

Simultane Messung charakteristischer Kenngrößen von Piezoaktoren im Großsignalbetrieb

Simultaneous Measurement of Characteristic Values of Piezoelectric Actuators at Large-signal Operation

Hartmut Janocha, Manfred Klein und Klaus Kuhnen, Universität des Saarlandes

Manuskripteingang: 18. Februar 2002; zur Veröffentlichung angenommen: 07. Juni 2002.

Beim Dauerbetrieb von piezoelektrischen Aktoren kann der Isolationswiderstand beispielsweise durch elektrische Überschläge in der Keramik oder durch leitende Kontaminationen auf der Keramikoberfläche so weit absinken, dass ein solcher Aktor nicht mehr sicher betrieben werden kann. In Mess- und Prüfanlagen wird der Isolationswiderstand eines Aktors in der Regel statisch gemessen, indem eine hohe Gleichspannung angelegt wird. Insbesondere für dynamische Dauertests, bei denen die Aktoren üblicherweise mit periodischen Steuerungsspannungen elektrisch zyklert werden, um beispielsweise die Kapazität oder die Dehnung zu erfassen, bedeutet die Messung des momentanen Isolationswiderstandes mit Gleichspannung eine andere Betriebsart und eine geänderte Messapparatur. Das hier vorgestellte Verfahren ermöglicht die gleichzeitige Messung des Isolationswiderstandes und der Kapazität im dynamischen Großsignalbetrieb, ohne dabei den Messaufbau oder die Form der Ansteuerung verändern zu müssen.

In continuous operation of piezoelectric actuators a decrease in the leakage resistance, caused by dielectric breakdown of the ceramic or by contamination with the conductive films at the surface of the ceramic, may lead to malfunction. Normally the leakage resistance of an actuator is measured in steady-state by supplying a high DC voltage. Trying to measure the leakage resistance during a dynamic fatigue test, in which the actuators are generally driven with alternating electrical signals to measure the capacitance or the strain, therefore involves interrupting the test or even changing measuring equipment. The method presented here allows simultaneous measurement of both leakage resistance and capacitance of the actuator during large-signal operation without the necessity of changes of the experimental set-up or of the driving signal.

Schlagwörter: Piezoaktor, Großsignalbetrieb, Leckstrom, Isolationswiderstand, Lebensdauerprüfung

1 Einleitung

Piezoelektrische Aktoren finden aufgrund ihrer Fähigkeit, Kräfte und Wege mit hoher Frequenz erzeugen zu können, viele Anwendungen bis hinein in den Massenmarkt. Für Hersteller und Anwender ist daher eine Aussage bezüglich der Lebensdauer und der Zuverlässigkeit von piezoelektrischen Aktoren wichtig, denn nur wenn die Funktionsfähigkeit hinreichend gesichert werden kann, ist ihr Einsatz zu

rechtfertigen. Einflüsse der Umgebung, wie hohe Temperaturen, hohe Feuchte oder Verschmutzungen, beeinflussen das Betriebsverhalten von piezoelektrischen Aktoren. Eine Verringerung ihres Isolationswiderstandes z. B. ist darauf zurückzuführen, dass sich innerhalb der Keramik durch Überschläge elektrisch leitende Kanäle ausbreiten oder auf der Keramikoberfläche durch Adsorption von Wasserdampf Schichten entstehen, die einen elektrisch leitenden Pfad bilden [1]. Hierdurch kann der Isolationswiderstand so

stark abnehmen, dass die Ansteuerelektronik des Piezoaktors überlastet wird und das gewünschte Ausgang-Eingang-Verhalten nicht mehr realisierbar ist [2].

Der Isolationswiderstand wird in Mess- und Prüfanlagen üblicherweise statisch gemessen, wobei Hochohmmessgeräte bis 10^{16} Ohm mit variablen Messspannungen von 1 V bis 1 kV üblich sind. Diese Messung kann u. a. Materialfehler aufdecken und dient somit der Qualitätskontrolle [3]. Ungeeignet ist dieses Verfahren jedoch im dynamischen Großsignalbetrieb, wie er für Lebensdaueruntersuchungen unumgänglich ist, da in diesem Fall durch die wesentlich größeren Lade- und Entladeströme (bei Stapelaktoren bis zu einigen Ampere) im Messwiderstand erhebliche Verlustleistungen entstehen.

Nachfolgend wird eine Möglichkeit beschrieben, die elektrischen Kenngrößen Isolationswiderstand und Kapazität eines Piezoaktors während einer Langzeituntersuchung im dynamischen Großsignalbetrieb simultan und kontinuierlich zu erfassen.

2 Messanlage und Messverfahren

Die Messanlage besteht aus einer Signalquelle, einem Leistungsverstärker zum Ansteuern kapazitiver Lasten, dem so genannten Sawyer-Tower-Messkreis [4] und einem Personal Computer (PC) mit integrierter Signalverarbeitungselektronik (Bild 1). Die Signalquelle liefert die Steuerspannung U_{Soll} an den Eingang des Leistungsverstärkers. Dieser arbeitet als spannungsgesteuerte Hochspannungsquelle mit konstantem Verstärkungsfaktor und generiert die Spannung U für den Sawyer-Tower-Messkreis.

Der zu analysierende Piezoaktor selbst bildet einen Teil des Sawyer-Tower-Messkreises. Die eingepreßte Spannung U und die Messspannung U_M , die über einer Referenzimpedanz abfällt, werden gemessen und dem PC zugeführt.

Die wichtigen Aspekte „elektrische Kontaktierung und mechanische Klemmung des Piezoaktors in der Prüfeinrichtung“ werden hier nicht weiter erläutert.

2.1 Funktion des Sawyer-Tower-Messkreises

Zur simultanen Bestimmung der Kapazität C_P und des Isolationswiderstands R_P eines Piezoaktors wird eine Referenzimpedanz, bestehend aus der Parallelschaltung einer Kapazität C_M mit einem Widerstand R_M , in Reihe geschaltet (Bild 2). Ähnliche Sawyer-Tower-Messkreise werden eingesetzt, um z. B. die Frequenzabhängigkeit dielektrischer Kenngrößen im Großsignalbetrieb zu erfassen.

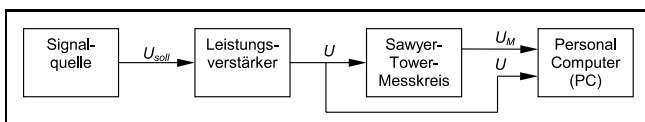


Bild 1: Prinzipieller Aufbau der Messanlage.

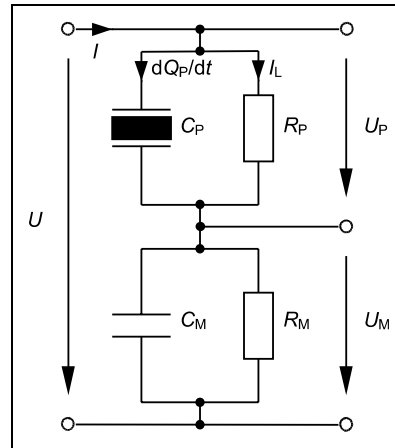


Bild 2: Sawyer-Tower-Messkreis.

Die Systemeigenschaften des Sawyer-Tower-Messkreises im Hinblick auf die hier interessierende Anwendung werden mit den in Bild 2 definierten Größen wie folgt beschrieben. Im Frequenzbereich gilt für den Leckstrom

$$\underline{I}_L(j\omega) = \frac{1}{R_M + R_P} \cdot \frac{1 + j\omega R_M C_M}{1 + j\omega \frac{R_P R_M (C_M + C_P)}{R_M + R_P}} \underline{U}(j\omega) \quad (1)$$

und für die Polarisationsladung

$$\underline{Q}_P(j\omega) = \frac{R_P C_P}{R_M + R_P} \cdot \frac{1 + j\omega R_M C_M}{1 + j\omega \frac{R_P R_M (C_M + C_P)}{R_M + R_P}} \underline{U}(j\omega) \quad (2)$$

Weiterhin lässt sich für die Messspannung der Zusammenhang

$$\underline{U}_M(j\omega) = \underline{A}(j\omega) \cdot \underline{I}_L(j\omega) + \underline{B}(j\omega) \cdot \underline{Q}_P(j\omega) \quad (3)$$

angeben, wobei

$$\underline{A}(j\omega) = \frac{R_M}{1 + j\omega R_M C_M} \quad (4)$$

und

$$\underline{B}(j\omega) = \frac{j\omega R_M}{1 + j\omega R_M C_M} \quad (5)$$

Neben der Bedingung, dass der Verlauf der Spannung $U(t)$ mathematisch eindeutig beschreibbar sein muss, werden folgende Voraussetzungen gemacht:

- i. Die Spannung $U(t)$ sei periodisch und habe die Periodendauer T_0 , d. h. $U(t) = U(t + T_0)$.
- ii. $U(t)$ habe einen Gleichanteil U_0 , der von einem Wechselanteil $U_{\sim}(t)$ überlagert ist, d. h. $U(t) = U_0 + U_{\sim}(t)$.
- iii. Die Frequenz $\omega_0 = 2\pi/T_0$ des Wechselanteils $U_{\sim}(t)$ liege deutlich oberhalb der durch $\omega_G = 1/(R_M C_M)$ festgelegten Grenzfrequenz, d. h. $\omega_0 \gg \omega_G$.
- iv. Der Widerstand R_M sei wesentlich kleiner als der Isolationswiderstand R_P des Piezoaktors, d. h. $R_M \ll R_P$.
- v. Die Kapazität C_M sei wesentlich größer als die Kapazität C_P des Piezoaktors, d. h. $C_M \gg C_P$.

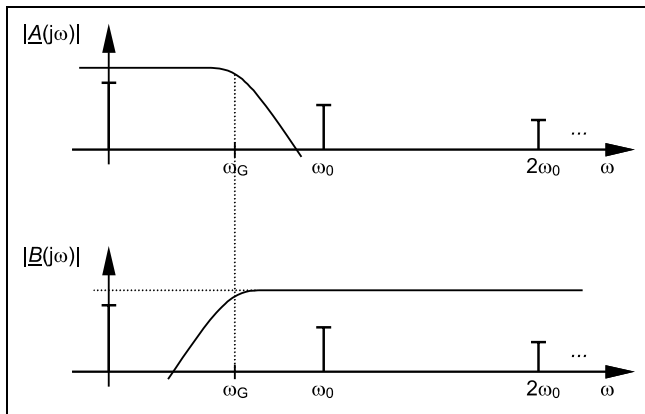


Bild 3: Amplitudengänge $|A(j\omega)|$ und $|B(j\omega)|$.

Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für $\underline{A}(j\omega)$ und $\underline{B}(j\omega)$ die Amplitudengänge nach Bild 3.

Aus diesen Bedingungen folgt:

- Die Periodizität des Steuersignals führt zu einem diskreten Amplitudenspektrum.
- Der Gleichanteil U_0 führt zu einer Spektrallinie bei $\omega = 0$.
- Wegen $\omega_0 \gg \omega_G$ lassen sich Gleich- und Wechselanteil getrennt auswerten.
- Aus iv. und v. ergibt sich, dass die Amplitudengänge $|\underline{L}/\underline{U}|$ und $|\underline{Q}_P/\underline{U}|$ nur in einem engen Bereich um ω_G herum nicht konstant sind.
- Aus iii. folgt weiterhin, dass die Zusammenhänge zwischen $I_L(t)$ und $U(t)$ sowie zwischen $Q_P(t)$ und $U(t)$ linear und frequenzunabhängig sind.

2.2 Messverfahren

Der Leckstrom $I_L(t)$ wird beschrieben durch

$$I_L(t) = \frac{1}{R_M + R_P} U_0 + \frac{C_M}{R_P(C_M + C_P)} U_{\sim}(t) \quad (6)$$

$$= I_{L0} + I_{L\sim}(t),$$

und für die Polarisationsladung gilt

$$Q_P(t) = C_P \frac{R_P}{R_M + R_P} U_0 + \frac{C_P C_M}{C_M + C_P} U_{\sim}(t) \quad (7)$$

$$= Q_{P0} + Q_{P\sim}(t).$$

Aufgrund der Filterwirkung gemäß Gl. (4) und Gl. (5) ergibt sich für die Messspannung

$$U_M(t) = R_M I_{L0} + \frac{1}{C_M} Q_{P\sim}(t) \quad (8)$$

$$= U_{M0} + U_{M\sim}(t).$$

Mit Gl. (6), (7) und (8) erhält man für den Gleichanteil der Messspannung

$$U_{M0} = \frac{R_M}{R_M + R_P} U_0 \quad (9)$$

und für den Wechselanteil

$$U_{M\sim}(t) = \frac{C_P}{C_M + C_P} U_{\sim}(t). \quad (10)$$

Aufgrund der Linearität von Gl. (10) gilt dieser Zusammenhang auch für Spannungsdifferenzen und damit insbesondere für die Differenz aus dem Maximal- und Minimalwert der Spannungsverläufe:

$$U_{M\max} - U_{M\min} = \frac{C_P}{C_M + C_P} (U_{\max} - U_{\min}). \quad (11)$$

Aus Gl. (9) folgt für den Isolationswiderstand des Piezoaktors

$$R_P = R_M \left(\frac{U_0}{U_{M0}} - 1 \right). \quad (12)$$

Der Gleichanteil U_0 ist der arithmetische Mittelwert von $U(t)$ über die Periode T_0 , also

$$U_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} U(t) dt. \quad (13)$$

Aus Gl. (11) folgt für die Kapazität

$$C_P = C_M \frac{U_{M\max} - U_{M\min}}{(U_{\max} - U_{\min}) - (U_{M\max} - U_{M\min})}. \quad (14)$$

Der zeitliche Verlauf zwischen den Extremwerten muss also nicht berücksichtigt werden, wodurch die Signalanalyse auf die Extremwertsuche innerhalb einer Spannungsperiode reduziert wird. Für die Messdauer T_M ist somit lediglich die Bedingung $T_M \geq T_0$ zu erfüllen.

Die Berechnung des Isolationswiderstandes nach Gl. (12) setzt die Kenntnis der Gleichanteile U_0 und U_{M0} voraus. Um die Messdauer durch den Zeitaufwand für die Ermittlung dieser Werte nicht zu vergrößern, wäre es von Vorteil, wenn sie ebenfalls in Abhängigkeit der Extremwerte ausgedrückt werden könnten. Dies ist für grundlegende Signalformen, wie sie bei der Lebensdauerprüfung verwendet werden, möglich und wird nun anhand eines Beispiels beschrieben.

$U(t)$ verlaufe trapezförmig (Bild 4), und werde beschrieben durch

$$U(t) = \begin{cases} \frac{5(U_{\max} - U_{\min})}{T_0} t & \text{für } 0 \leq t < \frac{T_0}{5} \\ U_{\max} & \text{für } \frac{T_0}{5} \leq t < \frac{3T_0}{5} \\ -\frac{5(U_{\max} - U_{\min})}{T_0} t & \text{für } \frac{3T_0}{5} \leq t < \frac{4T_0}{5} \\ 0 & \text{für } \frac{4T_0}{5} \leq t < T_0 \end{cases}. \quad (15)$$

Nach Einsetzen von Gl. (15) in Gl. (13) erhält man durch Lösen des Integrals den Gleichanteil U_0 in Abhängigkeit von den Extremwerten

$$U_0 = \frac{3}{5} (U_{\max} - U_{\min}) + U_{\min}. \quad (16)$$

Analog gilt für U_{M0}

$$U_{M0} = \frac{3}{5} (U_{M\max} - U_{M\min}) + U_{M\min}, \quad (17)$$

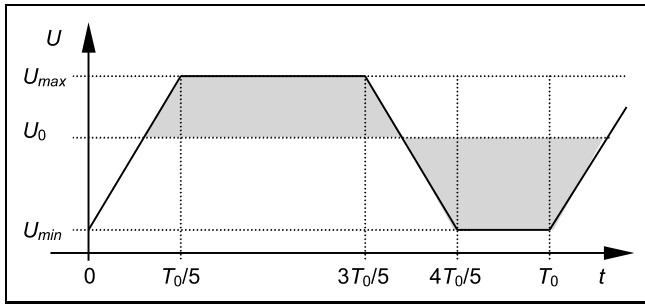


Bild 4: Trapezförmiger Verlauf der Spannung $U(t)$.

und durch Einsetzen von Gl. (16) und (17) in Gl. (12) ergibt sich bei oben gewählter Signalform folgende Gleichung für den Isolationswiderstand:

$$R_P = R_M \left(\frac{3U_{\max} + 2U_{\min}}{3U_{M\max} + 2U_{M\min}} - 1 \right). \quad (18)$$

Diese Formel muss für jeden Spannung-Zeit-Verlauf explizit hergeleitet und vorab im Messprogramm implementiert werden. Die Aktorkapazität C_P lässt sich für dieses Beispiel mit Gl. (14) berechnen.

Die gleichzeitige Einhaltung verschiedener Anforderungen an das Messsystem, wie z. B. kurze Einschwingzeit, große Messspannungen, hohe Frequenzbandbreite etc., bedingen teilweise unterschiedliche Dimensionierungen. Wie die Dimensionierung der Referenzimpedanz erfolgt und welche Beschränkungen sich für den Einzelfall ergeben, wird anschließend beschrieben.

2.3 Dimensionierung der Referenzimpedanz

Wird eine Spannung $U(t) = U_0 + U_{\sim}(t)$ an den Sawyer-Tower-Messkreis gelegt, so ist zu beobachten, dass der Wechselanteil $U_{M\sim}(t)$ der Messspannung sofort einen konstanten Spitze-Spitze-Wert annimmt (Bild 5). Dieser ist nach Gl. (10) abhängig vom Wechselanteil $U_{\sim}(t)$ der angelegten Spannung und dem Verhältnis $C_P/(C_M + C_P)$ der Kapazitäten. Der Gleichanteil U_{M0} hingegen zeigt während des Einschwingvorgangs ein PT₁-Verhalten, bis schließlich für $t > T_E$ der Endwert U_{M0} zu mehr als 99% erreicht ist. Dieser Endwert ist nach Gl. (12) durch das Verhältnis R_M/R_P

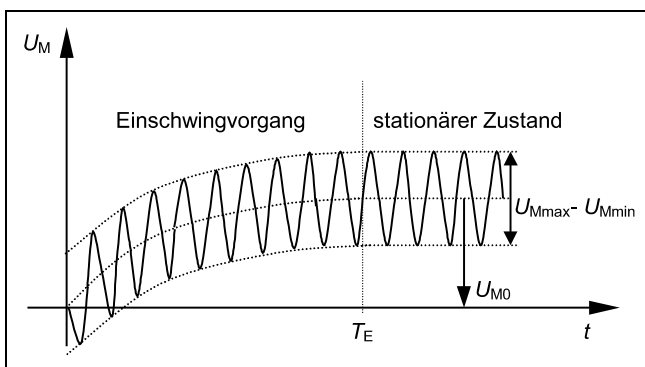


Bild 5: Einschwingvorgang der Messspannung.

und den Gleichspannungsanteil U_0 der angelegten Spannung festgelegt.

Zunächst wird C_M bestimmt. Um den Anteil U_M an der Gesamtspannung U über dem Messkreis möglichst gering zu halten, muss C_M wesentlich größer gewählt werden als die Kapazität C_P des Piezoaktors. Je nach Auflösung und Eingangsspannungsbereich des AD-Umsetzers sollte gelten

$$C_M \approx (100 \dots 500) \cdot C_P. \quad (19)$$

Dabei ist zu beachten, dass im Großsignalbetrieb (in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke) die Kapazität C_P gegenüber dem üblicherweise angegebenen Kleinsignalwert um den Faktor 1,5 bis 2 höher sein kann [5; 6]. Für einen Hochvolt(HV)-Stapelaktor mit einer Nennkapazität (Kleinsignalwert) $C_P = 100 \text{ nF}$ sollte C_M also zwischen 20 und $100 \mu\text{F}$ gewählt werden.

Bei der Auswahl des Widerstandes R_M hat man Folgendes zu beachten. Der Isolationswiderstand R_P eines HV-Stapelaktors kann einige Gigaohm betragen. Bei einer maximal zulässigen Spannung $U_{\max} = 1000 \text{ V}$ fließt z. B. bei $R_P = 20 \text{ G}\Omega$ ein Leckstrom $I_L = 50 \text{ nA}$. Soll nun eine Abnahme des Isolationswiderstandes $\Delta R_P = 100 \text{ M}\Omega$ messbar sein, so muss die dadurch hervorgerufene Zunahme des Leckstromes $\Delta I_L = 250 \text{ pA}$ an R_M eine Spannungsänderung ΔU_{M0} bewirken, die vom AD-Umsetzer noch aufgelöst werden kann. Für $R_M = 4,7 \text{ M}\Omega$ und $\Delta I_L = 250 \text{ pA}$ ist $\Delta U_{M0} = 1,175 \text{ mV}$.

Des Weiteren beträgt die Zeit T_E bis zum Erreichen des stationären Zustands (Bild 5)

$$T_E \approx 5 \cdot \frac{1}{\omega_G} = 5 \cdot C_M R_M. \quad (20)$$

Wählt man z. B. $C_M = 50 \mu\text{F}$ und $R_M = 4,7 \text{ M}\Omega$, so beträgt $T_E = 1175 \text{ s}$. Für die Bestimmung des Isolationswiderstandes R_P bedeutet dies, dass die eingelesenen Messwerte frühestens nach der Zeitspanne T_E ihren stationären Endwert erreicht haben und somit erst danach eventuelle Überschreitungen von vorgegebenen Grenzwerten detektierbar sind. Angesichts der Tatsache, dass Dauerversuche sich leicht einige Monate hinziehen können, ist diese Verzögerung akzeptabel.

Die Messung von C_P nach dem zuvor erläuterten Verfahren ist durch die untere Grenzfrequenz ω_G des Sawyer-Tower-Messkreises beschränkt und wird ebenfalls durch die Auswahl von C_M und R_M bestimmt (vgl. Gl. (20)). Mit den obigen Werten erhält man z. B. eine untere Grenzfrequenz von $\omega_G = 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 1/\text{s}$.

Der Widerstand R_M muss zum einen so gewählt werden, dass der Spannungsverlauf $U_M(t)$ bei der niedrigsten Betriebsfrequenz noch nicht verzerrt wird, d. h. die Bedingung $\omega_0 \gg \omega_G$ muss erfüllt sein, und zum anderen ist zu berücksichtigen, dass durch R_M gemäß Gl. (9) auch der Gleichanteil U_{M0} von $U_M(t)$ bestimmt wird und der maximale Messspannungsbereich nicht überschritten werden darf.

3 Messergebnisse

Das beschriebene Messverfahren hat in kommerziellen Mess- und Prüfanlagen für den Dauertest von Piezoaktoren Eingang gefunden [7]. Die Funktionalität jeder Anlage wurde zunächst mit Hilfe von Hochvoltkondensatoren mit unterschiedlichen, aber bekannten Kapazitäts- und Isolationswiderstandswerten verifiziert.

Dabei wurde zunächst die Kleinsignalkapazität C der Kondensatoren mit Hilfe einer üblichen RLC -Messbrücke bestimmt. Laut Hersteller ist der Kapazitätswert innerhalb des zulässigen Betriebsspannungs- und -frequenzbereiches konstant. Anschließend wurden sämtliche Sawyer-Tower-Messkreise der Anlage, die für Nennkapazitäten der Proben im Nanofaradbereich dimensioniert waren, mit den zuvor vermessenen Kondensatoren überprüft.

Bei Lebensdaueruntersuchungen von Piezoaktoren ist der absolute Wert ihrer Kapazität meist weniger relevant als die Änderung gegenüber dem Startwert der Kapazität (unbelastete Probe) mit zunehmender Betriebsdauer. Unabhängig von der Genauigkeit, mit der die Absolutwerte der Kapazitäten bestimmbar sind, konnten Kapazitätsänderungen der Hochvoltkondensatoren um 0,3% vom Nennwert sicher erfasst werden.

Um die Messergebnisse des Isolationswiderstandes zu überprüfen, wurden den Hochvoltkondensatoren Präzisionswiderstände parallel geschaltet, die deutlich niedrigere Werte hatten als die Isolationswiderstände der Kondensatoren. Auf diese Art wurden Leckströme von einigen Nano- bis Mikroampere erzwungen und eine Verringerung des Isolationswiderstandes simuliert. Mit entsprechender Dimensionierung der Referenzimpedanz wurden Änderungen des Isolationswiderstandes um 0,5% vom Nennwert gemessen.

4 Zusammenfassung

Es wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem in einer Mess- und Prüfanlage die Kapazität und der Isolationswiderstand von Piezoaktoren im dynamischen Großsignalbetrieb

gleichzeitig erfassbar sind. Unter den beschriebenen Voraussetzungen ist die Gewinnung dieser elektrischen Kenngrößen aus den Extremwerten der erfassten Spannungssignale möglich, was schnell zu Ergebnissen führt. Dadurch kann das Verfahren sehr ökonomisch für eine große Probenanzahl angewendet werden. Anhand der Kapazität und des Isolationswiderstandes ist während der gesamten Testdauer eine Aussage über den momentanen Zustand der Probe im Betrieb möglich.

Eine Erweiterung der Mess- und Prüfanlage für die Analyse von mechanischen Kenngrößen, wie z. B. Kraft oder Dehnung des Aktors, ist ebenfalls möglich.

Literatur

- [1] Bindig, R.; Helke, G.: Application of Piezoceramic Multilayer Actuators, Experiences and Solutions. Proceedings Actuator 2000, Bremen (2000), pp. 53–57.
- [2] Hennig, E.; Richter, St.: Langzeitverhalten von piezokeramischen Aktoren. Proceedings DGM Symposium Langzeitverhalten von Funktionskeramiken, Dresden (1997), pp. 19–25.
- [3] Schönecker, A.; Helke, G.: Messtechnik für elektromechanische Wandler aus piezokeramischen Werkstoffen. In Ruschmeyer, K. et al.: *Piezokeramik. Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen*; Expert Verlag; Renningen (1995), pp. 81–110.
- [4] Sawyer, C.B.; Tower, C.H.: Rochelle Salt as a Dielectric. Physical Review, Volume 35 (1930), pp. 269–273.
- [5] Janocha, H.; Clephas, B.: Measurement and Simulation of the Electromechanical Behavior of Piezoelectric Stack Transducers. In Galassi, C. et al.: *Piezoelectric Materials: Advances in Science, Technology and Applications*; Kluwer Academic Publisher; Niederlande (2000), pp. 179–190.
- [6] Pertsch, P.: *Großsignalmesstechnik für elektromechanische Festkörperaktoren*. Neue Aktoren im Maschinen- und Anlagenbau, Fachveranstaltung Nr. E-30-330-051-8, Haus der Technik e.V., Essen, 1998.
- [7] Homepage der D*ASS Prof. Janocha mbH: www.dass.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Janocha, Dipl.-Ing. Manfred Klein und Dipl.-Ing. Klaus Kuhnen, Lehrstuhl für Prozessautomatisierung (LPA) der Universität des Saarlandes, Im Stadtwald, Geb. 13, D-66041 Saarbrücken, E-Mail: janocha@lpa.uni-sb.de