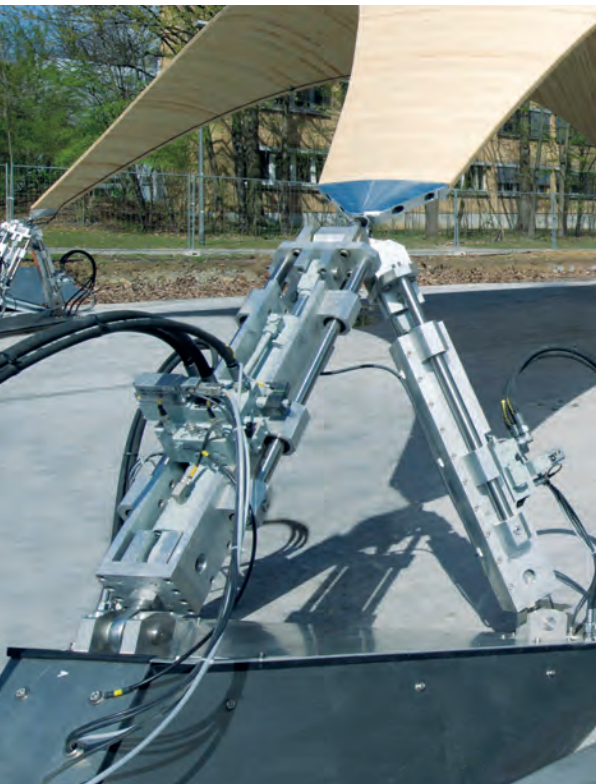



Bei der „Stuttgart SmartShell“ auf dem Campus Vaihingen der Universität Stuttgart (Foto: © Bosch Rexroth) kompensieren Hydraulikzylinder Spitzenbelastungen der Struktur.



Leicht, sicher, nachhaltig und materialsparend – so sollen moderne Bauwerke sein. Den alltäglichen Belastungen, etwa durch Schnee oder Wind, müssen sie aber trotzdem standhalten. An der Universität Stuttgart arbeiten Forscher an leichten Tragstrukturen, die sich aktiv an äußere Belastungen anpassen können.

Abbildung 2: Aktives Auflager an der Stuttgart SmartShell mit drei hydraulischen Achsen (Foto © Bosch Rexroth)



Regelungskonzepte für ultraleichte Bauwerke

Architektur mit Köpfchen

Ultraleichte adaptive Bauwerke

Verkehr, Schnee und Wind sind typische Alltagsbelastungen, denen Bauwerke ausgesetzt sind. Extremereignisse wie ein Jahrhundertwinter oder gar ein Erdbeben ereignen sich dagegen nur sehr selten. Weil Bauwerke aber auch für derart extreme Spitzenbelastungen ausgelegt sein müssen, wird heutzutage viel Material für eine Sicherheitsreserve verbaut, die im Alltag fast nie benötigt wird. Damit Bauwerke zukünftig auch bei reduziertem Materialeinsatz solchen Spitzenbelastungen standhalten, erforscht die Universität Stuttgart ultraleichte adaptive Strukturen, die

mit Hilfe einer intelligent gesteuerten Hydraulik unterschiedlichste Beanspruchungen kompensieren.

Statische Anpassung und aktive Schwingungsdämpfung

Die Stuttgarter Forscher untersuchen sowohl statische als auch dynamische Belastungen. Statische Belastungen entstehen beispielsweise durch Schnee, dynamische Belastungen (d.h. Schwingungen) unter anderem durch Sturmböen. Um diese Beanspruchungen zu reduzieren, muss die Belastungssituation zunächst über Sensoren erfasst werden. Aus den Messwerten berechnet der Regelalgorithmus

die optimale Ansteuerung der Aktuatoren und passt so die Struktur an die Belastung an. Im Falle der statischen Belastung ist die Anpassung der Tragstruktur ebenfalls statisch. Geht es dagegen darum, eine Schwingung zu dämpfen, müssen die Sensoren die Belastung zeitabhängig erfassen und die Aktuatoren dynamisch angesteuert werden. Auf diese Weise ist es möglich, tragende Elemente kleiner und leichter auszuliegen. Die beim Bau eingesparte Masse wird durch den kurzzeitigen Einsatz von Energie ersetzt.

Prototyp Stuttgart SmartShell

Um die beschriebenen Regelungs-

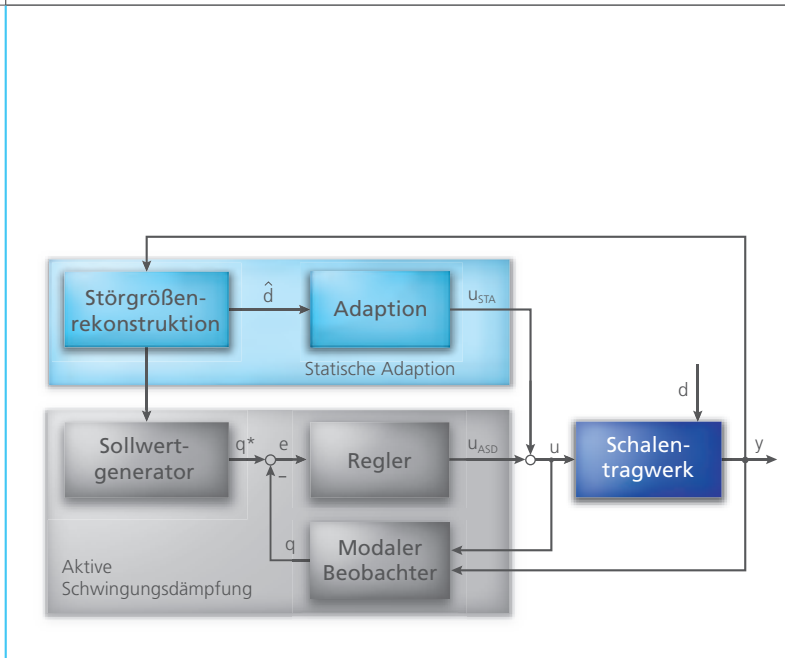


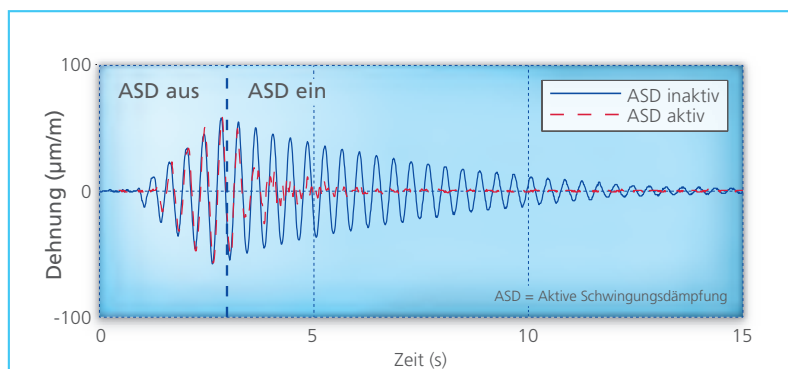
Abbildung 3: Steuerungs- und Regelungskonzept zur statischen Adaption und aktiven Schwingungsdämpfung.

konzepte zu testen, haben die Stuttgarter Institute mit Unterstützung der Firma Bosch Rexroth den Prototyp „Stuttgart SmartShell“ errichtet, das erste adaptive Schalenträgerwerk der Welt.

Es wurde in vierlagiger Holzbauweise konstruiert und besitzt eine Dicke von lediglich 40 mm. Vergleichbare Strukturen traditioneller, passiver Bauweise benötigen ein Vielfaches an Material. Die 1,4 t schwere Schale ruht auf vier Stützen, von denen drei durch hydraulische Zylinder bewegt werden können. Jedes der aktiven Auflager besitzt drei Aktuatoren in Tripod-Anordnung (Abbildung 2) und ist so gela-

gert, dass die Position der Auflagerpunkte im Raum frei vorgegeben werden kann. Dabei wird der kinematische Zusammenhang zwischen den Längen der Hydraulikzylinder in der Tripod-Anordnung und der Position der Auflagerpunkte kontinuierlich online berechnet. Zur Messung des Systemzustands stehen vielfältige Sensoren zur Verfügung. So sind etwa die hydraulischen Zylinder mit einem hochauflösenden Wegmesssystem sowie einer Kräftefassung ausgestattet. Zusätzlich sind auf dem Schalenträgerwerk Sensoren (Dehnungsmessstreifen, DMS) angebracht, welche die Dehnung an bestimmten Messpunkten erfassen.

Abbildung 4: Vergleich der ungedämpften Schwingung (blaue Kurve) und der aktiv gedämpften Schwingung (rote Kurve). Die Dämpfungsregelung wird bei 3 s aktiviert und reduziert die Schwingungsdauer um 80%.



Steuerungs- und Regelungskonzept

Die Bestimmung der notwendigen Aktivierung bei der statischen Adaption erfolgt in einem ersten Schritt anhand von Simulationsmodellen. Dafür wird das Verhalten der Struktur bei verschiedenen Belastungen nachgebildet und daraus die optimale Position der Auflager berechnet. Um darüber hinaus eine möglichst effektive Dämpfung der Schwingungen zu erreichen, wird das Modell um die Beschreibung des dynamischen Verhaltens erweitert. Das Regelungskonzept für die Schwingungsdämpfung basiert auf der Modellierung des dynamischen Verhaltens und dem daraus berechneten Rückführgesetz, das bei der Stuttgart SmartShell zum Einsatz kommt. Da dieses Regelungsgesetz direkt aus der analytischen Modellbeschreibung abgeleitet wird, kann es an zeitlich variable Parameter des Trägerwerks angepasst werden, beispielsweise die statische Belastungssituation oder die Sollwerte der Auflagerverschiebung. Das Rückführgesetz ist so gewählt, dass das Regelungssystem einerseits möglichst gute Dämpfungseigenschaften besitzt und andererseits die zur Dämpfung benötigte Energie minimiert wird. Durch eine Kombination der Sollwerte für die statische Adaption und die aktive Schwingungsdämpfung (Abbildung 3) lassen sich beide Anforderungen der Adaptivität gleichzeitig erfüllen (Abbildung 4, 6).

Umsetzung am Prototyp

Das Steuerungs- und Regelungssystem (Abbildung 5) der Stuttgart SmartShell muss im Wesentlichen folgende Aufgaben erfüllen:

- Steuerung der Hydraulik
- Zyklische Status- und Sicherheitsüberwachung
- Einlesen von Messdaten der Zylinder und Dehnungsmessstreifen
- Schätzung des Schwingungs-

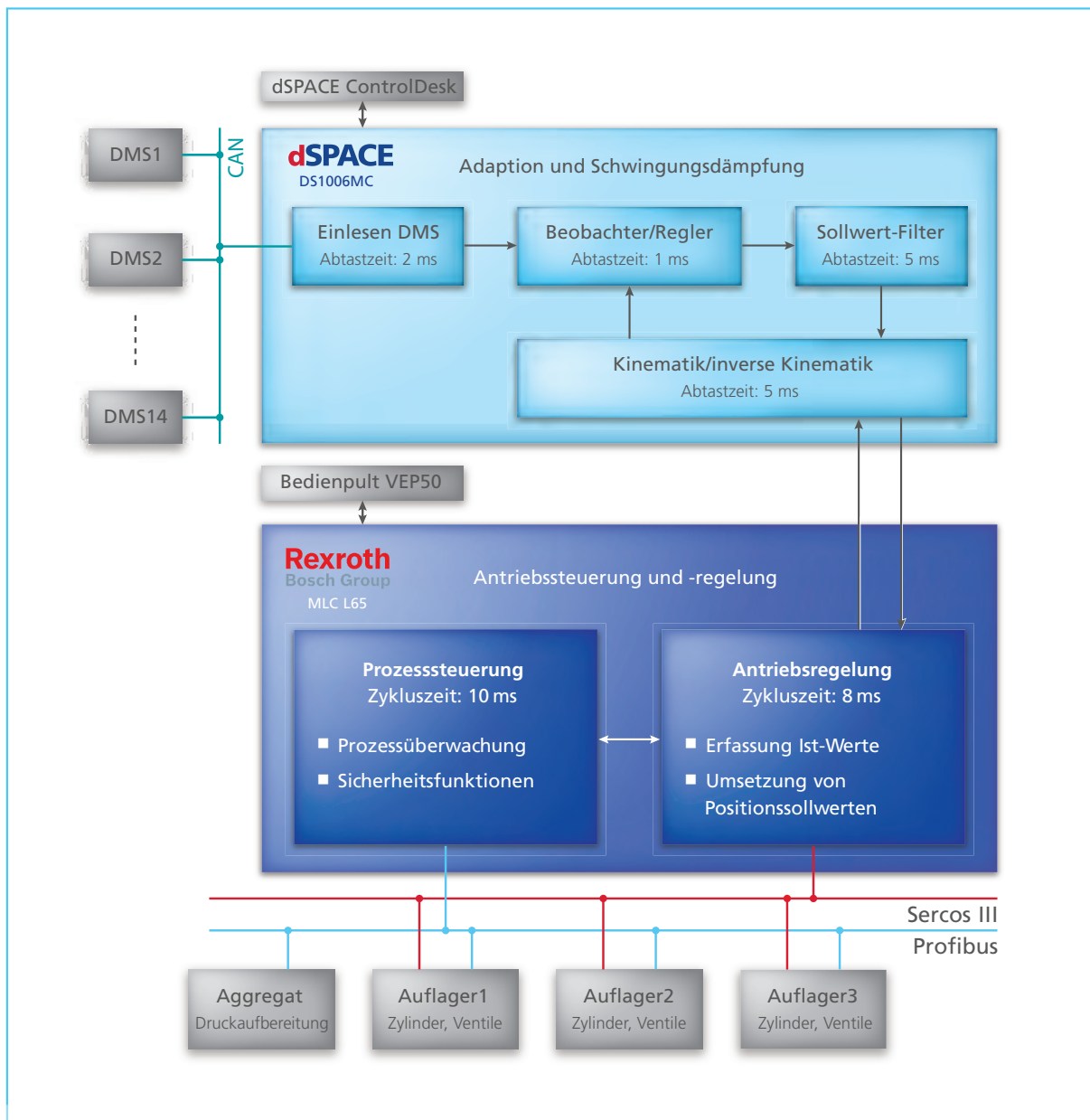


Unterkonstruktion zum Aufbau der Stuttgart SmartShell.

„Mit dem dSPACE Prototyping-System lassen sich Konzepte zur Adaptivität bei ultraleichten Bauwerken schnell und einfach umsetzen.“

Martin Weickgenannt, Universität Stuttgart

Abbildung 5: Soft- und Hardware-Struktur zur Umsetzung der statischen und dynamischen Adaption.



Fazit

Die kombinierte Nutzung eines dSPACE Controller Boards und einer Motion-Logic-Control (MLC) von Rexroth vereint die Vorteile eines Rapid-Prototyping-Systems mit einem Prozesssteuergerät. Die Aufgabenstellung der Stuttgart SmartShell, also die Generierung statischer und dynamischer Sollwerte und die Prozessablaufsteuerung, können somit effizient umgesetzt werden.

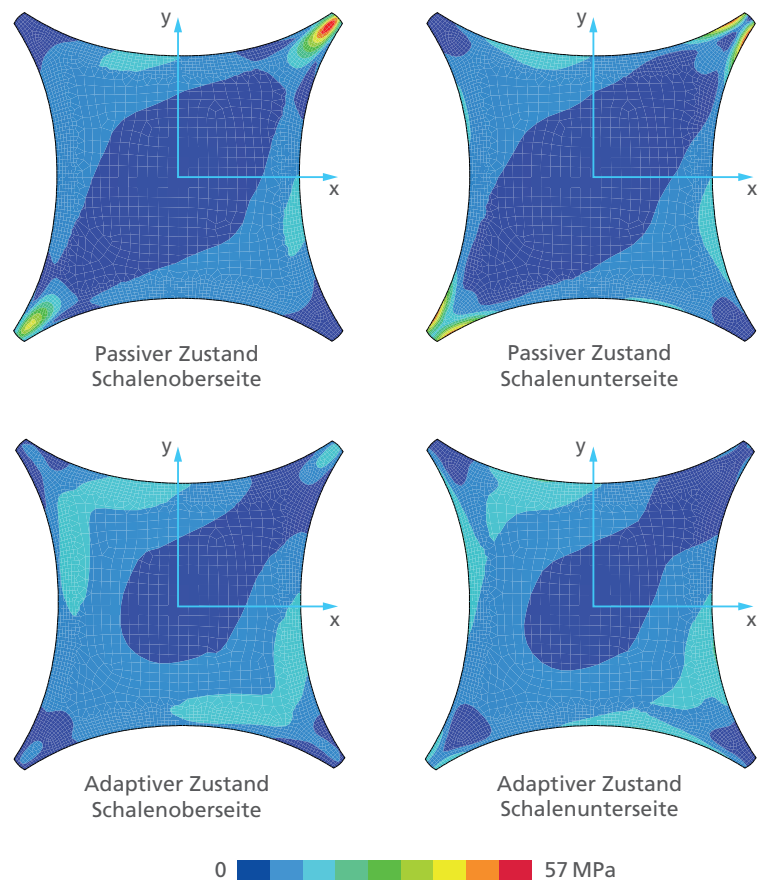
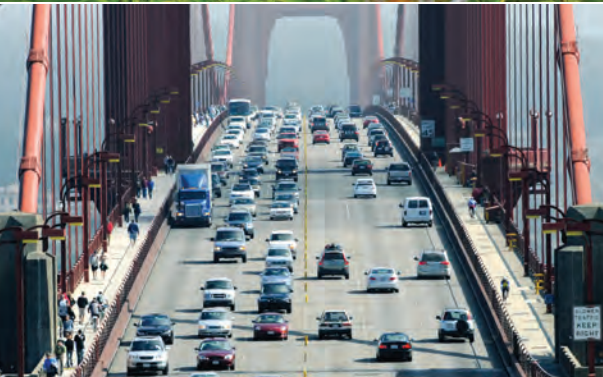


Abbildung 6: Spannungsverteilung bei einer beispielhaften Auflast. Die Adaption bewirkt eine Reduzierung der Spitzenspannung um 66 %.

zustands und Rekonstruktion der statischen Belastung

- Generierung der Sollwerte zur statischen Adaption sowie zur Schwingungsdämpfung
- Hochpräzise Ansteuerung der Aktuatoren

Um diese komplexe Aufgabe zu meistern, kommt ein System, bestehend aus einem dSPACE DS1006 Processor Board und einer Motion-Logic-Control (MLC)-Einheit der Firma Bosch Rexroth zum Einsatz. Während die MLC Steuerungsaufgaben der Hydraulikanlage und die Umsetzung lokaler Positions- und Kraftvorgaben an den Einzelachsen übernimmt, wird das DS1006 zur Zustandsschätzung

und Generierung der statischen und dynamischen Sollwerte genutzt. Zusätzlich berechnet das DS1006 die direkte und die inverse Kinematik, mithilfe derer die Positions- und Kraftvorgaben für die Auflagerpositionen in lokale Sollwertvorgaben für die Einzelachsen umgerechnet werden. Umgekehrt werden die Momentanwerte von Position und Kraft der Auflagerpunkte im globalen Koordinatensystem aus den lokalen Messungen bestimmt. Die hohe Komplexität der kinematischen Berechnungen und die kurze Zykluszeit von 5 ms erfordern einen großen Rechenaufwand. Hierbei sind vor allem die komfortablen Konfigurationsmöglichkeiten des DS1006 hilf-

Schnee, Sturm und Verkehr sind typische Belastungen, denen Bauwerke gewachsen sein müssen.



Das Schalentragwerk besitzt eine Dicke von lediglich 40 mm.

reich, da sich Rechenprozesse einfach auf seine Prozesskerne verteilen lassen und so die Rechenkapazität optimal genutzt werden kann. Die Profibus-Verbindung von DS1006 und MLC ermöglicht einen hochfrequenten Austausch von Soll- und Messwerten sowie Steuerbefehlen mit 12 MBit/s. Die Anbindung der Dehnungssensoren an das DS1006 wird über drei separat angesteuerte CAN-Netzwerke realisiert, was den Sensoren eine hohe Abtastrate von 200 Hz ermöglicht. Mit Hilfe des RTI CAN MultiMessage Blocksets lässt sich die CAN-Schnittstelle schnell und komfortabel einrichten. Die Experiment-Software ControlDesk® schließlich erlaubt es, auf einfache Weise zum Beispiel Positionssollwerte für die Einzelachsen vorzugeben und zwischen verschiedenen Regelungsstrategien umzuschalten. ■

*Martin Weickgenannt
Stefan Neuhäuser
Werner Sobek
Oliver Sawodny
Universität Stuttgart*

Stefan Neuhäuser

Stefan Neuhäuser ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart.



Martin Weickgenannt

Martin Weickgenannt war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart er arbeitet nun bei der Dürr Systems GmbH.



Werner Sobek

Werner Sobek ist Leiter des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart und Gründer der Firmengruppe Werner Sobek.



Oliver Sawodny

Oliver Sawodny ist Leiter des Instituts für Systemdynamik der Universität Stuttgart.



Sehen Sie in diesem Video die Stuttgart SmartShell in Aktion:
www.youtube.com/watch?v=ykDWRxguwTs