

Elektrisch drücken

Piezokeramische Aktuatoren sind in der Lage, winzige Spannungsänderungen in Positionsänderungen umzuwandeln. Dadurch haben sie sich bei einer Vielzahl technischer Anwendungen bewährt, bei denen es auf eine hochpräzise Steuerung ankommt.

Was haben Tintenstrahldrucker, Dieseldirekteinspritzungen und Computerlaufwerke gemeinsam? Die Antwort liegt im Detail und lautet piezokeramische Aktuatoren. Denn diese Stellglieder, die sich um wenige Mikrometer ausdehnen, wenn an sie eine elektrische Spannung angelegt wird und bei denen bereits die geringste Änderung der



Bei dieser Modelllok hebt und senkt der nur 1,5 Gramm schwere Piezo-Motor den Stromabnehmer naturgetreu. (Foto: Elliptec Resonant Actuator GmbH)

Betriebsspannung in eine Positionsänderung umgewandelt wird, regeln und steuern heutzutage eine Vielzahl von technischen Anwendungen, bei denen es auf höchste Präzision ankommt: etwa bei der Positionierung von Schreib- und Leseköpfen oder der mikrofeinen Dosierung von Flüssigkeiten im Tintenstrahldrucker.

Der piezoelektrische Effekt

Das erste grundlegende Verständnis der Piezoelektrizität¹⁾ wurde 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie entwickelt. Sie beobachteten bei Turmalinkristallen die Erzeugung einer elektrischen Spannung durch mechanische Deformation des Kristalls. Dieser Effekt tritt unterhalb der Curie-Temperatur bei Isolatorkristallen (Dielektrika) auf, die kein Symmetriezentrum besitzen und deren Struktur durch eine oder mehrere polare Achsen gekennzeichnet ist. Die Ursache für die Piezoelektrizität sind unterschiedliche Elastizitätsmodule der kristallinen Untergitter aus positiven und negativen Ionen. Wird auf die zu einer polaren Achse senk-

rechten Fläche z. B. durch einen kräftigen Schlag Druck ausgeübt, so verschieben sich im Kristall die positiven und negativen Gitterbausteine und infolgedessen entsteht ein elektrisches Dipolmoment. Dies äußert sich im Auftreten von (scheinbaren) Ladungen an der Oberfläche des nach außen hin neutralen Kristalls und damit einhergehend einer elektrischen Spannung. Der Piezoeffekt wird u. a. in der Sensortechnik und bei Ultraschallwandlern ausgenutzt, findet sich aber auch in Lautsprechern als Schallgeber oder in Feuerzeugen: die durch einen kräftigen Schlag auf den Kristall erzeugten Spannungen reichen zur Funkenbildung aus und entzünden das ausströmende Gas.

Piezoangetriebene Aktuatoren dagegen nutzen die Umkehrung des piezoelektrischen Effektes aus, nämlich das Phänomen, dass beim Anlegen eines externen elektrischen Feldes an den Kristall in Richtung einer polaren Achse die Ionen in den Einheitszellen durch die elektrostatischen Kräfte ausgerichtet werden und der Kristall sich im Mikrometerbereich ausdehnt, d. h. elektrische Spannung wird direkt in Kraft und Hub umgewandelt. Bleibt die Spannung aus, so zieht sich der Kristall wieder zusammen. Dieser Effekt (Elektrostriktion) geht auf theoretische Arbeiten von Gabriel Lippmann zurück und wurde 1881 von den Brüdern Curie experimentell nachgewiesen.

In der Automobilindustrie hat der Piezo-Aktuator die Dieseldirekteinspritzung revolutioniert. Hier wird der Kraftstoff in der Common-Rail-Einspritzung von einer Pumpe hochverdichtet und den Einspritzventilen über eine gemeinsame Leitung, daher die Bezeichnung „Common-Rail“, zugeführt. Die Präzisionsventile werden mit einem Piezo-Aktuator, der direkt in den

Injektor integriert ist, geöffnet und geschlossen. Um den für die Steuerung des Ventils nötigen Hub und die erforderliche Kraft zu erzielen, werden rund 300 je ein Zehntel Millimeter dicke Piezokristalle zu einem Aktuator verbunden. Gegenüber den konventionellen Magnetventilen haben die Piezo-gesteuerten Ventile den Vorteil, dass sie sich bis zu fünfmal schneller schalten lassen und somit der Einspritzvorgang in mehrere Einzelvorgänge unterteilt werden kann. Dies sowie der Einspritzdruck von bis zu 1600 mbar sorgen dafür, dass der Kraftstoff feiner dosiert und im Brennraum homogener verteilt wird. Der damit einhergehende sanfte Anstieg des Verbrennungsdrucks lässt den Motor leiser laufen und führt bei gesteigerter Motorleistung zu einem niedrigeren Kraftstoffverbrauch und geringerer Schadstoffemission.

Die Materialien

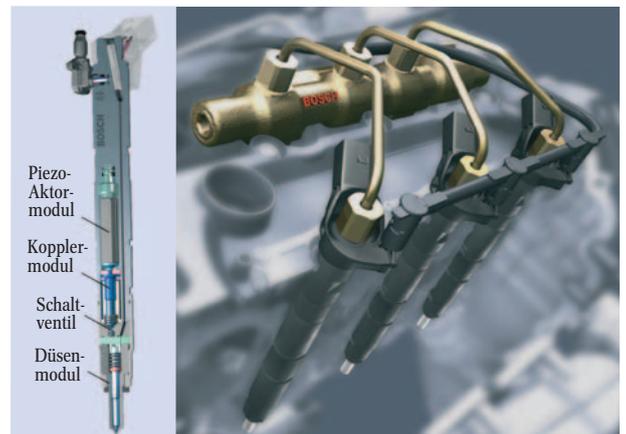
Außer den natürlichen piezoelektrischen Kristallen wie Quarz, Turmalin oder Zinkblende zeigen auch einige Kunststoffe (Polyvinylidenfluorid, PVDF) und bestimmte keramische Verbindungen gute piezoelektrische Eigenschaften. Die heute wichtigsten piezoelektrischen Keramiken basieren auf dem oxidischen Mischkristallsystem Bleizirkonat und Bleititanat, das als Bleizirkonattitanat bezeichnet wird. Sie erreichen eine Dehnung von ca. 0,1 bis 0,15 % bei einer zulässigen Feldstärke von 1 bis 2 kV pro mm.

Die polykristallinen Keramiken, die zu den Ferroelektrika gehören, bestehen aus einer Vielzahl von Kristalliten bzw. Domänen, in denen die permanenten Dipole schon ausgerichtet sind. Allerdings zeigen diese nach dem Sinterprozess noch keine einheitliche Orientierung: Dadurch ist die Keramik als makroskopischer Gesamtkörper zu-

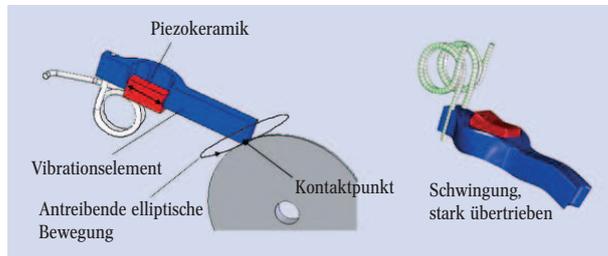
Dr. Katja Bammel,
science & more
redaktionsbüro,
E-Mail: kb@science-
and-more.de

¹⁾ Das Wort *piezo* ist aus dem Griechischen abgeleitet und bedeutet sowohl „Druck“ oder „drücken“.

Injektor bei der Common-Rail-Einspritzung: Der Piezo-Aktuator öffnet und schließt das Ventil bis zu fünfmal schneller als ein konventionelles Magnetventil. (Quelle: Bosch)



nächst noch isotrop und zeigt kein piezoelektrisches Verhalten. Um die Keramik zu „polen“, wird bei Temperaturen knapp unterhalb der Curie-Temperatur ein Gleichfeld angelegt, unter dessen Einfluss die elektrischen Dipole eine gemeinsame Ausrichtung erhalten, die auch nach dem Abschalten des Feldes als remanente Polarisation größten-



Eine Stahlfeder drückt die Resonatorspitze auf das anzutreibende Element. Dabei kann es sich um ein Rad (rotativer Antrieb) oder um einen Stab (lateraler Antrieb) handeln (Quelle: Elliptec Resonant Actuator GmbH).

teils erhalten bleibt und mit einer Längenänderung verbunden ist. Legt man an die jetzt polarisierte Keramik ein elektrisches Feld in Polarisationsrichtung an, so verstärkt sich die Ausrichtung der entspannten Dipole wieder, und der Kristall wird deformiert: er dehnt sich längs der polaren Achse im Nanometerbereich aus, wobei die Längenänderung von der Stärke des Feldes abhängt. Je nach Feldstärke und -richtung kann sowohl ein piezoelektrischer Längseffekt als auch ein Quereffekt auftreten und beide Effekte können sich auch überlagern (elliptische Ausdehnungsmode).

Piezo statt Elektro

Motoren, die mit Piezoantrieb arbeiten, waren bis vor einigen Jahren kaum in Massenprodukten zu finden. Schuld daran waren Stückpreise von bis zu 400 Euro, die einer großindustriellen Verbreitung im Weg standen und dafür sorgten, dass z. B. in Klimaanlage zum Öffnen der Lüftungsklappen nach wie vor die kostengünstigeren Elektromotoren zum Zug kamen. Gegenüber den Elektromotoren aber haben Piezomotoren einige Vorteile: Sie sind wesentlich kompakter und benötigen zum Umsetzen der Geschwindigkeiten kein Getriebe. Und auch das bei den Elektromotoren typische „Ruckeln“ bei der Bewegung entfällt, da Piezomotoren aufgrund der Längenänderungen im Mikrometerbereich und der hohen Wiederholungsrate sehr präzise und gleichmäßig arbeiten.

Nun droht dem Elektromotor aber doch Gefahr, denn vermehrt drängen in den letzten Jahren preisgünstige Piezo-Motoren auf den Markt: Seit die Konstruktion der Motoren und die Herstellung der piezoelektrischen Keramiken vereinfacht werden konnte und sich die Stückpreise bei einigen Euro eingependelt haben, steigt die Nachfrage

nach diesen Miniaturantrieben an. Nun wird ein Einsatz in Massenprodukten möglich, bei denen mit wenig Kraftaufwand Kleinteile verschoben werden sollen und die bisher nicht als motorisierbar galten.

Ein schönes Beispiel dafür ist der Motor der Firma Elliptec Resonant Actuator GmbH: Der fingernagelgroße und etwa 1,5 Gramm leichte Motor eignet sich für laterale und rotatorische Stellaufgaben auf kleinstem Raum. Einen ersten Einsatz fand er schon in einer Modell-eisenbahnlok, in der er den Stromabnehmer naturgetreu heben und senken kann.

Bei diesem Motor wird eine etwa einen halben Zentimeter lange vielschichtige Piezokeramik mithilfe eines Mikrocontrollers und eines Transistors mit elektrischer Spannung versorgt: Das angelegte elektrische Wechselstromfeld erzeugt eine mechanische Verformung des Piezomaterials, das sich um weniger als einen Mikrometer ausdehnt. Bleibt die Ansteuerspannung aus, so zieht sich das Piezoelement, das im Sub-ms-Bereich auf Änderungen der Betriebsspannung reagiert, wieder zusammen. Je nach Anwendung findet das Wechselspiel zwischen Ausdehnung und Zusammenziehen zwischen 50 000 und 100 000 Mal pro Sekunde statt.

Um die winzigen Ausdehnungen des Piezoelementes zu vergrößern, wird es in einen etwa zwei Zentimeter langen Aluminiumresonator eingepasst, der die Form eines Schlüssels hat. Eine Stahlfeder sorgt für den nötigen Druck der Resonatorspitze auf das anzutreibende Element und im Kontaktpunkt sorgen Reibungskräfte für einen linearen oder rotativen Antrieb.

KATJA BÄMMEL