

IB 131-2007/16

BMBF Ideenwettbewerb Bionik – Innovationen aus der Natur

Abschlussbericht

Bionisches Schwingungserregersystem



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

**Institut für Faserverbundleichtbau
und Adaptronik**

Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

Dr. J. Melcher, E. Mund, D. Fingerhut

**Institut für Werk-
stoff-Forschung**

Linder Höhe
51147 Köln

Dr. W. Braue



TU Clausthal

Institut für Nichtmetallische Werkstoffe

Zehntnerstrasse 2a
38678 Clausthal-Zellerfeld

Prof. Dr. J. G. Heinrich, Dr. J. Günster



Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg

**Biozentrum, Lehrstuhl für Verhaltensphysiologie und
Soziobiologie**

Am Hubland
97074 Würzburg

Prof. Dr. J. Tautz

Juli, 2007

DEUTSCHES ZENTRUM
FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.
IN DER HELMHOLTZGEMEINSCHAFT
INSTITUT FÜR FASERVERBUNDLEICHTBAU UND ADAPTRONIK

IB 131-2007/16

BMBF Ideenwettbewerb Bionik – Innovationen aus der Natur

Abschlussbericht

Bionisches Schwingungserregersystem

Braunschweig, den 31. Juli 2007

der Bericht umfasst: 36 Seiten


Institutsleiter:


Verfasser:

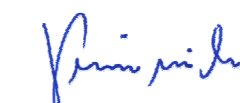
Prof. Dr. habil. E. Breitbach



Dr. J. Melcher



E. Mund


D. Fingerhut


Dr. W. Braue


Prof. Dr. J. G. Heinrich


Dr. habil. J. Günster


Prof. Dr. habil. J. Tautz



BMBF Ideenwettbewerb Bionik Innovationen aus der Natur

Forschungsvorhaben: 0313773

Abschlussbericht

Bionisches Schwingungserregersystem

**Dr. J. Melcher, E. Mund, D. Fingerhut, Dr. W. Braue,
Prof. Dr. J. G. Heinrich, Dr. habil. J. Günster, Prof. Dr. habil. J. Tautz**

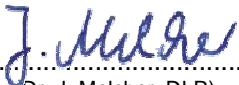



IB 131-2007/16

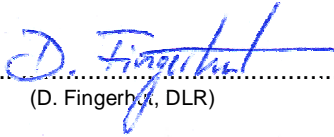
Ausgabe 01

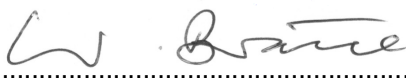


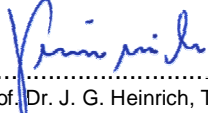
Projekt:	BMBF Ideenwettbewerb Bionik – Innovationen aus der Natur Bionisches Schwingungserregersystem
Dokument:	Abschlussbericht
Dokumentnummer:	IB 131-2007/16
Ausgabe:	01, 31. Juli 2007
Auftraggeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), vertreten durch den Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Außenstelle Berlin, Zimmerstr. 26-27, D-10969 Berlin
BMBF Forschungs- vorhaben.:	0313773
PTJ (Projektträger):	Dr. A. Hache, Dr. C. Junge

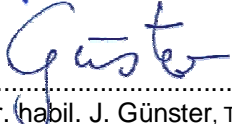
verfasst:  Datum: 26. Juli 2007
(Dr. J. Melcher, DLR)

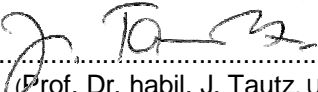
verfasst:  Datum: 26. Juli 2007
(E. Mund, DLR)

verfasst:  Datum: 26. Juli 2007
(D. Fingerhut, DLR)

verfasst:  Datum: 26. Juli 2007
(Dr. W. Braue, DLR)

verfasst:  Datum: 26. Juli 2007
(Prof. Dr. J. G. Heinrich, TU Clausthal)

verfasst:  Datum: 26. Juli 2007
(Dr. habil. J. Günster, TU Clausthal)

verfasst:  Datum: 26. Juli 2007
(Prof. Dr. habil. J. Tautz, Univ. Würzburg)

freigegeben: Datum: 31. Juli 2007
(Institutsleitung) (Prof. Breitbach, DLR)

	BMBF Ideenwettbewerb Bionik- Innovationen aus der Natur	IB 131-2007/16	Ausgabe 01
	Bionisches Schwingungserregersystem	31. Juli 2007	Seite 3

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Ablauf, Kooperation	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen	4
1.3	Planung und Ablauf des Projekts	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Status zu Beginn des Projekts	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2	Darstellung der Vorhabensergebnisse	10
2.1	Einleitung und Motivation	10
2.2	Bionische Lösungsansätze	11
2.3	Eingehende Untersuchungen an biologischen Waben	17
2.4	Technische Umsetzung	17
2.5	Verwertungspotenzial und Nutzen	26
2.6	Literatur	30
	Anhang A: Erfolgskontrollbericht	33
	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen	33
	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis	33
	Fortschreibung des Verwertungsplans	34
	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	34
	Präsentationsmöglichkeiten	34
	Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung	34
	Anhang B: Berichtsblatt und Document Control Sheet	35

1 Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Ablauf, Kooperation

1.1 Aufgabenstellung

Aufgabe und Ziel ist die Entwicklung eines bionischen Schwingungserregersystems auf der Basis eines in der Natur auftretenden Prinzips, das in der Adaptronik nutzbaren Aktuatoren ermöglicht, Kräfte rückwirkungsarm und effizient in eine Struktur einzuleiten. Derartige multifunktionale Schwingungserregersysteme bestehen aus piezokeramischem Material und besitzen die Geometrie von Honigwaben, die das biologische Vorbild dieses Vorhabens sind. Dadurch wird eine neue Generation piezoelektrischer Aktuatorssysteme realisiert, die durch ihre extreme Leichtbauweise, große Auslenkungen, ausreichend große mechanische Kräfte und geringen Energieverbrauch gekennzeichnet ist.

Aufgrund dieser verbesserten Eigenschaften ergibt sich ein hohes Anwendungspotenzial in unterschiedlichen Bereichen: in der Kommunikationstechnik (Handy-Vibrationsalarm), Medizintechnik (MR-Systeme), Robotik und Raumfahrt (autonome Schwingungsunterdrückung), Optische Industrie (Halbleiter-Lithographieobjektive), Maschinen- und Anlagenbau (adaptiver Leichtbau) und in der Verkehrstechnik (Schwingungs- und Lärmunterdrückung in Fahrzeugen).

Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des durch das BMBF initiierten Bionik Ideenwettbewerbs „Innovationen aus der Natur“ erarbeitet.

1.2 Voraussetzungen

Das Projekt wurde am DLR in Anlehnung an die globale Zielsetzung der Entwicklung neuer adaptronischer Aktuatorkomponenten im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik durchgeführt (Bild 1). Die durchgeführten Arbeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Nichtmetallische Werkstoffe der TU Clausthal, dem Kölner DLR-Institut für Werkstoffforschung und dem Biozentrum der Universität Würzburg. Jenseits der unmittelbaren Zielsetzung einer reinen Technologiedemonstration wird parallel die Planung für serienreife Aktuatorentwicklungen vorangetrieben. Bereits aus heutiger Sicht ist absehbar, dass damit eine Reihe notwendiger Innovationen, insbesondere im Bereich

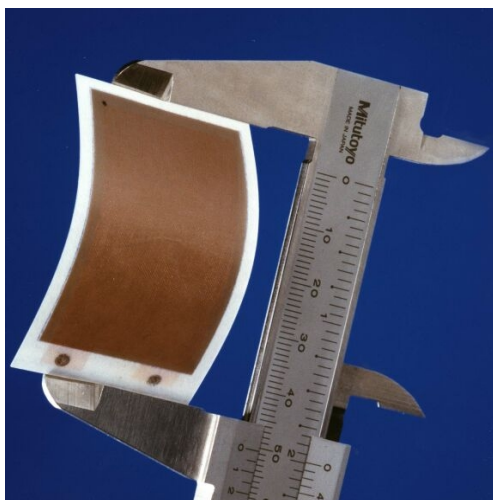


Bild 1: Moderner Piezoaktuator (DLR, Invent GmbH)

des adaptiven Leichtbaus und der Akustik, verknüpft sein wird. Daher werden parallel zu der unmittelbaren Zielsetzung grundlagenorientierte Forschungsaspekte im Bezug auf die Fertigung piezokeramischer Bauweisen mit komplexen Geometrien untersucht, die für einen mittelfristigen Einsatz der neuen Aktuator-technologie wichtige Forschungsansätze liefern könnte.

1.3 Planung und Ablauf des Projekts

Der Ablauf der Arbeiten erfolgte auf Grundlage einer Projektplanung (Bild 2), die die Zeit- und Kostenpläne der Zuwendung berücksichtigte. Der Gesamtumfang der Studie betrug ca. 50.000 € für die Dauer von 9 Monaten in dem Zeitraum vom 1. Juli 2006 bis 31. März 2007.

Da die Arbeiten in diesem Projekt vertiefte Kenntnisse auf den Gebieten der Biologie, Physik und Ingenieurwissenschaft verlangen, ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit unabdingbar. Sie sieht folgende Arbeitsumfänge bei den Projektpartnern vor:

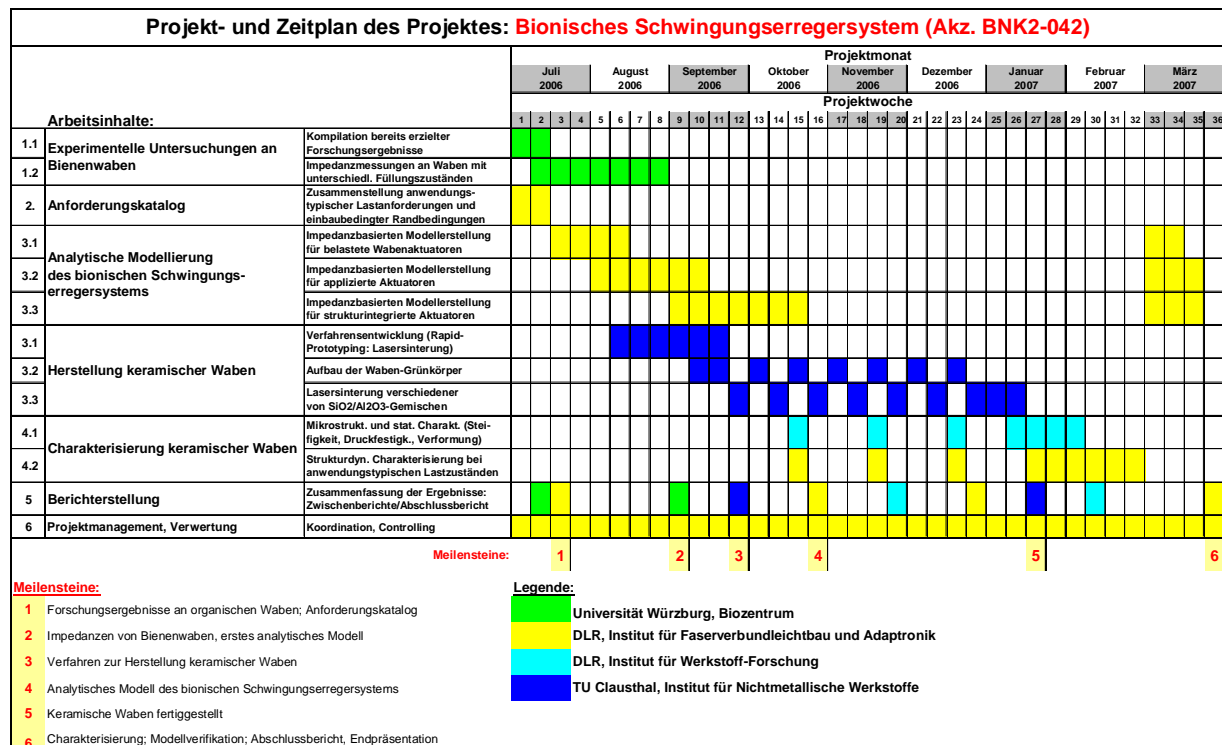


Bild 2: Projekt- und Zeitplan der durchgeführten Studie

Forschungseinrichtung: Forschungs- und Entwicklungsarbeit:

- Biozentrum Würzburg: Kompilation bereits erzielter Forschungsergebnisse;
Impedanzmessungen an Bienenwaben
- DLR-FA: Zusammenstellung anwendungstyp. Lastanforderungen
und einbaubedingter Randbed.; Analyt. Modellierung
von strukturintegrierten piezokeramischen Wabenaktua-
toren; Strukturdynamische Charakterisierung der kera-
mischen Waben bei anwendungstyp. Lastzuständen.
- DLR-WF: Mikrostrukturelle und mechanische Charakterisierung
keramischer Waben (Steifigkeit, Druckfestigkeit, quasi-
statisches Verformungsverhalten).
- TU CI – INW: Herstellung keramischer Waben mit verschiedenen
Abmessungen und Werkstoffen ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$).

Diese Planung sieht vor, dass zunächst die für dieses Forschungsvorhaben wichtigen Messdaten und Erkenntnisse zum Schwingungsverhalten von Bienenwaben, die in Vorarbeiten bereits erzielt worden sind, für die Übertragung auf technische Waben aufbereitet und zusammengestellt werden. Für unterschiedliche Füllungszustände und bei veränderten Randbedingungen (z.B. hinsichtlich der Lagerung) sollten an Bienenwaben impedanzspektroskopische Messungen für den späteren Vergleich mit keramischen Waben vorgenommen werden. Zeitgleich war die Erstellung eines analytischen Aktuatoremodells vorgesehen. Die erforderliche Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Aktuator und Struktur sollte in der Modellierung mit Hilfe eines Impedanzformalismus erfolgen, der sowohl die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe als auch beteiligte Koppelterme in einem einzigen elektrischen Netzwerk berücksichtigt. Diese Methode wurde im Vorfeld im Rahmen adaptronischer Industrieprojekte erarbeitet und bereits erfolgreich an Piezostacks und konventionellen piezokeramischen Folien erprobt. Die Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für keramische Waben war frühzeitig geplant, um ausreichend Entwicklungszeit für die Probenherstellung mit verschiedenen $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gemischen verfügbar zu haben. Die geplante Herstellung der keramischen Funktionsmuster bezog sich im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie auf passive Waben. Somit sollten zunächst umfangreiche Entwicklungsarbeiten hinsichtlich der Polarisierung, der Isolierung, Kontaktierung und Ansteuerung entfallen und die Untersuchung der Machbarkeit des vorgeschlagenen bionischen Ansatzes sollte dadurch nach wie vor gewährleistet bleiben. Aufgrund der Komplexität der Bauteile war die Generierung der Wabenstrukturen in einem Rapid-Prototyping-Verfahren durch direktes Lasersintern von $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vorgesehen. Die anschließende mikro- und makroskopi-

	BMBF Ideenwettbewerb Bionik- Innovationen aus der Natur	IB 131-2007/16	Ausgabe 01
	Bionisches Schwingungserregersystem	31. Juli 2007	Seite 7

sche Charakterisierung umfasst die experimentelle Bestimmung der Steifigkeit, der Druckfestigkeit und des quasi-statischen und dynamischen Verformungsverhaltens für anwendungstypische Last- und Randbedingungen. Die Erstellung von einem Zwischen- und diesem Abschlussbericht ist ebenfalls im Projektplan aufgeführt.

Der Fortgang des Projekts wurde während der Laufzeit durch Soll/Ist-Abgleiche permanent kontrolliert, und zwar in Bezug auf die Projektziele, den Terminplan und den Ressourcenverbrauch. Gemäß der Vorgaben des Projektträgers wurde während der Projektlaufzeit in Form von Zwischenberichten dem Auftraggeber über den Ablauf der Arbeiten berichtet. Zwischen Abarbeitung und Planung sind keine gravierenden Differenzen aufgetreten.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Status zu Beginn des Projekts

Das DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik beschäftigt sich seit 1992 mit der Entwicklung adaptronischer Strukturen, insbesondere im Hinblick auf den Hochleistungsleichtbau. Dazu wird die systemoptimale Integration von Sensoren und Aktuatoren auf der Basis von Multifunktionswerkstoffen wie z.B. Piezokeramiken, Formgedächtnislegierungen oder magnetostriktive Materialien in die lasttragende Struktur mit optimierter Regelungstechnik und Leistungsversorgung kombiniert, um quer durch alle Branchen neue Lösungsansätze zur aktiven

- Lärmunterdrückung (z.B. in Magnetresonanztomografen)
- Schwingungsreduktion (z.B. bei optischen Systemen)
- Konturanpassung (z.B. bei Satellitenleichtbauspiegeln)

bei variierenden operationellen Bedingungen zu realisieren.

Im Rahmen der in diesem Bericht dargestellten Projektergebnisse wurde auf folgende DLR-Patente zurückgegriffen:

- Melcher, J., Junge, M., Selle, D., 2004: „*Als Sensor und/oder Aktuator einsetzbares Bauteil*“, Deutsches Patent 102 38 932, 9.6.2004.
- Melcher, J., Krämer, M., Heinrich, J., Günster, J., Tautz, J., 2005: „*Verfahren zum Ausbilden einer Struktur mit optimierter Bauform*“, Deutsches Patent DE 10 2005 025367.9, 31.5.2005.

Die Entwicklung adaptiver Strukturen auf Basis piezokeramischer Folien spielt eine zentrale Rolle des im DLR durchgeführten Leitprojekts Adaptronik, einem Zusammenschluss des DLR-Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik mit 9 Großforschungs- und Hochschuleinrichtungen und 15 Industrieunternehmen. Es wurden einfache Funktionsmuster aus multifunktionalen Verbundstrukturen mit aktuatorischen Eigenschaften entwickelt, charakterisiert und zugehörige Fertigungstechnologien bereitgestellt.

Mittlerweile wurden Konzepte für piezoelektrische Aktuatoren von amerikanischen



und von europäischen Einrichtungen und Firmen, wie z.B. dem MIT, der NASA, Active Control Experts (ACX), Mide und Invent GmbH unter den Bezeichnungen Quick-Pack, FlexPatch, Poweract oder DuraAct kommerziell vor allem in der Sportgeräteindustrie umgesetzt. Eine deutlich verbesserte Fertigungsqualität und Reproduzierbarkeit der aktuatorischen Eigenschaften lässt sich mit gesägten piezokeramischen Folien erzielen, deren Streifen typischerweise 200 μm breit sind. Für monodirektionale Anwendungen wurden von der Firma Smart Material GmbH Aktuatoren mit Interdigitalelektroden entwickelt, deren Applizierung optimalerweise mit einem Abstand von 1 mm erfolgt. Nachteilig bei diesem Konzept sind jedoch die hohen Ansteuerspannungen von 1000 V, um die erforderliche elektrische Feldstärke von 1 kV/mm zu erzeugen. Ein vergleichbarer Folienaktuator benötigt unter Ausnutzung des Quereffekts etwa 200 V für die gleiche Feldstärke und erreicht somit trotz des geringeren d_{31} -Effekts die Hälfte der aktiven Dehnung des d_{33} -Wandlers. Motiviert durch Forderungen aus dem Anwendungsbereich wurden beim DLR neue modulare Fertigungskonzepte zur Einbettung piezokeramischer Folien in Polymere entwickelt. So konnte der Anwendungsbereich auf die Optik, die Halbleiterlithographie zur Chipherstellung und auf die Medizintechnik erweitert werden. Hinsichtlich der Bruchfestigkeit lässt sich eine deutliche Verbesserung durch eine Kombination mit duktilen Polymerwerkstoffen (z.B. durch Eingießen oder Verkleben mit sogenannten Piezokompositen) erzielen. Allerdings wird die Elastizität durch eine deutlich geringere Aktuatordehnung erkauft.

So besteht nach wie vor die Notwendigkeit einer Wegvergrößerung, deren Konzepte bislang vorwiegend in Japan und in den USA in Form von multimorphen, speziell gekrümmten oder teleskopischen Bauweisen entwickelt worden sind. Piezokeramische Aktuatorssysteme weisen jedoch auch dann eine signifikante Amplitudenvergrößerung und einen wesentlich geringeren Energiebedarf auf, sobald ihre Eigenfrequenzen mit denen der Strukturen, in die sie integriert sind, übereinstimmen und somit ein hoher Grad der Strukturkonformität vorliegt. Bislang kommen solche frequenzabhängigen und daher nahezu monofrequent betriebenen Aktuatorssysteme nur bei sehr speziellen, hochfrequenten Anwendungen, wie z.B. bei Ultraschallwandlern, Spritzdüsen oder Mikropositionierern, erfolgreich zum Einsatz.

Der breitbandige Betrieb der entwickelten Piezomodule erfordert eine spezielle Ansteuerung, die den komplexen Frequenzgang (Amplituden- und Phasenverlauf) berücksichtigt. Derartige Ansteuerungs- bzw. Regelungsalgorithmen sind beim DLR für den breitbandigen Echtzeitbetrieb auf der Basis digitaler Echtzeitfilter entwickelt worden.

Zur Herstellung spezieller keramischer Bauweisen werden seit mehreren Jahren Fertigungsverfahren entwickelt, z.B. vom Institut für Nichtmetallische Werkstoffe (INW)



der TU Clausthal. Eine dieser speziellen Bauweisen ist die Beschichtung von SiC-Fasern mit piezokeramischen Materialien. SiC-Fasern mit Blei-Zirkonat-Titanat-Schichten vereinen piezoelektrische Eigenschaften bei gleichzeitiger hoher mechanischer Belastbarkeit. In vorherigen Projekten wurden keramische Materialien mittels Laser generiert. Neben der lagenweisen Schlickerdeposition, LSD, dem 3D-Oberflächensintern, 3D-LSS und der 3D-Polymerisation präkeramischer Polymere als Rapid-Prototyping-Verfahren wurden Verfahren zur Laserablation, zur Verbindungstechnik und zur Innenverglasung hochreiner SiO₂-Tiegel für die Siliciumkristallherstellung entwickelt.

In der Biologie, speziell im Biozentrum der Universität Würzburg, haben experimentelle Untersuchungen zur Kommunikation von Honigbienen mittels Vibrationen und strukturdynamische Charakterisierungen von Honigwaben bestätigt, dass signalgebende Honigbienen die Waben als Kommunikationsmedium nutzen. Das Phänomen, dass es durch die Änderung externer Lasten offensichtlich nur zu einer marginalen Beeinflussung der Eigenfrequenzen kommt, war in einer interdisziplinären Zusammenarbeit bislang noch nicht systematisch analysiert.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Vorfeld des Projekts wurden kompetente Kooperationspartner für die Durchführung der Arbeiten identifiziert. Bei der Auswahl wurde bewusst der interdisziplinäre Ansatz der bionischen Forschung verfolgt. Er schließt branchenübergreifend Partner aus Biologie, technischer Forschung und industrieller Entwicklung ein. Neben dem **DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik**, Braunschweig, arbeiteten die nachfolgend aufgeführte Einrichtungen an diesem Projekt:

- **DLR-Institut für Werkstoff-Forschung**, Linder Höhe, 51147 Köln, Ansprechpartner: Dr. W. Braue
- **TU Clausthal, Institut für Nichtmetallische Werkstoffe**, Zehntnerstrasse 2a 38678 Clausthal-Zellerfeld, Ansprechpartner: Prof. Dr. J. G. Heinrich, Dr. J. Günster
- **Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Biozentrum**, Lehrstuhl für Verhaltensphysiologie und Soziobiologie, Am Hubland, 97074 Würzburg, Ansprechpartner: Prof. Dr. J. Tautz

2 Darstellung der Vorhabensergebnisse

2.1 Einleitung und Motivation

An technischen Konstruktionen treten häufig unerwünschte Vibrationen und eine dadurch bedingte Abstrahlung von Lärm auf. Die Vibrationen entstehen durch äußere Krafteinwirkungen und besitzen im Resonanzfall besonders große Amplituden. Dieser unerwünschte Effekt lässt sich durch eine Erhöhung der Steifigkeit und Dämpfung der Struktur vermeiden, was aber meist mit einer deutlichen Massezunahme einhergeht und daher kontraproduktiv bei der Entwicklung von Hochleistungsstrukturen im Sinne des Leichtbaus ist. Die Technologie der adaptiven Systeme, die Adaptionik, eröffnet durch die Einbindung von multifunktionalen Aktuatoren und Sensoren und deren Ansteuerung über adaptive Regler eine grundsätzlich neue Vorgehensweise: Die zumeist aus piezoelektrischen Werkstoffen bestehenden multifunktionalen Aktuatoren, die in der Struktur vollständig integriert sind und lasttragende Funktionen übernehmen, erlauben eine aktive Unterdrückung der auftretenden Vibrationen. Die Erfolgsaussichten für den technischen Einsatz dieser so genannten smarten Aktuatoren hängen jedoch weitestgehend davon ab, ob es gelingt, Aktuatorssysteme mit großen Auslenkungen bei gleichzeitig ausreichend großen mechanischen Kräften und geringem Energieverbrauch aufzubauen. Dies lässt sich nur dann erreichen (wie z.B. in Bild 3 bei der aktiven Schwingungs- und Lärmreduktion an Dachblechen von Fahrzeugen mit Hilfe applizierter piezoelektrischer Folien), wenn die Leistungsübertragung P_{mech} vom Aktuator zur passiven Strukturkomponente sehr gut bzw. optimal ist und somit die erforderliche Anpassung der jeweiligen mechanischen Aus- und Eingangsimpedanzen Z_A und Z_{Stru} gewährleistet ist. Problematisch dabei sind jedoch die mechanischen Rückwirkungen der Struktur auf den Aktuator, die sowohl dessen mechanische als auch dessen elektrische Impedanz derart verändern, dass sich die

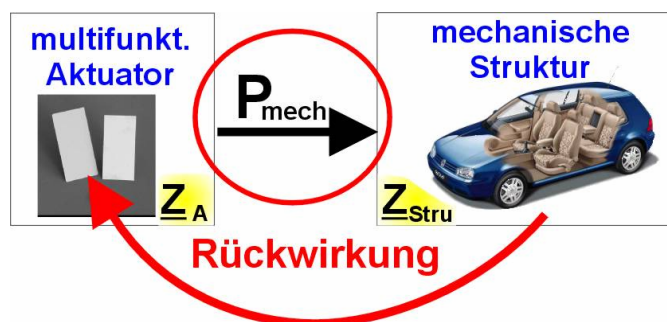


Bild 3: Problem multifunktionaler Aktuatoren: Durch die Rückwirkung der Struktur auf die elektrischen und mechanischen Aktuatoreigenschaften verschlechtert sich die Qualität der Leistungsübertragung während des Betriebs deutlich.

Qualität der Leistungsübertragung während des Betriebs deutlich verschlechtert. Die Realisierung einer im Betrieb anhaltend optimalen Impedanzanpassung setzt die Entwicklung einer Aktuatorbauweise voraus, bei der die Wandlereigenschaften nahezu unabhängig von den mechanischen Belastungszuständen sind.

Industriepolitisch ist dieses Forschungsvorhaben durch die Ergeb-

nisse ökonomischer Analysen hinsichtlich des Weltmarktpotenzials motiviert, die allein im Bereich Adaptronik ein Volumen **von 60 Milliarden Euro/Dekade** schätzen [Quelle: HY-TECH International: Smart Materials and Structures Technologies, The Impending Revolution, Technomic Publishing; Industrieanzeiger] und inländische Produktentwicklungen, die das Exportgeschäft mit dem erzielbaren Innovationsvorsprung dynamisch ausweiten können. Das Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten umfasst die Kommunikationstechnik (Handy-Vibrationsalarm), Medizintechnik (MR-Systeme), Robotik (Schwingungsunterdrückung bei schnellen hochpräzisen Bewegungen), Raumfahrt (Schwingungsunterdrückung an orbitalen Strukturen), Optische Industrie (Halbleiter-Lithographieobjektive), Maschinen- und Anlagenbau (adaptiver Leichtbau) und die Verkehrstechnik (Schwingungs- und Lärmunterdrückung in Fahrzeugen).

2.2 Bionische Lösungsansätze

Aufgrund ihres eindrucksvollen regelmäßigen Erscheinungsbildes faszinieren die Waben der Honigbienen den Menschen seit jeher. Mittlerweile dienen sie in der Technik als Vorbild für den robusten, stabilen Leichtbau und für Optimierungsrechnungen. In den Waben speichern die Bienen allerdings nicht nur ihre Nahrung und ziehen ihre Brut auf. Den wächsernen Wabenstrukturen kommt noch eine andere wichtige Funktion zu: als Medium für Kommunikationssignale. Der berühmte Schwänzeltanz (*Bild 4*) ist beispielsweise eines der höchstentwickelten Kommunikationsmittel unter Insekten. Eine erfolgreiche Sammlerin vermittelt ihren Bienenstockgenossinnen Informationen über eine entfernte Futterquelle. Die Zeitspanne für die Schwänzeltrecke liefert die Information über die Entfernung und die Körperrichtung beim Schwänzeln die einzuschlagende Richtung gegenüber der Sonne. Nach neueren Analysen läuft die Tänzerin jedoch während des Schwänzeln nicht (wie jahrzehntelang irrtümlich angenommen), sondern steht die meiste Zeit. Dabei überträgt sie die Vibrationen ihres mit Muskelkraft betriebenen Flugmotors im Brustabschnitt



Bild 4: Schwänzeltanz einer erfolgreichen Sammlerin als Mitteilung über die Lage einer Futterquelle.

über die einzelnen Füße an die Wabe, die ihrerseits nicht nur in Vertikalrichtung zu Schwingungen angeregt wird: Berührungslose Laser-Doppler-Vibrometrie-Messungen haben auch horizontale Schwingungseigenformen der Waben zwischen 200 Hz und 270 Hz als Signalwirkung für Interessentinnen identifiziert. Ein Impedanzminimum (gleichbedeutend eine hohe Nachgiebigkeit) der Honigwaben im Frequenzbereich der Kommunikationssignale ist physikalisch erforderlich, da die Bienen wäh-

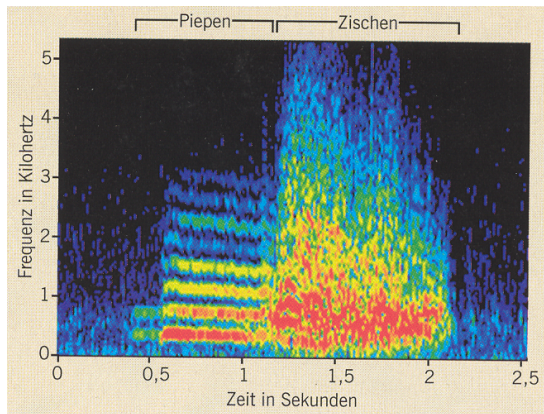


Bild 5: Wabenvibrationen als Warndialoge heimkehrender Zwerghonigbienen.

rend des Schwänzeln lediglich Kräfte von maximal einem tausendstel Newton auf die Ränder der Wabenzellen ausüben können. Folglich sind die wächsernen Waben dynamisch perfekt an das Anregungsspektrum der von den tanzenden Bienen generierten Kräfte ausgelegt worden. Wird das Signalmedium Honigwabe als Übertragungssystem interpretiert, darf seine mechanische Ausgangsimpedanz als perfekt abgestimmt an die Eingangsimpedanz des Informationsempfängers betrachtet werden: Die Schwingungssensoren der Bienen sind nämlich ebenfalls perfekt

an die Tanz- und Wabenfrequenzen angepasst, so dass die Bienen während der Kommunikation ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis erzielen. Ein weiteres Beispiel für die Kommunikation der Bienen über schwingende Waben liefern heimkehrende Zwerghonigbienen, die ihr Volk alarmieren, wenn sie in Nestnähe eine Gefahr bemerken. Das beunruhigte Tier erzeugt „Piep“-Signale, die in Form von Wabenschwingungen an die Kolonie weitergeleitet werden, die mit zischendem Rauschen antwortet (*Bild 5*).

Phänomenal ist die Tatsache, dass sich die Eigenfrequenzen der Waben durch mechanische Belastungen nur unmerklich bis gar nicht verschieben, selbst dann nicht, wenn die einzelnen Zellen mit viskosem Honig gefüllt werden bzw. eine Vielzahl von Bienen sich direkt auf den Wabenzellen befinden und mit ihrem Gewicht die Wabe mechanisch belasten. Erwartungsgemäß würden sich die Eigenfrequenzen des Übertragungssystems „Honigwabe“ unter dem Einfluss dynamisch relevanter Parameter, wie Masse und Vorspannung, soweit verschieben, dass die Bienen nicht mehr in der Lage wären, untereinander über Wabenschwingungen zu kommunizieren. Die offensichtlich fehlende Rückwirkung der mechanischen Belastungen auf das Signalmedium und damit auch auf die Erregerkraftquelle hat folglich eine material- und bauweisenbedingte Ursache.

2.3 Eingehende Untersuchungen an biologischen Waben

Der „gewöhnliche“, d.h. am häufigsten und ganzjährig vorkommende Zell- bzw. Wabentyp der Europäischen Honigbiene *Apis mellifera* sind Arbeiterinnen- bzw. Vorratswaben mit einer Kantenlänge der Zellen von 3 mm und einem Durchmesser (Wand-Wand) von 5.2 mm. Eine einzelne Wabe besteht aus mehreren 1000 hexagonalen Zellen mit ca. 70 µm dünnen Wänden, denen am oberen Zellrand ein ca. 340 µm dickerer Wulst als Rand aufliegt.

Die Zellwülste bieten den Kolonimitgliedern eine Lauffläche und ein Kommunikationsmedium. Sie sind geeignet, die von den Bienen beim Schwänzeltanz erzeugten und auf die Wabe übertragenen Schwingungen weiterzuleiten. In der vorliegenden Arbeit werden die mechanischen Eigenschaften dieser Zellränder im Wabenverband sowie für isolierte, künstlich hergestellte Wachsstäbe aus Wachsen verschiedener Bienenarten und Rassen untersucht.

Die mechanischen Eigenschaften von Wachsstegen wurden an intakten Wabenstücken unterschiedlicher Herkunft und an künstlich hergestellten, nicht im Zellverband befindlichen Wachsstäben untersucht. Die verwendeten Proben sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Trivialname	Wiss. Name	Arbeiterinnen-waben	Drohnen-waben	Wachsstäbe (15 mm x 1.5 mm)
Rassen der Europäischen Honigbiene (<i>Apis mellifera</i>)				
Kärtner/Krainer Biene	<i>A. m. carnica</i>	3	1	13
Kap-Honigbiene	<i>A. m. capensis</i>	3	1	12
Italienische Biene	<i>A. m. ligustica</i>	-	2	9
Dunkle Europäische Biene	<i>A. m. mellifera</i>	2	-	11
Asiatische Bienenarten				
Riesenhonigbiene	<i>A. dorsata</i>	-	-	12
Östliche Honigbiene	<i>A. cerana</i>	-	-	11

Tab. 1: Übersicht über die verwendeten Bienenarten und –rassen, die untersuchten Wachsproben und den jeweiligen Stichprobenumfang. A. = *Apis*; A. m. = *Apis mellifera*. Trivialnamen.

Die untersuchten *Wabenproben* bestanden aus jeweils 10x10 Zellen umfassenden, unversehrten Ausschnitten aus größeren Waben. Zur Herstellung *künstlicher Wachsstäbe* wurden Wabenstücke der verschiedenen Arten und Rassen jeweils separat in ein Glas gegeben und im Wasserbad bei 70°C (asiatische Arten: 90°C) geschmolzen. Teilweise, besonders bei den asiatischen Arten, wurden dabei schwer schmelzende, durchweg dunkler gefärbte Komponenten abgeschieden, bei denen es sich um schwer lösliche Wachsbestandteile oder um sekundär ein- bzw. aufgelagerte Stoffe handeln kann. Das flüssige Wachs wurde in eine spezielle Gießform aus *Reprogom* mit 15 mm x 1.5 mm großen Aussparungen gegeben, aus denen nach dem Erstarren des Wachses die zu untersuchenden Wachsstäbe entnommen wurden. Pro Bienenrasse bzw. –art wurden jeweils 9-13 Wachsstäbe vermessen (Tab. 1).

Die Messungen erfolgten in einem Klimaschrank mit Temperaturregulierung. Der Temperaturbereich von T = 20 °C bis 40 °C (in 5 °C-Schritten) wurde berücksichtigt.

Der einzelne Messvorgang dauerte 16 s (intakte Waben) bzw. 8 s (gegossene Wachsstäbe). Während dieser Messphase war der Klimaschrank kurzzeitig ausgeschaltet um betriebsbedingte Schwingungen zu vermeiden.

Zur Untersuchung von Materialermüdungserscheinungen wurden die Proben bei 25°C jeweils einer 12-minütigen Schwingungsanregung und gleichzeitiger Messung unterzogen. Die Messungen erfolgten dabei im Abstand von 2 Minuten. Über einen Funktionsgenerator Philips Typ PM 5192 wurden Schwingungen mit einer Frequenz von 4 Hz erzeugt und über einen „Minishaker“ von Brüel & Kjaer (Typ 4810) auf die Wabenstege übertragen. Die Kraft- und Beschleunigungsmessungen an den schwingenden Randwülsten bzw. Wachsstäben erfolgte mit einem Impedanzmesskopf von Brüel & Kjaer Typ 8001. Die vom Impedanzmesskopf ausgehenden Signale für die Kraft und die Beschleunigung wurden verstärkt (Kraftmessung: Brüel & Kjaer Mikrofonverstärker Typen 2639 und 5935; Beschleunigungsmessung: Brüel & Kjaer Charge Amplifier Typ 2635), gefiltert (Krohn Hite Filter Model 3750), auf einem Oszilloskop dargestellt (Gould Typ 1604) und an einen Dynamic Signal Analyzer (DSA, Hewlett Packard Typ 35670 A) weitergeleitet. Die Programmierung des DSA berücksichtigte die jeweiligen Verstärkungsfaktoren sowie die Kalibrierungsfaktoren des Impedanzmesskopfs. Die binär gespeicherten Messwerte wurden mit dem Programm *SDFTOMX* in das ASCII-Format umgewandelt, in *Excel* (Microsoft) weiterverarbeitet und in *Origin* (Microcal) ausgewertet. Die Amplituden der Signale für Kraft F und Beschleunigung a wurde aus den Maxima und Minima während der 8 bzw. 16 s dauernden Messung gemittelt.

Die Bestimmung der Federkonstanten D liefert sehr ähnliche Ergebnisse für die drei untersuchten Rassen von *Apis mellifera* (Bild 6 und Bild 7).

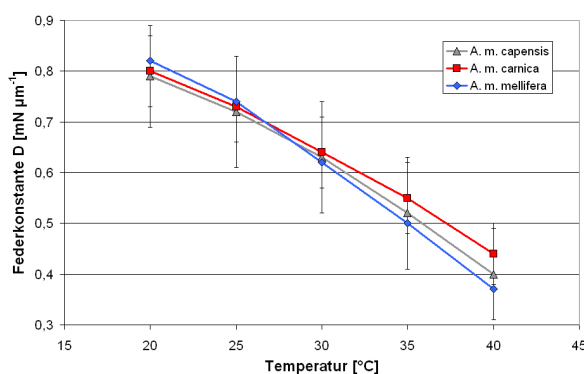


Bild 6: Federkonstanten D von Arbeiterinnenwaben dreier geographischer Rassen der Honigbiene *Apis mellifera* im Temperaturbereich von 20 °C bis 40 °C.

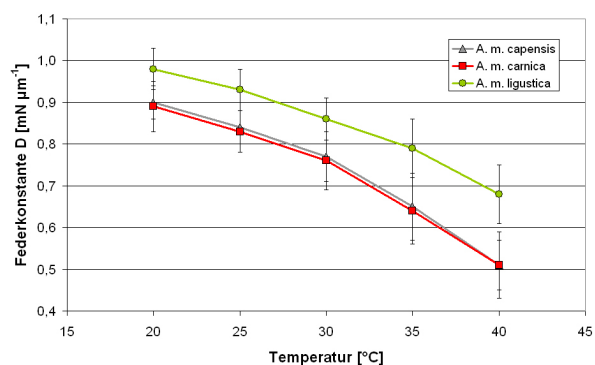


Bild 7: Federkonstanten D von Drohnenwaben dreier geographischer Rassen der Honigbiene, *Apis mellifera*, im Temperaturbereich von 20 °C bis 40 °C.

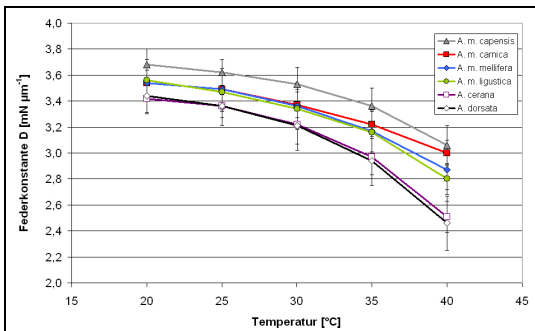


Bild 8: Federkonstanten D der künstlich erzeugten Wachsstäbe, hergestellt aus geschmolzenem Wabenwachs verschiedener geographischer Rassen von *Apis mellifera* sowie zweier asiatischer Honigbienenarten.

Die Federkonstanten der künstlich hergestellten Wachsstäbe (**Bild 8**) liegen im Bereich 3.4 bis 3.7 $\text{mN } \mu\text{m}^{-1}$ ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) und 2.5 bis 3.1 $\text{mN } \mu\text{m}^{-1}$ ($T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$). Im Vergleich mit den Werten für die Arbeiterwaben der Rassen *capensis*, *carnica* und *mellifera* sind diese Werte im Mittel um den Faktor 5.7 ± 1.1 höher.

Die Elastizitätsmoduln E der natürlichen Wabenstege und der künstlich erzeugten Wachsstäbe haben im gesamten Temperaturbereich ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $40 \text{ }^\circ\text{C}$) eine Größenordnung von 10^8 bis 10^9 N m^{-2} (**Bild 9** und **Bild 10**).

Eine gerichtete Veränderung der Federkonstanten D (Materialermüdung) innerhalb der 12-minütigen Daueranregung ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) ist weder bei den natürlichen Wabenstegen (Werte bei *A. m. carnica* von 0.73 bis $0.76 \text{ mN } \mu\text{m}^{-1}$) noch bei den künstlich hergestellten Wachsstäben (3.44 bis $3.47 \text{ mN } \mu\text{m}^{-1}$) feststellbar. Die Werte entsprechen den zuvor für diese Temperatur festgestellten Werten der entsprechenden Proben.

Die mechanischen Eigenschaften der Zellrandwülste (im Zellverband intakter Waben) und künstlich hergestellter Wachsstäbe wurden durch Bestimmung der Federkonstanten D und des Elastizitätsmoduls E charakterisiert.

Für die z. T. erheblichen Unterschiede zwischen den Eigenschaften der natürlichen Wabenstege (insbesondere jene von Arbeiterwaben) und der künstlichen Wachsstäbe sowie für die unterschiedlich starken Temperaturabhängigkeiten dieser Probengruppen kommen mehrere Ursachen in Frage.

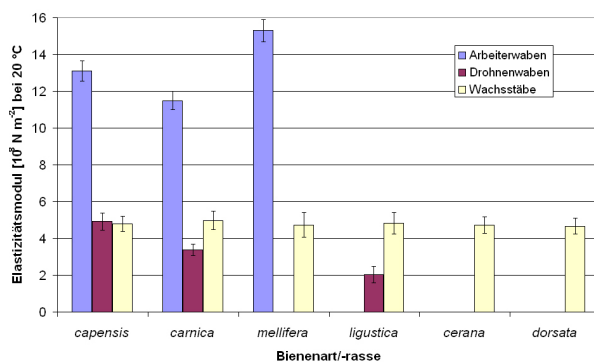


Bild 9: Elastizitätsmoduln E von Wabenstegen und künstlichen Wachsstäben aus Wachsen verschiedener Rassen und Arten von Honigbienen, gemessen bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

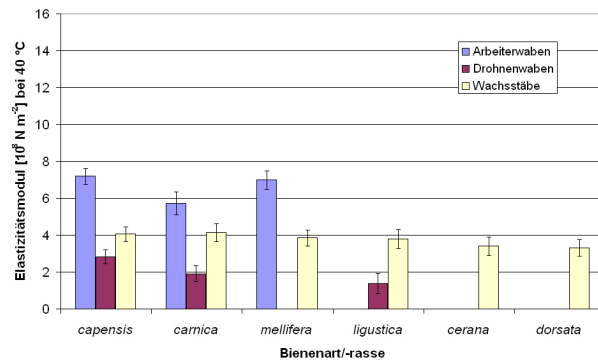


Bild 10: Elastizitätsmoduln E der selben Bienenarten und -rassen wie in Bild 3, jedoch gemessen bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Mit Blick auf die Kommunikation mittels Vibrationen im ansonsten dunklen Bienenstock können die größeren Elastizitätsmoduln der Arbeiterwaben sinnvoll sein, da die Energie von beim Schwänzeltanz in die Wabe eingeleiteten Signalen in geringerem Maße für plastische Verformungsarbeit verloren gehen würde. Durch eine größere Reichweite des Signals könnte dann eine größere Zahl umstehender Bienen, gleichsam potentielle Sammlerinnen, angesprochen werden.

Impedanzspektroskopische Messungen (*Bild 11*) erfolgten mit Hilfe eines Laser Scanning Vibrometers und mit einem Impedanzmesskopf von Brüel & Kjaer Typ 8001, der die Kraft und die Beschleunigung an den schwingenden Randwülsten bzw. Wachsstäben detektierte. Die Messkurven zeigen die typisch hohe Nachgiebigkeit an der Resonanzstelle. Mit sehr geringem Kraftaufwand ist es den Bienen in diesem schmalen Frequenzbereich möglich, die Wabe zu Schwingungen anzuregen. Es zeigt sich weiter, dass dieses ausgeprägte Minimum der mechanischen Punkteingangsimpedanz (entspricht dem Quotienten von Kraft und integrierter Beschleunigung) nahezu unabhängig von der Temperatur ist.

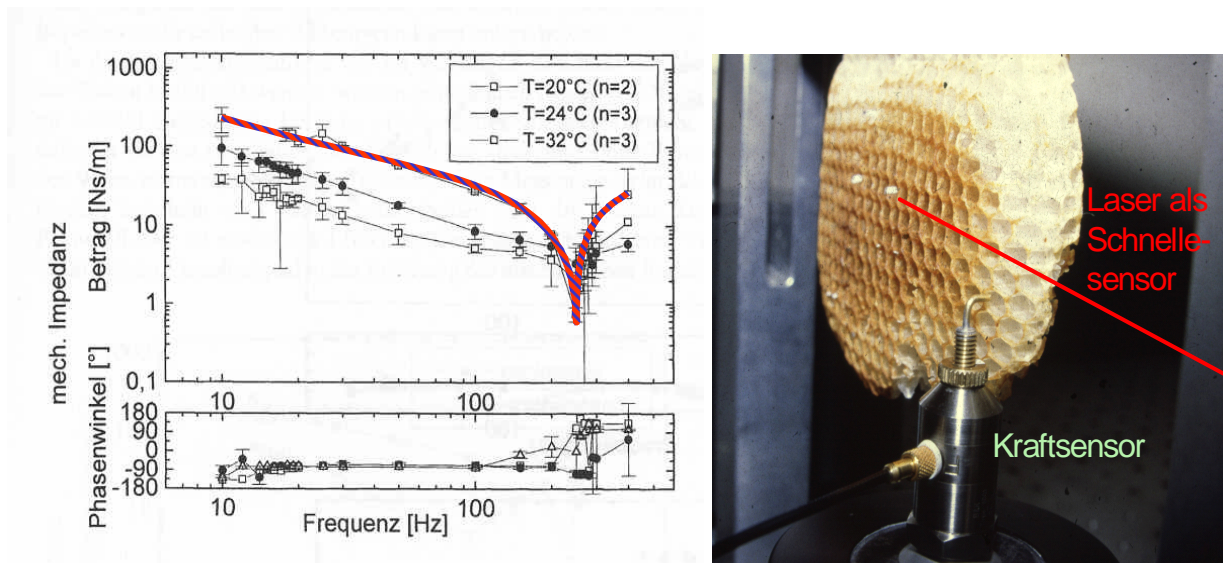


Bild 11: Messung der impedanzspektroskopischen Übertragungsfunktion und Messaufbau.

2.4 Technische Umsetzung

Impedanzspektroskopische Messungen an technischen Waben aus Aramid haben gezeigt, dass sich die Eigenfrequenzen der ersten longitudinalen Wabenschwingungen (im Bild 12 in senkrechter Richtung) selbst dann nur unwesentlich verschieben, wenn die Zellen vollständig mit hochviskosem Material gefüllt werden.

Darauf basiert die Idee, diesen in der Wabenbauweise begründeten Mechanismus für ein innovatives Schwingungserreger- bzw. Aktuatorssystem zu verwenden (Bild 13) und für technische Anwendungen der Adaptronik und der Messtechnik nutzbar zu machen.

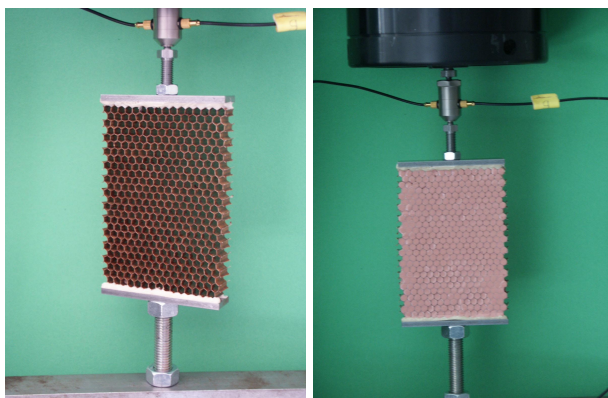


Bild 12: Impedanzspektroskopische Messungen an technischen Waben ohne und mit Zellfüllung.

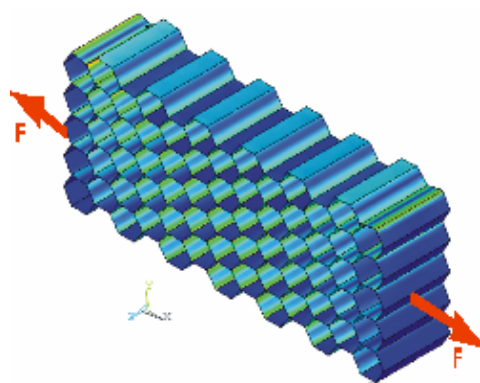


Bild 13: Bionischer piezokeramischer Schwingungserreger, der in den selben Eigenmoden schwingt wie sein biologisches Vorbild.

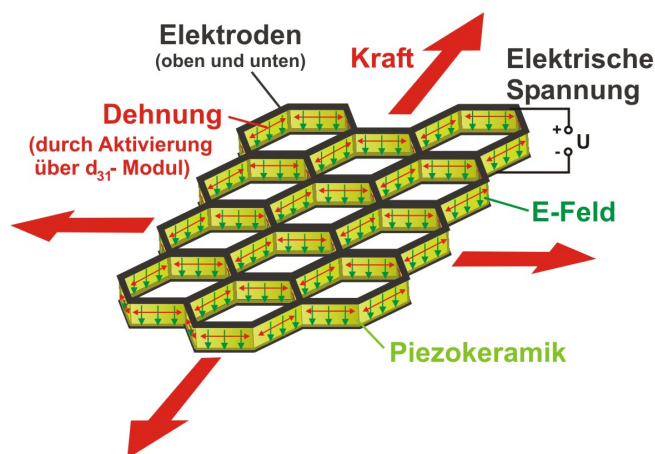


Bild 14: Prinzip des patentierten Wabenaktuator. Der Anschaulichkeit halber sind die geometrischen Abmessungen nicht maßstabsgerecht dargestellt.

Zur Realisation strukturkonformer energiesparsamer Aktuatoren wurde erstmals im DLR eine neue, patentierte Aktuatorbauweise mit Hilfe eines leistungs- bzw. impedanzanpassenden Konzepts entwickelt, die dünnflächige piezokeramische Folien in Wabenform vorschlägt (Bild 14). Das für die Aktivierung des piezokeramischen Materials über den Piezomodul d_{31} erforderliche elektrische Feld wird durch eine elektrische Spannung an den Elektroden generiert, die sich an den Ober- und Un-

terseiten der Stege befinden. Analytische Berechnungen an Honigwaben-Geometrien und FE-Untersuchungen prognostizieren übereinstimmend, dass sich eine effiziente Wegvergrößerung erreichen lässt. Aufgrund der Wabengeometrie wird eine lückenlose Aufteilung der Fläche bei minimalem Materialeinsatz ermöglicht. Die Kräfteinleitung erfolgt stets an den Verbindungsstellen (Kanten) im Inneren der Wabe unter einem Winkel von 120°, was eine optimale Gleichverteilung der Kräfte in der Wabe gewährleistet. Aufgrund der Weg vergrößernden Eigenschaft, die den Waben immanent ist, erlaubt sie große Aktuatorauslenkungen und bedingt natürlicherweise eine entsprechende Reduktion der Steifigkeit. Diesem Projekt vorausgegangene Finite-Element-Untersuchungen an nicht-keramischen Waben belegen, dass sich die Eigenwerte bestimmter Schwingungsmoden gezielt durch die optimale Auslegung der geometrischen Parameter (Zellgröße, Zellwanddicke, Kantenrundung) einstellen lassen.

Entsprechend ihrer Vorbilder in der Natur, sind energetisch optimale technische Aktuatoren durch eine physikalische Eigenschaft charakterisiert, die sich als Leistungsanpassung beschreiben lässt: Die Systemkomponenten sind derart aufeinander abgestimmt, dass ein Maximum an Energie von der einen in die andere Komponente übertragen werden kann. Alle Strukturkomponenten, also auch die aktuatorischen Elemente, sind demnach zueinander konform. Der 1991 in der Adaptronik eingeführte Begriff der "Strukturkonformität" kann mit Hilfe des Impedanzbegriffes konkretisiert werden.

Sind die geometrischen Abmessungen der betrachteten Struktur wesentlich kleiner als die Wellenlängen der auftretenden Schwingungen, ist die mechanische Impedanz bei punktförmiger Anregung als Punktimpedanz \underline{Z} definiert als der Quotient der komplexen Kraft \underline{F} und der komplexen Schnelle (Geschwindigkeit) \underline{v} am Anregungsort:

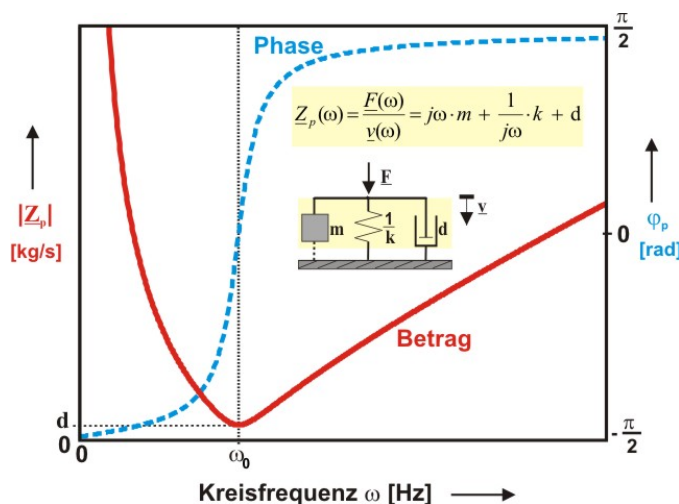


Bild 15: Beispiel einer mechanischen Impedanz.

$$\underline{Z} = \frac{\underline{F}}{\underline{v}} = |\underline{Z}| \cdot e^{j\varphi}$$

$$= \underbrace{Z'}_{\text{Resistanz (Wirkwiderstand)}} + j \cdot \underbrace{Z''}_{\text{Reaktanz (Blindwiderstand)}}$$

Für ein typisches (primäres) Struktursystem mit der Masse m , der Steifigkeit k und der Dämpfung d und nur einem Freiheitsgrad (Bild 15) ist diese Impedanz \underline{Z}_p - einem mechanischen Parallelkreis entsprechend:

$$\underline{Z}_p(\omega) = \frac{\underline{F}(\omega)}{\underline{v}(\omega)} = j\omega \cdot m + \frac{1}{j\omega} \cdot k + d$$

An der Resonanzstelle $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ ist die Impedanz betragsmäßig minimal, die Nachgiebigkeit der Struktur also sehr groß. Als mechanische Übertragungsfunktion, bei der die Kraft am Systemeingang und die Bewegungsgröße (hier die Schnelle) am Ausgang anliegt, lässt sich die Inverse der Impedanz, die Admittanz \underline{Y}_p , verwenden. Dies trifft auch bei größeren Wellenlängen zu. Die Impedanzdarstellung berücksichtigt die folgenden physikalischen Aspekte:

- Statische und dynamische Materialeigenschaften aller Werkstoffe,
- Wirkungen aktiv kontrollierter Sekundärkräfte auf mechanische Kontinua und deren Rückwirkungen,
- systemtheoretische Übertragungscharakteristika adaptiver Systeme,
- Interpretation physikalischer Sachverhalte (Energie, Leistung usw.),
- Körperschallausbreitungen (Abstrahlung, Reflexion, Dämpfung),
- Kopplungseigenschaften (Luftschall, Flüssigkeitsschall).

Die komplexe Leistung \underline{P} für ein System mit der Impedanz \underline{Z} ergibt sich als das Produkt von Kraft und konjugiert komplexer Schnelle:

$$\underline{P}(t) = \underbrace{\underline{P}_W(t)}_{\text{Wirkleistung}} + j \cdot \underbrace{\underline{P}_B(t)}_{\text{Blindleistung}} = \frac{1}{2} \underline{F} \cdot \underline{v}^* = \frac{1}{2} \underline{v} \cdot \underline{v}^* \cdot \underline{Z} = \frac{\underline{F} \cdot \underline{F}^*}{2\underline{Z}}$$

Die durch \underline{Z} (passiv und/oder aktiv) absorbierte Leistung entspricht dem zeitlichen Mittelwert der Wirkleistung

$$\overline{\underline{P}_W(t)} = \frac{1}{4} (\underline{F} \cdot \underline{v}^* + \underline{F}^* \cdot \underline{v}) = \frac{1}{2} \text{Re} \{ \underline{F} \cdot \underline{v}^* \}$$

Die Inverse der Impedanz ist die Admittanz \underline{Y}_p

$$\underline{Y}_p(\omega) = \frac{j\omega}{k - \omega^2 \cdot m + j\omega \cdot d}$$

Für die Übertragungsfunktion eines Multi-Input-Multi-Output (MIMO) Systems mit L Eingangskräften, J Schnelleausgängen und N Moden, erfolgt die modale Formulierung der Admittanz im kontinuierlichen Frequenzbereich durch die $N \times N$ Matrix

$$\underline{Y}_p(s) = \underline{v}(s) \cdot \underline{F}^{-1}(s) = \Phi \cdot \text{diag}[\underline{Y}_i(s)] \cdot \Phi^T$$

mit den Komponenten der i -ten Mode

$$\underline{Y}_i(s) = \frac{s}{M_i s^2 + D_i s + K_i} = \frac{1/M_i \cdot s}{s^2 + 2\omega_{0,i} \beta_i s + \omega_{0,i}^2} = \frac{(r_i s_i)}{s - s_i} + \frac{(r_i s_i)^*}{s - s_i^*}$$

Die Nomenklatur (entsprechend der i -ten Mode) ist:

- Modalmatrix, Elemente der Modalmatrix und Eigenvektoren: Φ, Φ_i
- generalisierte Masse, Dämpfung, Steifigkeit: M_i, D_i, K_i

- Pole und Residuen:

$$s_i = \underbrace{-\frac{D_i}{2M_i}}_{=-\omega_{0,i} \cdot \beta_i} + j \underbrace{\frac{1}{2M_i} \sqrt{4K_i M_i - D_i^2}}_{=\omega_{0,i} \sqrt{1 - \beta_i^2}} \quad \text{und} \quad r_i = j \cdot \left(-\frac{1}{\sqrt{4K_i M_i - D_i^2}} \right) = -j \frac{1}{2M_i \omega_{0,i} \sqrt{1 - \beta_i^2}}$$

Eigenfrequenzen und Lehr'sche Dämpfung:

$$\omega_{0,i} = \sqrt{\frac{K_i}{M_i}} \quad \text{und} \quad \beta_i = \frac{D_i}{2\sqrt{K_i M_i}} = \frac{D_i}{2\omega_{0,i} M_i}.$$

Die modale Beschreibung der Impedanz ist demnach die quadratische Übertragungsmatrix

$$\underline{Z}_p(s) := \underline{F}(s) \cdot \underline{v}^{-1}(s) = Y_p^{-1}(s) = \left(\Phi_i^T \right)^{-1} \text{diag}[Z_i(s)] \cdot \Phi_i^{-1}$$

mit den Komponenten

$$\underline{Z}_i(s) = \frac{M_i s^2 + D_i s + K_i}{s}$$

Abhängig von jeweiligen Zielsetzungen kann ein adaptives System ausgelegt werden, um

- ein Maximum an Leistung von der Struktur zu absorbieren ("matched impedance"),
- locale Vibrationen zu kompensieren ("infinite impedance"),
- Krafteinleitungen zu vermeiden ("zero impedance"),
- lokale Massen- und/oder Steifigkeitseffekte ("reactive impedance") zu bewirken oder sogar zu kompensieren ("negative mass", "negative stiffness").

Ein multifunktionaler Aktuator sei durch die Impedanz $\underline{Z}_s = Z'_s + j \cdot Z''_s$ repräsentiert und sein Ansteuersignal durch $\underline{F}_s = F'_s + j \cdot F''_s$. Die primäre Störkraft, die die unerwünschten Schwingungen verursacht, sei $\underline{F}_p = F'_p + j \cdot F''_p$. Nachfolgend stehen die Indizes p and s für *primär* und *sekundär*. Bei Anwendungen, in denen der Aktuator genutzt wird, um Energie zu dissipieren, werden am Ankoppelpunkt die Kraft und die Schnelle gemessen

$$\underline{F} = \frac{\underline{Z}_s}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_s} \cdot \underline{F}_p + \frac{\underline{Z}_p}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_s} \cdot \underline{F}_s$$

$$\underline{v} = \frac{1}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_s} \cdot \underline{F}_p - \frac{1}{\underline{Z}_p + \underline{Z}_s} \cdot \underline{F}_s$$

Aktive Leistungsabsorption (“Matched Impedance”)

Die Leistungsextraktion durch ein sekundäre System ist mit Hilfe der sogenannten Leistungsparabel (“power parabola”) beschreibbar (Bild 16):

$$P_{\underline{Z}_s}(\underline{F}_s) = \frac{1}{2 \cdot |\underline{Z}_p + \underline{Z}_s|^2} \cdot \left[\underline{Z}_s |\underline{F}_p|^2 - (\underline{Z}_p - \underline{Z}_s) \underline{F}_p \underline{F}_s^* - \underline{Z}_p |\underline{F}_s|^2 \right],$$

die nur dann den optimalen (maximalen) Werte annimmt, wenn die Sekundärkraft optimal ist

$$\underline{F}_{s,opt} = \frac{\underline{Z}_p^* - \underline{Z}_s}{\underline{Z}_p^* + \underline{Z}_p} \cdot \underline{F}_p.$$

Diese Kraft erzeugt am Ankoppelpunkt die messbare Kraft und Schnelle

$$\underline{F}_{opt} = \frac{\underline{Z}_p^*}{2 \cdot \underline{Z}_p'} \cdot \underline{F}_p \quad \text{und} \quad \underline{v}_{opt} = \frac{1}{2 \cdot \underline{Z}_p'} \cdot \underline{F}_p.$$

Der Quotient dieser beiden Terme entspricht der mechanischen Impedanz am Ankoppelpunkt

$$\underline{Z}_{opt} = \frac{\underline{F}_{opt}}{\underline{v}_{opt}} = \underline{Z}_s + \underbrace{\frac{\underline{F}_{s,opt}}{\underline{v}_{opt}}}_{\text{aktiv verstellbare Impedanz}} = \underline{Z}_p^*.$$

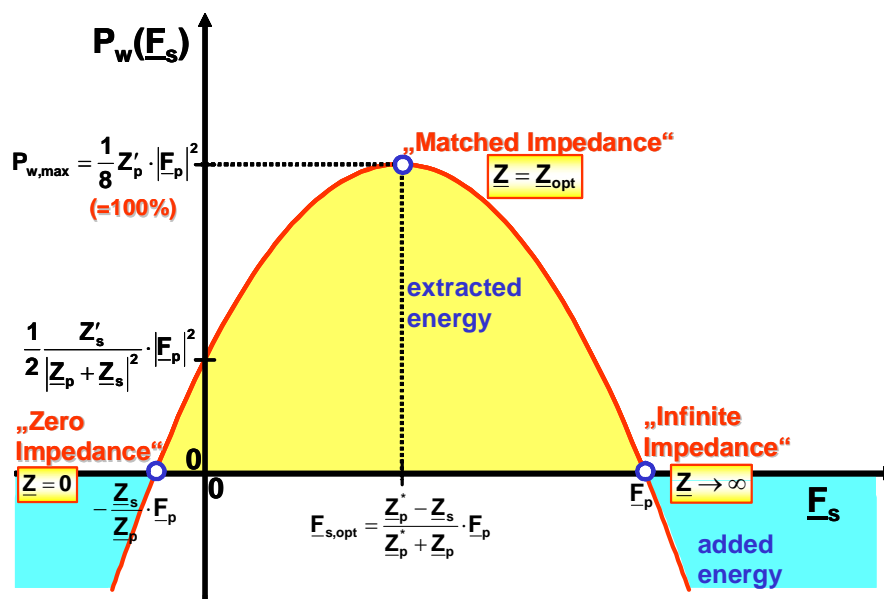


Bild 16: Leistungsparabel.

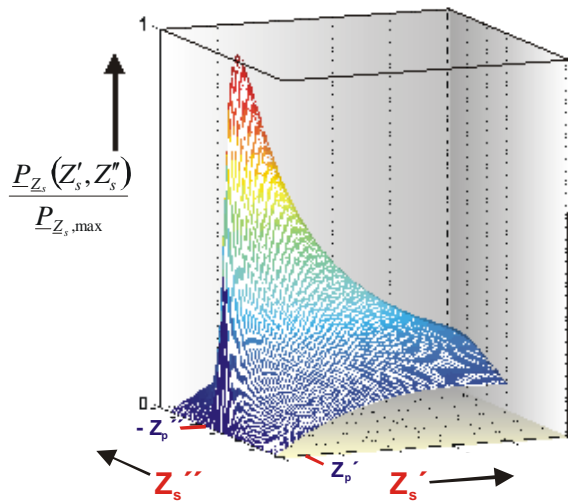


Bild 17: Normierter Leistungszug durch einen dynamischen Absorber \underline{Z}_s in Abhängigkeit von seiner Resistanz und Reaktanz.

Diese Gleichung zeigt deutlich, dass \underline{Z}_s an die konjugiert komplexe Impedanz seiner strukturellen Umgebung angepasst sein sollte. Allgemein ist der normierte Leistungszug gegeben durch

$$\frac{P_{\underline{Z}_s}(Z'_s, Z''_s)}{P_{\underline{Z}_s, \max}} = \frac{4 \cdot Z'_s Z'_p}{\left[(Z'_p + Z'_s)^2 + (Z''_p + Z''_s)^2 \right]} \leq 1$$

mit
$$P_{\underline{Z}_s, \max} = \frac{1}{8} \frac{|F_p|^2}{Z'_p}$$

Falls jedoch $\underline{Z}_s \neq \underline{Z}_p^*$ gelten sollte, müsste der Aktuator extreme Ansteuer-signale erhalten, um die Fehlanpassung $(\underline{Z}_p^* - \underline{Z}_s)$ zu kompensieren.

Aktive Schwingungunterdrückung (“Infinite Impedance”)

Eine aktive Schwingungunterdrückung benötigt die infinite Impedanz $\underline{Z}_{opt} \rightarrow \infty$, die durch die Einstellung bewirkt wird:

$$\underline{F}_{s, opt} = \underline{F}_p \quad (\Rightarrow \underline{F}_{opt} = \underline{F}_p; \quad \underline{v}_{opt} = 0)$$

In diesem Fall weist der Aktuator maximale Amplituden auf. Interessanter Weise zeigt sich hier, dass es keinen Sinn machen würde, die geforderte unendliche hohe Impedanz \underline{Z}_{opt} durch ein infinites \underline{Z}_s zu realisieren, denn eine solche Impedanz würde keine Amplituden eines sekundären Systems erlauben.

Aktive Kraftflusskompensation (“Zero Impedance”)

Eine Zielsetzung Kraftflusskompensation erfordert am Ankoppelpunkt die “zero impedance” $\underline{Z} = 0$ mit der dann optimalen Einstellung

$$\underline{F}_{s, opt} = -\frac{\underline{Z}_s}{\underline{Z}_p} \underline{F}_p \quad (\Rightarrow \underline{F}_{opt} = 0; \quad \underline{v}_{opt} = \frac{1}{\underline{Z}_p} \underline{F}_p)$$

Die größte Herausforderung des Wabenkonzepts ist seine Realisierung, denn man benötigt sehr feine Geometrien mit präzisen Krümmungen.

Die Zielsetzung dieser Untersuchung ist daher auch, eine neue Methoden zu entwickeln, um perfekte Leichtbaugeometrien aus keramischen Werkstoffen fertigen zu können. Als vielversprechenstes Konzept erwies sich ein selbstorganisierendes Verfahren, das keramische Wabenstrukturen mit minimalflächigen Geometrien liefert. Die Oberfläche des dabei entstehenden Körpers erfüllt die Euler-Lagrange-Gleichung. In kartesischen Koordinaten $z = f(x, y)$ lautet sie

$$(1 + f_y^2)f_{xx} - 2f_x f_y f_{xy} + (1 + f_x^2)f_{yy} = 0$$

Mit den Ableitungen

$$f_x = \frac{\partial f}{\partial x}, \quad f_y = \frac{\partial f}{\partial y}, \quad f_{xx} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2},$$

$$f_{yy} = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}, \quad \text{und} \quad f_{xy} = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$$

Diese nichtlineare, elliptische, partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung entspricht der allgemeineren Laplace-Young-Gleichung mit der Kondition der verschwindenden mittleren Krümmung. Auf die keramischen Waben angewandt bedeutet dies, dass dieses Leichtbaukonzept Lösungen erfordert, die mit den konventionellen Methoden der Ingenieurskeramik, wie z.B.

- Gießverfahren
- Plastische Formgebung oder
- Druckverfahren

nicht erzielbar sind. Selbst mit Hilfe moderner Methoden, wie

- Mikrosandstrahlverfahren,
- ionotrope kapillare Gelbildung oder
- elektrophoretische Ablagerung

sind die geforderten Stegdicken und die hyperbolischen Krümmungen nicht annähernd erreichbar.

Die Physik der Selbstorganisation

In der Physik ist die Selbstorganisation als ein spontan ablaufender Strukturbildungsprozess in einem dissipativen thermodynamischen Systems fern ab vom Gleichgewicht definiert. In Übereinstimmung mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der bei allen geschlossenen Systemen die Tendenz der stetigen Entropiezunahme postuliert, treten selbstorganisierte Prozesse spontan in allen Größenordnungen auf. Sie führen zu strukturellen Mustern, die durch ein Minimum an freier Enthalpie und durch ein Maximum an Entropie ausgewiesen sind. Effekte der Selbst-

organisation wurden gleichermaßen in mathematischen Systemen (zellulären Automaten) und auch in der Chemie (molekulare Selbstorganisation, reaktionäre Diffusion, autokatalytische Netzwerke, Flüssigkristalle) beobachtet. Die Ursache selbstorganisiert ablaufender Prozesse ist die Präsenz eines mechanischen, chemischen, elektrischen, elektrochemischen, thermodynamischen, akustischen oder eines aerodynamischen Potentials, dessen absolutes Minimum noch nicht eingestellt ist.

Im Bienenstock liegt ein thermodynamisches Potenzial vor, wenn die Bienen nach der Absonderung des Wachses die Umgebungstemperatur auf 40 °C erhöhen. Durch

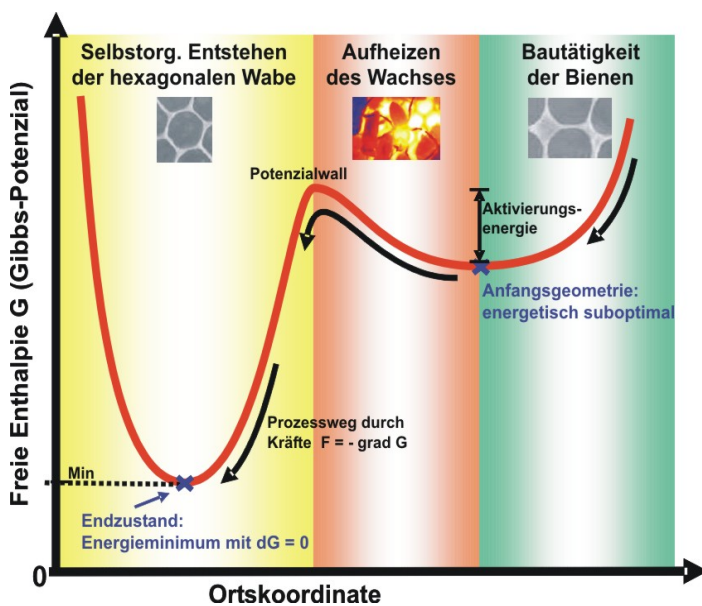


Bild 18: Potenzialbasierte Entstehung der Bienenwaben: Die letzte Phase der Wabenherstellung (gelb) erfolgt selbstorganisiert.

den Volumenschrumpfung des Wachses treten nun thermisch induzierte innere mechanische Spannungen auf, die das Wachs in dieser heißen Phase in die energetisch günstigste Form überführt (*Bild 18*). Das Material ist derart erwärmt worden, dass es sich wie eine Flüssigkeit verhält, ohne allerdings dabei wegzufließen, und dadurch durch Formveränderung energetisch günstigere Zustände annehmen kann, so ähnlich wie Seifenblasen. Das Ergebnis dieses selbstorganisiert ablaufenden Prozesses ist die bekannte Wabenstruktur mit den vielen gleich- und regelmäßigen hexagonalen Zellen.

Wenn selbstorganisierende Prozesse für die keramische Formgebung genutzt werden sollen, müssen wenigstens die folgenden vier Grundeigenschaften erfüllt sein:

- Das System ist dissipativ und
- nichtlinear (durch die Rückkopplungseffekte).
- Zu Beginn ist Aktivierungsenergie verfügbar, um Potentialschwellen überwinden zu können.
- Das System ist deshalb anfänglich zunächst ein offenes System fern ab vom Gleichgewicht anschließend jedoch ein geschlossenes System.

Simulation selbstorganisierender Prozesse

Im DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik wurde eine Matlab/Simulink® basierte Toolbox und eine sehr schnelle Programm-Library in C++ entwi-

ckelt, um selbstorganisierende Prozesse simulieren zu können. Mit den Methoden der Differenzial-Geometrie ist das Ziel, die optimalen Werte

- der Stegdicken,
- ihrer Längen und
- der hyperbolischen Krümmungen der Zellecken

zu ermitteln für vorgegebene statische und dynamische Randbedingungen. Der implementierte Algorithmus berücksichtigt ein thermomechanisches Potenzial, dessen negative Gradienten die Kräfte sind, die die Struktur dazu veranlassen, sich selbst zu

organisieren. Der rekursive Iterationsprozess erlaubt sowohl zwei- als auch dreidimensional Anwendungen. Dazu wurde das Prinzip zunächst an einzelnen Wabenzellen untersucht (*Bild 19*). Eine simulierte Sequenz einer vollständigen keramischen Wabe ist in *Bild 20* dargestellt. Erst wenn die Endkonfiguration eingestellt wurde, besitzt das System eine geometrische Form, bei der die mechanischen Spannungen vollkommen gleich verteilt sind: die perfekte Leichtbaugeometrie ist gefunden.

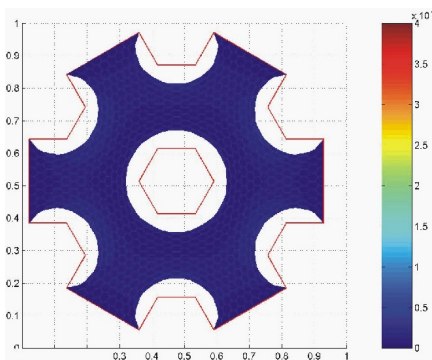


Bild 19: Start- (rot) und Endkonfiguration (blau) einer einzelnen selbstorganisierten keramischen Wabenzelle.

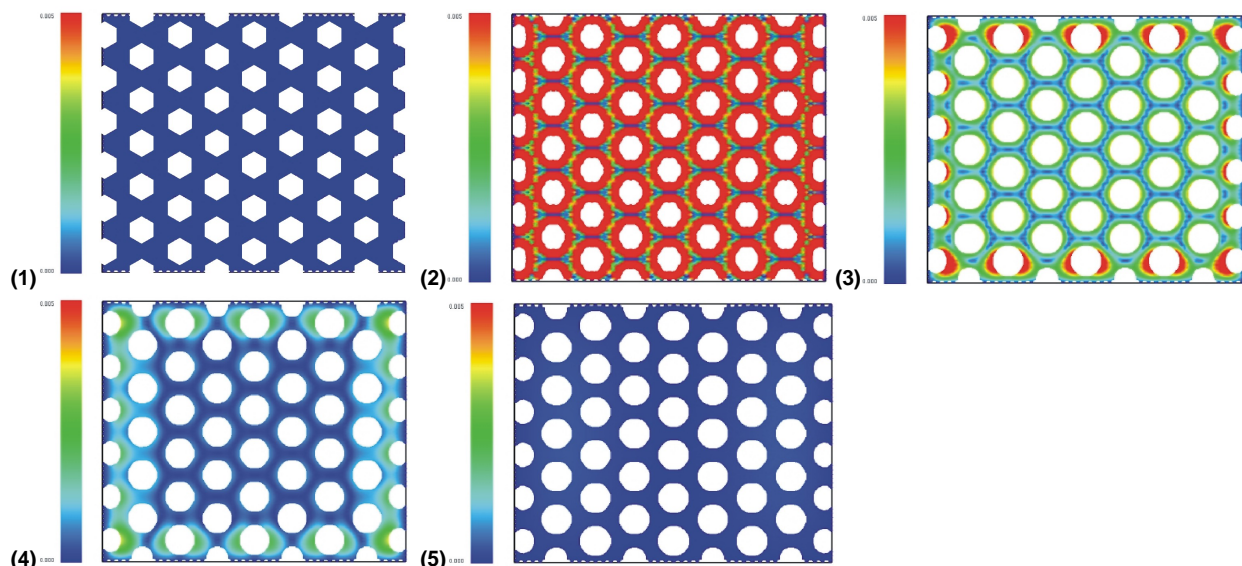


Bild 20: Simulierter Selbstorganisationsprozess: Startkonfiguration (1) bis Endgeometrie (5). Die während der Sinterung auftretenden durch Volumenschrumpfung bedingten mechanischen Spannungen sind farbig dargestellt..

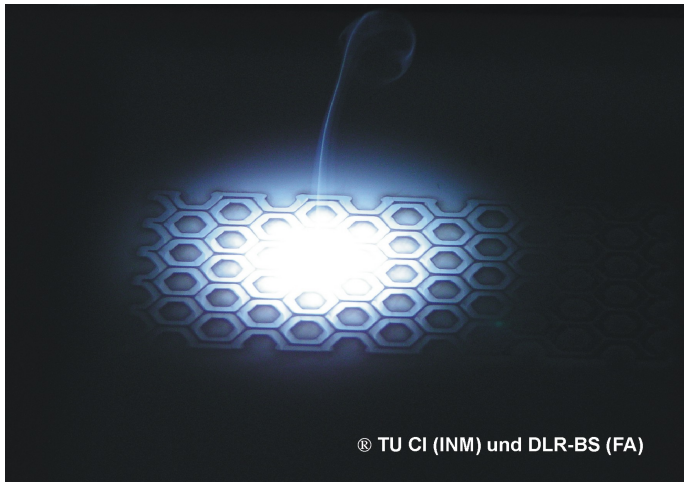


Bild 21: Lokaler Lasersinterprozess.

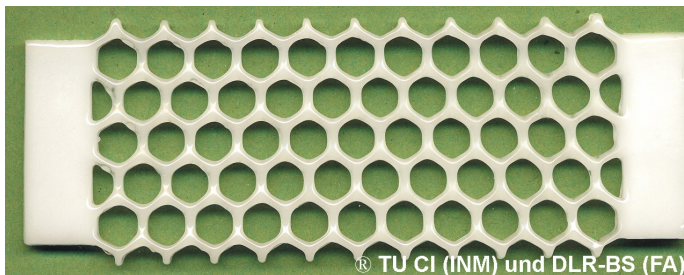


Bild 22: Keramische Wabenfolie.

Zur Herstellung keramischer Funktionsmuster wurden zunächst Grünkörper mit einer Dichte von ca. 70 Vol.-% im Schlickergussverfahren hergestellt, getrocknet und mit einer Fräseinheit grob wabenförmig vorstrukturiert. Mittels Laser wird nun ein Teilbereich der dargestellten Struktur auf Sintertertemperatur (ca. 1450 °C) erwärmt (*Bild 21*). Der nicht mittels Laser erwärmte Bereich unterliegt keinem Sinterschrumpf und dient somit als Halterung des sinternden Bereichs, in dem sich durch Sinterschrumpf Spannungen aufbauen. Nach der vollständigen Verdichtung des mittels Laser gesinternden Bereichs hat sich eine dichte keramische Struktur von Minimalflächen, Flächen mit verschwindender mittlerer Krümmung, gebildet (*Bild 22* und *Bild 23*).

Bei dieser potenzialbasierten Methode werden Grünkörper einem thermisch induzierten kontrollierten Selbstorganisationsprozess unterzogen, was die Herstellung auch sehr kleiner Waben mit sehr dünnen Zellsteigen (Mikrometerbereich) erlaubt. Uniaxiale Zugversuche dienen zur mechanischen Charakterisierung der keramischen Muster. Dabei traten Brüche fern von der Einspannung auf. Die Steifigkeit war signifikant geringer als die des monolithischen Systems, was größere Auslenkungen für den aktuatorischen Fall erwarten lässt.

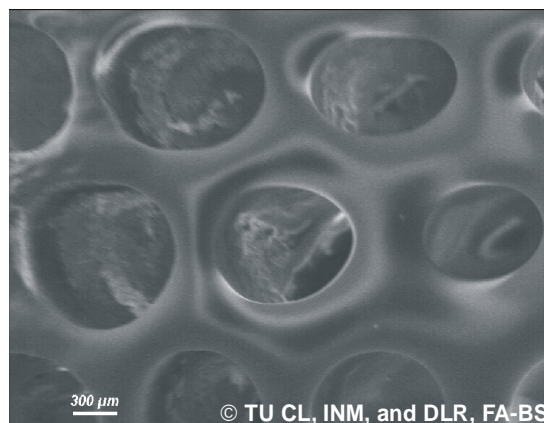


Bild 23: Selbstorganisierte keramische Wabe.

2.5 Verwertungspotenzial und Nutzen

Die konzipierten piezokeramischen Aktuatoren lassen sich unmittelbar als neue Bestandteile adaptiver Technologien verstehen, die vorrangig kleine und mittlere Unternehmen zur Entwicklung innovativer Lösungskonzepte zur aktiven Schwingungsisolierung und –unterdrückung nutzen.

Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse der Modellierung, der Fertigung und die der Charakterisierung leisten einen bedeutenden Beitrag für die Entwicklung von Systemen und Verfahren in unterschiedlichen Branchen:

- wabenförmige Folien-Aktuatoren für hochdynamische Anwendungen,
- Resonanz-Tuning breitbandig wirksamer Niedrig-Energie-Aktuatoren,
- gezielte Mikro und Makro-Strukturierung unter Einbeziehung selbstorganisierender Herstellungsprozesse,
- Aufbau komplexer Geometrien mit Schwindungsschwankungen in den unterschiedlichen Raumrichtungen durch selektives Lasersintern,
- Untersuchung der Laser-PZT Wechselwirkung mit CO₂ und Nd:YAG-Lasern,
- Analyse und Auslegung adaptiver Gesamtsysteme.

Die Ergebnisse wurden auf Fachtagungen vorgetragen. Des Weiteren werden sie in geeigneten Fachzeitschriften publiziert und in den Lehrveranstaltungen an der TU Braunschweig, an der Universität Magdeburg, der FH Braunschweig/Wolfenbüttel und an der TU Clausthal übernommen.

Um einen gezielten Technologietransfer in die Wirtschaft zu ermöglichen, wurde ein Kooperationsnetzwerk mit industriellen Unternehmen, wie INVENT GmbH, ERAS GmbH, CeramTec AG, Smart Material GmbH und HPS GmbH geschaffen.

Nach Abschluss des Projektes kann das Business- und Informationsportal für Neue Materialien und Mikrosystemtechnik in Niedersachsen, die NMN-MST (www.nmn-ev.de), genutzt werden, das für eine schnellere Umsetzung von Ideen in neue innovative Produkte und Verfahren insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen initiieren worden ist. Darüber hinaus wird auch das European Center of Adaptive Systems (ECAS, www.ecas-europe.com) in Anspruch genommen, das 2005 mit Unterstützung des Landes Niedersachsen gegründet wurde, um innovative Technologien durch Netzwerkleistungen zu vermarkten.

Hinsichtlich des Nutzens lassen sich für die Waben-Folien, die in diesem Forschungsvorhaben untersucht worden sind, folgende Vorteile gegenüber konventionellen Folien prognostizieren:

- Massereduktion um mindestens 80% (abhängig von Zellwanddicke, Zellgröße),
- deutliche Reduktion des Energieverbrauchs im relevanten Arbeitsbereich bei vergleichbarer Auslenkung,

- im dynamischen Betrieb drastisch verbesserte maximale Auslenkungen bei ausreichend großer Steifigkeit,
- verbesserte Robustheit und Langlebigkeit durch "fully stressed design".

Aufgrund dieser verbesserten Eigenschaften ergibt sich ein hohes Anwendungspotenzial in unterschiedlichen Bereichen. Im Bereich der mobilen Systeme können neue Einsatzbereiche für piezokeramische Aktuatoren erschlossen werden.

Kommunikationstechnik:

Zur Generierung des Handy-Vibrationsalarms erzeugen herkömmliche Systeme eine Schwingung des Akkus bei ca. 180 Hz. Dabei wird durch die hohe Beschleunigungsarbeit eine Leistung von ca. 2,6 W benötigt. Die piezokeramische Alternative sieht die Erregung einer Gehäuseschwingung mittels der Wabenaktuatoren vor. Diese Technologie wird voraussichtlich bei der gleichen Frequenz lediglich 0,02 W benötigen, also nur ca. ein Hundertstel der Leistung des bisherigen Alarmsystems.

Sportindustrie:

In einer im Jahre 2000 durchgeführten Testreihe wurde festgestellt, dass eine aktive Schwingungsreduktion an Tennisschlägern das Risiko für Epikondylitis radialis, den sog. Tennisellenbogen, deutlich reduziert. Die Firma HEAD Sport AG brachte den Tennisschläger „I.S18 Chipsystem“ auf der Basis 250 µm dicker piezoelektrischer Fasern in Kombination mit einem batterielosen Regelsystem („self-powered“) auf den Markt. Die in den Schlägerholmen integrierten Fasern arbeiten aufgrund der Stoßbelastungen mit ca. 600 V bis zu 200 Hz in einer dämpfenden Funktion. Dagegen benötigt die aktive Strukturversteifung mittels piezokeramischer Wabenaktuatoren lediglich 50 bis 100 V bei deutlich geringeren elektrischen Strömen.

Im Februar 2002 wurde der erste aktiv geregelte Ski vorgestellt, der unangenehme Biege- und Torsionsschwingungen des Skis während der Fahrt reduziert. Testfahrer beschreiben einen derartigen Ski als ruhig beim Kurvenfahren und dennoch spritzig und drehfreudig. Zum Einsatz kommen bislang herkömmliche piezoelektrische monolithische Folien und piezoelektrische Fasern im Frequenzbereich bis 120 Hz. Wie in der oben dargestellten Anwendung bei Tennisschlägern lässt sich auch bei dieser Anwendung die Wirkungsweise durch die Reduktion des Energieverbrauchs drastisch verbessern, da es sich bei den Skiern ausschließlich um resonierende und damit um aktiv versteifbare Systeme handelt.

Elektrogeräte:

Die Schwingköpfe von Rasierapparaten werden in einem 3- bis 4-fach-Schersystem vorzugsweise bei konstant gehaltener Frequenz betrieben. Der Antrieb erfolgt mechanisch über Verbindungsstücke von einem DC-Motor bis hin zum Schwingkopf. Bisherige Akkus sorgen dabei für eine Betriebsdauer von bis zu 50 Minuten. Diese Betriebszeit könnte dadurch verlängert werden, dass das Schwingkopfsystem reso-



nierend von Wabenaktuatoren angeregt werden, was eine deutliche Verlängerung der Betriebsdauer zur Folge hätte.

Optik:

Stark vergrößernde Ferngläser benötigen bei stativloser Benutzung ein Wackelausgleichssystem. Optisch analoge Systeme basieren auf einer batteriebetriebenen Aktuatereinheit, die eine Schwingungskompensation am Prismenumkehrsystem für zwei rotatorische Bewegungen durchführt. In dem Frequenzbereich von 0,2 bis 20 Hz können zwei wabenbasierte helikal angeordnete Aktuatorpaare für einen Ausgleich bei geringem Energieverbrauch sorgen. Gleichzeitig übernehmen diese Aktuatoren aufgrund ihrer Bauweise passive schwingungsisolierende Federeigenschaften.

Formmesstechnik:

Hochempfindliche Formmessmaschinen müssen meistens direkt in Fertigungshallen zur schnellen Überprüfung der Produktqualität vor Ort platziert werden. Durch den Umgebungslärm- und durch Erschütterungen wird die prinzipiell erreichbare Messgenauigkeit jedoch drastisch herabgesenkt. Forschungs- und Entwicklungsprojekte haben gezeigt, dass in die Tastarme integrierte Aktuatorssysteme Störschwingungen deutlich reduzieren können. Der Einsatz von Wabenaktuatoren soll diese hochpräzisen Messgeräte aktiv versteifen und den mobilen Einsatz ermöglichen.

Medizintechnik:

In einer 2003 an der Boston University durchgeführten Studie wurden die gleichgewichtsfördernden Auswirkungen von vibrierenden Einlegesohlen nachgewiesen. Mit Hilfe von leichten energiesparsamen Wabenaktuatoren ist die Realisierung derartiger Sohlen möglich. Da sich der Gleichgewichtssinn im Alter allgemein verschlechtert, könnten gerade ältere Menschen diese Einlegesohlen verwenden, um sich vor Stürzen und den damit verbundenen Verletzungen zu schützen.

Für die Präzisionsgusstechnik in Dentallaboren werden spezielle Vibratoren zum Einrütteln von Gipsbrei oder Einbettmassen in Abdrücke, Küvetten und Muffelringe benötigt. Dabei muss die Amplitude kontinuierlich in dem Frequenzbereich bis 100 Hz einstellbar sein. Wabenaktuatoren können selbst bei mechanischer Belastung diese Anforderungen erfüllen.

In der medizinischen Ultraschalltechnik werden sogenannte „harmonische Skalpelle“ z.B. bei der Tonsillektomie (Entfernung der Gaumenmandeln) benutzt, um eine hohe Nachblutungsrate und die erhebliche postoperative Schmerzsymptomatik zu reduzieren. Die Klinge schneidet und koaguliert dabei schwingend mit 55 kHz. Wabenaktuatoren sind bei entsprechender geometrischer Auslegung in der Lage, die erforderlichen Schwingungen auch in diesem Frequenzbereich zu generieren.

Handhabungstechnik, Fertigungsautomatisierung, Robotik:

Je präziser Mikropositioniervorrichtungen sein müssen, desto mehr gewinnen piezo-

elektrische Antriebe an Bedeutung. Die Positionierung muss dabei nicht ausschließlich statisch, sondern auch dynamisch zur Kompensation auftretender Störschwingungen erfolgen. Wabenaktuatoren können daher bei schwingungsisolierenden Labortischen, bei Motorsteuerungen, in der Halbleiterfertigung oder auch in Präzisionswerkzeugmaschinen zum Einsatz kommen.

2.6 Literatur

- (1) Bein, T., Breitbach, E.J., Uchino, K., 1997: „*A Linear Ultrasonic Motor Using the First Long. and the Fourth Bending Mode*“, Smart Materials and Struct., Vol. 6, No. 5, S. 619-627.
- (2) Brei, D., Berner, N.T., Alexander P.W., 2001: „*Modeling and Study of the Quasi-Static Behavior of Piezoceramic Telescopic Actuation Architectures*“, Journal of Intelligent Materials and Structures, Vol. 12, S. 303-313, 2001.
- (3) Diefenbach, G., Reichinger, C., 1999: „*Piezoelektrische Mikrostoßantriebe für hochgenaue Servoantriebe*“, Proc. of the Adaptronic Congress Potsdam 1999, S. 1-6.
- (4) Esch, H., Zhang, S., Srinivasan, M., Tautz, J., 2001: „*Honeybee dances communicate distance by optic flow*“, Nature 411, S. 581-583, 2001.
- (5) Fröhlich, B., 2000: „*Wachse der Honigbiene Apis mellifera carnica Pollm.: chem. und physik. Unterschiede und deren Bedeutung für die Biene*“, Dissertation, Univ. Würzburg.
- (6) Fröhlich, B., Riederer, M & J.Tautz, 2001: „*Honeybees discriminate cuticular waxes based on esters and polar components*“, Apidologie 32, 265-274, 2001.
- (7) Günster, J., Engler, S., Krause, T., Heinrich, J. G., 2002: „*Verfahren zur Herstellung von keramischen Formkörpern*“, Deutsches Patent DE 101 28 664 A1, 2002.
- (8) Günster, J., Engler, S., Heinrich, J. G., 2003: „*Forming of complex shaped ceramic products via layer-wise slurry deposition (LSD)*“, J. Eur. Ceram. Soc. 1, S. 25-28.
- (9) Günster, J., Görke, R., Heinrich, J. G., Souda, R., 2001: „*Pulsed laser ablation of dense sintered AlN and AlN powder samples studied by time-of-flight mass spectroscopy*“, Appl. Surf. Sci. 173, S. 76.
- (10) Hepburn, H.R., 1986: „*Honeybees and wax: an exp. natural history*“, Springer, 1986.
- (11) Hepburn, H.R., Kurstjens, S.P., 1984: „*On the strength of propolis (bee glue)*“, Naturwiss. 71: 591-592, 1984.
- (12) Hepburn, H.R., Kurstjens, S.P., 1988: „*The combs of honeybees as composite materials*“, Apidologie 19, S. 25–36, 1988.
- (13) Hepburn, H.R., Muller, W.J., 1988: „*Wax secretion in honeybees: thermal integrity of the festoon*“, Naturwissenschaften 75, S. 628–629, 1988.
- (14) Junge, M., Melcher, J., 2003: „*Von der Natur inspiriert – Ein Konzept zur Entwicklung dynamischer Low-Energy-Aktuatoren*“, BIONA-report 16, Akad. Wiss. Lit. Mainz, GTBB, 2003, Saarbrücken, ISBN 3-9807335-2-1, S. 140-151.
- (15) Kurstjens, S.P., Hepburn, H.R., Schoening, F.R.L., Davidson, B.C., 1985: „*The conversion of wax scales into comb wax by African honeybees*“, J. Comp. Physiol. B 156: 95-102, 1985.



- (16) Lau, D., 1959: „*Beobachtungen und Experimente über die Entstehung der Bienenwabe (Apis mellifica L.)*“, Zool. Beitrag 4, S. 233–306, 1959.
- (17) Löschau, W., Lenk, R., Scharek, S., Teichgräber, M., Nowotny, S., Richter, C., 1999: „*Prototyping of complex-shaped parts and tools of Si/SiC-Ceramics by selective laser sintering*“, Proc. 9th Cimtec-World Ceramic Congress, S. 567-573, 1999.
- (18) Martin, H., Lindauer, M., 1966: „*Sinnesphysiologische Leistungen beim Wabenbau der Honigbiene*“, Z. vergl. Physiol. 53: 372-404, 1966.
- (19) McGowan, A.-M. R., 2001: „*Research on Adaptive Aerospace Vehicle Technologies at NASA Langley Research Center*“, Proc. of the Adaptronic Congress 2001, Potsdam.
- (20) Melcher, J., 2001: „*Adaptive Impedanzregelung an strukturemechanischen Systemen*“, Shaker Verlag, ISBN 3-8265-8887-8, Aachen, 2001.
- (21) Melcher, J., Junge, M., 2002: „*Adaptive Impedance Control Using Piezoelectric Honeycomb Actuator Concepts*“, Int. Conf. on Adapt. Struct. & Techn., Potsdam, S. 644 -655.
- (22) Melcher, J., Junge, M., Breitbach, E., 2004: „*Selbstorganisierende Strukturen*“, Wettbewerb der Visionen 2001-2004, DLR, Köln, S. 22-25, September 2004.
- (23) Melcher, J., Junge, M., Günster, J., Heinrich, J. G., 2004: „*New Piezoceramic Actuators with High Displacements for Active Vibr. Control*“, 28th Int. Cocoa Beach Conf. & Exp. on Advanced Ceramics & Composites in conjunction with the 8th Int. Symp. on Ceramics in Energy Storage and Power Conversion Systems, FI, USA, Jan. 25-30, 2004.
- (24) Melcher, J., Junge, M., Selle, D., 2004: „*Als Sensor und/oder Aktuator einsetzbares Bauteil*“, Deutsches Patent 102 38 932, 9.6.2004.
- (25) Melcher, J., Krämer, M., Heinrich, J., Günster, J., Tautz, J., 2005: „*Verfahren zum Ausb. einer Struktur mit optim. Bauform*“, Deutsches Patent DE 10 2005 025367.9, 31.5.2005.
- (26) Nieh, J.C., Tautz, J., 2003: „*Behaviour-locked signal analysis reveals weak 200-300 Hz comb vibrations during the honeybee waggle dance*“, J. Exp. Biol. 203(10): 1573-1579, 2003.
- (27) Pirk, C.W.W., Hepburn, H.R., Radloff, S.E., Tautz, J., 2004: „*Honeybee combs: construction through a liquid equilibrium process?*“, Naturwiss. 91, S. 350-353, 2004.
- (28) Rohrseitz, K., 1998: „*Biophysik. und etholog. Aspekte der Tanzkomm. der Honigbienen (Apis mellifera carnica Pollm.)*“, Shaker Verlag, ISBN 3-8265-4126-X, Aachen, 1998.
- (29) Ruttner, F., 2003: „*Naturgeschichte der Honigbiene*“, 2. Auflage. Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart, 2003.
- (30) Sandemann, D.C., Tautz, J., Lindauer, M., 1996: „*Transmission of vibration across honeycombs and its detection by bee leg receptors*“, J. exp. Biol, Vol.199, 1996, S. 2585-2594, 1996.
- (31) Schmidt, K., 2003: „*Alternative Schwingungskompensation an einer PKW-Dachstruktur*“, Adaptronic Congress 2003, Wolfsburg, 2003.
- (32) Seeley, T.D., 1985: „*Honeybee Ecology. A study of adaptation in social life*“, Princeton Univ. Press, Princeton NJ, 1985.
- (33) Strehle, M.A., Jenke, F., Fröhlich, B., Tautz, J., Riederer, M., Kiefer, W., Popp, J., 2003: „*Raman spectroscopic study of spatial distribution of propolis in comb of Apis mellifera carnica (Pollm.)*“, Biopolymers, 72, S. 217-224, 2003.



- (34) Tautz, J., 1996: "*Honeybee waggle dance: recruitment success depends on the dance floor*", J. Exp. Biol. 199: 1375-1381, 1996.
- (35) Tautz, J., Casas, J., Sandeman, D.C., 2001: "*Phase reversal of vibratory signals in honeycomb may assist dancing honeybees to attract their audience*", J. Exp. Biol. 204: 3737-3746, 2001.
- (36) Tautz, J., Rohrseitz, K., Sandeman, D.C., 1996: "*One-strided waggle dance in bees*", Nature 382: 32.
- (37) Tautz, J., 1999: "*A comb-wide web*", Science, Vol. 286, S. 2272-2273, 1999.
- (38) Tautz, J., 2002: "*Das Festnetz der Bienen*", Spektrum der Wissenschaft, August 2003, S. 60-66.
- (39) Thompson, D'Arcy W., 2000: "*On Growth and Form*", Cambridge Univ. Press, 2000.
- (40) Weaire, D., Phelan, R., 1994: "*Opt. design of honeycombs*", Nature, S. 367-123, 1994.
- (41) Wierach, P., 2003: "*Entwicklung multifunktionaler Werkstoffsysteme mit piezokeramischen Folien im Leitprojekt Adaptronik*", Adaptronic Congress, Wolfsburg, 2003.
- (42) Wierach, P., Monner, H. P., Schönecker, A., Dürr, J. K., 2002: "*Application Specific Design of Adaptive Structures with Piezoceramic Patch Actuators*" SPIE's 9th Int. Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, USA, March 17-21, 2003.
- (43) Wierach, P., Schönecker, A., Sachau, D. 2001: "*Adaptive Strukturen mit piezoker. Folien - Stand und Entwicklungen im Leitprojekt Adaptronik*", Adaptr. Congr., Potsdam, 2001.

	BMBF Ideenwettbewerb Bionik- Innovationen aus der Natur	IB 131-2007/16	Ausgabe 01
	Bionisches Schwingungserregersystem	31. Juli 2007	Seite 33

Anhang A: Erfolgskontrollbericht

Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die Projektergebnisse wurden im Rahmen des BMBF Ideenwettbewerb – Innovationen aus der Natur erarbeitet. Alle gewährten Zuwendungen wurden gemäß der förderpolitischen Zielsetzungen des Wettbewerbs eingesetzt.

Wissenschaftlich-technisches Ergebnis

Die Forschungsarbeiten zielten auf

- die bionische Entwicklung eines keramischen Schwingungserreger- bzw. Aktuatorsystems auf der Basis eines in der Natur auftretenden Prinzips, das multifunktionalen Aktuatoren ermöglicht, Kräfte rückwirungsarm und effizient (impedanzangepasst) in eine Struktur einzuleiten,
- eine deutliche Verbesserung bisheriger Aktuatoren der Technologie Adaptronik und
- die Bewertung der Machbarkeit der vorgeschlagenen Produktverbesserung.

Im Rahmen dieser Studie wurden die Arbeitsziele verfolgt:

- Entwicklung eines strukturdynamischen Modells von Bienenwaben,
- die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung keramischer Waben,
- die Fertigung von Funktionsmustern und
- deren experimentelle Charakterisierung.

Aus den vorangehenden Ausführungen dieses Berichtes ist ersichtlich, dass nicht nur alle Ziele erreicht worden sind, sondern darüber hinaus noch Methoden zur präzisen Fertigung komplexester Geometrien keramischer Bauteile vorgeschlagen und hinsichtlich der Machbarkeit überprüft wurden. Es stehen nun folgende Patente als Grundlage der bearbeiteten innovativen Technologie zur Verfügung:

Melcher, J., Junge, M., Selle, D., 2004: „*Als Sensor und/oder Aktuator einsetzbares Bauteil*“, Deutsches Patent 102 38 932, 9.6.2004.

Melcher, J., Krämer, M., Heinrich, J., Günster, J., Tautz, J., 2005: „*Verfahren zum Ausb. einer Struktur mit optim. Bauform*“, Deutsches Patent DE 10 2005 025367.9, 31.5.2005.



Fortschreibung des Verwertungsplans

Um einen gezielten Technologietransfer in die Wirtschaft zu ermöglichen, wurde ein Kooperationsnetzwerk mit industriellen Unternehmen, wie INVENT GmbH, ERAS GmbH, CeramTec AG, Smart Material GmbH und HPS GmbH geschaffen.

Nach Abschluss des Projektes kann das Business- und Informationsportal für Neue Materialien und Mikrosystemtechnik in Niedersachsen, die NMN-MST (www.nmn-ev.de), genutzt werden, das für eine schnellere Umsetzung von Ideen in neue innovative Produkte und Verfahren insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen initiiert worden ist. Darüber hinaus wird auch das European Center of Adaptive Systems (ECAS, www.ecas-europe.com) in Anspruch genommen, das 2005 mit Unterstützung des Landes Niedersachsen gegründet wurde, um innovative Technologien durch Netzwerkleistungen zu vermarkten.

Es ist zu erwarten, dass man bei vorhandener finanzieller Unterstützung eine Entwicklung bis zur Serienreife vorantreiben können, so dass in spätestens 4-5 Jahren neue Produkte am Markt befinden werden.

Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine.

Präsentationen und Publikationen

1. Melcher, J., Mund, E., Sinapius, M., Braue, W., Hildmann, B., Tautz, J., Günster, J., Heinrich, J.G., 2006: „Bionische Aktuatoren für die Adaptronik“, Bionik-Kongress in Bremen: Patente aus der Natur, 27.-28. Oktober 2006, Bremen.
2. Melcher, J., Mund, E., Braue, W., Hildmann, B., Günster, J., Heinrich, J.G., 2007: „New Piezoceramic Actuators Using Self-Organizing Fabrication Methods“, 10th Int. Conf. and Exhibition of the Europ. Ceramic Soc., 17.-21. Juni 2007, Berlin.
3. Melcher, J., Mund, E., Sinapius, M., Fingerhut, D., Braue, W., Heinrich, J.G., Günster, J., Tautz, J., 2007: „Bionisches Schwingungserregersystem“, DLR-IB 131-2007/16, August 2007.
4. Melcher, J., Mund, E., Sinapius, M., Fingerhut, D., Braue, W., Tautz, J., Kleinhenz, M., Heinrich, J.G., Günster, J., 2007: „Bionisches Schwingungserregersystem“, BMBF-Wettbewerb „Bionik-Innovationen aus der Natur“, Deutsches Technikmuseum, Berlin, 19.-20. Juni 2007.

Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Kosten- und Zeitpläne wurden eingehalten.



Anhang B: Berichtsblatt und Document Control Sheet

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlussbericht
3a. Titel des Berichts Bionisches Schwingungserregersystem	
3b. Titel der Publikationen 1.) Bionische Aktuatoren für die Adaptronik 2.) <u>New Piezoceramic Actuators Using Self-Organizing Fabrication Methods</u>	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Melcher, Jörg ¹ , Mund, Eyleen ¹ , Fingerhut, Daniel ¹ , Sinapius, Michael ¹ , Braue, Wolfgang ² , Hildmann, Bernd ² , Tautz, Jürgen ³ , Günster, Jens ⁴ , Heinrich, Jürgen G. ⁴	5. Abschlussdatum des Vorhabens 1.3.2007
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) 1.) Melcher, Jörg ¹ , Mund, Eyleen ¹ , Sinapius, Michael ¹ , Braue, Wolfgang ² , Hildmann, Bernd ² , Tautz, Jürgen ³ , Günster, Jens ⁴ , Heinrich, Jürgen G. ⁴ 2.) Melcher, Jörg ¹ , Mund, Eyleen ¹ , Braue, Wolfgang ² , Hildmann, Bernd ² , Günster, Jens ⁴ , Heinrich, Jürgen G. ⁴	6. Veröffentlichungsdatum 1.) Oktober 2006 2.) Juni 2007
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ¹ DLR, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig ² DLR, Institut für Werkstoff-Forschung, Linder Höhe, 51147 Köln ³ Universität Würzburg, Biozentrum, Zoologie II, Am Hubland, 97074 Würzburg ⁴ TU Clausthal, Institut für Nichtmetallische Werkstoffe, Zehntnerstraße 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld	7. Form der Publikation 1.) Bionik-Tagungsband (Bremen) 2.) ECERS-Tagungsband (Berlin)
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Dienstsitz Berlin Hannoversche Straße 28-30 10115 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution IB 131-2007/16
	10. Förderkennzeichen *) 0313773
	11a. Seitenzahl Bericht 36
	11b. Seitenzahl Publikation 1.) 6 Seiten 2.) 6 Seiten
	12. Literaturangaben 43
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 23
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Endpräsentationen BMBF Wettbewerb Bionik - Innovationen aus der Natur -, Vortrag und Posterausstellung, 19./20. Juni 2007, Deutsches Technikmuseum, Berlin	
18. Kurzfassung Ziel ist die Entwicklung eines bionischen Schwingungserregersystems auf der Basis eines in der Natur auftretenden Prinzips, das in der Adaptronik nutzbaren Aktuatoren ermöglicht, Kräfte rückwirkungsarm und effizient in eine Struktur einzuleiten. Derartige multifunktionale Schwingungserregersysteme bestehen aus piezokeramischen Material und besitzen die Geometrie von Honigwaben, die das biologische Vorbild dieses Vorhabens sind. Vorgesehen sind experimentelle Untersuchungen an Bienenwaben, Zusammenstellung anwendungstypischer Lastanforderungen und einbaubedingter Randbedingungen, analytische Modellierung des bionischen Schwingungserregersystems, Herstellung und Charakterisierung keramischer Waben. Darüber hinaus sieht das Projekt ein professionelles Projektmanagement und Maßnahmen zur Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse vor. Die Verwertung wird angestrebt in der Kommunikationstechnik (Handy-Vibrationsalarm), Medizintechnik (MR-Systeme), Robotik und Raumfahrt (autonome Schwingungsunterdrückung), Optische Industrie(Halbleiter-Lithographieobjektive), Maschinen- und Anlagenbau (adaptiver Leichtbau) und in der Verkehrstechnik(Schwingungs- und Lärmunterdrückung in Fahrzeugen).	
19. Schlagwörter Bionik, Wabenstrukturen, Piezokeramik, Adaptronik, Schwingungen, Lärm, Selbstorganisation	
20. Verlag -	21. Preis -

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.



Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report final report	
3a. Report Title Bionic Vibration Actuator System		
3b. Title of Publication 1.) Bionische Aktuatoren für die Adaptronik 2.) New Piezoceramic Actuators Using Self-Organizing Fabrication Methods		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Melcher, Jörg ¹ , Mund, Eyleen ¹ , Fingerhut, Daniel ¹ , Sinapius, Michael ¹ , Braue, Wolfgang ² , Hildmann, Bernd ² , Tautz, Jürgen ³ , Günster, Jens ⁴ , Heinrich, Jürgen G. ⁴		5. End of Project 1.3.2007
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) 1.) Melcher, Jörg ¹ , Mund, Eyleen ¹ , Sinapius, Michael ¹ , Braue, Wolfgang ² , Hildmann, Bernd ² , Tautz, Jürgen ³ , Günster, Jens ⁴ , Heinrich, Jürgen G. ⁴ 2.) Melcher, Jörg ¹ , Mund, Eyleen ¹ , Braue, Wolfgang ² , Hildmann, Bernd ² , Günster, Jens ⁴ , Heinrich, Jürgen G. ⁴		6. Publication Date 1.) Oktober 2006 2.) Juni 2007
8. Performing Organization(s) (Name, Address) ¹ DLR, Institute of Composite Structures and Adaptive Systems, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig ² DLR, Institute of Materials Research, Linder Höhe, 51147 Köln ³ University of Würzburg, Biocenter, Zoology II, Am Hubland, 97074 Würzburg ⁴ TU Clausthal, Institute of Nonmetallic Materials, Zehntnerstraße 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld		7. Form of Publication 1.) Bionic-Proceeding (Bremen) 2.) ECERS- Proceeding (Berlin)
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Dienststz Berlin Hannoversche Straße 28-30 10115 Berlin		9. Originator's Report No. IB 131-2007/16
		10. Reference No. 0313773
		11a. No. of Pages Report 36
		11b. No. of Pages Publication 1.) 6 pages 2.) 6 pages
		12. No. of References 43
		14. No. of Tables 1
		15. No. of Figures 23
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date) Final presentation during final event of "BMBF Ideenwettbewerb Bionik – Innovationen aus der Natur", June 19-20, 2007, Deutsches Technikmuseum, Berlin		
18. Abstract The goal is the development of a bionic actuator system on a basis of a natural principle, that adaptronic actuators allow to produce sufficient forces in a mechanical structure without any feedback effects. Such multifunctional actuators consist of piezoceramic material and have geometries that take combs of honeybees as an example. This investigations covers: experiments on honeybee combs, compilation of typical load and geometry conditions, analytical modelling, fabrication, and characterization of ceramic combs. Furthermore this project includes professional project managements and measures in order to commercialize the obtained expertise in communication technologies (handy vibration alarm), medicine technics (MR Systems), robotics and aerospace systems (autonomeous vibration reduction), optical industries (semiconductor lithography), mechanical engineering (adaptive lightweight structures) and in traffic engineering (vibration and noise control in cars).		
19. Keywords Bionics, honey combs, piezoceramics, adaptronics, vibration, noise, self-organization		
20. Publisher -	21. Price -	