

DIE ADAPTRONIK ALS SCHLÜSSELTECHNOLOGIE FÜR DEN INTELLIGENTEN LEICHTBAU

Holger Hanselka

Adaptronik beschreibt den Technologiebereich zur Schaffung einer neuen Klasse von sogenannten **Intelligenten Strukturen**. Dieses Konzept geht von der Entwicklung adaptiver Systeme aus, die sich über autonome, d. h. selbstregelnde Mechanismen an unterschiedliche Betriebsbedingungen anpassen. Voraussetzung dafür ist die systemoptimale Verknüpfung von Sensoren und Aktuatoren auf der Basis von neuen Funktionswerkstoffen wie z. B. piezokeramischen Fasern und Folien mit adaptiven Reglern. So können diese neuartigen Struktursysteme auf äußere Veränderungen selbstoptimierend reagieren, bevor beispielsweise störende Verformungen auftreten. Dadurch wird es u. a. möglich, unmittelbar am Ort der Entstehung Schwingungen und damit häufig verbundene Körperschallprobleme zu unterbinden. Im Gegensatz zu klassischen Lösungsansätzen mit Hilfe von speziellen Federungen, hydraulisch-pneumatischen Dämpfern, Dämpfungsmaterialien oder anderen sind adaptive Komponenten integraler Bestandteil der Struktur selbst. Sie übernehmen damit gleichzeitig tragende wie aktuatorisch/sensorische Funktionen und sind somit **multifunktional**. Adaptronik wird dadurch zur unabdingbaren Voraussetzung für die Weiterentwicklung des Ultraleichtbaus.

MOTIVATION

Der allgemeine Maschinenbau gilt als klassische Disziplin im Ingenieurwesen. Bislang standen Zielsetzungen wie Funktionalität, Leistungsfähigkeit, Präzision, Schnelligkeit etc. im Vordergrund. Aktuelle und zukünftige Anforderungen verlangen nach einer ganzheitlichen ökonomischen und ökologischen Betrachtungsweise. Themen wie Ressourcenschonung, Energieeffizienz und Emissionsreduktion bekommen ganz besonderen Stellenwert. In diesem Kontext gewinnt der Leichtbau für den allgemeinen Maschinenbau zunehmend an Bedeutung.

Dies sei erläutert anhand eines Beispiels aus der Automobilbranche: dem 3-Liter-Auto. Während auf der einen Seite moderne Technologien wie neue Antriebskonzepte, neue Bauweisen, neue Werkstoffe etc. zum Einsatz kommen, stehen auf der anderen Seite die Kundenwünsche nach Komfort, Sicherheit und Leistungsfähigkeit. Dies stellt häufig einen Konflikt dar, der u. a. durch neue Leichtbauweisen mit neuen Leichtbauwerkstoffen gelöst werden kann. Dem Evolutionsprozeß der Natur folgend, haben in diesem Zusammenhang Faserverbundkonstruktionen einen ganz besonderen Stellenwert (Abb. 1).

So können ideale Lösungen der Natur entnommen werden, wenn beispielsweise das Wachstum

eines Baumes beobachtet wird. Dort liegen die Fasern des Werkstoffs in Richtung der Kraftflüsse, sind an Stellen hoher Beanspruchung vermehrt vorhanden und an Stellen niedriger Beanspruchung entsprechend ausgespart.



Moderne Faserverbundwerkstoffe wie kohlenstofffaserverstärkte Polymere zeigen im Vergleich zu anderen Werkstoffen ein erhebliches Leichtbaupotential. Während die spezifischen Steifigkeiten und spezifischen Festigkeiten von Aluminium, Stahl und Titan in gleicher Größenordnung liegen, so können der spezifische Modul und die spezifische Festigkeit von Hochleistungskohlenstofffaserverbundwerkstoffen um ein Viel-

Abb. 1
Natürliche Konstruktionen wie z. B. Bäume (links) und synthetische Konstruktionen wie Faserverbundwerkstoffe (rechts) enthalten gerichtete Verstärkungsfasern.

faches höher liegen als bei den erstgenannten Leichtbaumaterialien. /1/ Neben den spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten weisen solche Werkstoffe noch zusätzliche Vorteile wie die Möglichkeit geringster Wärmedehnung, die Optimierung des Dämpfungsverhaltens, die Ausnutzung der Werkstoffanisotropie etc. auf.



Abb. 2
Das natürliche System (links) enthält Aktuatorik/Sensorik/Regelung, während das technische System als passive Einheit zu betrachten ist /2/

Wird dieses Werkstoffverhalten mit den Konstruktionsprinzipien aus der Natur (vgl. Abb. 1) kombiniert, so ergeben sich für den Maschinenbau bislang in keinster Weise erahnte Möglichkeiten. Damit einhergehend folgen für solche Leichtbauanwendungen Leistungspotentiale, aber auch Einsatzgrenzen. Als Potentiale seien genannt die hervorragenden gewichtsbezogenen Steifigkeiten und Festigkeiten, die Möglichkeit, durch anisotrope Mehrkomponentensysteme maßgeschneidertes Strukturverhalten konstruieren zu können und die Fähigkeit, während des Herstellungsprozesses zusätzliche Elemente in

den Verbund zu integrieren. Dagegen stehen Einsatzgrenzen wie beispielsweise die Anfälligkeit gegen Schwingungen durch geringe Massen und Dämpfungen, Stabilitätsprobleme durch leichtbautypische Dünnwandigkeit und vor allem die hohe Empfindlichkeit gegen Imperfektionen.

Folgt man gedanklich dem o. g. Evolutionsprozeß, so steht für den allgemeinen Maschinenbau als nächstes die Brücke von passiven zu aktiven Struktursystemen an (Abb. 2).

ADAPTIVE STRUKTURSISTEME

In der Vergangenheit wurden Konstruktionen im allgemeinen Maschinenbau als passive Strukturen ausgelegt. Dimensioniert wurde in der Regel nach Steifigkeit, nach Festigkeit, nach Stabilität oder hinsichtlich des dynamischen Verhaltens. Werden passive Strukturen mit äußeren Störkräften beaufschlagt, so reagieren diese mit Verformungen, mit Schwingungen, mit Instabilitäten, mit Lärm etc. (Abb. 3).

Ein erster Schritt hin zu aktiven Struktursystemen ist es gewesen, die passiven Strukturen zusätzlich mit geeigneter Sensorik auszustatten, um das entsprechende Strukturverhalten zu erfassen. Die sensorischen Signale wurden einer Regelungstechnik zugeführt und letztendlich durch geeignet angeordnete Aktuatoren in die Struktur rückgeführt, um das Strukturverhalten zu optimieren. Der Vorteil dieser Lösung liegt darin, daß auf Grund äußerer Störkräfte die Reaktionen des Struktursystems minimiert werden können. Als Nachteil ist neben der erhöhten Masse im wesentlichen zu nennen, daß die

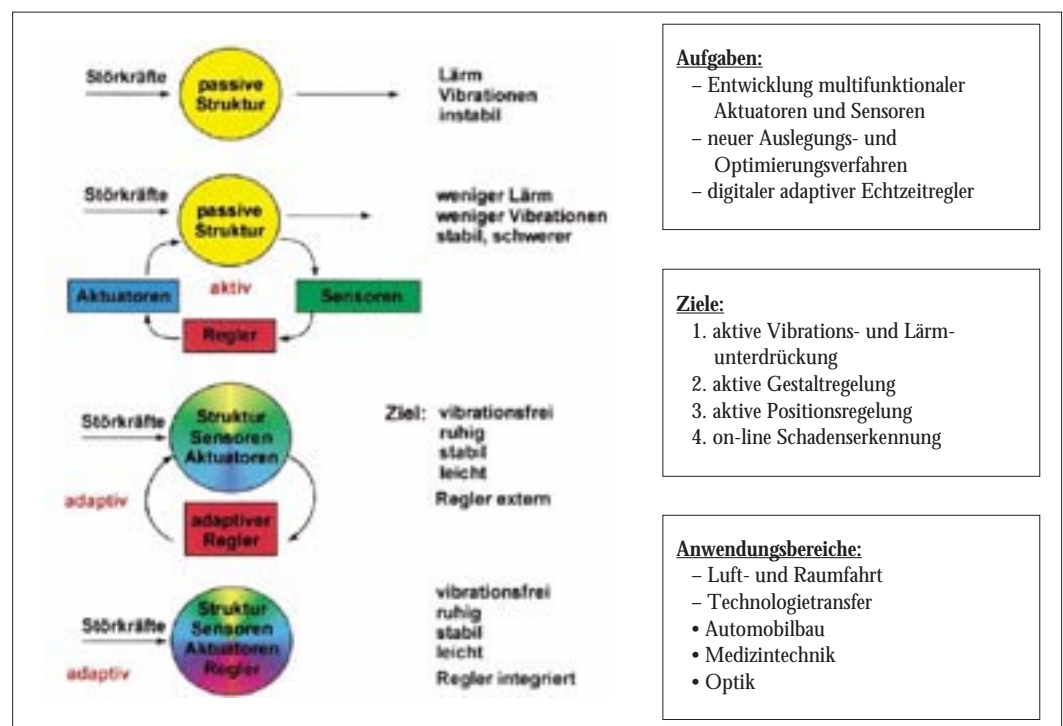


Abb. 3
Vergleich verschiedener Struktursysteme von der herkömmlichen passiven Struktur über das mechatronische System bis hin zur Adaptronik /3/

zusätzlichen Elemente Sensor und Aktuator in dem Auslegungsprozess der Struktur nicht erfaßt worden sind und somit in der Regel nicht optimal in den Kraftflüssen liegen.

Der Weg hin zu adaptiven Strukturen ist dadurch charakterisiert, daß die Struktur selbst mit Aktuatoren und Sensoren ausgerüstet ist, d. h. Sensoren und Aktuatoren selbst sind ein Bestandteil der Struktur. Dies bewirkt, daß auch schon während des Auslegungsprozesses Kräfte und Momente über die zusätzlichen Aktuatoren und Sensoren geleitet werden können und Rückwirkungen aus der Aktuatorik/Sensorik auf das Strukturverhalten mit erfaßt werden. Solche Strukturen verknüpft mit einem adaptiven Regler stellen im Idealfall ein System dar, welches auf Grund äußerer Störkräfte keine Reaktionen ausführt.

Zukünftig wäre es anzustreben, daß auch die Regelungstechnik Bestandteil des Struktursystems wird. Solche Struktursysteme, die aus der eigentlichen lasttragenden Tragstruktur, integrierten oder applizierten Aktuator- und Sensorsystemen sowie einer adaptiven Regelung bestehen, werden adaptive Struktursysteme genannt. Sie sind multifunktional und zeichnen sich insbesondere dadurch aus, daß sie sich selbständig und autonom veränderten Randbedingungen anpassen können. Die Technologie der adaptiven Struktursysteme wird Adaptronik genannt.

Die Ziele der Adaptronik sind

- aktive Vibrations- und Lärmunterdrückung,
- aktive Gestaltregelung,
- aktive Positionsregelung und
- Schadenserkenkung in multifunktionalen Leichtbaustrukturen.

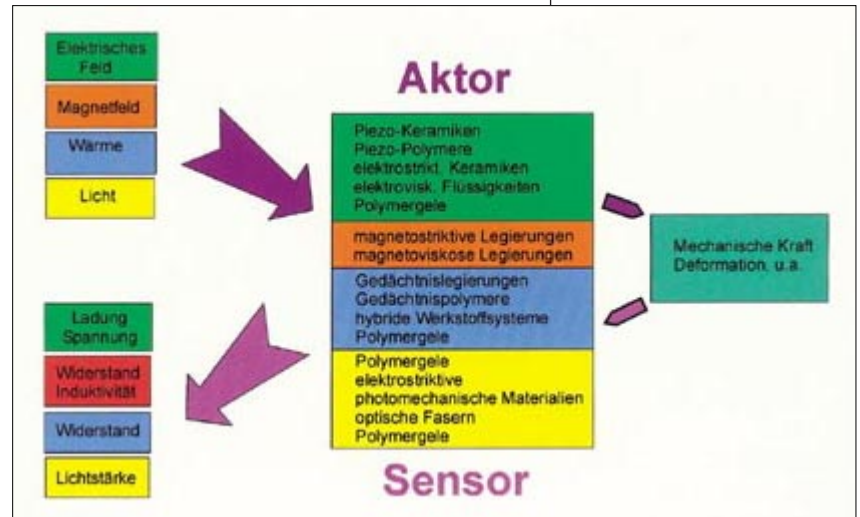
Dazu sind Aufgaben wie

- strukturkonform integrierte Aktuator- und Sensorsysteme,
 - digitale adaptive Echtzeitregler,
 - neue Auslegungs- und Optimierungsverfahren,
 - neue Konstruktionsprinzipien und
 - ganzheitliche interdisziplinäre Betrachtungsweisen
- zu bearbeiten.

Grundlage solcher adaptiven Struktursysteme sind multifunktionale Materialien, die als Aktuator und/oder Sensor eingesetzt werden können (Abb. 4).

Es gibt verschiedene Wandlermaterialien, die zum Beispiel auf elektrische Felder, Magnetfelder, Wärme oder Licht mit mechanischen Kräften oder Deformationen reagieren. Auf der anderen Seite führen mechanische Kräfte oder Deformationen bei selben Materialien zu elektrischen Spannungen oder Ladungen, Widerstandsänderungen, Veränderungen der Lichtstärke etc. Im ersten Fall spricht man von aktuatorisch wirksamen

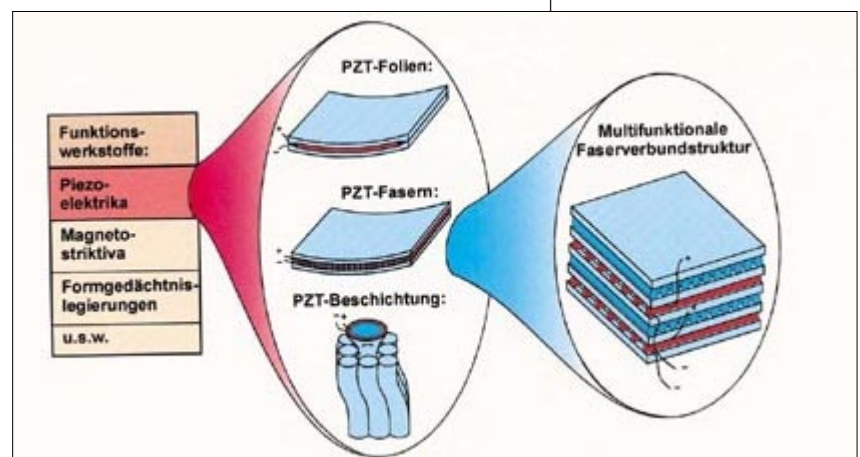
Materialien, im zweiten Fall von sensorisch wirksamen Materialien. Beispiele für solche Materialien sind Piezokeramiken, magnetostruktive Legierungen, Formgedächtnislegierungen, Polymergele, optische Fasern etc. All diesen Materialsystemen ist gemein, daß sie zwar aktuatorisch und sensorisch wirksame Eigenschaften aufweisen, aber nicht im Sinne der klassischen Strukturmechanik lasttragende Aufgaben übernehmen können.



Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, solche Materialsysteme in Leichtbaustrukturen zu integrieren, um neben aktuatorischen und sensorischen Eigenschaften auch noch die lasttragende Komponente dazu zu bekommen. Idealerweise bieten sich hier faserverstärkte Kunststoffe an, da nur bei diesen Werkstoffen während des Herstellungsprozesses zusätzliche Komponenten im Material integriert werden können (Abb. 5).

Abb. 4

Funktionswerkstoffe/Wandlerwerkstoffe können eine physikalische Größe in eine andere wandeln und umgekehrt.



Beispiel für solche Multifunktionswerkstoffe sind z. B. piezoelektrische Folien integriert in Faserverbundwerkstoffe, piezoelektrische Fasern in Faserverbundwerkstoffen oder PZT (Bleizirkonattitanat) beschichtete Kohlenstofffasern im Verbund. Aus solchen Elementen können im Sinne der Faserverbundtechnologie multifunktionale Faserverbundstrukturen mit optimierten anisotropen Werkstoffeigenschaften aufgebaut werden.

Abb. 5

Beispiele für multifunktionale Materialien auf der Basis piezokeramischer Funktionswerkstoffe /2/

AUSWAHL GEEIGNETER ANWENDUNGSFELDER

Prinzipielle Anwendungsfelder für solche multifunktionalen Werkstoffsysteme sind auf der einen Seite aktive Schwingungs- und Schallreduktionen, auf der anderen Seite aktive Gestaltsänderung (Abb. 6).

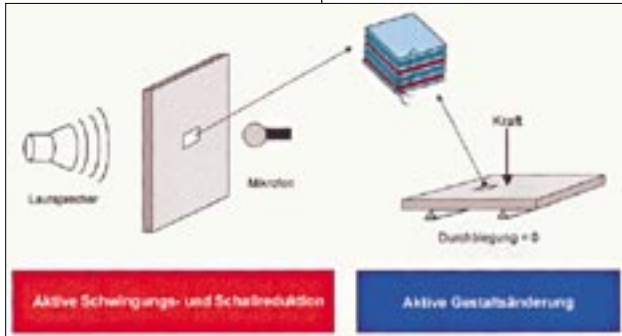


Abb. 6
Prinzipielle Anwendungsfelder für multifunktionale Werkstoffsysteme

Während im Falle dynamischer Beanspruchung durch integrierte Sensoren und Aktuatoren das dynamische Verhalten von Hautfeldern und Strukturkomponenten verändert werden kann, so ist es im Falle statischer Beanspruchung

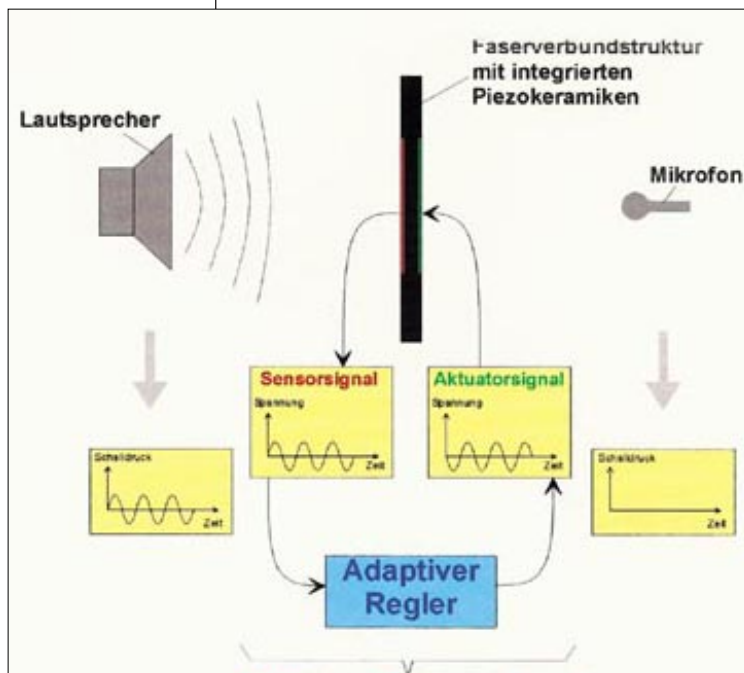
möglich, mechanischen Kräften keine Durchbiegung folgen zu lassen: Normalerweise folgt im Sinne des Hookeschen Gesetzes einer Beanspruchung immer eine Deformation. Mit Hilfe multifunktionaler Werkstoffsysteme können durch aktiv eingebrachte innere Kräfte auftretende Deformationen ausgeglichen werden. Dies hat im Idealfall zur Folge, daß beispielsweise eine an einen Biegebalken angreifende Kraft keine Verformung erzwingt. Dies entspräche einer virtuell unendlichen Steifigkeit.

BEISPIEL „AKTIVE GERÄUSCHREDUKTION“ /4/

In vielen Bereichen der Technik treten sogenannte strukturakustische Effekte auf, d. h. vibrierende Strukturen strahlen Luftschall ab bzw. leiten ihn als Körperschall in angrenzende Bauteile weiter, oder aber es tritt der umgekehrte Fall auf, daß umgebender Lärm strukturelle Vibrationen erzeugt. Körperschall und Luftschall sind hierbei eng miteinander gekoppelt.

Diese Kopplung soll anhand des folgenden Beispiels verdeutlicht werden: Wenn Schall auf eine

Abb. 8
Prinzip der Regelung in Zusammenarbeit mit einer adaptiven Faserverbundstruktur /5/



Fensterscheibe eines Wohnraumes trifft, so wird ein Teil reflektiert, ein anderer Teil absorbiert. Der transmittierende Anteil, welcher als störender Lärm in den Wohnraum gelangt, entsteht durch die vom auftreffenden Schall verursachte strukturelle Vibration der Fensterscheibe, die dann als Luftschall in den Innenraum weitergeleitet wird. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 7 dargestellt.

Wird ausgehend von Abbildung 7 die Energiebilanz betrachtet, so muß gelten: Auftreffender Luftschall = Reflexion + Transmission + Absorption. Will man den Anteil des transmittierenden Schalls möglichst klein halten, so kann man, wie aus der Energiebilanz ersichtlich ist, den Reflektions- und Absorptionsanteil erhöhen. Solche Maßnahmen führen zwangsläufig zur Gewichtszunahme bei einer Struktur. Beispielsweise werden sowohl im Automobilbau als auch im Flugzeugbau zusätzliche Dämmstoffe für Absorbtionzwecke eingesetzt, was sich negativ auf die Gewichtsbilanz auswirkt.

Eine andere Möglichkeit der Reduzierung der Schallemission ist die direkte Beeinflussung des transmittierenden Anteils. Da Schall ein Wellenphänomen ist, können Schallfelder unter Verwendung des physikalischen Prinzips der Interferenz beeinflusst werden. Bei der Überlagerung einer Schallwelle mit einer Schallwelle gleicher Amplitude und gleicher Frequenz, aber mit einer Phasenverschiebung von 180°, kommt es zur vollständigen Auslöschung der interferierenden Wellen. Man spricht in diesem Fall von einer destruktiven Interferenz.

Die Ausnutzung des Prinzips der aktiven Lärmunterdrückung mittels hochintegrierter aktiver Faserverbundstrukturen wird mit Hilfe von Faserverbundplatten mit integrierten piezokeramischen Scheibenelementen umgesetzt (Abb. 8). Ein Lautsprecher wird von einer breitbandigen oder harmonischen Anregung eines Signalgenerators angesteuert. Die Messung des vom Lautsprecher erzeugten Schalls erfolgt mit dem Mikrofon. Zwischen dem Mikrofon und dem Lautsprecher ist eine Faserverbundplatte positioniert, in der zwei piezokeramische Scheibenelemente integriert sind. Der Lagenaufbau des Laminats ist symmetrisch, die Piezokeramiken liegen übereinander jeweils außerhalb der neutralen Ebene. Innerhalb

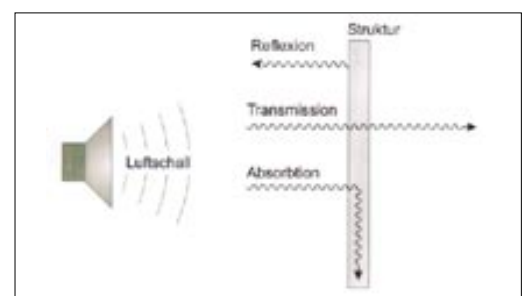


Abb. 7
Strukturverhalten bei auftreffendem Luftschall /4/
Bei auftreffendem Luftschall verhält sich eine Struktur gewöhnlich so, daß ein Teil des Schalls reflektiert, ein Teil absorbiert und ein Teil durchgelassen (Transmission) wird.

der Faserverbundplatte dient die vordere Piezokeramik als Sensor, die hintere übernimmt die Funktion des Aktuators. Um diese Vorrichtung gegenüber Umgebungslärm zu isolieren, wird sie mit einer Plexiglashaube abgedeckt.

Hierbei mißt die Sensorkeramik den vom Lautsprecher kommenden Primärschall und steuert den adaptiven Regler mit einem zum beeinflussenden Primärschallfeld kohärenten Referenzsignal an. Der adaptive Regler erzeugt daraufhin ein zum Referenzsignal phasenverschobenes Aktuatorsignal und steuert damit die Aktuatorkeramik an. Der Aktuator erzeugt entsprechend seiner Ansteuerung ein sekundäres Kompensationsschallfeld, das dem Primärschallfeld am Ort des Mikrofons überlagert wird und zur Auslöschung führt. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 8 aufgezeigt.

Zur Veranschaulichung der gemessenen Lärmverminderung werden in Abbildung 9 die Ergebnisse für den regelten und den unregelten Fall bei einer breitbandigen Anregung des Lautsprechers im Bereich des Mikrofons dargestellt.

Es konnte im Frequenzbereich von 900 bis 930 Hz eine sehr gute Schallfeldkompensation am Ort des Mikrofons erreicht werden. Die Amplitude des Fehlersignals wurde dabei um 60 dB gedämpft.

Anwendung für diese Technologie ist zum Beispiel im Straßen-, Schienen- und Luftfahrzeugbau vorstellbar, wo generell mechanische Schwingungen zu Lärmproblemen im Inneren führen. Durch den Einsatz multifunktionaler Werkstoffe in Kombination mit der Adaptronik lassen sich die o. g. Wirkprinzipien zur Schallübertragung/-abstrahlung positiv beeinflussen (Abb. 10).

So werden im Leitprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) ADAPTRONIK /2/ entsprechende Technologien bis hin zur prototypischen Baugruppe entwickelt.

REGELUNGSANSÄTZE FÜR DIE ADAPTRONIK

Wesentliches Element für adaptive Systeme ist die Verknüpfung der sensorischen und aktuatorischen Einheiten durch eine adaptive Regelungstechnik. Diese Regelungstechnik muß insbesondere Forderungen nach

- Strukturkonformität,
- Echtzeitfähigkeit,
- Adaptionsfähigkeit,
- Robustheit,
- Stabilität etc.

folgen.

Als Lösungsansätze sind zu finden

- neuronale Netze,
- digitale Filter,
- Fuzzy-Logic-Konzepte etc.

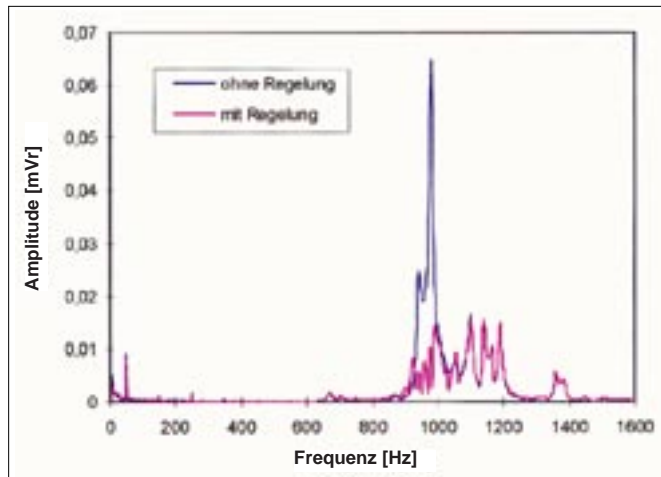


Abb. 9
Amplitudenspektren mit und ohne adaptive Regelung bei einer breitbandigen Anregung /5/

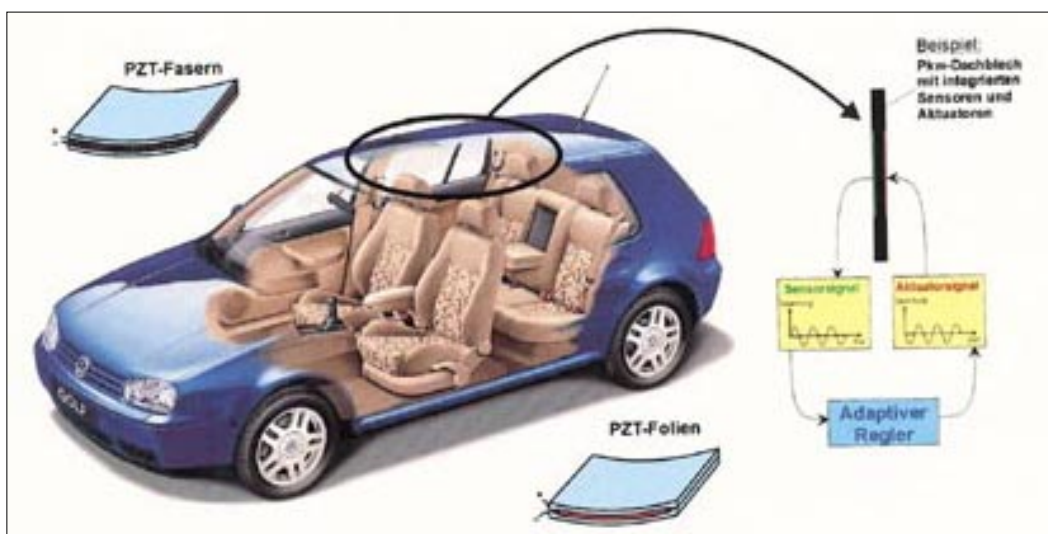


Abb. 10
Adaptive Hautfelder zur Beeinflussung der Innenraumakustik /2/

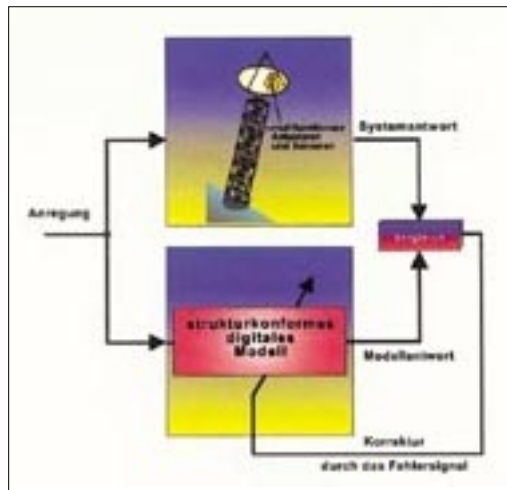


Abb. 11
Strukturkonformität bei adaptiven Reglern /6/ bedeutet, daß sich der Regler konform zur Struktur verhält.

Als besonders wichtig ist sicherlich die Strukturkonformität gemäß Abbildung 11 zu nennen. /6/

Adaptive Struktursysteme müssen in der Lage sein, auf veränderte innere und äußere Randbedingungen aktiv reagieren zu können. Dies beinhaltet auch eine Darstellung eines veränderlichen Strukturverhaltens infolge von Masseveränderungen etc.

KONSTRUKTIONS-, AUSLEGUNGS- UND OPTIMIERUNGSSTRATEGIEN FÜR ADAPTIVE MECHANISCHE SYSTEME

Während es für den allgemeinen Maschinenbau ausreicht, Berechnungsansätzen nach klassischen Theorien wie beispielsweise dem Hooke'schen Gesetz zu folgen, müssen für adaptive Struktursysteme Wechselwirkungen beispielsweise zwischen mechanischen Spannungen und elektrischen Feldern, mechanischen Kräften und eingebrachter Wärme etc. berücksichtigt werden. Es handelt sich somit in der Regel um gekoppelte

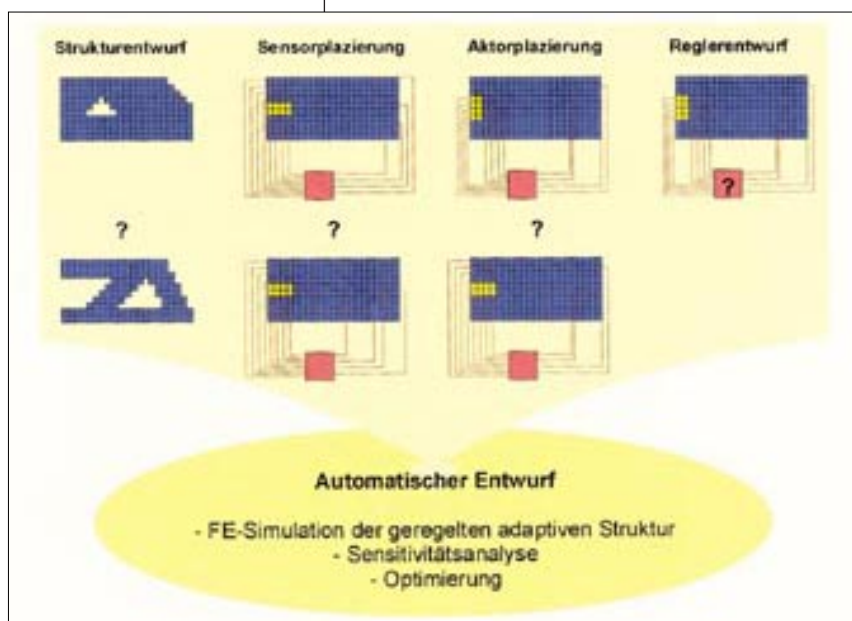


Abb. 12
Beispiel für den automatischen Entwurf /7/ zur Minimierung des Energieaufwandes bei der Regelung

Systeme. Darüberhinaus hat auch die Regelungstechnik Rückwirkungen auf das mechanische System, welche es zu berücksichtigen gilt.

Der erste Schritt beim Entwurf adaptiver mechanischer Strukturen ist der klassische Strukturentwurf /7/. Er wird bestimmt von den geometrischen und physikalischen Randbedingungen (Lagerpunkten, Kräfteinleitungspunkten, Bauraum u. a.). Dazu können verschiedene Werkzeuge wie zum Beispiel die Topologieoptimierung oder die Gestaltoptimierung genutzt werden. Der nächste Schritt besteht in der Platzierung der Aktuatoren. Die Position und Art der Aktuatoren ergibt sich aus den Möglichkeiten, die Struktur an bestimmten Stellen gezielt zu versteifen bzw. zusätzliche Kräfte einzuleiten. Dazu wird aus dem Sensorsignal mit Hilfe eines Regelgesetzes ein Stellsignal für den Aktuator erzeugt. Die Position und Art der Sensoren bestimmt das Signal, das dem Regler zur Verfügung gestellt wird. Das Regelgesetz gibt an, in welcher Art und Weise aus dem Sensorsignal ein Stellsignal produziert wird. Es zeigt sich eine Abhängigkeit des Regelgesetzes von der Position der Aktuatoren und Sensoren, d. h., für jede Konfiguration von Aktuatoren und Sensoren müssen die Parameter des Regelgesetzes neu bestimmt werden. Die Anzahl und der Wirkungsgrad der Aktuatoren ist entscheidend für den Energieaufwand der Regelung. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, wenige Aktuatoren in der Struktur so zu positionieren, daß mit wenig Energie das Strukturverhalten gezielt beeinflusst werden kann. Es wird deutlich, daß die Position der Aktuatoren ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit (Betriebskosten, Anschaffungskosten) adaptiver Strukturen ist.

In der Literatur sind verschiedenste Ansätze zur Bestimmung der optimalen Aktuator/Sensorplatzierung zu finden, wobei jeder Ansatz gewisse Vor- und Nachteile in sich birgt. Einen völlig neuen Zugang bieten Methoden, die versuchen, ausgehend von Verfahren der Strukturoptimierung und basierend auf mathematischen Optimierungsalgorithmen, das Positionierungsproblem zu lösen. Um einen ersten Entwurf der adaptiven Struktur zu erhalten, eignen sich Verfahren aus der Topologieoptimierung. Ausgangspunkt ist ein Entwurfsraum, der die Grundstruktur enthält und dessen Designvariablen mögliche diskrete Aktuatorpositionen oder Positionen mit piezoelektrischem Material sind.

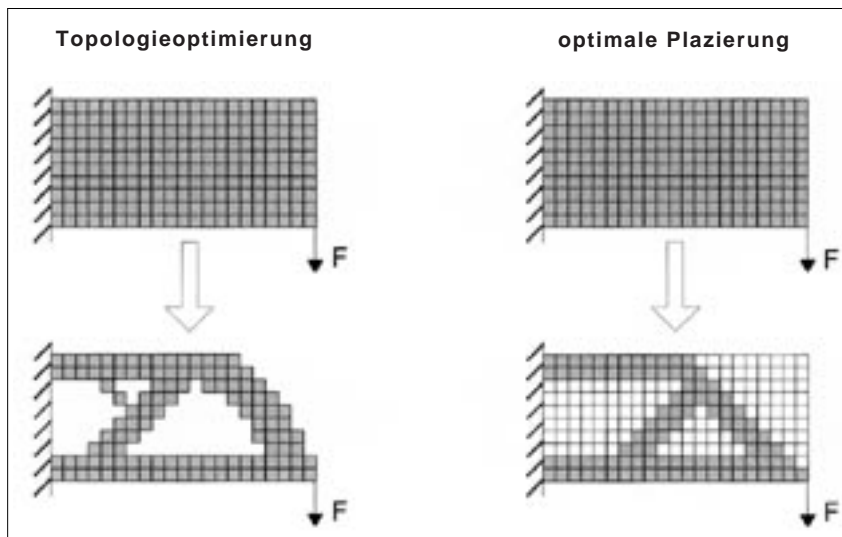
Die Analogie ergibt sich daraus, daß die klassische Topologieoptimierung einen Entwurfsraum definiert, in den Material so eingebracht wird, daß die Lösung den mechanischen und technischen Anforderungen entspricht.

An einem kleinen Beispiel soll die Analogie verdeutlicht werden. Das Ausgangsmodell der klassischen Topologieoptimierung von Stabwerken ist eine Struktur mit n Knoten und m möglichen

Verbindungen mit Stäben zwischen den Knoten. Wird das Problem diskret betrachtet, das heißt, ein Stab ist entweder vorhanden oder nicht vorhanden, erhält man eine Lösungsmenge, die 2^m mögliche Lösungen enthält. Das Problem läßt sich mit Hilfe diskreter mathematischer Optimierungsalgorithmen (Enumeration, Branch-and-Bound) lösen. Es gibt Ansätze, bei denen das diskrete Problem als kontinuierliches gelöst wird. Vom kontinuierlichen Optimum aus wird dann die diskrete Lösung in einer geeigneten Umgebung gesucht. Betrachtet man nun das Problem der optimalen Positionierung von Aktuatoren in einem Stabwerk, so gibt es m mögliche Positionen, an denen ein Aktuator eingebaut werden kann. Bei diskreter Betrachtung ergibt sich das bekannte diskrete Optimierungsproblem mit 2^m möglichen Lösungen. Unterschiede zwischen beiden Problemen gibt es in der Wahl der Designvariable und der Zielfunktionen. In der Topologieoptimierung werden die Dichte oder der E-Modul als Designvariable verwendet, um finite Elemente ein- oder auszublenden. Bei der optimalen Positionierung von Aktuatoren ist es eine diskrete Variable, welche die Eigenschaften des Elementes diskret verändert (konventionelles Element oder Aktuatorelement).

Ein Ansatz, der auf einer erweiterten Formulierung des Strukturoptimierungsproblems beruht, wurde von Sepulveda, Jin und Schmit beschrieben. Dabei werden zwei Arten von Designvariablen unterschieden: diskrete Variablen, um die Aktuatorposition zu beschreiben, und kontinuierliche Variablen, die die Parameter des Reglers sind. Die Optimierung erfolgt in zwei Stufen. In der ersten Phase werden die kontinuierlichen Parameter für definierte diskrete Variablen ermittelt. Ausgehend von der kontinuierlichen Lösung wird in der zweiten Phase mit Hilfe eines Branch-and-Bound-Algorithmus eine neue diskrete Lösung ermittelt. Der Algorithmus stoppt, wenn keine neue diskrete Lösung gefunden werden kann, die die Zielfunktion minimiert. Der eingesetzte Branch-and-Bound-Algorithmus ist die mathematische Technik der Fallunterscheidung. Es werden daher keine Sensitivitäten benötigt, denn der Algorithmus entscheidet sich für diejenige diskrete Variante, die die größte Zielfunktionsverbesserung liefert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei allen Autoren die Beschreibung des Problems durch diskrete Variablen für die Aktuatorpositionen erfolgt. Nicht in jedem Fall wird die Bestimmung des Regelgesetzes in die Aktuatorpositionierung mit einbezogen, obwohl ein direkter Zusammenhang besteht. Werden die Reglerparameter als kontinuierliche Designvariablen betrachtet, so entsteht ein diskret-kontinuierliches Optimierungsproblem mit nichtlinearen Problemfunktionen. Die Eignung dieses Ansatzes basiert auf der Tatsache, daß eine geschlossene mathematische Lösung für diskrete und kontinuierliche Variablen angegeben werden kann.



INTERDISZIPLINARITÄT

Die Adaptronik zeichnet sich durch eine starke Interdisziplinarität aus. Auf der einen Seite ist Basiswissen aus den Bereichen Materialwissenschaft, Strukturmechanik, Aktuatorik und Sensorik, Elektrotechnik, Regelungstechnik etc. erforderlich, auf der anderen Seite wird für spezielle Aufgaben anwendungsspezifisches Wissen z. B. aus den Branchen

- Luft- und Raumfahrt,
 - Automobil-, Schienenfahrzeug- und Schiffbau,
 - Maschinen- und Anlagenbau,
 - Optik und
 - Medizintechnik
- gefordert.

Mit der Möglichkeit Werkstoffsysteme aktiv zu verändern, sind in allen diesen Branchen Anwendungen denkbar, die bisher außerhalb der Diskussion standen. Im folgenden soll die Idee der Adaptronik an ausgewählten Projekten/Anwendungsbeispielen erläutert werden, die an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg bearbeitet werden.

INNOVATIONSKOLLEG ADAMES

Das Innovationskolleg „Adaptive mechanische Systeme“ ADAMES ist ein von der DFG geförderter interdisziplinärer Forschungsverbund, in dem Wissenschaftler aus sieben Instituten der Otto-von-Guericke-Universität und des Instituts für Strukturmechanik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) Braunschweig mitarbeiten. Das Kolleg ist nach den wesentlichen Schwerpunkten in die Projektbereiche RID (*Realisierung, Identifikation und Demonstration*), AWS (*Adaptive Werkstoffsysteme*), MBO (*Modellierung, Berechnung und Optimierung*) und RAS (*Regelung und Signalverarbeitung*) untergliedert.

Das Innovationskolleg führt Grundlagenforschung zur Entwicklung, Realisierung und Anwendung adaptiver mechanischer Systeme durch und erprobt die gewonnenen Erkenntnisse an ausgewählten Strukturen. Das Ziel ist dabei

Abb. 13
Topologieoptimierung /7/ soll durch einen geeigneten Optimierungsalgorithmus die ideale geometrische Form ermitteln.

nicht nur die Erweiterung passiver Systeme durch den Einsatz von Sensoren und Aktuatoren mit einer Ansteuerung durch ein Reglersystem, sondern darüber hinaus die Integration von Sensor- und Aktuatorssystemen in die Struktur und Verwendung adaptiver Regler zur Optimierung der Leistungsfähigkeit. /8/

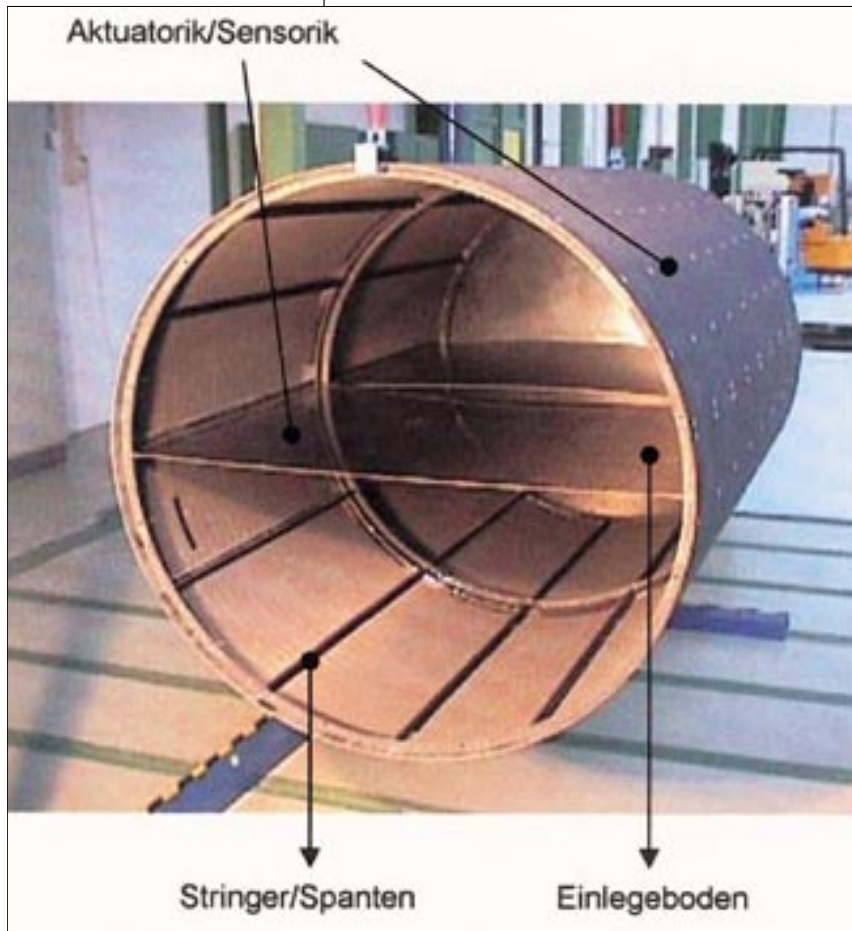


Abb. 14
Adaptiver CFK-Zylinder als stringerverstärkter Faserverbund Leichtbaustruktur mit auswechselbaren Tragböden und flächig verteilter Aktuatorik und Sensorik /8/

In der ersten Arbeitsphase des Kollegs wurden in den einzelnen Bereichen die Grundlagen zur Realisierung adaptiver Systeme geschaffen. So wurden spezielle piezoelektrische finite Elemente entwickelt und in ein FE-Programmsystem implementiert, mit dem u. a. auch eine Simulation des Schädigungsverhaltens von Piezokeramiken möglich ist. Ebenfalls entwickelt wurden Berechnungsalgorithmen zur optimalen Positionierung von Aktuatoren und Sensoren zur Auslegung adaptiver Systeme sowie zum Modellupdating. Es wurden Untersuchungen zum Reglerentwurf und zur Hysteresekompensation für die Anwendung auf adaptive Systeme durchgeführt. Zur Mikrocharakterisierung und Schadensdiagnose adaptiver Verbunde auch bei mechanischer Beanspruchung wurden Prüfverfahren angewendet und entsprechend angepaßt. Die Verifikation der entwickelten Auslegungs- und Berechnungsverfahren erfolgte durch die Realisierung und Identifikation adaptiver Strukturen und dem Vergleich zwischen Messung und Simulation. Dabei wurde das statische und dynamische Verhalten von zunächst einfachen passiven und aktiven Stab-, Balken-, Platten- und Schalenstrukturen untersucht.

In der zweiten Arbeitsphase des Innovationskollegs ADAMES steht als *Leitstruktur* ein anwendungsorientierter Demonstrator im Zentrum der Aktivitäten, an dem sich die einzelnen Fachdisziplinen Werkstoffe, Modellierung, Aktuatoren und Sensoren, Elektronik und Regelung synergetisch ergänzen.

Bei der Leitstruktur handelt es sich um einen *stringerverstärkten CFK (kohlenstoffaserverstärkten)-Zylinder mit auswechselbaren Tragböden*, der als dreidimensionale adaptive Struktur den Bezug zu realen Problemstellungen herstellen soll. Der Demonstrator repräsentiert charakteristische Bauelemente aus der Verkehrstechnik, wie z. B. einen Flugzeugrumpf, die Zelle eines Schienen- oder Straßenfahrzeugs bis hin zum Rumpf eines Schiffes, oder aber auch Bauelemente aus dem Maschinen- und Anlagenbau sowie aus Bereichen der Medizintechnik.

Ziel des Projektes ist, die Struktur einerseits hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens aktiv so zu beeinflussen, daß z. B. der Lärmpegel im Inneren des Zylinders minimiert wird. Andererseits soll an bestimmten Elementen eine quasistatische Konturverformung durchgeführt werden.

BMBF-LEITPROJEKT ADAPTRONIK

In einem Ideenwettbewerb hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung Bonn die Industrie und Forschung aufgefordert, Projektvorschläge mit besonders hohem wissenschaftlichen und technischen Niveau und einer Ausstrahlung der Ergebnisse weit in das 21. Jahrhundert einzureichen. Aus einer Vielzahl von Projektvorschlägen der unterschiedlichsten Konsortien sind von einer hochrangigen Gutachterjury fünf Projekte ausgewählt worden, darunter das BMBF-Leitprojekt ADAPTRONIK /2/. Die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg ist Forschungspartner in diesem Projekt.

Ziel des BMBF-Leitprojektes ADAPTRONIK ist es, auf der Basis neuartiger Werkstoffsysteme mit aktuatorischen und sensorischen Eigenschaften Funktionsmuster als Voraussetzung für eine wettbewerbssteigernde Produktentwicklung zu erarbeiten. Dies anhand von prototypischen Baugruppen repräsentativ für verschiedene Branchensegmente, so daß eine vielfache Übertragbarkeit in die unterschiedlichsten industriellen Anwendungen auf Basis der gewonnenen Erfahrungen möglich ist.

Dabei soll das Leitprojekt ADAPTRONIK die wissenschaftlich/technologische Basis für industrielle Anwendungen in möglichst vielen Branchenfeldern bereitstellen. Es wird die Strategie verfolgt, das im internationalen Wettbewerb führende wissenschaftliche Potential mit den Industriepartnern aus den unterschiedlichsten Branchenfeldern synergetisch zu vernetzen. Dies, um eine Generation von Produkten mit weltweit einmaligen Eigenschaften vorzubereiten. Den Klein- und mittelständischen Unternehmen

(KMU's) kommt dabei als Drehscheibe der Technologien eine besondere Bedeutung zu.

Für diese anspruchsvolle Aufgabe hat sich ein Netzwerk von Industrie- und Forschungspartnern zusammengefunden (Abb. 15), welches die einzelnen Fachdisziplinen des sehr komplexen Feldes der Adaptronik beherrscht und zielorientiert zusammenführt.

Eingang finden dabei die Ergebnisse aus der Materialentwicklung und der zugehörigen Prozesstechnik für piezoelektrische Fasern und Folien, aus der strukturkonformen Integration in Leichtbauwerkstoffe sowie aus der Entwicklung von Modellierungs- und Optimierungsstrategien insbesondere im makromechanischen Bereich.

Im zeitlichen Ablauf ist das Projekt so angelegt, daß einige der industriellen Anwendungen sehr früh in die Umsetzung und Markteinführung gehen können, während Anwendungen mit höherer Integrationsdichte entsprechend später zum Tragen kommen – in Abhängigkeit der bereits laufenden Aktivitäten und Erfahrungspotentiale in dem Technologieumfeld.

Eine wesentliche Neuheit, die das Leitprojekt von allen weltweit bekannten Arbeiten auf dem Gebiet adaptiver Materialien und Strukturen

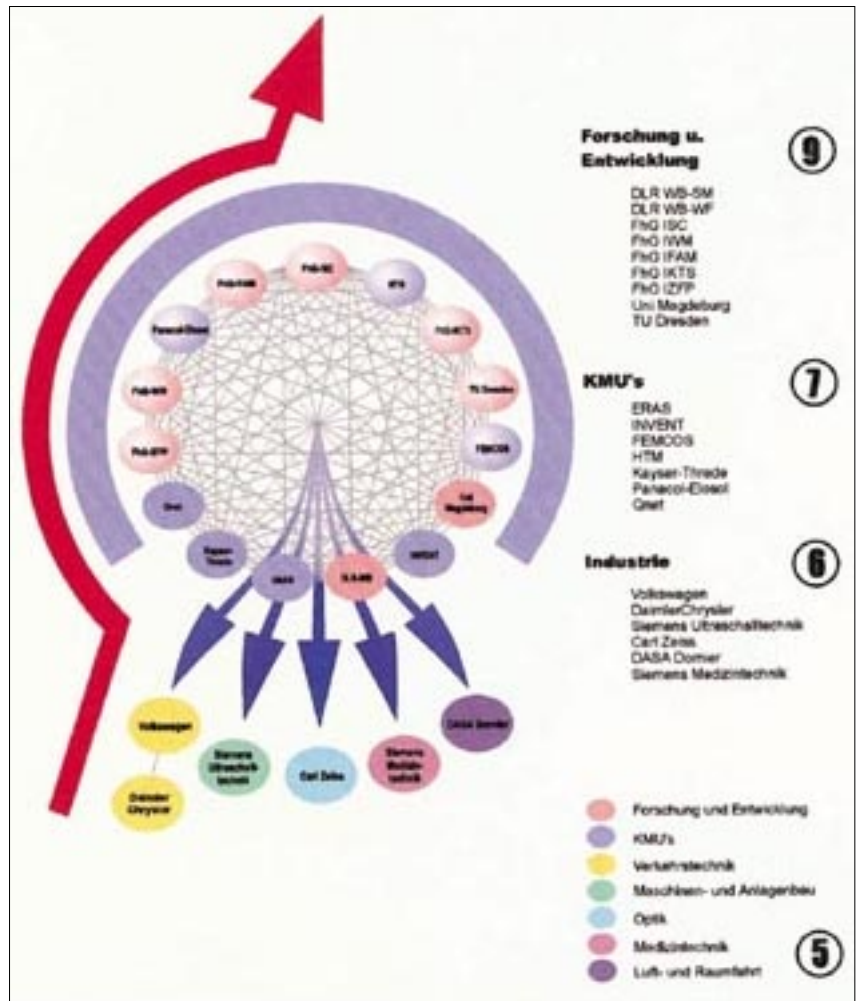


Abb. 15 Netzwerk aller im Leitprojekt Adaptronik beteiligten Partner /2/

deutlich abhebt, ist der Zugang zu dünnen, aktivierbaren PZT-Fasern, die derzeit den Weltstand auf diesem Sektor repräsentieren /9/. Das Verfahren zur Herstellung von PZT-Fasern aus Sol-Gel-Vorstufen ist vom Fraunhofer-Institut für Silicidforschung Würzburg patentiert und sichert alleinig dem Projektteam den Zugang zu diesen neuartigen Materialien. Es ist derzeit weltweit kein wettbewerbsfähiges Verfahren bekannt, das Fasern dieser Qualität liefern kann.

Die beteiligten Industrie- und Forschungspartner leisten entlang der Wertschöpfungskette (Materialentwicklung → Verbundtechnologie → Adaptives Gesamtsystem → Prototypische Baugruppen) die notwendigen Entwicklungsarbeiten. Die technologischen Grundlagen finden Eingang in das Gesamtsystem Adaptronik, welches mit seinen speziell ausgewählten Funktionsmustern die Basis zur Realisierung der prototypischen Baugruppen bildet.

Hierbei ist es notwendig, parallele Entwicklungen in den einzelnen Arbeitspaketen zu leisten. Die Synergien und Rückschlüsse zwischen den einzelnen Disziplinen werden bei diesem sehr komplexen und interdisziplinären Ansatz zwingend erforderlich für die erfolgreiche Umsetzung sein.

Die meisten Partner finden sich in verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette wieder. Dies spiegelt die Komplexität und Interdisziplinarität

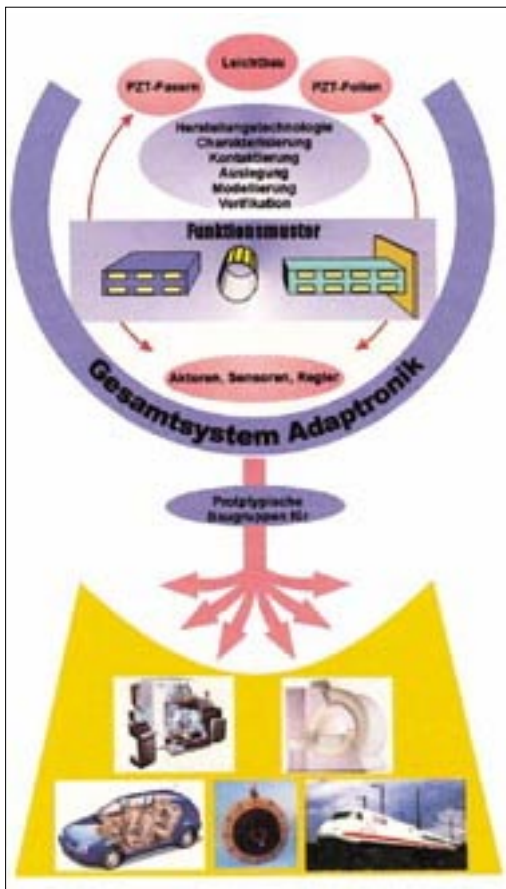


Abb. 16 Technische Inhalte des Leitprojektes Adaptronik und konzeptionelle Umsetzung /2/

Literatur

- /1/ Niederstadt, G.: Ökonomischer und ökologischer Leichtbau mit faserverstärkten Polymeren, Kontakt & Studium, Band 167, Expert-Verlag, 1997
- /2/ Breitbach, E.; Hanselka, H.: BMBF-Antrag zum Leitprojekt ADAPTRONIK, Förderkennzeichen 03 N 8516 1, DLR Braunschweig, 1998
- /3/ Breitbach, E. u. a.: Smart Structures Research in Aerospace Engineering, Second European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow 1994, S. 11 ff.
- /4/ Melcher, J.: Active vibration isolation using multifunctional interfaces and adaptive controllers, Proceeding of Third International Conference on Adaptive Structures, San Diego, 1992
- /5/ Hanselka, H.: Realization of smart structures by using fibre composite materials, VDI-Fortschrittsbericht, Reihe 11, Nr. 244, Magdeburg 1997
- /6/ Melcher, J.: MX-Filters: A New Tool for Performance Tests of Adaptive Structural Systems. Proceeding of the International Conference on Intelligent Materials, 1994, Williamsburg (USA)
- /7/ Weber, Chr.-T.: Ein Konzept zur optimalen Positionierung von Aktuatoren, 1. Workshop ADAMES 1996, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Preprint 1, 1997
- /8/ Gabbert, U.: Innovationskolleg ADAMES, DFG-Förderkennzeichen INK 25/A1-1, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1995-1998
- /9/ Sporn, D.: Integration von piezoelektrischen keramischen Fasern in Verbundwerkstoffe für adaptronische Systeme, Proceeding, Adaptronic-Congress, 1997, Potsdam

wider, da die einzelnen Stufen entlang der Wertschöpfungskette eng miteinander verbunden sind und es zwingend notwendige Abhängigkeiten untereinander gibt.

Mit dem Ziel der

- Lärm- und Schwingungsreduktion,
- Konturverformung und Stabilisierung,
- Feinstpositionierung und
- Ultraschalltechnik

finden die prototypischen Baugruppen Anwendung in den folgenden Industriebranchen mit ihren fachspezifischen Zielsetzungen:

- In der **Verkehrstechnik** sollen mit Hilfe multifunktionaler, adaptiver Elemente Schwingungen vom Dachblech im Pkw-Bau bzw. von Hautfeldern im Schienenfahrzeugbau reduziert werden, um den Lärmpegel im Innenraum aktiv zu beeinflussen.
- Beim **Maschinen- und Anlagenbau** geht es um die aktive Beeinflussung von Maschinenschwingungen mit dem Ziel höherer Genauigkeiten bei reduzierten Ausschwingzeiten sowie um neuartige Ultraschallwandler.
- Ziel in der **optischen Industrie** ist die Korrektur von Spiegeln sowie die deformationsfreie Haltung von Linsen, beides für den Einsatz in Objektiven zur Halbleiterlithographie.
- In der **Medizintechnik** geht es um die akustische Entlastung der Patienten in Magnet-Resonanz-Tomographen (MRT).

- Im Bereich der **Luft- und Raumfahrt** soll die Präzision von Antennen- und Satellitenstrukturen gesteigert werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Adaptronik ist eine neue und innovative Technik für den Maschinenbau. Die attraktivsten Anwendungen scheinen u. a.

- aktive Lärm- und Schwingungsunterdrückung,
- aktive Kontur- und Positionskontrolle und
- Schadenserkenkung zu sein.

Hier hat die Adaptronik aufgrund der physikalisch-technischen Sachverhalte nicht nur Chancen, sondern auch ein hervorragendes Anwendungspotential.

Während in einigen adaptronischen Anwendungsbeispielen noch Vereinfachungen und Kostenersparnisse (einschließlich Fertigung) erforderlich sind, wurden spezielle adaptronische Systeme bis zur Prototypenreife entwickelt. Diese Basis haben Großforschungseinrichtungen, Hochschulen und Zulieferindustrien geschaffen. Es liegt nun an der Industrie, Entwicklungen für die Serie direkt voranzutreiben. Hierzu steht die Otto-von-Guericke-Universität gerne als Forschungspartner zur Verfügung.



Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka,

geb. am 04. 11. 1961, studierte Allgemeinen Maschinenbau an der Technischen Universität Clausthal und begann 1988 seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strukturmechanik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Braunschweig auf dem Gebiet der Faserverbundtechnologie. 1992 promovierte er erfolgreich. Von 1993 bis 1996 war Holger Hanselka stellvertretender Leiter des Demonstrationszentrums für Faserverbundwerkstoffe im DLR und beschäftigte sich mit dem Technologietransfer von der Großforschung in die Industrie. Als wissenschaftliches Thema betreute er zu dieser Zeit die „Konstruktionswerkstoffe auf der Basis Nachwachsender Rohstoffe“. Holger Hanselka wurde im Institut für Strukturmechanik 1996 zum Abteilungsleiter Adaptive Struktursysteme bestellt und beschäftigte sich vornehmlich mit den nationalen Leitkonzepten Adaptiver Flügel, Adaptive Rotorsysteme und fortschrittliche Flugzeugstrukturen, für letztgenanntes als Projektleiter. Ende 1997 folgte er einem Ruf auf den neuen Lehrstuhl für Adaptronik der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg und richtete seinen Lehrstuhl auf die Forschungsthemen adaptive Strukturen, Vibroakustik und multifunktionale Werkstoffe aus. Professor Hanselka ist stellvertretender Leiter des von der DFG geförderten Innovationskollegs „Adaptive mechanische Systeme“ und wissenschaftlicher Projektleiter des BMBF-Leitprojektes ADAPTRONIK.