, die den Bewohnerkomfort einschränken und Elemente besonders stark abnutzen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird eine aktive Schwingungsdämpfung zur Reduktion von Wind-induzierten Oszillationen erforscht. Dabei wird wiederum auf Basis des mathematischen Modells in Echtzeit die Ansteuerung der Aktoren mit einer Regelung berechnet, die den Schwingungen entgegenwirken.

In der Regelungstechnik sind zahlreiche Methoden für die aktive Schwingungsdämpfung von linearen Modellgleichungen bekannt. Bei nichtlinearen Modellgleichungen, wie bei adaptiven Tragwerken mit druckschlaffen Elementen, sind diese Methoden oft nicht direkt anwendbar. Die entwickelte Methode der linearisierenden Eingangstransformation ermöglicht es, einem nichtlinearen Tragwerk das Verhalten eines linearen Zielmodells aufzuprägen. Das Zielmodell ist dabei ein frei gewähltes Modell, das ähnliche Eigenschaften wie das untersuchte nichtlineare Modell aufweist, jedoch linear ist. Folgt das adaptive nichtlineare Tragwerk dem linearen Verhalten, sind die Methoden der linearen Regelungstechnik anwendbar. Die linearisierende Eingangstransformation wird mit einer Regelung realisiert, die die Modellgleichungen des nichtlinearen Tragwerks und des linearen Zielmodells als Berechnungsgrundlage verwendet.



**Abb. 6:** Simulationsergebnisse der Auslenkung an der Spitze des adaptiven Tragwerks: ohne Dämpfung (grau) und mit linearisierender Eingangstransformation zur aktiven Schwingungsdämpfung (orange).

In Abb. 6 ist die Amplitude an der Gebäudespitze eines adaptiven Tragwerks mit und ohne aktive Schwingungsdämpfung aufgetragen. Diese Daten wurden mit einer Computersimulation des in Abb. 1 gezeigten adaptiven Hochhauses erzeugt und haben als Anfangsbedingung eine Auslenkung des gesamten Gebäudes vorgegeben. Die Schwingungen werden durch die linearisierende Eingangstransformation deutlich gedämpft und zeigen das Potential der Methode <sup>[18]</sup>. Bei der Anwendung an einem realen adaptiven Tragwerk führt die aktive Schwingungsdämpfung dazu, dass Wind-induzierte Schwingungen gar nicht mit großen Amplitude auftreten und sofort gedämpft werden.

### **Zusammenfassung**

Adaptive Tragwerke werden theoretisch schon seit einiger Zeit erforscht, die praktische Umsetzung, die für eine Anwendbarkeit bei realen Bauten notwendig ist, wurde bisher jedoch kaum betrachtet. Das Potential darf im Angesicht des Menschen-gemachten Klimawandels nicht ungenutzt bleiben, um den Ressourcenverbrauch des Bausektors drastisch zu reduzieren. Regelungstechnische Konzepte sind essentiell für den sicheren Betrieb von Gebäuden mit dieser Technologie. Erste Methoden wie beispielsweise die statische Lastkompensation wurden bereits praktisch validiert. Weitere Experimente erfolgen nach Fertigstellung des ersten adaptiven Hochhauses auf dem Campus der Universität Stuttgart. Durch den Beitrag der Steuerung und Regelung von Tragwerken konnte im Sonderforschungsbereich 1244 gezeigt werden, dass in der Gesamtbilanz des experimentellen Hochhauses beinahe 50 Prozent der Treibhausgase eingespart werden können <sup>[19]</sup>. In Zukunft werden die Regelungstechnischen Methoden für adaptive Tragwerke verfeinert und weiterentwickelt, sodass ein reibungloser und sicherer Betrieb möglich wird.

### **Danksagung**

Mein Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen im SFB 1244 für die außerordentlich gute Zusammenarbeit zur gemeinsamen Erforschung adaptiver Bauwerke.

Die Forschungsinhalte dieser Publikation werden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 279064222 – SFB 1244, B04.

## Literaturverzeichnis

- [1] United Nations, „Paris Agreement”, Paris, 2015.
- [2] UK Government, „COP26: The negotiations explained”, UN Climate Change Conference, UK, 2021.
- [3] United Nations Environment Programme, „2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector”, Nairobi, 2020.
- [4] entralverband des Deutschen Baugewerbes, „Materialknappheit belastet Baukonjunktur“, ZDB Baustein, 62, Juli 2021.
- [5] United Nations Department of Economic and Social Affairs, „World urbanization prospects: the 2018 revision“, 2018.
- [6] Zimmermann, J.; Reiser, M., „Prognose des Verbrauchs grauer Energie über die Lebensdauer von Gebäuden“, Bautechnik, 98(1), 63-73, 2021.
- [7] Schlaich, J., „Lightweight Structures“, Widespan Roff Structures, S. 178-188, 2000.
- [8] Sobek, W., Sawodny, O., Bischoff, M., Blandini, L., Böhm, M., Haase, W., Klett, Y., Mahall, M., Weidner, S., Burghardt, T., Leistner, P., Maierhofer, M., Park, S., Reina, G., Roth, D., Tarin, C., „Adaptive Hüllen und Strukturen – Aus den Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 1244“, Bautechnik 98, H. 3, S. 208–221, 2021.
- [9] Frahm, H., "Device for damping vibrations of bodies", US Patent 989, 1909.
- [10] Morgenstern, J., "The fifty-nine-story crisis", Journal of professional issues in engineering education and practice, 123.1, 23-29, 1997.
- [11] Yao, J.T.P., "Concept of structural control", ASCE Journal of the Structural Division, 98(07):1567–1574, 1972.
- [12] Housner, G., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., Yao, J.T.P., "Structural Control: Past, Present, and Future" Journal of engineering mechanics, 123(9):897–971, 1997.S.
- [13] Korkmaz, S., "A review of active structural control: challenges for engineering informatics", Computers & Structures, 89(23-24):2113–2132, 2011.
- [14] SFB1244, <https://www.sfb1244.uni-stuttgart.de/> (abgerufen: 24.11.2021).
- [15] Lunze, J., „Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen“, 7. Auflage, Springer, Berlin, 1996.
- [16] Föllinger, O., Dörrscheidt, F., Klittich, M., „Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung“, 8. Auflage, Hüthig, Heidelberg, 1994.
- [17] Wagner, J. L., Gienger, A., Stein, C., Arnold, P., Tarin, C., Sawodny, O., Böhm, M., "Optimal static load compensation with fault tolerance in nonlinear adaptive structures under input and state constraints", Frontiers in Built Environment, vol. 6, p. 93, 2020.
- [18] Wagner, J.L., Böhm, M., Sawodny, O., "Nonlinear modeling and control of tension-only elements in adaptive structures", IX ECCOMAS conference on smart structures and materials, 2019.
- [19] Ostertag, A., Schlegl, F., Gienger, A., Wagner, J., Dazer, M., Bertsche, B., Albrecht, S., Leistner, P., Tarín, C., Sawodny, O., „Reliable Design of Adaptive Load-bearing Structures with Focus on Sustainability“, in: Proc. of the European Safety and Reliability Conf. and the Probabilistic Safety Assessment and Management Conf. 2020

**Julia Laura Heidingsfeld** (geb. Wagner) ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart. Sie erhielt ihren Abschluss B.Sc. Medizintechnik als *joint degree* der Universitäten Tübingen und Stuttgart. Ihren M.Sc. absolvierte sie im gleichen Fachbereich an der Universität Stuttgart und der Columbia University in the City of New York mit den Schwerpunkten Regelungstechnik und Systemdynamik. Julia Heidingsfeld forscht im interdisziplinären Sonderforschungsbereich 1244 zum Thema Steuerung und Regelung adaptiver Bauwerke. Die Schwerpunkte ihrer Promotion sind Methoden zum optimalen Betrieb adaptiver Tragwerke sowie deren experimenteller Funktionsnachweis. Zudem ist Julia Heidingsfeld seit 2021 für die wissenschaftliche Projektkoordination als Assistenz der Projektsprecher verantwortlich.