

# Muskel- spiele

Elastomere kommen in der Technik seit Jahrzehnten zum Einsatz, etwa als schwingungsdämpfende Elemente im Maschinenbau. Wissenschaftler entwickeln nun elektroaktive Elastomere, die, elektrisch angesteuert, Schwingungen noch effektiver bekämpfen können und völlig neue Anwendungsszenarien auch in der Energiegewinnung erschliessen.

William Kaal, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

**E**lastomere sind Kunststoffe, die bei Raumtemperatur gummielastische Eigenschaften aufweisen. Grund für die hohe Elastizität sind die schwach vernetzten, langen Kettenmoleküle. Im unbelasteten Zustand liegen diese Polymerketten als geknäuelte Struktur vor, die sich unter mechanischer Belastung entflechten und entlang der Zugrichtung ausrichten. Solche aus Naturkautschuk bestehende oder synthetisch hergestellte Materialien sind als Haushaltsgummi, Luftballon, Gummiball, Radiergummi, Fahrradreifen oder Putzhandschuh allgegenwärtig. Im technischen Bereich werden Elastomere vorzugsweise als Dichtungsmaterialien eingesetzt oder zum Dämpfen von Schwingungen verwendet, zum Beispiel in Lagerungen von Maschinen und Aggregaten.

## Elektroaktive Elastomere

Seit einigen Jahren wird an der Entwicklung und Erprobung elektroaktiver Elastomere geforscht. Elektroaktiv bedeutet, dass sie elektromechanische Kopplungseigenschaften besitzen, die sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung aktiv verformen. Wie piezokeramische oder magnetostruktive Materialien handelt es sich bei elektroaktiven Elastomeren damit um Funktionsmaterialien, die auch als «smart materials» bezeichnet werden. Im Gegensatz zu anderen Wandlerwerkstoffen können sie grosse Deformationen – bei allerdings nur moderaten Kräften – erzeugen.

Elektroaktive Elastomere gewinnen zurzeit in den unterschiedlichsten Bereichen an Bedeutung und Aufmerksamkeit, da ihre Einsatzmöglichkeiten von akustischen und haptischen Applikationen bis hin zu Anwendungen in der Robotik und der Energiegewinnung reichen. Sie bieten allerdings auch gerade für Anwendungen im Bereich der aktiven und semi-aktiven Schwingungsdämpfung grosses Einsatzpotenzial und könnten dort in Zukunft passive Elastomerbauteile ersetzen. So lassen sich beispielsweise aktive Lagerungskomponenten realisieren, die durch eine intelligente Ansteuerung im Vergleich zu passiven Bauteilen ein verbessertes Dämpfungspotenzial aufweisen.

## Dielektrische Elastomere

Dielektrische Elastomere sind die wichtigsten Vertreter der elektroaktiven Elastomere, ihr Wirkprinzip ist relativ einfach: Wird ein dünnes Elastomer beidseitig mit einer elektrisch leitfähigen Schicht versehen, entsteht



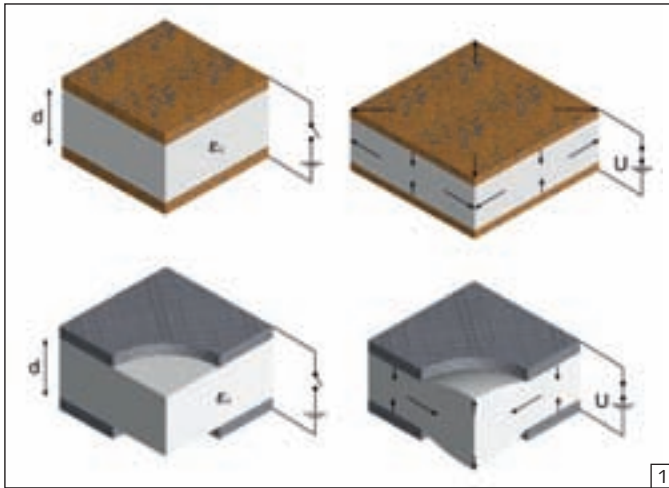


Bild 1: Funktionsprinzip dielektrischer Elastomere. Oben: Eine Schicht eines Stapelwandlers mit flexibler Elektrode. Unten: Mit gelochter, starrer Elektrode.

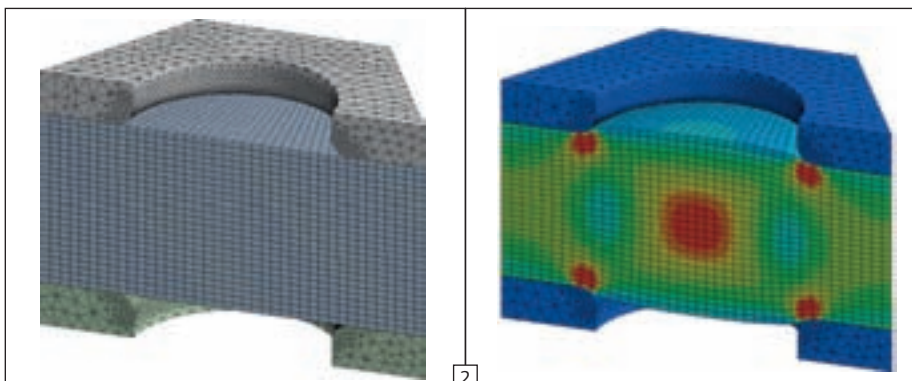
Bild 2: Numerisches Berechnungsmodell für ein hexagonales Basiselement eines elektroaktiven Elastomerwandlers mit gelochten Elektroden. Links: Unverformter Zustand. Rechts: Dehnung bei Anlegen eines elektrischen Feldes.

ein Plattenkondensator, dessen Elektroden sich elektrostatisch anziehen, wenn ein elektrisches Feld anliegt. Diese Anziehung bewirkt eine Verformung des Elastomers in Dickenrichtung. Aufgrund der Inkompressibilität des Materials wird aber nicht nur die Schichtdicke reduziert, sondern die Fläche vergrössert (Bild 1, oben). Die erreichbare Verformung ist im Wesentlichen von der Feldstärke abhängig, die wiederum von der anliegenden Spannung und der Schichtdicke des Elastomermaterials bestimmt ist. Typische Feldstärken für dielektrische Elastomere liegen bei 20 bis 30 kV/mm. Um die notwendigen Spannungen für die Erzeugung solcher Feldstärken gering zu halten, werden daher möglichst dünne Elastomerschichten mit Schichtdicken unter 100 µm eingesetzt. Neben gerollten Bauformen sind Stapelwandler die am weitesten verbreitete Bauform dielektrischer Elastomeraktoren. Hierbei wird die Dickenreduktion des Materials aktorisch genutzt. Um die Wirkung zu vervielfachen, werden viele Schichten übereinandergestapelt und abwechselnd mit positiven und negativen Elektroden durchsetzt. Bei anliegender Spannung kontrahiert der Aktor, bei Wegnahme der Spannung dehnt er sich aus und geht in seinen Ausgangszustand zurück. Stapelaktoren sind gut auf Druck belastbar, können allerdings keine Zugbelastung ertragen, da die Schichten sich sonst voneinander lösen. Daher sollten Stapelwandler für wechselnde Lasten immer mechanisch oder elektrisch vorgespannt betrieben werden. Ein entscheidender Nachteil von Stapelwandlern mit flexiblen Elektroden ist die ungleiche Deh-

nung, die sich über der Stapelhöhe einstellt. Da die äusseren Schichten prinzipbedingt starr angebonden sein müssen, entstehen in den Randbereichen hohe Dehnungsgradienten. Insbesondere bei Stapelwandlern mit wenigen Schichten führen diese Effekte zu erheblichen Performanceverlusten.

### Elektrodenfertigung als Herausforderung

Eine technische Herausforderung stellt die Realisierung geeigneter Elektroden dar. Damit sie die Flächenvergrösserung nicht behindern, müssen sie eine hohe Dehnfähigkeit aufweisen, weswegen metallische Elektroden in der Regel ausscheiden. Daneben müssen sie elektrisch gut leitfähig sein, um eine homogene Feldverteilung zu realisieren und keine grossen elektrischen Verluste zu erzeugen. Meistens wird mit einer pastösen oder pulverförmigen Elektrode gearbeitet, wie beispielsweise Graphitpulver oder Silberleitpaste. Solche Elektroden lassen sich leicht manuell auftragen und bringen keine zusätzliche Steifigkeit in das System ein. Damit konnten Aktoren mit sehr grossen Verformungen realisiert werden. Im Hinblick auf eine serienreife Prozesstechnologie bieten allerdings formstabile Elektroden je nach Aktorbauform entscheidende Vorteile. Ein am Fraunhofer LBF entwickeltes neuartiges Konzept für Elastomerstapelwandler verwendet starre metallische Elektroden. Die Elektroden sind in diesem Designansatz gelocht und gestatten dem Elastomer eine lokale Deformation in die Löcher. Damit >



Mehr als 11000 Steckverbinder von 40 führenden Herstellern im Katalog oder Online Shop:

[www.compona.ch](http://www.compona.ch)

### Binder Serie 620: Snap-in-Flanschsteckverbinder IP67 mit Tauchlötkontakten



Die neu eingeführte Printlötversion bietet die Möglichkeit einer rationelleren Verarbeitung. Die 100 % elektrisch geprüften Steckverbinder garantieren ein gleichbleibend hohes Qualitätsniveau. Durch die angecrimpten Litzen wird ein niedriger Übergangswiderstand gewährleistet.

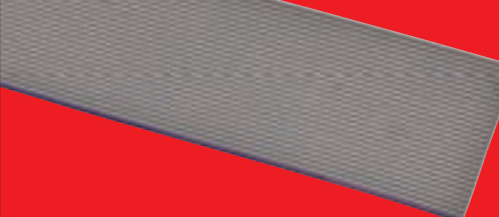
### Die EH-Serie von Switchcraft



Die EH-Serie von Switchcraft® ist eine komplette Linie von Daten-, Audio- und Video-Steckern, die in Standard-Panel-Mount-XLR-Gehäuse eingebaut sind. Erhältlich sind zum Beispiel D-Sub, RJ45, BNC, USB A und B, Fiber Optic, 3,5-mm-Stereobuchsen usw.

### Halogenfreies Flachbandkabel 1 mm von 3M

Das neue Low Smoke Zero Halogen (LSZH) Flachband entspricht der IEC-61034-2:2005- beziehungsweise der NF-X-70-100-2:2006-Norm. Die Serie HF625 mit AWG-28-Kabel ist von 6- bis 50-polig erhältlich und für einen Temperaturbereich von -40 °C bis 105 °C ausgelegt.



**COMIPONA**  
CONNECTOR SYSTEMS

COMPONA AG · 8320 Fehraltorf  
0848 840 100 · [www.compona.ch](http://www.compona.ch)

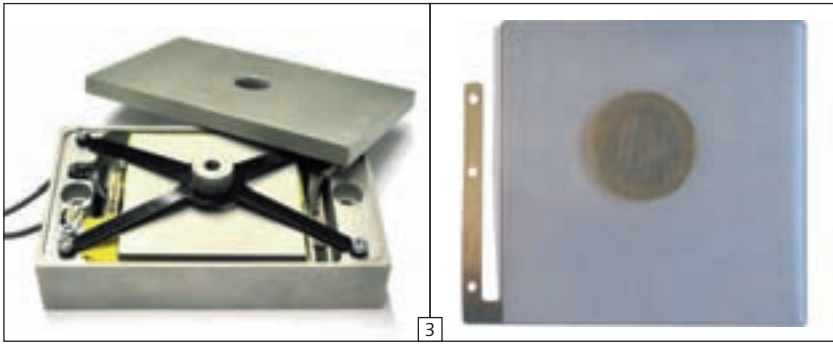


Bild 3: Funktionsmuster des elektroaktiven Elastomerwandlers mit offenem Gehäuse/Elektrode.

stellt sich trotz der InkompRESSIBILITÄT des Elastomermaterials eine makroskopische Kompressibilität des Aktors ein. Die Fläche des Aktors bleibt hierbei im Gegensatz zu Stapelwandlern mit flexiblen Elektroden konstant (Bild 1, unten). Damit können die mechanischen Verluste aufgrund der Dehnungsbehinderung in den Randbereichen bei Anbindung an eine starre Struktur reduziert werden. Zudem werden durch den geringen elektrischen Widerstand der Metallelektroden die resistiven Verluste minimiert. Für eine auf den jeweiligen Anwendungsfall optimierte Auslegung eines Wandlers sind numerische Berechnungsmodelle nötig. Diese erlauben eine Optimierung der Designparameter Elektrodendicke, Elastomerschichtdicke und Lochgeometrie/-anordnung (Bild 2).

#### Aufbau eines Funktionsmusters

Um die Funktionsweise dieses neuen Designansatzes und dessen Verwendbarkeit für aktive Dämpfungselemente zu demonstrieren, wurde am Fraunhofer LBF ein aktorisches Funktionsmuster aufgebaut und charakterisiert. Dieses besteht aus 44 Schichten mit einer aktiven Fläche von 60 x 60 mm. Die Elektroden wurden elektrogalvanisch hergestellt und weisen jeweils circa 280 000 Löcher mit einem Durchmesser von 90 µm auf. Als Polymermaterial wurde industriell hergestellter Naturkautschuk verwendet. Dessen Dielektrizitätskonstante ist zwar etwas niedriger als bei Silikonen und Acrylaten, er zeichnet sich aber durch eine hohe Konstanz hinsichtlich seiner Materialparameter, eine kleine Fehlstellenzahl und damit eine geringe Neigung zu elektrischen Durchschlägen sowie eine leichte Handhabung aus. Der Schichtverbund ist in einem Gehäuse aus Aluminium untergebracht, das eine Membranfeder zum mechanischen Vorspannen des Stapels beinhaltet und für eine berührungssichere Kapselung der spannungsführenden Teile sorgt. Ein Stempel mit Gewindeanschluss realisiert die mechanische Anbindung und kann fest mit der zu lagernden Struktur verschraubt werden. Dieser Funktionsdemonstrator (Bild 3) generiert Dehnungen bis 5 Prozent und Blockierkräfte bis 25 N.

#### Aktive Schwingungskontrolle mit EAE-Aktoren

Schwingfähige Systeme können auf verschiedene Weisen mit elektroaktiven Elastomerwandlern beeinflusst werden. Eine Möglichkeit ist die semi-aktive Änderung der Steifigkeiten von elastischen Lagerkomponenten. Bei EAE-Wandlern kann eine solche Steifigkeitsänderung durch Anlegen einer statischen elektrischen Vorspannung erreicht werden. Dieser Ansatz kommt ohne eine komplexe Regelung aus

und ist mit geringem Energieaufwand realisierbar. Aufgrund des grossen Deformationsvermögens ändert sich bei Elastomerwandlern die Geometrie in einem solchen Mass, dass signifikante Steifigkeitsänderungen zu beobachten sind. Der vorgestellte Designansatz mit gelochten Elektroden ermöglicht ausserdem eine gezielte Beeinflussung der Steifigkeitskennlinie durch die gewählte Lochgeometrie. Häufig werden im Maschinenbau Tilger zur Schwingungsminderung eingesetzt. Das sind schwingungsfähige Zusatzsysteme, die auf eine bestimmte Resonanzfrequenz der zu beruhigenden Struktur ausgelegt sind und diese gezielt tilgen können. Da

solche Tilger nur schmalbandig optimal wirken, lassen sie sich bei Systemen mit sich ändernden Resonanzfrequenzen nur bedingt einsetzen. Mit Hilfe elektroaktiver Elastomerwandler sind adaptive Tilger denkbar, die ohne aufwendige Verstellmechanismen ihre Resonanzfrequenz anpassen können. Am Funktionsdemonstrator wurde dieses Anwendungsszenario bereits erfolgreich demonstriert. Die Resonanzfrequenz eines damit aufgebauten Tilgers liess sich um circa 25 Prozent verstellen.

Neben der besonderen Funktionalität der adaptiven Steifigkeitsverstellung bieten Elastomeraktoren die Möglichkeit, eine aktive breitbandige Schwingungsbeeinflussung durch Integration in einen geschlossenen Regelkreis zu erzielen. Dazu wird die zu beruhigende Struktur mit entsprechender Sensorik ausgestattet, das gemessene Signal von einem Regler ausgewertet, der wiederum das notwendige Steuersignal für den Aktor zur Verfügung stellt. Dabei muss die Nichtlinearität des Aktorverhaltens berücksichtigt und durch geeignete Algorithmen kompensiert werden. Entsprechende Konzepte wurden ebenfalls am LBF entwickelt und am Funktionsdemonstrator getestet.

#### Energiegewinnung mit elektroaktiven Elastomeren

Ein ganz anderes Anwendungsfeld bietet sich für elektroaktive Elastomere, wenn sie nicht aktorisch, sondern generatorisch betrieben werden. Da sie bei mechanischer Belastung eine Kapazitätsänderung aufweisen, lassen sie sich als Generatoren für kapazitive Energy-Harvesting-Konzepte verwenden. Mit Hilfe spezieller Schaltungen kann so aus mechanischen Schwingungen elektrische Energie erzeugt werden. Das ist insbesondere für die Realisierung energieautarker Sensoren ein vielversprechender Ansatz. Zum Beispiel können grosse Strukturen wie Brücken oder Windkraftanlagen mit solchen Sensoren bestückt und so die Erfassung von wichtigen Daten ohne aufwendige kabelgebundene Lösungen ermöglicht werden.

#### Zusammenfassung

Elektroaktive Elastomere stehen erst am Anfang ihrer technologischen Entwicklung. Gerade im Hinblick auf Zuverlässigkeit der Komponenten und serienreife Prozesstechnik besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Im Gegensatz zu anderen Wandlerwerkstoffen versprechen sie jedoch preisgünstige Lösungen, die für den Einsatz in Serienprodukten geeignet sind. Am Fraunhofer LBF wurden Wandler entwickelt, die das Einsatzpotenzial für schwingungstechnische Anwendungen erfolgreich demonstrieren konnten und als Grundlage für die Entwicklung grossserientauglicher Komponenten geeignet sind. **at**