

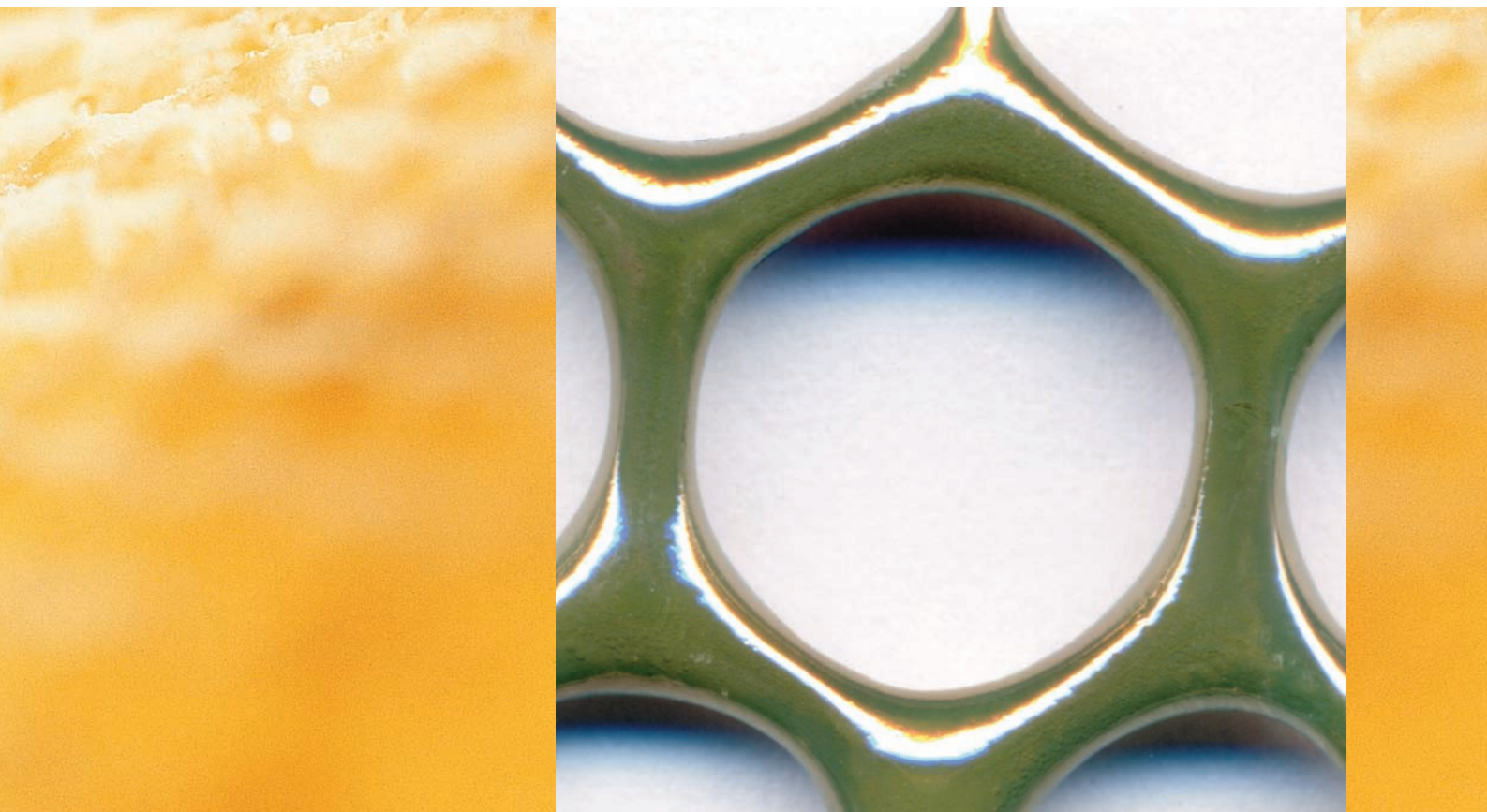


# Der Trick der Bienen

Piezowaben – eine bionische Innovation in der Adaptronik

Von Dr. Jörg Melcher

**W**er heute Schwingungen und Lärm wirksam reduzieren will, bedient sich der Adaptronik. Dank dieser innovativen Technologie lassen sich Vibrationen und störende Geräusche aktiv auslöschen. Erreicht wird dies durch Sensoren und Stellglieder (Aktuatoren), die gleich mit in die schwingende Struktur integriert werden. Sie bestehen aus aktivierbaren Materialien, so genannten Funktionswerkstoffen. Als Teil der Struktur können sie elektrisch, magnetisch, thermisch oder sogar optisch angesteuert werden. In Kombination mit sich anpassenden (adaptiven) Reglern lassen sich so Schwingungen und Lärm durch Gegenschwingungen beziehungsweise Antischall reduzieren. Für Aktuatoren, die hinsichtlich der Auslenkung und des Wirkungsgrades noch höheren Anforderungen genügen müssen, ist eine neue Generation piezokeramischer Systeme entwickelt worden: innovative Piezo-Aktuatoren in Wabenbauweise. Eine Idee, deren Impetus die faszinierenden Waben der Honigbienen sind. In einem interdisziplinären Forschungsverbund des DLR zusammen mit der TU Clausthal und der Universität Würzburg werden bionische Herstellungs- und Simulationsverfahren entwickelt und über die Luft- und Raumfahrt hinaus dem Automobilbau, der Medizintechnik, dem Maschinenbau und anderen technischen Anwendungsbereichen bereitgestellt.



Vibrationen an technischen Konstruktionen gibt es nicht nur in der Luftfahrt. Wo immer sie auftauchen, sind sie in der Regel höchst unerwünscht, in der Luftfahrt vor allem auch wegen ihrer Lärm verursachenden Wirkung. Die Vibrationen entstehen durch äußere Krafteinwirkungen oder auch durch Antriebssysteme und haben im Resonanzfall besonders große Amplituden. Dieser Effekt lässt sich vermeiden, indem die Steifigkeit und die Dämpfung der Struktur erhöht werden. Doch das macht die Bauteile leider schwerer und ist somit nicht im Sinne des Leichtbaus.

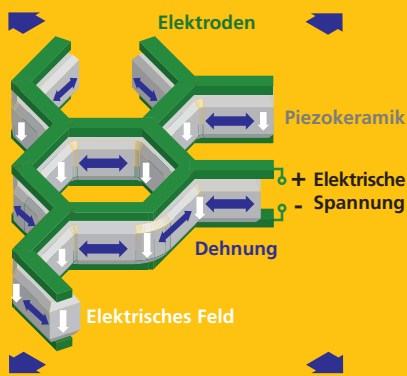
Die Technologie der adaptiven Systeme – die Adaptronik – eröffnet eine grundsätzlich neue Vorgehensweise: Multifunktionale Aktuatoren, die zu meist aus piezoelektrischen Werkstoffen bestehen, werden in die Struktur

vollständig integriert. Dabei übernehmen sie auch Last tragende Funktionen. Vor allem aber erlauben sie eine aktive Unterdrückung der auftretenden Vibrationen. Bei den Piezoelektrika wird das Phänomen genutzt, dass bei einer Verformung des Materials entsprechende elektrische Spannungen an der Oberfläche auftreten (sensorische Nutzung) beziehungsweise sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung mechanische Verformungen ergeben (aktuatorische Verwendung).

Die Erfolgsaussichten für den technischen Einsatz dieser so genannten smarten Aktuatoren hängen jedoch davon ab, ob es gelingt, Aktuator-systeme mit großen Auslenkungen bei gleichzeitig ausreichend großen mechanischen Kräften und geringem Energieverbrauch aufzubauen. Aus

physikalischen Gründen müssen die Aktuatoren dabei eine optimale Leistungsübertragung erlauben. Dieser optimale Betrieb entspricht exakt dem Fall der so genannten Impedanzanpassung, bei der die mechanischen Eigenschaften des Aktuators mit denen der Struktur perfekt übereinstimmen.

Für den Leichtbau wäre es von Vorteil, das Material gleichmäßig zu belasten. In der Regel sind aber die mechanischen Spannungen in einer belasteten Struktur ungleichmäßig verteilt. Wie also hat der perfekte Leichtbau auszusehen? DLR-Wissenschaftler nahmen sich dieses Problems an: Bei welcher Bauweise erfolgt eine optimale Materialausnutzung bei minimalem Materialaufwand? Durch welche Leichtbauprinzipien lassen sich hochfeste Konstruktionen erzielen?



Prinzipskizze der Wabenaktuatoren

Bäume wachsen nicht rechteckig. In der Natur lassen sich vielfältige Bauweisen finden, die Lösungen aufzeigen. So treten beispielsweise an Bäumen aufgrund ihrer traktoiden Form keine Kerbspannungen und somit auch keine lokalen Spannungsspitzen auf, die deren Festigkeit mindern würden. Bäume haben keine geraden und rechteckigen Formverläufe, die gefürchtete Kerbwirkungen zur Folge hätten. Die Vorliebe der Ingenieure für rechte Winkel (diese tauchen in der Natur sehr selten auf) und Metall als bevorzugter Werkstoff (kein Organismus verwendet Metall für mechanische Zwecke) setzen dem Leichtbau offensichtlich Grenzen. So entstand im DLR die Idee, piezoelektrische Aktuatoren zu entwickeln, die nicht wie bisher monolithisch, sondern in Wabenform, mit vielen kleinen hexagonalen Zellen aufgebaut sind. An der oberen und unteren Seite befinden sich die Elektroden, durch die ein elektrisches Feld in Dickenrichtung erzeugt wird. Der indirekte piezoelektrische Effekt in der Keramik bewirkt dann eine planare Ausdehnung. Jede Wabenzelle weist in den Ecken einen 120-Grad-Winkel auf. Das ist der einzige Winkel, bei dem

eine optimale gleichmäßige Weiterleitung von Kräften in einer ebenen Struktur erfolgt. Mit der Festlegung der Steg-Dicken und der Zellgrößen lässt sich die Resonanzfrequenz der Piezowaben einstellen und somit eine Anpassung an das Spektrum der schwingenden Struktur vornehmen. Doch wie sollten die Ecken im Detail aussehen? Mit welchem Krümmungsradius müssen sie abgerundet werden? Und noch viel entscheidender: Wie lassen sich derart komplizierte Geometrien mit den extrem spröden Piezokeramiken in der gewünschten Genauigkeit fertigen?

## Bienen kommunizieren mit den Füßen

Parallel zu diesen Überlegungen fand der Biologe und Bienenexperte Prof. Dr. Jürgen Tautz im Biozentrum der Universität Würzburg heraus, dass die Bienen in den Waben nicht nur ihre Nahrung speichern und ihre Brut aufziehen. Den wächsernen Wabenstrukturen kommt noch eine andere wichtige Funktion zu: Sie dienen als Medium für Kommunikationssignale. Der bekannte Schwänzeltanz (eine Figur in Form einer Acht) ist eines der höchstentwickelten Kommunikationsmittel unter Insekten. Eine erfolgreiche Sammlerin vermittelt ihren Bienenstockgefährtinnen Informationen über eine entfernte Futterquelle. Die Dauer des Schwänzeln liefert die Information über die Entfernung und die Körperrichtung beim Schwänzeln informiert über die einzuschlagende Richtung. Doch nach neueren Analysen läuft die Tänzerin während des Schwänzeln nicht, wie jahrzehntelang angenommen, sondern sie steht die meiste Zeit. Dabei überträgt sie die Vibrationen ihres mit Muskelkraft betriebenen Flugmotors

im Brustabschnitt über die einzelnen Füße an die Wabe. Diese wird nun ihrerseits in Vertikalrichtung zu Schwingungen angeregt. Mehr noch: Berührungslose Laser-Doppler-Vibrometrie-Messungen haben auch horizontale Schwingungseigenformen der Waben im Bereich 200 bis 270 Hertz identifiziert.

Ein Impedanzminimum (gleichbedeutend mit einer hohen Nachgiebigkeit) der Honigwaben im Frequenzbereich der Kommunikationssignale ist physikalisch erforderlich, da die Bienen während des Schwänzeln lediglich Kräfte von maximal einem tausendstel Newton auf die Ränder der Wabenzellen ausüben können. Die Waben sind also 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, sodass die Bienen während der Kommunikation ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis erzielen.

## Warmes Wachs fließt in die optimale Form

Eine weitere Beobachtung lieferte die Vorlage für die Piezowaben: Honigbienen bauen ihre hexagonalen Waben in einer exakten Geometrie. Bis vor kurzem war rätselhaft, wie die Präzision der Hexagone zu Stande kommt. Zunächst erzeugen die Bienen den Baustoff Wachs mit vier Drüsenpaaren, die sich auf der Bauchseite ihres Hinterleibes befinden. Sitzen viele Bienen dabei nebenein-

## Keramische Wabenfolie

ander, bauen sie keine Sechsecke, sondern weitgehend runde Hohlzylinder, deren Zellenwände nur etwa 70 Mikrometer dick sind. Doch während sie an diesen Rohlingen arbeiten, erwärmen sie das thermoplastische Wachs auf etwa 37 bis 40 Grad Celsius und fügen diverse Enzyme hinzu. Während dieser Bauaktivität fängt das Wachs an, hochviskos flüssig zu werden. Als Flüssigkeit ist es nun in der Lage durch Formveränderung die energetisch günstigste Geometrie einzunehmen – so ähnlich, wie es die Seifenblasen tun. Nur sind es hier Sechsecke mit abgerundeten Kanten und Ecken.

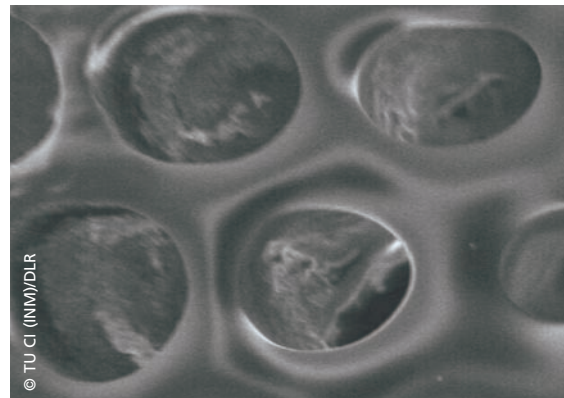
Sobald die Bienen das Wachs anschließend wieder auf etwa 29 Grad Celsius abkühlen, wird es wieder steif und im hexagonalen Wabenzellverband hochbelastbar. Mit 40 Gramm Wachs sind Bienen in der Lage, in einer Wabe mit den Abmessungen von 400 Millimeter mal 200 Millimeter bei 0,1 Millimeter dicken Wänden zwei Kilogramm Honig zu speichern. Indem die Honigbienen die physikalischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs Wachs über dessen chemische Zusammensetzung und über die Temperatur beeinflussen, machen sie sich physikalische Prinzipien zu Nutze. Honigwaben entstehen durch kontrollierte Selbstorganisation.

Dieser sozusagen von selbst ablaufende Prozess der Formveränderung erfolgt durch Kräfte, die den negativen Gradienten des thermodynamischen Potentials entsprechen. Darauf basiert die Idee, Piezowaben in ähnlicher Weise herzustellen, nur nicht bei 40 Grad Celsius mit dem Material Wachs, sondern mit Piezokeramiken bei der Sintertemperatur von zirka 1.400 Grad. Die Versuche, die in

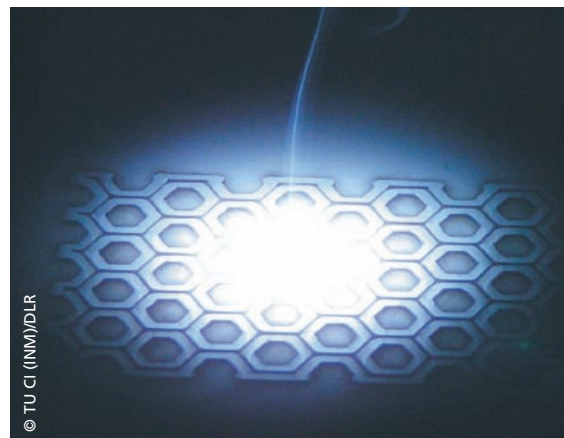
Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Jürgen G. Heinrich und Dr. habil. Jens Günster am Institut für Nicht-Metallische Werkstoffe der TU Clausthal erfolgten, zeigen nach der vollständigen Verdichtung des mittels Laser gesinterten Bereichs eine dichte keramische, energetisch optimierte Struktur mit hyperbolischen Abrundungen.

Bei dieser potentialbasierten Methode werden die Ausgangskörper für das spätere Bauteil, die so genannten Grünkörper, einem thermisch induzierten kontrollierten Selbstorganisationsprozess unterzogen. Dadurch wird die Herstellung auch sehr kleiner Waben mit sehr dünnen Zellstegen im Mikrometerbereich möglich. Die optimalen Abrundungen an den Ecken in den hexagonalen Zellen ergeben sich automatisch während der Sinterung. Das Ergebnis sind hyperbolische Geometrien mit optimalen Leichtbaueigenschaften. Mittlerweile lassen sich im DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaption die Selbstorganisationsprozesse, die während der Sinterung auftreten, durch neue Berechnungsverfahren vollständig vorab berechnen, sodass sich die Endgeometrien der Piezowaben vorhersagen lassen.

Zusammen mit den DLR-Kollegen Dr. Wolfgang Braue und Dr. Bernd Hildmann vom DLR-Institut für Werkstoff-Forschung und den Clausthaler und Würzburger Wissenschaftlern werden nun in einem interdisziplinären Bionik-Projekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung Piezowaben entwickelt, die für die Aktuatorik in vielen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen sollen. Im Anschluss an das Projekt ist die Verwertung in der Kommunikationstechnik (Handy-Vibrationsalarm), in der Medizintechnik (MR-



Selbstorganisierte keramische Wabe: Hexagonale Zellen mit hyperbolisch abgerundeten Ecken



Selbstorganisierte Herstellung der Piezowaben durch lokale Lasersinterung

Systeme), in der Robotik und Raumfahrt (autonome Schwingungsunterdrückung), im Maschinen- und Anlagenbau (adaptiver Leichtbau) und in der Verkehrstechnik (Schwingungs- und Lärmunterdrückung in Fahrzeugen) anvisiert.

### Autor:

Dr. Jörg Melcher leitet im DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaption das interdisziplinäre Bionik-Projekt „Bionisches Schwingungserregersystem“, für das er und seine Forscherkollegen den mit 500.000 Euro dotierten Bionik-Preis 2007 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung erhielten.