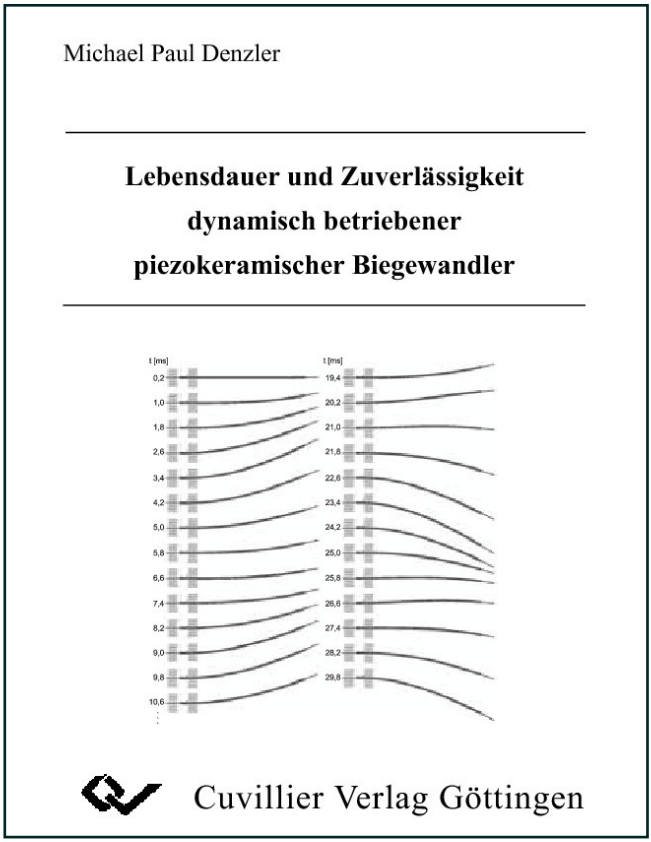
Michael Paul Denzler (Autor)

Lebensdauer und Zuverlässigkeit dynamisch betriebener piezokeramischer Biegewandler



https://cuvillier.de/de/shop/publications/2940

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

1 Einleitung

Mit zunehmender Miniaturisierung und Dynamisierung von elektrischen, optischen und feinmechanischen Systemen wächst der Bedarf an hochpräzisen und zuverlässigen Stell- und Positionierelementen (Aktoren). Gegenüber konventionellen Systemen wie elektromechanischen Stellelementen haben Aktoren aus piezoelektrischer Keramik eine Reihe von Vorteilen. Piezokeramische Aktoren haben eine hohe Stellgeschwindigkeit und Positiniergenauigkeit sowie einen vergleichsweise geringen Energieverbrauch bei kleiner Baugröße. Weiterhin sind Piezoaktoren elektronisch regelbar und können je nach Bauform beträchtliche Stellkräfte liefern.

Aufgrund dieser herausragenden Eigenschaften und der Möglichkeit kostengünstiger Fertigung werden piezokeramische Aktoren heute in vielen Bereichen eingesetzt. Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über wichtige Anwendungen in Optik, Medizin, Feinwerktechnik und Maschinenbau.

Tabelle 1.1: Beispiele für die Anwendung von piezokeramischen Aktoren (nach [Jen96])

Optik	**Medizin**	**Feinwerktechnik**	**Maschinenbau**
Laserabstimmsysteme	Blindenlesegeräte (Braille-Aktoren)	Mikromanipulatoren (Tunnelmikroskopie)	Feinstvorschub in Dreh- und Fräsmaschinen
Interferometrie, Holografie	Dosiereinrichtungen, Mikrodüsen	Linear- und Rotationsmotoren	Steuerung von Extrudierdüsen
Positionierung von Lichtwellenleitern	Ultraschall-Bildgebungsverfahren	Antriebe für Tintenstrahl- und Nadeldrucker	Unrunddrehen, -bohren und -schleifen
Spiegelnachführung und Strahlablenkung	Nierenstein-zertrümmerung	Einspritzventile (KFZ-Motoren)	Aktive Schwingungsdämpfung
Röntgen- und Mikrolithografie	Ultraschall-Schneide- und Reinigungsgeräte	Einzelfadensteuerung in Textilmaschinen	Dynamische Schwingerreger
Autofokussysteme			

Als Nachteile von Piezokeramiken sind die kleinen Dehnungen in der Größenordung von wenigen Promille und die dafür benötigten hohen elektrischen Felder von ca. 1 bis 2 kV/mm zu nennen. Aufgrund ihres Designs können verschiedene Piezoaktoren dennoch verhältnismäßig große Stellwege bei relativ niedrigen Ansteuerspannungen erreichen. Die für Massenanwendungen heute wichtigsten Piezoaktoren sind der Vielschicht- oder Multilayerstapelaktor (engl.: multilayer stack) und der Biegewandler.

Ein Vielschichtstapelaktor besteht aus einem monolithisch gesinterten Stapel mehrerer hundert dünner Piezokeramikschichten mit dazwischen liegenden Elektroden. Bei 30 mm Höhe, einem Querschnitt von 7 × 7 mm^2 und einer Schichtdicke von 80 µm werden bei 160 V Ansteuerung ein Hub von etwa 40 µm und eine Blockierkraft von ca. 2,2 kN erreicht. Solche Multilayerstapelaktoren werden mit wachsenden Stückzahlen von heute bereits über 2 Mio. pro Jahr für Einspritzventile in Dieselmotoren mit Common-Rail-System gefertigt [Bar01].

Bild 1.1: Segmente mit bis zu 32 Biegewandlern der Argillon GmbH für die Einzelfadensteuerung in Textilmaschinen

Kommerzielle Biegewandler bestehen häufig aus zwei piezokeramischen Schichten und einer passiven Zwischenschicht. Unter elektrischer Ansteuerung einer der beiden Piezokeramikschichten führt der piezoelektrische Quereffekt, ähnlich wie beim Bimetall, zur Biegung des Verbundes. In der Regel werden Biegewandler an einem Ende fixiert. Am freien Ende werden Auslenkungen von mehreren hundert Mikrometern und Kräfte von einigen hundert mN erzeugt. Beispiele für industrielle Anwendungen von piezokeramischen Biegewandlern sind Blindenlesegeräte [Sie97], Relais [Gun76, Kie98] sowie hydraulische und pneumatische Mikropumpen und Ventile [Spe78, Smi90, Koc97, Mor00, Lim00, Spa00, Schm02]. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist die Textilindustrie. Bild 1.1 zeigt Segmente mit Biegewandlern der Argillon GmbH[1], die zur Einzelfadensteuerung in Textilmaschinen verwendet werden [Sie97, Ket01]. Die Argillon GmbH fertigt gegenwärtig etwa 1,2 Mio. Biegewandler pro Jahr für Blindenlesegeräte, 900 000 für Textilmaschinen und etwa 220 000 für pneumatische Ventile [Zip02]. Insbesondere für die beiden letzten Anwendungen wird großes Wachstumspotential gesehen.

[1] Bis 01.08.2002 Geschäftsbereich PG CE P der Siemens AG

Im Bereich der industriellen Massenanwendung besteht die Forderung nach zuverlässigen und wartungsarmen Systemen. Die daraus resultierende notwendige Sicherung der Zuverlässigkeit von Piezoaktoren stellt eine wesentliche Herausforderung dar. Unter *Zuverlässigkeit* wird hier die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass ein Bauteil „unter gegebenen Betriebsbedingungen während einer bestimmten Zeit bestimmte Mindestwerte nicht unterschreitet“ [VDA84]. Diese Unterschreitung bedeutet den *Ausfall* des betreffenden Bauteils. Die Zeit bis zum Ausfall wird als *Lebensdauer* bezeichnet. Für piezokeramische Biegewandler wird eine Lebensdauer von $1 \cdot 10^9$ Zyklen mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 10^{-5} gefordert[2].

Zur Vorhersage der Lebensdauer von piezokeramischen Aktoren ist die Kenntnis der Schädigungsarten und deren zeitlicher Entwicklung notwendig. Bislang liegen umfassende Untersuchungen zu Schädigungsphänomenen nur für Multilayerstapelaktoren vor. Die beobachteten Schädigungsarten können in mechanische Schäden wie Mikro- und Makrorissbildung [Abu94, Zic95, Weit00] und in elektrochemische Degradationen in Form von Elektroden-Migrationen mit zunehmender Leitfähigkeit der Piezokeramik eingeteilt werden [Tho98, Nag99].

Über Schädigungsphänomene in Biegewandlern oder Lebensdaueruntersuchungen zu diesen Aktoren liegen bislang keine Veröffentlichungen vor. Aus dem Feldbetrieb ist bekannt, dass die elektrische und mechanische, zum Teil stark inhomogene Belastung zum sofortigen oder allmählichen Ausfall in Form von unzureichender Auslenkung und/oder Kurzschlüssen zwischen den Elektroden führen kann.

Das **Ziel dieser Arbeit** ist es, die Lebensdauer von piezokeramischen Biegewandlern unter Einsatzbedingungen quantitativ vorauszusagen. Hierzu werden Dauerversuche bei unterschiedlichen Lasten bis zum Ausfall der Bauteile durchgeführt. Mit Hilfe von Schadensanalysen werden die Schadensmechanismen und ihre zeitlichen Entwicklung aufgeklärt. Dabei tragen numerische Analysen zum Verständnis des dynamischen Verhaltens der Belastungssituation der Biegewandler bei. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird ein exemplarischer Überlasttest (Prooftest) definiert und verifiziert. Mit Hilfe eines solchen Prooftests kann eine Mindestlebensdauer von piezokeramischen Biegewandlern unter bestimmten Betriebsbedingungen garantiert werden.

---

[2] Neuerdings werden sogar Lebensdauern von bis zu $3 \cdot 10^9$ Zyklen gefordert

2 Grundlagen

2.1 Piezoaktorik

Für die Funktion von Piezoaktoren grundlegend sind der piezoelektrische und der ferroelektrische Effekt. Der piezoelektrische Effekt wurde 1880 von den Brüdern P. und J. Curie an natürlichen Kristallen wie Quarz entdeckt. Beim sogenannten direkten Piezoeffekt werden infolge von Zug oder Druck in bestimmte Richtungen Ladungen auf bestimmten Kristallflächen angesammelt. Bei der umgekehrten Erscheinung, dem inversen oder indirekten piezoelektrischen Effekt, verursacht eine elektrische Spannung an den entsprechenden Grenzflächen eine Längenänderung des Kristalls.

Eine Teilgruppe der Piezoelektrika sind die sogenannten Ferroelektrika. Der deutlich größere ferroelektrische Effekt wurde 1921 an Rochelle-Salz entdeckt. Die technische Nutzung in der Aktorik und Sensorik wurde wesentlich durch Entdeckung und Erforschung der Ferroelektrizität in polykristalliner Keramik von etwa 1940 bis 1965 vorangetrieben.

Im Folgenden werden der piezoelektrische und der ferroelektrische Effekt erläutert und die für diese Arbeit wichtigen Begriffe eingeführt. Nach einem Überblick über die wesentlichen Aktorprinzipien werden unterschiedliche Bauformen und Anwendungen von piezokeramischen Biegewandlern dargestellt.

Für eine ausführliche Darstellung der Piezo- und Ferroelektrizität sei auf Standardwerke und Übersichtsartikel wie [Jaf71, Wer74, Heyw84, Xu91, Hae99] verwiesen. Weitergehende Informationen zur Piezoaktorik findet der interessierte Leser neben den Literaturangaben im Text in [Rus95, Jen98, Uch99].

2.1.1 Piezoelektrischer Effekt

Für das Auftreten von Piezoelektrizität ist die Existenz mindestens einer polaren Achse notwendig. Entlang einer polaren Achse gibt es keine Zentral- bzw. Inversionssymmetrie. Die Kristallographie teilt die Vielzahl der möglichen Kristalle nach Symmetriegesichtspunkten in 32 sogenannte Punktgruppen ein. Davon sind 21 Gruppen nicht zentralsymmetrisch und haben mindestens eine polare Achse. Bis auf eine Ausnahme mit besonderen Symmetrieeigenschaften sind alle nicht zentralsymmetrischen Gruppen piezoelektrisch [Xu91].

Der piezoelektrische Effekt wird im Folgenden am Beispiel von Quarz (SiO_2) veranschaulicht [Ber87]. Die dreidimensionale Ladungsverteilung in der Strukturzelle von Quarz kann im Querschnitt vereinfacht wie in Bild 2.1a dargestellt werden. Dabei sind in den kleinen Kreisen jeweils zwei O-Atome mit einer vierfach negativen Gesamtladung zusammengefasst. Die großen Kreise stellen die vierfach positiv geladenen Si-Atome dar. Eine Druckspannung ω in Richtung der polaren Achse verschiebt die Ladungsschwerpunkte entsprechend Bild 2.1b aus ihrem gemeinsamen Zentrum. Auf den Elektroden sammeln sich Oberflächenladungen entgegengesetzter Polarität. Im Kristall wird eine dielektrische Verschiebung D bzw. eine Polarisation P erzeugt. Man spricht vom *direkten Piezoeffekt*, und es gilt in erster Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen D und ω:

$$D \mid d_p \omega \ . \tag{2.1}$$

Der Proportionalitätsfaktor d_p wird als Ladungskonstante bezeichnet und trägt die Einheit [C/N]. Sind die Kristalloberflächen mit Elektroden A und B versehen, kann eine elektrische Spannung gemessen werden.

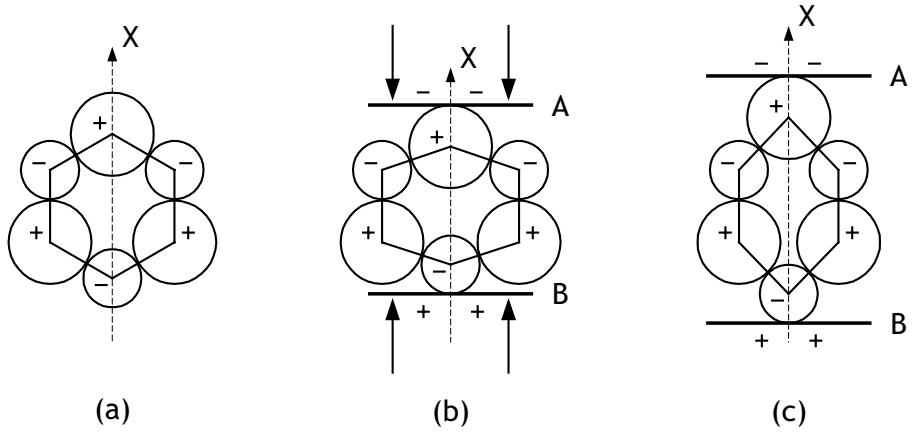


Bild 2.1: Veranschaulichung des piezoelektrischen Effekts

Bei Aufbringen von Ladungen entsprechend Bild 2.1c sorgt der *inverse Piezoeffekt* für eine Dehnung des Kristalls in Richtung der polaren Achse X. Das elektrische Feld E zwischen den Elektroden verschiebt die Ladungsschwerpunkte und bewirkt damit die relative Längenänderung κ. Es gilt

$$\kappa \mid d_p E \tag{2.2}$$

mit der gleichen Proportionalitätskonstanten d_p wie beim direkten Piezoeffekt (2.1).

Zusätzlich verursacht bei Anliegen eines elektrischen Feldes die Elektrostriktion eine Längenänderung, die dem Quadrat des äußeren elektrischen Feldes bzw. dem Quadrat der

dielektrischen Verschiebung proportional ist. Da die in allen Dielektrika wirkende Elektrostriktion in der Regel sehr klein ist, kann sie gegenüber dem piezoelektrischen Effekt vernachlässigt werden.

2.1.2 Ferroelektrischer Effekt

Eine Untergruppe der Piezoelektrika sind die ferroelektrischen Stoffe. Von den 20 Kristallklassen mit piezoelektrischen Eigenschaften haben zehn Klassen nur eine polare Achse. Die meisten dieser Kristalle zeigen längs dieser polaren Achse in bestimmten Temperaturbereichen eine spontane Polarisation, die durch ein elektrisches Feld umgekehrt werden kann. In Analogie zum Ferromagnetismus werden solche Stoffe als Ferroelektrika bezeichnet, da sie im elektrischen Wechselfeld eine Hysterese mit Sättigung und Remanenz zeigen. Ferroelektrische Stoffe können eine sehr hohe Permittivitätszahl $e_{\#}$ bis 10000 haben, die von der Feldstärke und der Temperatur abhängig ist. Beispiele für ferroelektrische Materialien sind das bereits erwähnte Rochelle-Salz und die technisch bedeutsamen polykristallinen Keramiken Bariumtitanat $BaTiO_3$ und Blei-Zirkonat-Titanat $PbZr_xTi_{(1-x)}O_3$ (PZT).

Die Erscheinung der Ferroelektrizität existiert nur in bestimmten Temperaturbereichen. Beim Überschreiten der Grenzen dieser Bereiche finden Phasenübergänge statt. Die Übergangstemperatur vom para- in den feroelektrischen Zustand wird in Analogie zum Ferromagnetismus als Curie-Temperatur T_C bezeichnet. Unterhalb von T_C sind die Kristalle ferroelektrisch und tragen ein Dipolmoment. Dieses resultiert aus der Kristallstruktur, in der die Schwerpunkte positiver und negativer Ladungen räumlich getrennt sind. In Richtung dieser spontanen Polarisation ist die Einheitszelle etwas länger als senkrecht dazu. Dies wird als spontane Dehnung bezeichnet. Je nach stöchiometrischer Zusammensetzung ist die Kristallstruktur z.B. tetragonal oder rhomboedrisch. Mit dem Phasenübergang bei Überschreiten der Curie-Temperatur ändert sich die Kristallstruktur (wird z.B. kubisch) und das ferroelektrische Verhalten verschwindet.

Betrachtet man ferroelektrische Einkristalle bzw. Körner eines polykristallinen Gefüges, so findet man zusammenhängende Bereiche gleicher Polarisation, die als ferroelektrische Domänen bezeichnet werden. Die Grenzen zwischen den Domänen (Domänenwände) erstrecken sich nur über wenige Gitterzellen. Die Kristallperiodizität erlaubt je nach Struktur nur bestimmte Winkel zwischen den Polarisationen benachbarter Domänen. Zum Beispiel haben tetragonale Strukturen 90°-Domänen und rhomboedrische 71°- und 109°-Domänen.