

J. Tichý · G. Gautschi

Piezo— elektrische Meßtechnik

Physikalische Grundlagen
Kraft-, Druck- und
Beschleunigungsaufnehmer
Verstärker



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York

J. Tichý · G. Gautschi

Piezoelektrische Meßtechnik

Physikalische Grundlagen,
Kraft-, Druck- und Beschleunigungsaufnehmer,
Verstärker

Mit 145 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin · Heidelberg · New York 1980

Dr. Jan Tichý
Professor an der Kantonsschule und
Sekundarlehrantsschule St. Gallen,
Universitätsdozent für Angewandte Physik
an der Universität Innsbruck

Dipl.-Ing. ETH Gustav H. Gautschi
Kistler Instrumente AG, Winterthur

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Tichý, Jan:

Piezoelektrische Meßtechnik : physikal. Grundlagen, Kraft-, Druck- und Beschleunigungsaufnehmer, Verstärker
J. Tichý ; G. Gautschi. – Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1980.

ISBN 3-540-09448-2 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-09448-2 Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1980

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gesamtherstellung: Passavia Druckerei GmbH, Passau
2362/3020-543210

Vorwort

Während wir diese Zeilen niederschreiben, vollenden sich hundert Jahre seit der Entdeckung des piezoelektrischen Effektes. Seine technischen Anwendungen ließen zwar ziemlich lange auf sich warten, sind jedoch heute kaum aus unserem Leben wegzudenken. Die piezoelektrischen Resonatoren steuern die Frequenzen von Sendern sowie den Gang von Quarzuhren, dienen als Frequenzfilter und erzeugen Ultraschallwellen. Etwas im Schatten derartiger Anwendungen machte man sich den piezoelektrischen Effekt ebenfalls zum Messen von Kräften, Drücken und Beschleunigungen zunutze. Dieses an und für sich nächstliegende Anwendungsgebiet der Piezoelektrizität wurde auch in der Literatur nur bescheiden berücksichtigt. Eine gebührende Aufmerksamkeit wurde ihm eigentlich nur in zwei Monographien über die Piezoelektrizität [S 3, P 3] zuteil, wobei die erste einzig Aufnehmer mit Quarzelementen behandelt und die zweite, der Sprache wegen, nur einem beschränkten Leserkreis zugänglich bleibt. Ausschließlich mit der piezoelektrischen Meßtechnik beschäftigt sich das Buch von W. Gohlke [G 8]. Seit dem leicht ergänzten Nachdruck sind jedoch immerhin schon zwanzig Jahre vergangen, und die Auflage ist längst vergriffen. Die inzwischen in der deutschen wie auch in anderen Sprachen in Handbüchern der allgemeinen Meßtechnik erschienenen Darstellungen oder Firmenschriften über spezielle Teilgebiete konnten die Lücke nicht schließen.

Aus dieser Lage heraus reifte unser Entschluß, in enger Zusammenarbeit eines Physikers und eines Ingenieurs ein neues Buch vorzubereiten, das dem Leser ein ausgewogenes Bild der physikalischen Grundlagen sowie des technischen Aufbaus von piezoelektrischen Aufnehmern vermittelt. Er schien uns um so begründeter, als die Entwicklung der Ladungsverstärker in den letzten zwanzig Jahren der piezoelektrischen Meßtechnik zu einem breiten Durchbruch sowohl in labormäßigen als auch in industriellen Anwendungen verholfen hatte.

Den die ersten sechs Kapitel beinhaltenden physikalischen Teil verfaßte J. Tichý. Unserer Vorstellung nach soll er nicht nur die Eigenschaften piezoelektrischer Aufnahmerelemente erklären, sondern darüber hinaus auch das Studium wissenschaftlicher Arbeiten, die sich mit der Piezoelektrizität und verwandten Problemen befassen, erleichtern. Dieser Absicht tragen insbesondere die Abschnitte über kovariante und kontravariante Koordinaten, das reziproke Gitter, den Verzerungszustand, den pyroelektrischen Effekt, die Ferroelektrizität und nichtlineare Effekte Rechnung. Die sonst im Vordergrund stehende und für technische Anwendungen unerläßliche thermodynamische Betrachtungsweise ergänzen wir

durch ein stark vereinfachtes mikrophysikalisches Modell, das dem Leser den Begriff der „weichen Schwingung“ verständlich machen soll. Einem möglichen Einwand, dem Quarz zu viel, den übrigen Materialien und im besonderen den Keramiken und dünnen Schichten zu wenig Platz eingeräumt zu haben, möchten wir entgegenhalten, daß für anspruchsvolle Messungen Aufnehmer vorwiegend mit Quarzelementen hergestellt werden und somit Quarz weiterhin seine führende Rolle in der piezoelektrischen Meßtechnik behält.

Den zweiten, mit dem siebten Kapitel beginnenden technischen Teil verfaßte G. H. Gautschi. Da es bis heute in der Praxis an einer einheitlichen Benutzung von klar definierten meßtechnischen Begriffen mangelt, erschien es uns sinnvoll, einleitend eine für unsere Bedürfnisse angepaßte Auswahl ihrer Definitionen zusammenzustellen. Nach der Erläuterung der allgemeinen Grundlagen werden der Aufbau, die Eigenschaften und die Arbeitsweise der nach Meßgrößen geordneten Aufnehmer dargestellt. Dies soll dem Benutzer ermöglichen, deren meßtechnisches Verhalten richtig zu verstehen und für ein gegebenes Meßproblem den geeignetsten Aufnehmer zu wählen. Auf technologische Herstellungsprobleme gehen wir nicht ein, da wir nicht beabsichtigten, ein Arbeitsbuch der Fabrikation von piezoelektrischen Aufnehmern zu schreiben.

Das umfangreiche letzte Kapitel ist den Ladungsverstärkern gewidmet. Ihr Prinzip wurde 1949 von W. P. Kistler patentiert, und es war eigentlich schon längst fällig, das dadurch erschlossene und für die piezoelektrische Meßtechnik unentbehrliche Gebiet zusammenfassend zu behandeln. Wir schätzen es deshalb außerordentlich, daß wir für diese Aufgabe während des Schreibens unseres Buches El.-Ing. HTL Franz Meier zur Mitarbeit gewinnen konnten. Dank seiner langjährigen Erfahrung auf diesem Spezialgebiet war er in der Lage, den ursprünglichen Entwurf des Kapitels wesentlich zu erweitern und zu vertiefen. Für seinen wertvollen Beitrag sind wir Herrn F. Meier ganz besonders dankbar.

Für J. Tichý war die Arbeit an diesem Buch von einer dankbaren Erinnerung an seinen – leider nicht mehr lebenden – hoch geschätzten und geliebten Lehrer Univ.-Prof. Dr. V. Petržílka beseelt. Dies um so mehr, da sie beide Ende der fünfziger Jahre gemeinsam mit vier weiteren unvergeßlichen Kollegen an einer Monographie über Piezoelektrizität [P 3] zusammengearbeitet hatten. Das sichere Bewußtsein einer untrennbaren Zusammengehörigkeit mit den treuesten in seiner Heimat verbliebenen Freunden blieb für ihn auch im Exil beim Schreiben dieses Buches die stärkste Unterstützung.

Bis ein Buch zu seiner Vollendung gelangt, bedarf es weit mehr als nur der Arbeit von Autoren. Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes sowie viele wertvolle Anregungen und Hinweise danken wir besonders herzlich den Herren Dr. H. Arend, Dr. H. U. Baumgartner, Dr. E. Bertagnolli, Prof. Dipl.-Phys. R. Burgstaller, Dr. J. Golder, Dr. P. Günter, Univ.-Doz. Dr. P. Hájiček, Univ.-Doz. Dr. E. Kittinger, Univ.-Prof. Dr. J. Kolb, Masch.-Ing. K. H. Martini und Masch.-Ing. HTLP. Wolfer. Ebenso möchten wir auch den Firmen AVL-Gesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Meßtechnik m. b. H. in Graz, Brüel & Kjær in Naerum, Endevco Corp. in Pasadena, Environmental Equipments Ltd. in Wokingham, Kistler Instrumente AG in Winterthur, SEI Salford Electrical Works Ltd. in Manchester, Sundstrand Data Control Inc. in Redmond, VEB RFT Meßelektronik „Otto Schön“ in Dresden und Vibrometer AG in Fribourg für die verschiedenen, groß-

zügig zur Verfügung gestellten Unterlagen unsere aufrichtige Dankbarkeit bezeugen. Dem Springer-Verlag sind wir für die Unterstützung unseres Vorhabens, eine angenehme und verständnisvolle Zusammenarbeit sowie unermüdliche Bereitschaft, unseren Problemen entgegenzukommen, außerordentlich dankbar. Darüber hinaus zollen wir unseren großen gemeinsamen Dank allen, die uns während der Entstehungszeit dieses Buches mit Rat, Hilfe und Verständnis unterstützten, insbesondere Frau J. Gautschi, welche auch wesentlich zum Erstellen des Manuskriptes beigetragen hat. Sämtliche kritischen Bemerkungen, Hinweise auf Fehler und Verbesserungsvorschläge nehmen wir immer gern und dankbar entgegen.

St. Gallen und Zürich, Oktober 1979

J. Tichý G.H. Gautschi

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Proportionalitätsfaktor Amplitude Fläche, Oberfläche	m m ²
$A = (a_{ij}^i)$	Transformationsmatrix	
$A = (a_{ij})$	Transformationsmatrix einer orthogonalen Transformation	
a	Dicke Beschleunigung	m ms ⁻²
a, b, c	Kristallachsen Gitterkonstanten	m
$\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$	Translationsvektoren	
a_{ij}	Richtungskosinus	
b	Breite	m
C	Symbol für ein basiszentriertes Bravais Gitter Curie-Weiß-Konstante Federkonstante Kapazität	Fm ⁻¹ K Nm ⁻¹ F
C_{kl}	Greenscher Deformationstensor	1
c	spezifische Wärmekapazität	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
c_{kl}	Cauchyscher Deformationstensor	1
$c_{ijkl}, c_{\lambda\mu}$	Elastizitätsmodul	Nm ⁻²
$\mathbf{D}$	elektrische Flußdichte	Cm ⁻²
d	Abstand der Gitterebenen, Gitterkonstante	m
d_h	Koeffizient des hydrostatischen piezoelektrischen Effektes	CN ⁻¹
$d_{i\lambda}$	piezoelektrischer Koeffizient	CN ⁻¹
E	Youngscher Elastizitätsmodul	Nm ⁻²
$\mathbf{E}$	elektrische Feldstärke	Vm ⁻¹
E_1	elektrische Feldstärke des lokalen Feldes	Vm ⁻¹
e	Basis natürlicher Logarithmen ($e = 2,718282 \dots$)	
e	Elementarladung ($e = 1,6021917 \cdot 10^{-19}$ C)	
$\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$	Basisvektoren, Einheitsvektoren	
$\mathbf{e}^i$	kontravariante Basisvektoren	
$\mathbf{e}_i$	kovariante Basisvektoren	

Symbol	Bedeutung	Einheit
$e_{i\lambda}$	piezoelektrischer Modul	$\text{Cm}^{\frac{2}{3}}$
F	freie Energie pro Volumeneinheit (Helmholtz Energie)	Jm^{-3}
$\mathbf{F}$	Kraft	N
F_{ij}	Tensorkoordinaten des Deformationsgradienten	1
f	Frequenz	Hz
$\mathbf{f}$	Massenkraftdichte	Nkg^{-1}
G	Schubmodul	Nm^{-2}
$\bar{G}$	Gibbssches Potential pro Volumeneinheit	Jm^{-3}
$\tilde{G}$	elastisches Gibbssches Potential pro Volumeneinheit	Jm^{-3}
$\tilde{\tilde{G}}$	elektrisches Gibbssches Potential pro Volumeneinheit	Jm^{-3}
g	Fallbeschleunigung (Normwert $g_n = 9,80655 \text{ ms}^{-2}$, meistens nur als g bezeichnet)	ms^{-2}
g^{ij}	kontravariante Metrikkoeffizienten	
g_{ij}	kovariante Metrikkoeffizienten	
$g_{i\lambda}$	piezoelektrischer Koeffizient	m^2C^{-1}
$g_{i\lambda\mu}$	elektroelastischer Koeffizient	Cm^2N^{-2}
H	Enthalpie pro Volumeneinheit	Jm^{-3}
$\tilde{H}$	elastische Enthalpie pro Volumeneinheit	Jm^{-3}
$\tilde{\tilde{H}}$	elektrische Enthalpie pro Volumeneinheit	Jm^{-3}
$\mathbf{H}$	magnetische Feldstärke	Am^{-1}
(hkl) $(h_1h_2h_3)$	Millersche Indizes	
$\mathbf{h}$	Fahrstrahl	
$h_{i\lambda}$	piezoelektrischer Modul	NC^{-1}
I	Symbol für ein innenzentriertes Bravais Gitter elektrischer Strom	A
J	Funktionaldeterminante	
$\mathbf{J}$	magnetische Polarisation	Vsm^{-2}
K	Wellenzahl	m^{-1}
$\mathbf{K}$	Wellenvektor	m^{-1}
k	Federkonstante	Nm^{-1}
$\mathbf{k}$	Volumenkraftdichte	Nm^{-3}
l	Länge	m
M	Moment	Nm
m	Symbol für eine Spiegelebene (miroir)	
m	Masse	kg
N	Anzahl der Elementarzellen pro Volumeneinheit	m^{-3}
$\mathbf{N}$	Einheitsvektor in der Referenzkonfiguration	
n	Zähligkeit einer Drehachse	
n_1, n_2, n_3	ganze Zahlen	
$\mathbf{n}$	Einheitsvektor in der aktuellen Konfiguration, Normalenvektor	

Symbol	Bedeutung	Einheit
O	Koordinatenursprung	
P	Punkt, Symbol für ein primitives Bravais Gitter	
$\mathbf{P}$	elektrische Polarisation	Cm^{-2}
P_s	spontane Polarisation	Cm^{-2}
p	Druck	Pa
	elektrisches Dipolmoment	Cm
p_i	pyroelektrischer Koeffizient	$\text{Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Q	Punkt	
	elektrische Ladung	C
q_i	pyroelektrischer Modul	C^{-1}m^2
$q_{ij\lambda}$	Elektrostriktionskoeffizient	V^{-2}m^2
R	Symbol für ein rhomboedrisches Bravais Gitter	
	elektrischer Widerstand	Ω
r	Radius	m
$\mathbf{r}$	Ortsvektor	
$r_{\lambda k}$	elektrooptische Konstante	mV^{-1}
s	Weg	m
S_{ij}, S_{λ}	infinitesimaler Deformationstensor	1
$s_{ijkl}, s_{\lambda\mu}$	Elastizitätskoeffizient	m^2N^{-1}
$s_{ijklmn}, s_{\lambda\mu\nu}$	Elastizitätskoeffizient dritter Ordnung	N^{-2}m^4
T	Drehmoment (Kräftepaar)	Nm
$\mathbf{T}$	Gittertranslation	
T_{ij}, T_{λ}	Spannungstensor (Cauchyscher Spannungstensor)	Nm^{-2}
t	Zeit	s
$\mathbf{t}$	Flächenkraftdichte, Spannungsvektor	Nm^{-2}
U	elektrische Spannung	V
	innere Energie pro Volumeneinheit	Jm^{-3}
u	Verschiebung	m
$\mathbf{u}$	Verschiebungsvektor	m
V	Volumen, Volumen in der Referenzkonfiguration	m^3
V_{kl}	Lagrangescher Deformationstensor	1
v	Volumen in der aktuellen Konfiguration	m^3
	Geschwindigkeit	ms^{-1}
	Verstärkungsfaktor	1
W	Arbeit	J
w	Energiedichte	Jm^{-3}
X_1, X_2, X_3	Koordinatenachsen, materielle oder Lagrangesche Koordinaten	
$\mathbf{X}$	Ortsvektor in der Referenzkonfiguration	
x_1, x_2, x_3	Koordinatenachsen, räumliche oder Eulersche Koordinaten (Ortskoordinaten)	
x, y, z	kartesische Koordinatenachsen	
$\mathbf{x}$	Ortsvektor in der aktuellen Konfiguration	

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Polarisierbarkeit Dämpfungskonstante	kg s^{-1}
α, β, γ	von den Translationsvektoren eingeschlossene Winkel, Gitterkonstanten	
$\alpha_{ij}, \alpha_\lambda$	thermischer Ausdehnungskoeffizient	K^{-1}
β_{ij}	Impermittivitätstensor	mF^{-1}
γ	Proportionalitätsfaktor	
$\gamma_{ij}, \gamma_\lambda$	thermischer Spannungsmodul	1
Δ	logarithmisches Dekrement	
Δ^e bzw. Δ^s	Determinante der Elastizitätsmoduln bzw. -koeffizienten	
$\Delta_{\lambda\mu}^e$ bzw. $\Delta_{\lambda\mu}^s$	Unterdeterminante des Elementes $c_{\lambda\mu}$ bzw. $s_{\lambda\mu}$	
δ	Abklingkonstante	s^{-1}
$\delta_{ij}^i, \delta_{ij}$	Kronecker-Symbol	
ε	Permittivität	Fm^{-1}
ε_0	elektrische Feldkonstante ($\varepsilon_0 = 8,854186 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)	Fm^{-1}
ε_{ij}	Permittivitätstensor	Fm^{-1}
$\varepsilon_{ij}/\varepsilon_0$	Permittivitätszahl	1
ε_{ijk}	elektrooptischer Koeffizient	CV^{-2}
η_{ij}	magnetoelektrischer Koeffizient	m^{-1}s
Θ	Winkel	
Θ	Temperatur	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
Θ_0 bzw. Θ'_0	parelektrische bzw. ferroelektrische Curie-Weiß-Temperatur (nur in (5.74) und (5.75))	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
Θ_0	durch (5.80) definierte Temperatur, für die $1/\chi = 0$	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
Θ_C	Curie-Temperatur	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
ϑ	Winkel Dämpfungszahl	
$\varkappa_{ij}$	magnetische Suszeptibilität	1
λ	Zahlenfaktor	1
	Wellenlänge	m
μ	reduzierte Masse	kg
μ_0	magnetische Feldkonstante ($\mu_0 = 1,256637 \cdot 10^{-6} \text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$)	$\text{VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$
ν	Poissonsche Zahl	1
ξ, η, ζ	Drehwinkel um die x_1, x_2, x_3 -Achse	
Π	hydrostatistischer Druck	Nm^{-2}
$\Pi_{\lambda\mu}$	piezooptische Konstante	N^{-1}m^2
π	Ludolfische Zahl ($\pi = 3,1415926 \dots$)	
π_i	pyroelektrischer Koeffizient	$\text{Vm}^{-1}\text{K}^{-1}$
π_{ij}	piezomagnetischer Koeffizient	A^{-1}m
ϱ	Massendichte Ladungsdichte	kgm^{-3} Cm^{-3}
ϱ_i	pyroelektrischer Modul	V^{-1}m

Symbol	Bedeutung	Einheit
Σ	Entropie	JK^{-1}
σ	Entropiedichte	$\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
σ	Normalspannung	Nm^{-2}
$\sigma_{ij}, \sigma_\lambda$	thermischer Ausdehnungsmodul	N^{-1}m^2
τ	Schubspannung	Nm^{-2}
τ	Zeitkonstante	s
τ_{ij}, τ_λ	thermischer Spannungskoeffizient	$\text{Nm}^{-2}\text{K}^{-1}$
φ	Phasenwinkel	
χ	elektrische Suszeptibilität	1
χ_{ij}	Suszeptibilitätstensor	1
ω	Kreisfrequenz	s^{-1}

H. Kronmüller, F. Barakat

Prozeßmeßtechnik

1. Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen

Hochschultext

1974. 143 Abbildungen. VII, 203 Seiten

DM 24,-

ISBN 3-540-06545-8

Inhaltsübersicht: Weg- und Winkelmessung. – Kraftmessung. – Druck- und Niveaumessung. – Durchflußmessung. – Temperaturmessung. – Zeitmessung. – Geschwindigkeits- und Drehzahlmessung. – Messung radioaktiver Strahlung.

Aus den Besprechungen:

„... Der aus seiner Industrietätigkeit bekannte Fachmann Kronmüller hat jetzt als Hochschullehrer seine Erfahrungen auf diesem Gebiet in einer methodischen Übersicht über die elementaren Meßmethoden, Meßfühler und -schaltungen wiedergegeben... Hervorzuheben sind die informativen Abbildungen, teils zum Deutlichmachen der Zusammenhänge, teils zur übersichtlichen Darstellung der Meßgeräte.

Das Buch ist nicht nur Studierenden an Hochschulen und Fachhochschulen als leicht verständliches und übersichtliches Lehrbuch zu empfehlen, sondern auch dem Ingenieur in der Praxis, der wertvolle Anregungen zur Auswahl der Meßmethoden und zum Abschätzen der erreichbaren Empfindlichkeit und Meßunsicherheit der Meßanordnung daraus gewinnen kann. ...“

Elektrotechnische Zeitschrift

P. M. Pflüger, H. Jahn, G. Jentsch

Elektrische Meßgeräte und Meßverfahren

4., völlig Neubearbeitete Auflage von G. Jentsch

1978. 392 Abbildungen, 13 Tabellen.

VIII, 433 Seiten

Gebunden DM 128,-

ISBN 3-540-08601-3

Inhaltsübersicht:

Meßtechnische Begriffe. – Direkt wirkende elektrische Meßwerke. – Meßeinrichtungen und Meßverfahren. – Normen und Regeln für elektrische Meßgeräte.

Das Buch vermittelt Studenten und Praktikern einen umfassenden Überblick über die Eigenschaften, Schaltungen und Anwendungen von Meßgeräten zur elektrischen Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen. Im einzelnen werden die Funktionsglieder der Meßkette zum Aufnehmen, Anpassen, Verstärken, Verarbeiten und Ausgeben von Meßgrößen von der herkömmlichen analogen Meßtechnik bis zur digitalen automatischen Meßwertverarbeitung behandelt.

Für die Neuauflage wurde die Darstellung der klassischen Meßgeräte und -verfahren systematisch überarbeitet und aktualisiert. Die Abschnitte über elektrische Meßverstärker und die digitale Meßtechnik sind unter Berücksichtigung der heutigen Halbleitertechnik wesentlich erweitert worden.

Preisänderungen vorbehalten



Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

A. M. Ašner

Stoßspannungs-Meßtechnik

1974. 101 Abbildungen. VII, 115 Seiten
Gebunden DM 58,-
ISBN 3-540-06353-6

Aus den Besprechungen:

„... Die Art der Darstellung, unterstützt durch reichliches Bildmaterial, ermöglicht eine rasche und gute Information über die behandelten Spezialgebiete. Ein umfangreiches Literaturverzeichnis gibt weitere Hinweise.

Ein empfehlenswertes Buch für Ingenieure und Studierende, die sich über das behandelte Spezialgebiet informieren wollen.“

*E. u. M. Elektrotechnik
und Maschinenbau*

L. Borucki, J. Dittmann

Digitale Meßtechnik

Eine Einführung

2., neu bearbeitete Auflage 1971. 242 Abbildungen, 32 Tabellen. VII, 252 Seiten
Gebunden DM 62,-
ISBN 3-540-05058-2

Aus den Besprechungen:

„... Das Buch ist sehr klar aufgebaut, flüssig geschrieben, setzt die Grundlagen weitgehend selbst und ist somit auch für Nicht-Elektroniker sehr empfehlenswert. Sehr wertvoll sind auch die jedem Kapitel beigelegten, auf neuestem Stand befindlichen Literaturhinweise und der (mathematische) Anhang. Es ist ein Buch, das dem Lernenden umfassendes Wissen vermittelt und auch als Übersichts- und Nachschlagewerk für den Spezialisten dienlich ist.“

*etz-b Elektrotechnische Zeitschrift –
Ausgabe b*



Springer-Verlag
Berlin
Heidelberg
New York

C. Brinkmann

Die Isolierstoffe der Elektrotechnik

1975. 213 Abbildungen. VIII, 437 Seiten
Gebunden DM 148,-
ISBN 3-540-07105-9

Aus den Besprechungen:

„... Im vorliegenden Buch werden sämtliche, derzeit zur Verfügung stehenden Isolierstoffe behandelt. Einen besonders breiten Raum mit mehr als der Hälfte der Buchseiten nimmt die Beschreibung der Kunststoffe ein. Es werden aber auch eingangs grundlegende Ausführungen über Isolierstoffkunde gebracht.

Im Hinblick auf Ausführung und Inhalt ein empfehlenswertes Buch, das dem Praktiker und dem Studierenden rasch zu Informationen verhilft, die sonst aus Einzelveröffentlichungen zusammengeholt werden müßten.

Hinweise auf Literaturstellen geben 288 Aufzählungen und 35 Buchtitel. Ein Sachverzeichnis erleichtert das Auffinden.“

Elin-Zeitschrift

Elektrokeramik

Werkstoffe – Herstellung – Prüfung – Anwendungen

Mit Unterstützung der Keramischen und der Elektroindustrie herausgegeben von A. Hecht
Bearbeitet von E. Albers-Schönberg, A. Hecht, W. Rath, K. Schaudinn, W. Schlegel, W. Soyck

2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 1976.
197 Abbildungen. VII, 334 Seiten
Gebunden DM 138,-
ISBN 3-540-07276-4

Aus den Besprechungen:

„... Die großen Vorteile, aus einer Hand über Rohstoffe, Herstellung, Eigenschaften, Anwendung und Prüfung informiert zu werden, mit Tabellen zu all diesen Gesichtspunkten, unter Angabe von Normen und Vorschriften, macht auch diese Auflage zu einem Standardwerk, das Firmen der Elektrokeramik- und Elektroindustrie, Studenten, Lehrern und Forschern, wie auch Bibliotheken ... nur empfohlen werden kann.“

Berichte der Dt. Keramischen Gesellschaft

Preisänderungen vorbehalten

Inhaltsverzeichnis

	Symbolverzeichnis	XIV
1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Piezoelektrizität	4
2.1	Der direkte und der reziproke piezoelektrische Effekt	4
2.2	Die Entdeckung der Piezoelektrizität	5
2.3	Entwicklung der technischen Anwendung der Piezoelektrizität ...	5
2.4	Entwicklung der Theorie des piezoelektrischen Effektes	7
3	Grundlagen der phänomenologischen Kristallphysik	8
3.1	Die Struktur der Kristalle	8
3.1.1	Die Symmetrieeigenschaften des Translationsgitters	9
3.1.2	Bravais-Gitter	11
3.1.3	Raumgruppen	13
3.1.4	Symmetrieklassen	13
3.2	Einführung in die Tensorrechnung	13
3.2.1	Skalare und Vektoren	15
3.2.2	Die Beziehungen zwischen den Vektorkoordinaten in zwei verschiedenen Grundsystemen mit gemeinsamem Koordinatenursprung ..	15
3.2.3	Die kovarianten und kontravarianten Basisvektoren (Koordinaten)	18
3.2.4	Die Metrik-Koeffizienten	20
3.2.5	Anschauliche Bedeutung der kontravarianten und kovarianten Koordinaten	21
3.3	Einige Anwendungen der Tensorrechnung in der Kristallphysik ..	22
3.3.1	Das reziproke Gitter und die Millerschen Indizes	22
3.3.2	Das kartesische Koordinatensystem	26
3.3.3	Dielektrische Permittivität als Beispiel eines Tensors zweiter Stufe .	27

3.3.4	Tensoren p -ter Stufe	30
3.3.5	Symmetrischer und antisymmetrischer Tensor zweiter Stufe	30
3.3.6	Die Hauptachsentransformation von symmetrischen Tensoren zweiter Stufe	31
4	Elastische Eigenschaften der Kristalle	33
4.1	Der Verzerrungszustand	33
4.2	Der Spannungszustand	40
4.3	Das Hookesche Gesetz	44
4.4	Transformationsgleichungen für elastische Konstanten	48
4.5	Der Youngsche Modul und die Poissonsche Zahl	49
4.6	Thermodynamik der Deformation	50
5	Grundlagen der Thermodynamik der piezoelektrischen Kristalle	54
5.1	Dielektrische Eigenschaften	54
5.2	Innere Energie des elastischen Dielektrikums	55
5.3	Lineare Zustandsgleichungen	56
5.4	Materialkonstanten	59
5.5	Beziehungen zwischen den Materialkonstanten	63
5.6	Die piezoelektrischen Konstanten	67
5.7	Die vier Arten des piezoelektrischen Effektes	70
5.8	Der piezoelektrische Effekt und die Kristallsymmetrie	71
5.9	Transformationsgleichungen für piezoelektrische Konstanten	73
5.10	Der pyroelektrische Effekt	74
5.11	Der hydrostatische piezoelektrische Effekt	77
5.12	Ferroelektrizität	77
5.12.1	Besondere Eigenschaften der Ferroelektrika	78
5.12.2	Thermodynamische Theorie	80
5.12.3	Mikrophysikalisches Modell zur Erklärung der Ferroelektrizität ..	86
5.12.4	Antiferroelektrizität	91
5.13	Ferroika	92
5.14	Nichtlineare Effekte	94
5.14.1	Der elektrooptische Effekt	96
5.14.2	Die Elektrostriktion	97
5.14.3	Der elektroelastische Effekt	98
5.14.4	Elastische Konstanten dritter Ordnung	99
6	Piezoelektrische Materialien	100
6.1	Allgemeine Anforderungen an piezoelektrische Materialien für Aufnehmer	100
6.2	Quarz	101

6.2.1	Wahl des Koordinatensystems	102
6.2.2	Physikalische Eigenschaften	104
6.2.3	Synthetische Quarzkristalle	106
6.2.4	Zwillingsbildung	107
6.2.5	Unterdrückung der sekundären Zwillingsbildung	112
6.2.6	Temperaturabhängigkeit der piezoelektrischen Konstanten	114
6.2.7	Nichtlineare elektromechanische Eigenschaften des α -Quarzes	115
6.2.8	Piezoelektrische Eigenschaften des β -Quarzes	116
6.3	Turmalin	117
6.4	Einige andere piezoelektrische Einkristalle	120
6.5	Piezoelektrische Texturen	122
6.5.1	Piezoelektrische Keramiken	122
6.5.2	Piezoelektrizität in dünnen Schichten von Polymeren	127
7	Grundbegriffe der piezoelektrischen Meßtechnik	128
7.1	Wahl der Begriffe und Definitionen	128
7.2	Definition eines Aufnehmers	129
7.3	Meßtechnische Eigenschaften der Aufnehmer	130
7.3.1	Statische Eigenschaften	130
7.3.1.1	Eigenschaften, die sich auf die Meßgröße beziehen	130
7.3.1.2	Eigenschaften der Beziehung zwischen Meßgröße und Ausgangssignal	131
7.3.1.3	Einflüsse der Temperatur auf die Beziehung zwischen Meßgröße und Ausgangssignal	135
7.3.1.4	Einflüsse von Beschleunigung, Vibration und Schock auf die Beziehung zwischen Meßgröße und Ausgangssignal	139
7.3.2	Dynamische Eigenschaften	140
7.3.3	Elektrische Eigenschaften	143
7.3.4	Einflüsse der Aufnehmermontage	144
7.3.5	Lebensdauer des Aufnehmers	144
7.3.6	Übersprechen	145
8	Piezoelektrische Aufnehmer	146
8.1	Einführung	146
8.2	Grundsätzliches zur Kraftmessung	147
8.3	Prinzipieller Aufbau der Aufnehmer	148
8.4	Allgemeine Übersicht über den praktischen Aufbau der Aufnehmer	154
8.5	Bauteile der Aufnehmer	156
8.5.1	Aufnehmerelemente	156

8.5.1.1	Quarz	157
8.5.1.2	Turmalin	158
8.5.1.3	Piezoelektrische Keramiken	158
8.5.2	Elektroden	158
8.5.3	Isolationsmaterialien	159
8.5.4	Vorspannelemente	159
8.5.5	Aufnehmergehäuse	160
8.5.6	Stecker	160
9	Aufnehmer für Kräfte und Momente	162
9.1	Allgemeines	162
9.2	Aufnehmer für Kräfte	162
9.3	Mehrkomponenten-Kraftaufnehmer	169
9.4	Aufnehmer für Momente	170
9.5	Meßtechnische Besonderheiten von Ein- und Mehrkomponenten-Kraftmeßsystemen	171
9.6	Einbau von Kraftaufnehmern	174
9.7	Sechskomponenten-Kraftmessung	175
9.8	Grundlagen der Kalibrierung von Kraftaufnehmern	181
10	Druckaufnehmer	184
10.1	Allgemeines	184
10.2	Aufbau piezoelektrischer Druckaufnehmer	185
10.3	Niederdruck-Aufnehmer	187
10.4	Druckaufnehmer für allgemeine Anwendungen	188
10.5	Hochdruck-Aufnehmer	189
10.6	Druckaufnehmer mit Beschleunigungskompensation	190
10.7	Druckaufnehmer für hohe Temperaturen	193
10.8	Druckaufnehmer für plastische Massen	194
10.9	Grundlagen der Kalibrierung von Druckaufnehmern	195
11	Beschleunigungsaufnehmer	197
11.1	Allgemeines	197
11.2	Grundlegende Eigenschaften von Beschleunigungsaufnehmern ...	197
11.3	Bauformen piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer	205
11.4	Besondere Eigenschaften von Beschleunigungsaufnehmern mit Auf- nehmerelementen aus Turmalin oder piezoelektrischen Keramiken	207
11.5	Hochempfindliche Beschleunigungsaufnehmer	209
11.6	Beschleunigungsaufnehmer für allgemeine Anwendungen	210
11.7	Beschleunigungsaufnehmer für Schockmessungen	212