

Agnes Eydam\*, Gunnar Suchanek und Gerald Gerlach

# Polarisationsbestimmung integrierter Piezokeramiken mittels Wärmeschwingungen und Wärmeimpulsen

Evaluation of the polarization state of integrated piezoceramics by thermal oscillations and thermal pulses

DOI 10.1515/teme-2017-0033

**Zusammenfassung:** In Leichtbaustrukturen wird der Polarisationszustand von integrierten Piezokeramiken mittels thermischer Anregung zerstörungsfrei geprüft. Wärmeschwingungen (Laser-Intensitäts-Modulations-Methode) oder Wärmeimpulse führen zu einem pyroelektrischen Strom im Frequenz- bzw. Zeitbereich. Das Frequenzspektrum wird analytisch mit Hilfe thermischer Relaxationszeiten, die den Wärmeverlust charakterisieren, beschrieben. Die Signale im Zeitbereich werden fourier-transformiert und mit der Übertragungsfunktion der Messstrecke korrigiert. Außerdem wird die mittlere Temperatur der Probe analytisch und numerisch ermittelt, um daraus das Zeitsignal des Stromes abzuleiten.

**Schlüsselwörter:** Polarisation, Laser-Intensitäts-Modulations-Methode, Wärmepuls-Methode, Piezokeramik.

**Abstract:** In lightweight structures, the polarization state of integrated piezoceramics is evaluated non-destructively by thermal excitation. Thermal oscillations (laser intensity modulation method) or thermal pulses lead to a pyroelectric current in frequency or time domain. The frequency spectrum is described by an analytical model with thermal relaxation times which characterize the heat losses. The signals in time domain are Fourier-transformed and corrected by the transfer function of the measurement set-up. Furthermore, the

mean temperature of the sample is determined analytically and numerically to derive the current in time domain.

**Keywords:** Polarization, laser intensity modulation method, thermal pulse method, piezoceramic.

## 1 Einleitung

Piezoelektrische Sensoren und Aktoren werden in Leichtbaustrukturen aus Faserverbundkunststoff und Aluminium stofflich integriert, um intelligente aktive Strukturbauteile zu schaffen. Anwendungen sind die aktive Schwingungs- und Geräuschkontrolle (z.B. im Fahrzeug- und Maschinenbau) [1], die Strukturüberwachung sicherheitsrelevanter Systeme (z.B. von Flugzeugtragflächen) [2] und die permanente Zustandsüberwachung (z.B. von Flügeln in Windkraftanlagen) [3]. Andererseits führen thermische und mechanische Belastungen während des Integrationsprozesses zur teilweisen Depolarisation der Piezokeramiken. Ziel der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen ist deshalb die zerstörungsfreie Prüfung des Polarisationszustandes der integrierten Piezomodule.

Die Bewertung von Piezokeramiken in der Massenfertigung erfolgt dem Stand der Technik entsprechend zumeist mittels Impedanzspektroskopie, wobei die piezoelektrischen Konstanten aus elektromechanischen Kopplungsfaktoren, Permittivitäten und elastischen Konstanten ermittelt werden [4]. Durch die Einbettung der Piezomodule ändern sich jedoch die mechanischen Randbedingungen, wodurch ein direkter Vergleich solcher Kenngrößen in verschiedenen Integrationszuständen erschwert wird. Im Unterschied zur Impedanzspektroskopie erfolgt bei den thermischen Messverfahren auf Grundlage des pyroelektrischen

\*Corresponding author: Agnes Eydam: TU Dresden, Institut für Festkörperelektronik, 01062 Dresden, agnes.eydam@tu-dresden.de  
Gunnar Suchanek, Gerald Gerlach: TU Dresden, Institut für Festkörperelektronik, 01062 Dresden, gunnar.suchanek@tu-dresden.de, gerald.gerlach@tu-dresden.de

Effekts ein direkter Nachweis der remanenten Polarisation. Außerdem ist eine orts aufgelöste Bestimmung der Polarisation sowohl in Tiefenrichtung als auch in der Fläche möglich.

Bei der Laser-Intensitäts-Modulations-Methode (LIMM) wird die Probe mit einem intensitätsmodulierten Laser bestrahlt und das Spektrum des pyroelektrischen Stromes im Frequenzbereich ermittelt [5]. Die Wärmepuls-Methode hingegen basiert auf der Nutzung kurzer Laserpulse und dem pyroelektrischen Signal im Zeitbereich [6]. Die Herausforderung bei der Untersuchung eingebetteter Piezokeramiken liegt zum einen im Einfluss der Deckschicht, welche die thermische Anregung stark dämpft und daher zu sehr kleinen Messsignalen führt. Zum anderen erfordert der Anspruch der Großserienfähigkeit ein automatisierbares Messverfahren mit geringem Zeitaufwand.

## 2 Laser-Intensitäts-Modulations-Methode (LIMM)

### 2.1 Messaufbau

Die Probe wird je nach Größe durch eine einzelne Laserdiode (LCU98A041A, Laser Components GmbH, Olching, Germany) oder ein Array aus sechs Dioden mit einer Wellenlänge von 980 nm und einer Leistung von 14 mW, rechteckmoduliert mit Frequenzen bis zu 1 kHz, bestrahlt. Amplitude und Phase bzw. Real- und Imaginärteil des pyroelektrischen Stromes werden durch einen Impedance/Gain-Phase Analyzer (Solartron 1260, Solartron Analytical, Farnborough, UK) bestimmt. Um die Messunsicherheit zu verringern, wird der Mittelwert aus 30 bis 50 Messungen gebildet.

### 2.2 Theorie

Der pyroelektrische Strom wird durch folgende grundlegende Beziehung beschrieben [7]:

$$I(\omega) = \frac{A}{d} \int_0^d p(z) \frac{\partial}{\partial t} \Theta(z, t, \omega) dz, \quad (1)$$

wobei  $z$  die Position in Tiefenrichtung beschreibt,  $p(z)$  die Verteilung des pyroelektrischen Koeffizienten,  $\Theta = T - T_0$  die Temperaturdifferenz zur Umgebung,  $t$  die Zeit und  $\omega$  die Kreisfrequenz.

Hier wird das gemessene Frequenzspektrum des pyroelektrischen Stromes mit einem analytischen Modell beschrieben, das die Wärmeverluste einer harmonisch erwärmten piezoelektrischen Platte mit einzelnen Relaxationszeiten oder einer kontinuierlichen Verteilung von Relaxationszeiten charakterisiert. Die wertediskrete thermische Relaxationszeit beträgt:

$$\tau_{th} = \frac{c\rho d}{2G} \quad (2)$$

mit der spezifischen Wärmekapazität  $c$ , der Dichte  $\rho$ , der Dicke  $d$  der piezoelektrischen Schicht und dem flächenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $G$ .

Die thermische Relaxation konnte analog zur dielektrischen Relaxation mit dem Debye-Modell oder erweiterten Modellen wie der Havriliak-Negami-Funktion beschrieben werden [8]. Die pyroelektrische Antwort einer homogen polarisierten Platte mit einer einzelnen thermischen Zeitkonstante wird durch ein Debye-ähnliches Modell beschrieben [9]:

$$I_{\sim}(\omega) = \frac{\Phi_0 A}{c\rho d} p_0 \frac{i\omega\tau_{th}}{1+i\omega\tau_{th}}, \quad (3)$$

wobei  $p_0$  der mittlere pyroelektrische Koeffizient,  $\Phi_0$  der absorbierte Wärmefluss an der Oberfläche der Platte und  $A$  deren Fläche sind.

Eine inhomogene Polarisationsverteilung wird durch Erweiterung des Modells mit räumlich verteilten pyroelektrischen Koeffizienten  $p_n$  in Betracht gezogen [9]:

$$I_{\sim}(\omega) = \frac{\Phi_0 A}{c\rho d} \left( p_0 \frac{i\omega\tau_{th}}{1+i\omega\tau_{th}} + \sum_{n=1}^{\infty} p_n \frac{i\omega\tau_d/n^2}{1+i\omega\tau_d/n^2} \right), \quad (4)$$

wobei  $\tau_d = d^2/\kappa a$  die thermische Diffusionszeit beschreibt und  $a$  die Temperaturleitfähigkeit des Materials.

Wird eine kontinuierliche Verteilung von Relaxationszeiten berücksichtigt, dann wird Gl. (3) verallgemeinert zu [10]:

$$I_{\sim}(\omega) = \frac{\Phi_0 A}{c\rho d} p_0 \left[ 1 - \frac{1}{[1+(i\omega\tau_{th})^\alpha]^\beta} \right], \quad (5)$$

wobei die empirischen Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  entsprechend der Havriliak-Negami-Relaxation die Breite und Asymmetrie der Verteilungsfunktion beschreiben.

### 2.3 Ergebnisse

Der Betrag der absorbierten Laserstrahlung ist vom Material der Deckschicht abhängig. PZT-Platten und PZT-Faserkomposite wurden in Thermoplastverbunde, Epo-

xidharz, Niedertemperatur-Einbrand-Keramiken (Low Temperature Cofired Ceramics - LTCC) und Aluminiumdruckguss eingebettet. Die Thermoplaste sind lichtdurchlässig, so dass die Laserstrahlung direkt in der oberen Elektrode der Piezokeramik absorbiert wird. LTCC und Aluminium hingegen absorbieren selbst das Laserlicht. Die Temperaturschwingung wird daher in der Deckschicht exponentiell abgeschwächt, bevor sie die Piezokeramik erreicht.

Die Messergebnisse werden am Beispiel eines LTCC-PZT-Moduls vorgestellt. Das Modul besteht aus einer zuvor gesinterten PZT-Platte (CeramTec Sonox® P53 mit einer Größe von  $25 \times 10 \times 0,2 \text{ mm}^3$ ) die in LTCC-Schichten eingebettet wurde ( $45 \times 20 \times 0,7 \text{ mm}^3$ , Heraeus HeraLock® Tape-HL2000) [11]. Abb. 1 stellt das gemessene Spektrum des pyroelektrischen Stromes im Vergleich zum Fit mit Gl. (4) dar. Zwischen 0,1 Hz und 10 Hz ist das charakteristische Verhalten einer einzelnen thermischen Relaxationszeit (Debye-Modell mit  $\alpha = 1$  und  $\beta = 1$ ) erkennbar, welche die Wärmeverluste des PZT an das umgebende LTCC beschreibt. Die Relaxationszeit beträgt 0,16 s, woraus sich ein flächenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient von  $3083 \text{ W/m}^2\text{K}$  an dem PZT/LTCC-Interface ergibt. Durch Berücksichtigung einer leicht inhomogenen Polarisationsverteilung mit  $p_1 = -p_0/5$  wurde der Fit im höheren Frequenzbereich genauer. Für Frequenzen oberhalb von 100 Hz wird nur die obere LTCC-Schicht erwärmt und das hier verwendete einfache Modell ist nicht mehr gültig.

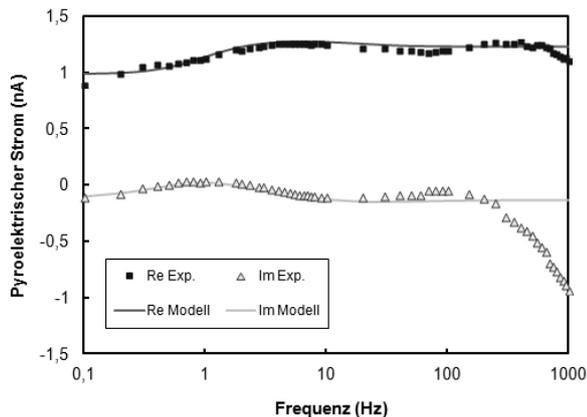


Abb. 1: Spektrum des pyroelektrischen Stromes eines LTCC-PZT-Moduls im Vergleich zum Fit mit Gl. (4).

Ein Makrofaserkomposit-Aktor (MFC-Aktor) ist ein Beispiel für eine breite Verteilung der Relaxationszeiten. Makrofaser aus PZT wurden in Epoxidharz eingebettet, mit Kupferelektroden kontaktiert und von einem Kaptonfilm bedeckt. Durch die komplexe Struktur ergeben sich Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien, so

dass die Wärmeverluste der gesamten Struktur an die Umgebung am besten durch eine Cole-Cole-Verteilung mit  $\alpha = 0,4$  beschrieben werden (siehe Abb. 2). Mithilfe der Finite-Elemente-Methode wurde das thermische Verhalten des MFC auf ein einfaches eindimensionales Modell zurückgeführt, da sich laterale Wärmeströme als vernachlässigbar erwiesen [12].

Die untersuchten Piezomodule wiesen im Allgemeinen eine homogene Polarisierung auf.

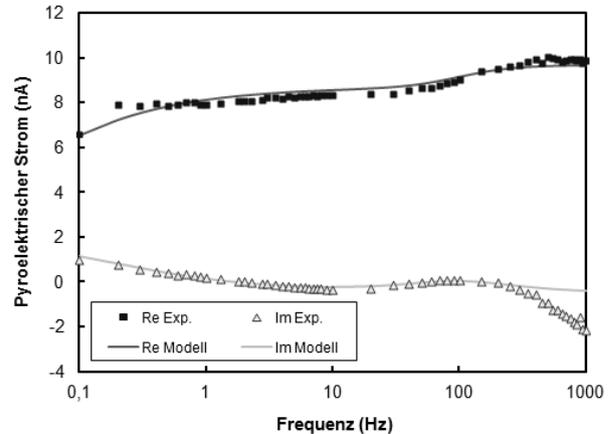


Abb. 2: Spektrum des pyroelektrischen Stromes eines MFC-Aktors im Vergleich zum Fit mit Gl. (5).

### 3 Wärmepuls-Methode

Durch den Einsatz der Wärmepuls-Methode statt LIMM kann die Messzeit wesentlich verkürzt werden, weil der pyroelektrische Strom im Zeitbereich sofort das ganze Spektrum umfasst. Es werden zwei Ansätze verfolgt: Entweder wird der Strom durch die Fouriertransformation in den Frequenzbereich überführt und das entstandene Spektrum wird mit der Übertragungsfunktion der Messstrecke korrigiert. Dann erfolgt wiederum ein Vergleich mit den von LIMM bekannten Modellen, oder die Auswertung erfolgt im Zeitbereich, wobei die Temperaturverteilung nach Erwärmung durch den Laser-Impuls und der daraus resultierende Strom mit analytischen und numerischen Modellen beschrieben werden.

#### 3.1 Messaufbau

Wärmepulsmessungen wurden ausgeführt, indem die Proben mit einer Puls laserdiode (LC905D3S3J09S, Laser Components GmbH, Olching, Germany) mit einer Wellenlänge von 905 nm, einer Spitzenleistung von 55 W,

einer Pulsbreite von 100 ns und einer Wiederholfrequenz von 1 Hz erwärmt wurden. Der pyroelektrische Strom wurde durch einen Stromverstärker (SR570, Stanford Research Systems, Sunnyvale, CA) in eine Spannung umgewandelt und durch einen selbstgebauten 50 Hz-Notchfilter gefiltert, bevor er von einem Waverunner® Xi-A Oszilloskop (LeCroy, Chestnut Ridge, USA) mit DC-Kopplung aufgezeichnet wurde.

## 3.2 Zeitbereich

### 3.2.1 Theorie

Der pyroelektrische Strom im Zeitbereich wird ebenfalls durch Gl. (1) beschrieben, aber ohne die Frequenzabhängigkeit.

Unter der Annahme einer homogenen Polarisation äquivalent zu  $p(z) = p_0 = \text{konstant}$  vereinfacht sich Gl. (1) zu:

$$I(t) = \frac{A}{d} p_0 \int_0^d \frac{\partial}{\partial t} \Theta(z, t) dz = A p_0 \frac{d\Theta_m}{dt} \quad (6)$$

mit  $\Theta_m$  als der mittleren Temperatur der Probe.

Zunächst muss die Temperaturverteilung im pyroelektrischen Material ermittelt werden, woraus dann der pyroelektrische Strom abgeleitet werden kann. Es werden zwei analytische Modelle genutzt, um die Temperaturverteilung in einer einzelnen Materialschicht nach Absorption eines Wärmeimpulses an der Oberfläche zu berechnen. Mit Hilfe von Gl. (6) lässt sich daraus der pyroelektrische Strom ermitteln.

Für eine Platte mit thermisch isolierter Oberfläche und thermisch gekoppelter Rückseite führt das Modell von Camia [13] zu folgender Gleichung [14]:

$$I(\tau) = -A p_0 \frac{a}{d^2} \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) \pi \cdot (-1)^m \exp\left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{4} \tau\right] \quad (7)$$

mit  $\tau = at/d^2$  als dimensionsloser Variable der Zeit.

Das Modell von Bloß et al. [15] berücksichtigt zusätzlich die thermische Masse der Elektrode [14]:

$$I(\tau) = -A p_0 \frac{2a}{d^2} \sum_{k=0}^{\infty} 2 \frac{x_k(1+\cos x_k)}{(1+r+r^2 x_k^2) \sin x_k} \exp(-x_k^2 \tau), \quad (8)$$

wobei  $r$  das Verhältnis der thermischen Masse der Elektrode zu der des pyroelektrischen Elementes darstellt.  $x_k$  sind die Lösungen einer transzendenten Gleichung, die numerisch gelöst wird. Beide Modelle beschreiben die

Anregung mit einem unendlich kurzen Laser-Impuls (Dirac-Impuls).

Ein Modell für ein 2-Schicht-System wurde in [16] angewendet. Hier wurde die zeitliche Abhängigkeit der Impulsintensität durch das Duhamel-Integral berücksichtigt.

Die Temperaturverteilung wurde auch numerisch mit einem Finite-Elemente-Modell (FEM) unter der Nutzung von ANSYS15.0 ermittelt. Die transiente thermische Analyse wurde durchgeführt, indem eine Wärmestromdichte für die Dauer des Laserpulses im Bereich des Laserspots auf die Oberfläche der Probe wirkte. Die Rückseite der Probe war eine ideale Wärmesenke. Die Ausgangstemperatur betrug 20°C.

### 3.2.2 Ergebnisse

Die mittlere Temperatur und der resultierende pyroelektrische Strom wurden für eine PZT-Platte mit den zuvor beschriebenen Modellen bestimmt. Die Platte hatte eine Größe von (10 x 7 x 0,2) mm<sup>3</sup> und Elektroden aus Nickel-Chrom. Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 1 aufgelistet.

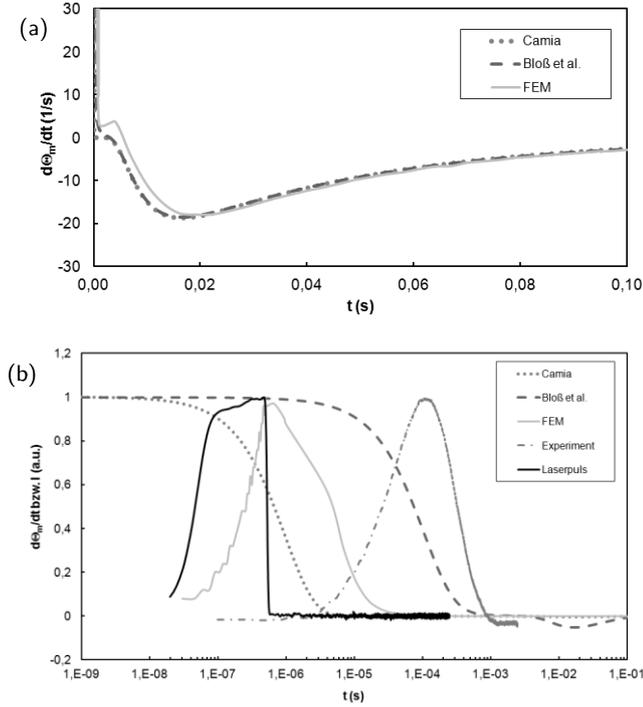
**Tabelle 1:** Materialeigenschaften der PZT-Platte [17].

Dichte g/cm <sup>3</sup>	Wärmeleitfähigkeit W/mK	Spezifische Wärme J/kgK
7,8	1,1	350

Der pyroelektrische Strom ist direkt proportional zu der zeitlichen Ableitung der mittleren Temperatur der Probe (vgl. Gl. (6)), die in Abb. 3a und 3b dargestellt wird. In Abb. 3b werden zusätzlich der Verlauf des Laserpulses (anhand des Stromes einer Monitordiode) und der im Experiment gemessene pyroelektrische Strom veranschaulicht.

Aufgrund der Annahme eines unendlich kurzen Laser-Impulses und der dadurch verursachten sofortigen Erwärmung beginnt der Strom in den analytischen Modellen bei einem sehr hohen positiven Wert. Nur das FEM-Modell berücksichtigt die reale Länge des Pulses und bildet somit auch die gesamte Erwärmungsphase ab. Der Strom steigt während der Pulsdauer an und fällt dann ab. Die Abkühlphase beginnt nach dem Nulldurchgang des Stromes. Diese wird von allen Modellen übereinstimmend berechnet. Der Strom geht langsam auf Null zurück, während die Probe in ihren Ausgangszustand zurückkehrt. Der gemessene Strom stimmt qualitativ mit den Werten aus dem FEM-Modell überein, ist jedoch

zeitlich verschoben. Diese Verschiebung wird durch den Stromverstärker verursacht. Der Einfluss des Verstärkers kann im Frequenzbereich korrigiert werden (siehe Abschnitt 3.3).



**Abb. 3:** Zeitliche Ableitung der mittleren Temperatur (proportional zum pyroelektrischen Strom) einer PZT-Platte, ermittelt mit drei verschiedenen Modellen (vgl. Abschnitt 3.2.1) mit (a) linearer und (b) logarithmischer Zeitachse. In (b) sind außerdem der Monitorstrom für die Pulsaserdiode und der experimentell ermittelte Pyrostrom (SR570, High Bandwidth Mode, Bandbreite 2 kHz) dargestellt.

### 3.3 Transformation in den Frequenzbereich

#### 3.3.1 Theorie

Die im Zeitbereich gemessene Spannung  $U(t_k)$  wird durch eine diskrete schnelle Fouriertransformation (FFT) in den Frequenzbereich konvertiert. Das erhaltene Frequenzspektrum wird durch die Übertragungsfunktion  $\underline{H}(f_n)$  der Messstrecke dividiert, um den Einfluss von Verstärker und Filter zu korrigieren. Das resultierende pyroelektrische Spektrum ergibt sich aus:

$$\underline{I}(f_n) = \frac{1}{\underline{H}(f_n)} \sum_{k=0}^{N-1} U(t_k) \exp\left(-ink \frac{2\pi}{N}\right), \quad (9)$$

wobei  $k$  der Index der abgetasteten Signalwerte ist,  $n$  der Index der Fourierkoeffizienten und  $N$  die Anzahl der Datenpunkte (sowohl im Zeit- als auch Frequenzbereich). Die Frequenzpunkte werden durch die Abtastrate  $\Delta t$  bestimmt:

$$f_n = \frac{n}{N \cdot \Delta t}, \quad n = 0, \dots, N - 1. \quad (10)$$

#### 3.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden anhand einer PZT-Platte der Größe (10 x 7 x 0,2) mm<sup>3</sup> mit Nickel-Chrom-Elektroden und einer in Polyamid 6 (PA 6) eingebetteten Platte vorgestellt. Letztere hat eine Größe von (35 x 22 x 0,2) mm<sup>3</sup> und wurde zwischen zwei transparente Trägerfolien aus PA 6 integriert [18].

Der pyroelektrische Strom wurde bei drei Bandbreiten gemessen, um ein breites Spektrum mit einem geringen Rauschpegel zu erfassen. Die Verstärkereinstellungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

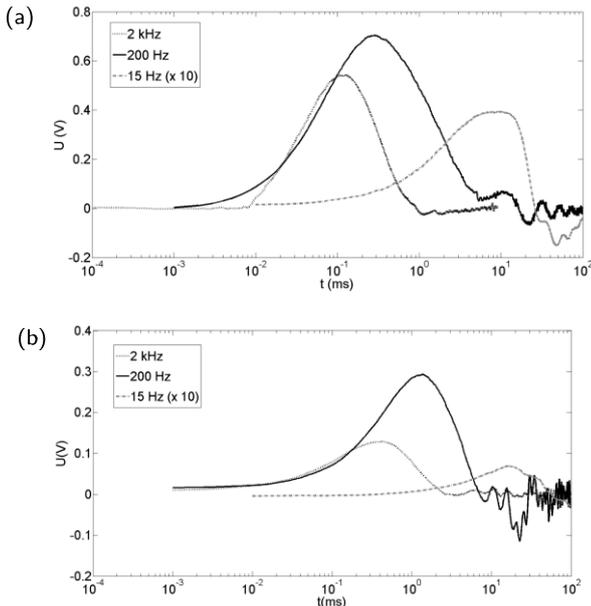
**Tabelle 2:** Verstärkereinstellungen des SR570.

Bandbreite	Verstärkung (V/A)	Modus
2 kHz	10 <sup>8</sup>	High Bandwidth
200 Hz	10 <sup>9</sup>	High Bandwidth
15 Hz	10 <sup>9</sup>	Low Noise

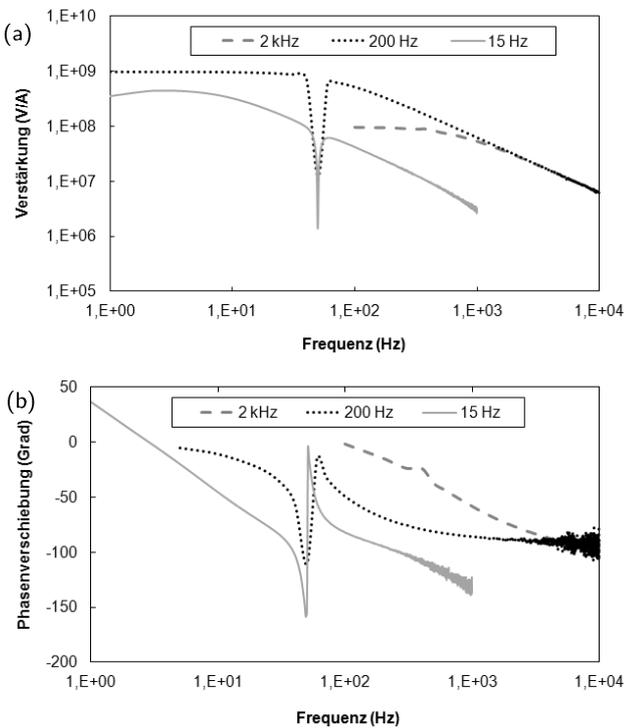
Abb. 4 zeigt die pyroelektrische Antwort beider Proben im Zeitbereich. Die Übertragungsfunktion der Messstrecke (Verstärker und 50 Hz-Filter) wurde für jede Einstellung ermittelt (Abb. 5). Oberhalb der Grenzfrequenz fällt die Verstärkung mit 20 dB pro Dekade ab und die Phasenverschiebung beträgt ungefähr -90° wie für einen Tiefpassfilter üblich. Der 50 Hz-Filter erzeugt eine Kerbe in der Verstärkung und einen Phasensprung bei 50 Hz.

Die Zeitsignale wurden entsprechend Gl. (9) in den Frequenzbereich konvertiert. Für die PZT-Platte stimmt der Realteil der erhaltenen Spektren mit dem LMM-Spektrum gut überein (Abb. 6a). Der Imaginärteil wird trotz Korrektur stark durch den Verstärker beeinflusst. Für die eingebettete Platte wird nur eine annähernde Übereinstimmung der Realteile erreicht (Abb. 6b). Hier beginnt der Signalabfall bei kleineren Frequenzen als für die nicht integrierte Platte. Wir schreiben das der höheren Kapazität der integrierten Platte zu (mit 70 nF etwa das Zehnfache), welche die Übertragungsfunktion beeinflusst. höheren Kapazität der integrierten Platte zu

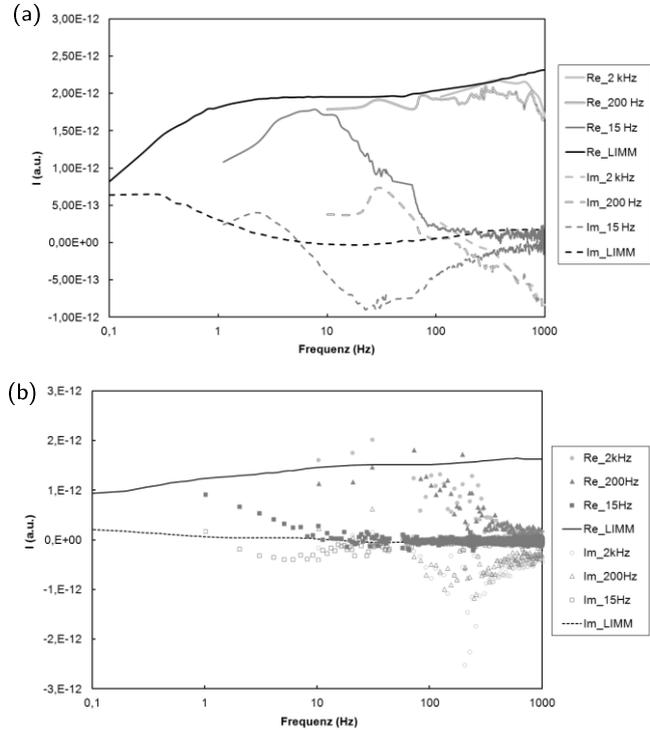
(mit 70 nF etwa das Zehnfache), welche die Übertragungsfunktion beeinflusst.



**Abb. 4:** Pyroelektrische Antwort einer (a) nicht eingebetteten PZT-Platte und (b) einer in PA 6 eingebetteten PZT-Platte bei verschiedenen Bandbreiten. Die Werte für die Bandbreite von 15 Hz wurden für eine bessere Vergleichbarkeit mit dem Faktor 10 multipliziert.



**Abb. 5:** (a) Amplitude und (b) Phase der Übertragungsfunktion des Verstärkers SR570 einschließlich des 50 Hz-Notchfilters für die Einstellungen in Tabelle 2.



**Abb. 6:** Spektrum des pyroelektrischen Stromes einer (a) nicht eingebetteten PZT-Platte und (b) einer in PA 6 eingebetteten PZT-Platte, ermittelt durch eine schnelle Fouriertransformation des pyroelektrischen Zeitsignals. In Abb. 6a wurden die Kurven bei höheren Frequenzen durch einen gleitenden Mittelwert über 10 Datenpunkte geglättet. Die LIMM-Spektren sind zum Vergleich eingefügt. Re und Im bezeichnen jeweils den Real- und Imaginärteil des Stromes.

## 4 Schlussfolgerungen

Der pyroelektrische Strom wird im Frequenz- und Zeitbereich durch analytische und numerische Modelle beschrieben. Aus dem Strom werden Rückschlüsse auf den Polarisationszustand der integrierten Piezokeramiken gezogen. Die untersuchten Piezomodule wiesen im Allgemeinen eine homogene Polarisation auf. Im Frequenzbereich wurde die thermische Relaxation verschiedener Proben erfolgreich durch einzelne thermische Zeitkonstanten oder durch eine Verteilung derselben beschrieben. Im Zeitbereich erfolgte eine FFT in den Frequenzbereich oder eine Modellierung des thermischen Verhaltens, aus dem der Strom abgeleitet werden konnte. Verstärker und Filter beeinflussen die pyroelektrische Antwort. Die Messung im Zeitbereich ist zwar wesentlich schneller als im Frequenzbereich, führt aber zu größeren Messunsicherheiten.

**Danksagung:** Die Forschungsarbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs/Transregio 39 PT-PIESA im Teilprojekt C08 unterstützt.

## Literatur

1. T. Koko, U. Akpan, A. Berry, P. Masson, O. Besslin, J. Szabo und N. Spongale. Vibration Control in Ship Structures. In: *Encyclopedia of Smart Materials*, 2002. doi:10.1002/0471216275.esm084
2. J. Schweiger. Aircraft Control, Applications of Smart Structures. *Encyclopedia of Smart Materials*, 2002; doi: 10.1002/0471216275.esm005
3. C. Gewiehs. Rotorblätter werden größer – eine Aufgabe für den Leichtbau. *LightweightDesign*, 3(2):32-35, 2010.
4. A. Mellinger. Dielectric resonance spectroscopy: a versatile tool in the quest for better piezoelectric polymers. *Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10(5): 842-861, 2003.
5. S.B. Lang und D.K. Das-Gupta. Laser-intensity-modulation method, a technique for determination of spatial distributions of polarization and space charge in polymer electrets, *Journal of Applied Physics*, 59: 2151-2160, 1986.
6. R.E. Collins. Measurement of charge distribution in electrets, *Review of Scientific Instruments*, 48: 83-91, 1977.
7. B. Ploss, R. Emmerich ans S. Bauer. Thermal Wave Probing of Pyroelectric Distributions in the Surface Region of Ferroelectric Materials – a New Method for the Analysis. *Journal of Applied Physics*, 72: 5363-5370, 1992.
8. F. Kremer und A. Schoenhals. eds. *Broadband Dielectric Spectroscopy*. pp. 62–72. Springer Berlin. 2003.
9. S. Bauer and B. Ploss. A method for the measurement of the thermal, dielectric, and pyroelectric properties of thin pyroelectric films and their applications for integrated heat sensors. *Journal of Applied Physics*, 68(12):6361-6367, 1990.
10. G. Suchanek, A. Eydam und G. Gerlach. A Laser Intensity Modulation Method for the Evaluation of the Polarization State of Embedded Piezoceramics. *Ferroelectrics*, 453(1): 127-132, 2013.
11. M. Flössel, S. Gebhardt, A. Schönecker und A. Michaelis. Development of a novel sensor-actuator-module with ceramic multilayer technology. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 1: 55-58, 2010.
12. G. Suchanek, A. Eydam, W. Hu, B. Krantz, W-G. Drossel and G. Gerlach. Evaluation of polarization of embedded piezoelectrics by the thermal wave method. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 59(12):1950-1954, 2012.
13. F.M. Camia. *Traité de Thermocinétique impulsionelle*. Dunod Paris. 1967.
14. A. Eydam, G. Suchanek und G. Gerlach. Characterization of the Polarization State of Embedded Piezoelectric Transducers by Thermal Waves and Thermal Pulses. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 5:165-170, 2016.
15. P. Bloß, A.S. DeReggi und H. Schäfer. Electric-field profile and thermal properties in substrate supported dielectric films. *Physical Review B*, 62(12):8517-8530, 2000.
16. A. Eydam, G. Suchanek und G. Gerlach. Thermal excitation as a mean for nondestructive evaluation of embedded piezoelectric transducers. *2016 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Applications of Polar Dielectrics & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/ECAPD/PFM)*, August 21-25, 2016, Darmstadt (Germany); doi: 10.1109/ISAF.2016.7578102.
17. PI Ceramic GmbH. Werkstoffdaten, Spezifische Parameter der Standardmaterialien; [http://www.piceramic.de/download/PI\\_Ceramic\\_Werkstoffdaten.pdf](http://www.piceramic.de/download/PI_Ceramic_Werkstoffdaten.pdf), Stand: 17.08.2015.
18. W. Hufenbach, M. Gude, N. Modler, Th. Heber, A. Winkler und T. Weber. Process Chain Modelling and Analysis for the High-Volume Production of Thermoplastic Composites with Embedded Piezoceramic Modules. *Smart Materials Research*, 2013, 201631, 2013.