Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 21

Artikel: Über die Messung mechanischer Spannungen in Epoxidharzkörpern

Autor: Beyer, M. / Jähne, H.-J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915615

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Über die Messung mechanischer Spannungen in Epoxidharzkörpern

Von *M. Beyer* und *H.-J. Jähne*

681.2 : 531.252.3 : 678.643'42'5

Es wird über die Ermittlung innerer mechanischer Spannungen in Epoxidharzkörpern berichtet. Zunächst erfolgt eine Zusammenstellung verschiedener Bestimmungsmöglichkeiten. Danach wird auf zwei Messmethoden mit Piezo-Quarzen eingegangen.

Exposé sur la détermination des tensions mécaniques internes dans des corps en résine époxyde. Indication des différentes possibilités de détermination, puis description de deux méthodes de mesure avec quartz piézo-électriques.

1. Bestimmungsmöglichkeiten innerer mechanischer Spannungen in Harzkörpern

Bei der Herstellung von Giessharzformstoffen bilden sich abhängig von der Formgebung der Körper sowohl bei der Aushärtung als auch bei der nachfolgenden Abkühlung infolge des Schwundes und der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der eingegossenen Materialien und des Harzes innere mechanische Spannungen aus. Bei Temperaturwechsel und bei zusätzlich aufgebrachten äusseren mechanischen Spannungen können die örtlich unterschiedlichen inneren Spannungen so gross werden, dass es zur Bildung von Rissen kommt, welche die mechanische und elektrische Festigkeit beeinträchtigen. Es hat daher nicht an Versuchen gefehlt, sich über die Verteilung und jeweilige Höhe dieser inneren mechanischen Spannungen eine Aussage zu verschaffen, wobei jedoch eine universell anwendbare Methode bisher nicht gefunden wurde.

Fig. 1 zeigt eine Übersicht der grundsätzlichen Möglichkeiten. Handelt es sich um einen einfach aufgebauten, symmetrischen Körper (z. B. Zylinder), so ist – auch bei zusätzlicher Einbettung eines symmetrischen Fremdwerkstoffes – eine Berechnung des Spannungszustandes durchführbar [1...7][1]). Bei komplizierten Bauteilen – insbesondere bei nichtsymmetrischen – ist nur eine Messung der inneren Spannungen möglich. Hier gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

a) Messung ohne Geber,
b) Messung mit Geber

(Fig. 1), wobei unter Geber das Element verstanden wird, das die mechanische in eine elektrische Grösse umformt.

Die Messung ohne Geber beruht darauf, dass Harz unverspannt optisch isotrop ist und infolge innerer mechanischer Spannungen doppelbrechend wird [8; 9] und dass der dielektrische Verlustfaktor bzw. die Dielektrizitätskonstante von den inneren Spannungen beeinflusst werden [10]. Diese Methode wäre optimal, da keine die Spannungsverteilung störenden Geber mit eingegossen werden müssen. Entscheidende Nachteile jedoch sind, dass die Spannungsoptik nur im Klarharz durchführbar ist und auch nur bei verhältnismässig übersichtlichen Spannungsverhältnissen zu sicheren Ergebnissen führt. Dielektrische Messungen sind nur an geeigneten Probekörpern möglich, wobei jedoch der unmittelbare Zusammenhang zwischen den inneren mechanischen Spannungen und den dielektrischen Eigenschaften noch nicht soweit geklärt ist, dass sich aus den gemessenen dielektrischen Werten die Höhe und Art der mechanischen Spannungen angeben lassen. Zur Klärung dieses Zusammenhanges laufen Versuche.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Die Möglichkeiten mit Gebern kann man in drei Teilgebiete unterteilen:

1. Ohne Anschlussdrähte;
2. Sonderfall: Thermometerinkrement-Methode;
3. Mit Anschlussdrähten (Fig. 1).

In allen Fällen wird ein Fremdwerkstoff – der Geber – im Harz mit eingegossen, was eine unvermeidliche Störung der Spannungsverhältnisse bedeutet. Diese Störung muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Die Ermittlung der Spannungen mit Gebern ohne Anschlussdrähte beruht auf der Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaften verschiedener Werkstoffe von mechanischen Spannungen. Es kann einmal die Permeabilität durch Spannungen geändert werden (magnetoelastischer Effekt, ME), oder es ändert sich die remanente Induktion und die Koerzitivfeldstärke (magnetostriktiver Effekt, MS) [11...13]. Beide Anwendungsfälle sind jedoch auf kleine Laborprüfkörper beschränkt, da insbesondere die Halterung der drahtlosen Geber im Harz Schwierigkeiten bereitet. Bei der Fixierung wird entweder die zu einer bestimmten Beanspruchung gehörende Doppelbrechung eingefroren, oder es werden Kugeln aus thermoplastischem Material mit eingegossen. Aus deren Verformung wird nach Durchfahren eines bestimmten Temperaturzyklus auf die örtlichen mechanischen Spannungen geschlossen [14]. Der Sonderfall bei den Gebermessungen, die Thermometerinkrementmethode, basiert auf der Kompression eines im Harz eingegossenen Quecksilberthermometers unter dem Einfluss des Schwindungsdruckes [4]. Diese Methode bereitet Schwierigkeiten, wenn an verschiedenen Stellen und in verschiedenen Ebenen eines Körpers gemessen werden soll.

Bei den Messmöglichkeiten mit Gebern mit Anschlussdrähten werden zwei Gruppen unterschieden. Einmal die Gruppe der passiven Geber, die eine Hilfsenergie benötigen (piezoresistiv und piezoelektrisch, passiv eingesetzt), zum anderen die Gruppe der aktiven Geber, die selbst eine Spannung oder einen Strom dadurch erzeugen, dass sie dem Messobjekt die Energie entziehen (Transistor, piezoelektrisch, aktiv). Bei der piezoresistiven Methode wird der Ohmsche Widerstand eines Leiters durch Dehnung oder Stauchung verändert (Dehnungsmeßstreifen) [15]. Nachteil dieser Methode ist, dass die Spannung kaum punktförmig aufgenommen werden kann, da die Dehnungsmeßstreifen in verhältnismässig grossen Messwertaufnehmern fixiert werden müssen. Mit Transistormethode wird hier ein Verfahren bezeichnet, bei dem druckabhängige Transistoren im Harz mit eingegossen werden. Über eine Verstärkerschaltung ist eine Druckanzeige möglich, jedoch nur auf wenige Anwendungsfälle beschränkt, da diese Transistoren

keine höheren Temperaturen als ca. 70 °C vertragen. Die piezoelektrische Methode benutzt Quarze, die aktiv und passiv eingesetzt werden können. Von den beschriebenen Methoden bieten nur die Piezo-Quarze die Möglichkeit einer universellen Anwendung zur punktförmigen Ermittlung innerer mechanischer Spannungen in beliebigen Epoxidharzformstoffen. Dieser Methode wurde bisher wenig Beachtung geschenkt, da man Schwierigkeiten sah, die schnell abfliessenden elektrostatischen Ladungen auszuwerten.

2. Piezoelektrische Messmethode

2.1 Der Quarzgeber

Als Geber wird eine Scheibe aus piezoelektrischem Werkstoff (Bleizirkonat-Titanat) verwendet, der einen Elastizitätsmodul von 9,2 Nm^{-2} hat. Die Curietemperatur des Werkstoffes beträgt 360 °C, der spezifische Widerstand 10^{13} Ω cm, und die Belastungsgrenze liegt bei 6 $kNcm^{-2}$. Oberhalb dieser Grenze ist mit einer partiellen Depolarisation des Werkstoffes zu rechnen, d.h. der Quarz nimmt dann selbst nach einer gewissen Beruhigungszeit nicht wieder seine ursprünglichen elektrischen und mechanischen Werte an.

Die Quarzscheibe (Durchmesser 2 bis 4 mm, Dicke 0,3 mm) ist geschliffen, polarisiert und an den Stirnflächen versilbert. Zwei lackisolierte Kupferdrähte (Durchmesser 0,1 mm) werden auf die Stirnflächen mit einem Einkomponenten-Silber-Leitkleber aufgeklebt. Aus Isolationsgründen wird der Geber einschliesslich der Klebeflächen mit einer dünnen Epoxidharzschicht überzogen.

2.2 Aktive Messmethode

Fig. 2 zeigt die Messanordnung für den aktiven Quarz. Sie besteht aus dem Aufnehmerteil (Quarzgeber, QG), dem Umwandlungsteil (Meßstellenumschalter, MU, und Ladungsverstärker, LV) sowie dem Registrierungsteil, RT. Die Quarzgeber sind in der Giessform an verschiedenen Stellen und in verschiedenen Ebenen angeordnet. Sie nutzen die mikroskopischen Wegänderungen aus, die sich während der Polyaddition, bei der Abkühlung des Giesslings von der Härtetemperatur auf Raumtemperatur und evtl. beim Nachschwund im Harz vollziehen. Durch diese Wegänderungen werden Kräfte auf die Quarzgeber ausgeübt, ihre Atomgitter werden verspannt, und es werden je nach Richtung der Kräfte (Druck oder Zug) positive oder negative Ladungen an den Anoden (a) erzeugt. Eine Zugbelastung an den Flächen der Quarzgeber bedeutet im Harz senkrecht dazu eine Druckbelastung an den Rändern. In diesem Fall entstehen negative Ladungen an den Anoden. Die Menge der erzeugten Ladungen ist ein Mass für die Grösse der Verspannungen im Harzkörper. Man muss daher sicherstellen, dass alle erzeugten Ladungen möglichst verlustfrei gespeichert, registriert und damit ausgewertet werden können.

Im Umwandlungsteil werden die erzeugten Ladungen zunächst im Meßstellenumschalter in Parallelkapazitäten C_p gespeichert. Jeder Quarzgeber ist ständig an eine Kapazität ange-

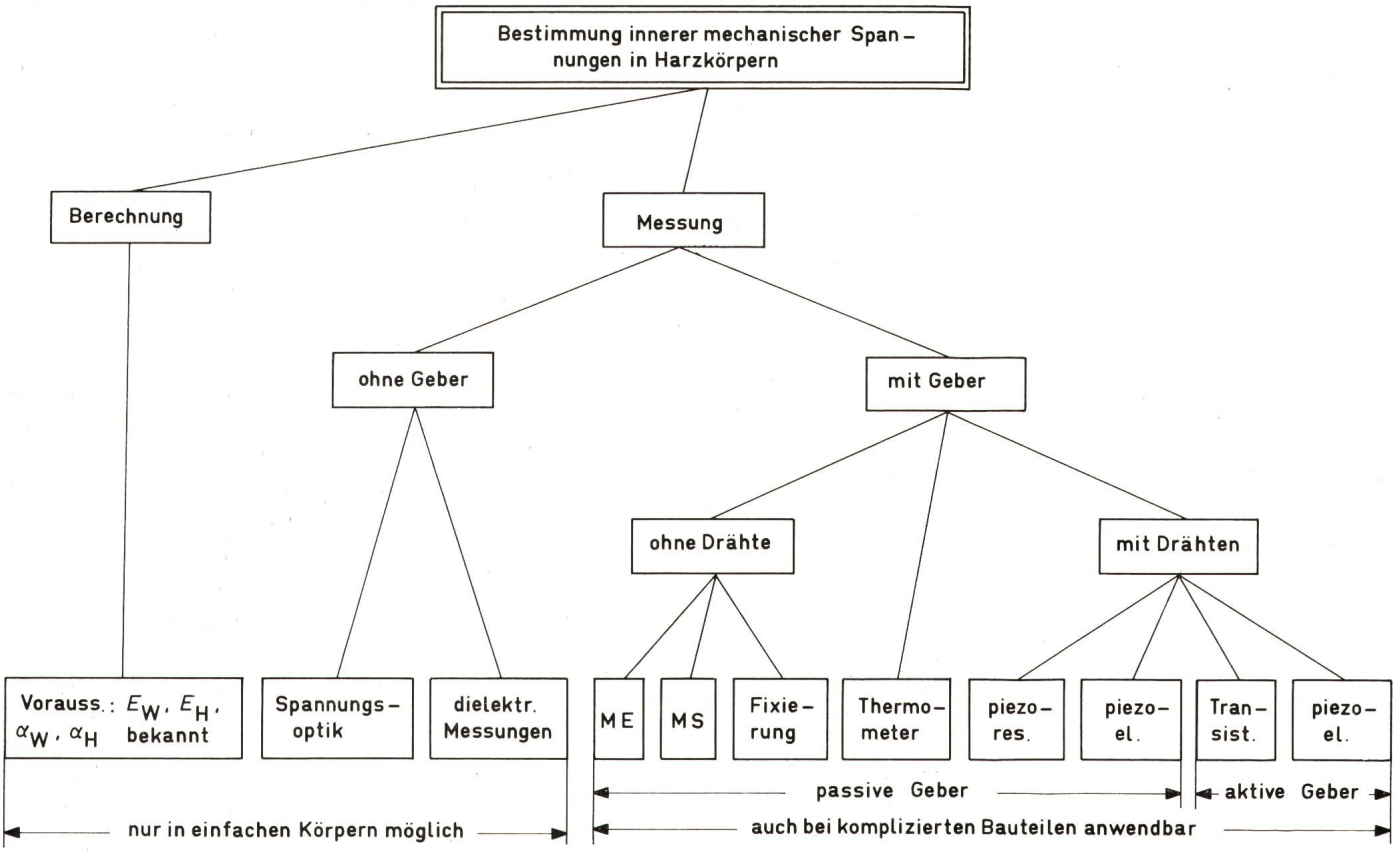

Fig. 1
Möglichkeiten der Bestimmung innerer mechanischer Spannungen in Harzkörpern

E	Elastizitätsmodul	*MS*	magnetostriktiver Effekt
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	*W*	weichelastischer Zustand
ME	magnetoelastischer Effekt	*H*	hartelastischer Zustand

Erläuterungen siehe im Text

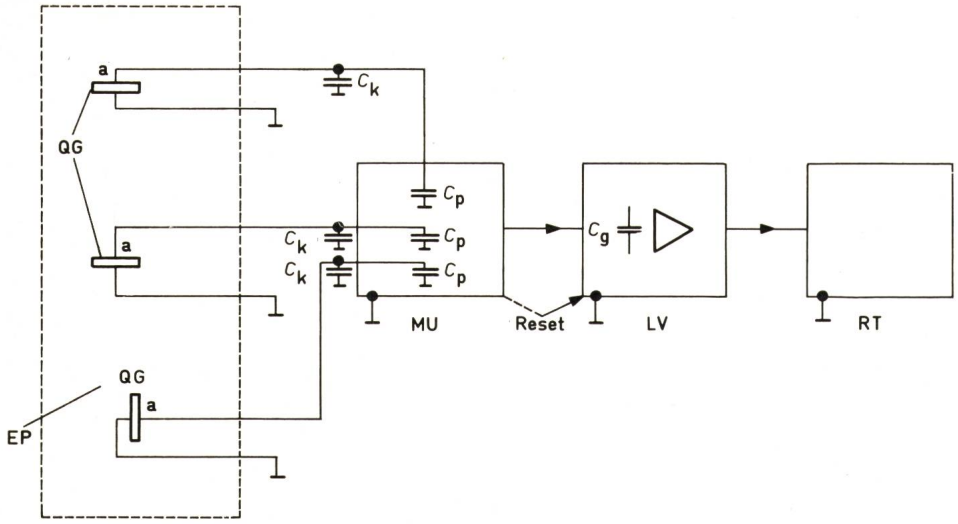

Fig. 2
Messeinrichtung für den aktiven Quarz

EP Epoxidharzkörper
QG Quarzgeber
MU Meßstellenumschalter
LV Ladungsverstärker
a Anode des Quarzgebers
RT Registrierungsteil
C_p Parallelkapazität
C_k Kabelkapazität
C_g Gegenkopplungskondensator

schlossen, deren Speichervermögen ca. 10^5 mal so gross ist wie das der statischen Kapazität der Quarzgeber. Ein Schrittschaltwerk im Meßstellenumschalter fragt in wählbaren Abständen und für wählbare Zeiten die Parallelkapazitäten einzeln ab. Es wird nacheinander jeweils eine Parallelschaltung, bestehend aus dem Quarzgeber (C_{stat} = 1,67 pF), der Kabelkapazität (C_k = 300 pF) und der Parallelkapazität (C_p = 0,22 µF), auf den Eingang des Ladungsverstärkers geschaltet.

Der Ladungsverstärker besteht im Prinzip aus einem Spannungsverstärker hoher Verstärkung mit einem Mosfet-Transistor am Eingang zur Erzielung des hohen Isolationswiderstandes. Die abgenommene Ladung wird auf dem Gegenkopplungskondensator C_g gespeichert und in eine proportionale Spannung am niederohmigen Ausgang umgewandelt. Auf diese Weise können die elektrostatischen Ladungen in Form einer Spannung auf dem an den Ladungsverstärker angeschlossenen Bandgerät, Linienschreiber oder Rechner registriert werden. In Fig. 2 ist eine weitere wesentliche Funktion des Meßstellenumschalters angedeutet. Nachdem der Gegenkopplungskondensator C_g die Ladung aufgenommen hat und die entsprechende Spannung registriert worden ist, muss C_g kurzgeschlossen werden, bevor die Ladungen vom nächsten Quarzgeber abgefragt werden. Dieses «Reset-Setzen» des Ladungsverstärkers und damit Zurücksetzen des Registrierungsteils führt der Meßstellenumschalter jeweils durch, bevor er den nächsten Quarzgeber anschliesst. Damit ergibt sich z. B. für einen Linienschreiber als Registrierungsteil das in Fig. 3 gezeigte Ergebnis. Es entstehen positive bzw. negative Anzeigen je nach Polarität der erzeugten Ladungen. Bei 3 Quarzgebern entspricht der senkrechte Anstieg (2/3 des Spannungsmaximums U_m) der in C_p während der Zeit gespeicherten Ladung, in welcher der jeweilige Quarzgeber nicht an den Ladungsverstärker angeschlossen ist. Der schräge Anstieg $U_m/3$ ist proportional der Ladungen, die während der Abfragezeit im Quarzgeber erzeugt werden. Die Addition aller Scheitelwerte für jeden Quarzgeber führt zu einem elektrischen Spannungswert (in V), dem ein mechanischer Spannungswert (in Ncm^{-2}) am Ort des Quarzgebers entspricht. Bei n Meßstellen beträgt der senkrechte Anstieg $(n - 1)\ U_m/n$ und der schräge Anstieg U_m/n.

Die Eichung der Geber stellt die Beziehung zwischen den elektrischen Spannungswerten und den gesuchten mechanischen Spannungswerten her, wozu eine Eichkurve aufgenommen werden muss. In dieser Kurve ist U_m in V als Funktion von den mechanischen Spannungen in Ncm^{-2} aufgetragen. Die Empfindlichkeit der Quarze V/Ncm^{-2} ist bis 5 $kNcm^{-2}$ konstant, so dass sich in den Eichblättern Geraden ergeben. Die Aufnahme der Geraden erfolgte durch Beaufschlagung der Geber mit definierten Gasdrücken. Zur Kontrolle und als Ergänzung wurden Quarzgeber in Klarharz eingegossen und über die spannungsoptische Auswertung geeicht. Schliesslich wurden auch Quarzgeber in gemagertes Harz eingegossen (Zylinder mit konzentrischer Messingelektrode) und deren Druckanzeige mit dem berechneten Spannungsverlauf verglichen. Es ergab sich als systematischer Fehler durch den Quarzgeber als Fremdkörper im Harz eine Druckerhöhung von etwa 5 %. Der Temperatureinfluss erwies sich als vernachlässigbar klein im Temperaturbereich bis 160 °C. Wichtig für die Genauigkeit der Messungen ist, dass ein Isolationswiderstand bis zum Eingang des Ladungsverstärkers von 10^{12} bis $10^{13}\Omega$ gewährleistet wird, damit bei den quasistatischen Messungen nur ein geringer Anteil der Ladungen abfliessen kann. Dieser Anteil kann aus dem Verhältnis des senkrechten zum schrägen Anstieg der Spannungswerte (Fig. 3) bestimmt werden. Er liegt bei dem verwendeten Messaufbau bei ca. 8 %. Beide systematischen Fehler müssen bei der Auswertung entsprechend berücksichtigt werden.

Diese aktive Messmethode ist nur anwendbar, wenn man den Aufbau innerer mechanischer Spannungen vom Giessprozess bis zur endgültigen Aushärtung verfolgen will, da nach diesem Verfahren nur die Änderung der inneren mechanischen Spannungen laufend erfasst werden kann.

2.3 Passive Messmethode

Unter Ausnutzung des reziproken Piezoeffektes können die Quarzgeber nach 2.1 auch passiv eingesetzt werden, d.h. man kann die inneren mechanischen Spannungen in einem Giessharzformstoff mit eingeschlossenen Quarzgebern nach der Aushärtung bestimmen. Ist ein Quarzgeber in einen Harzkörper eingegossen, so zwingt sein Einbettungsmedium ihm eine bestimmte eigene Frequenz auf, deren Grösse ein Mass für die inneren mechanischen Spannungen ist. Fig. 4 zeigt eine dafür mögliche Schaltung. Dabei handelt es sich um einen kapazitiven Dreipunktoszillator, dem zur Verstärkung des Ausgangssignals ein Emitterfolger nachgeschaltet ist. In dieser Schaltung bestimmt der Quarzgeber abhängig von seiner mechanischen Beanspruchung die Arbeitsfrequenz, die am Ausgang A mit

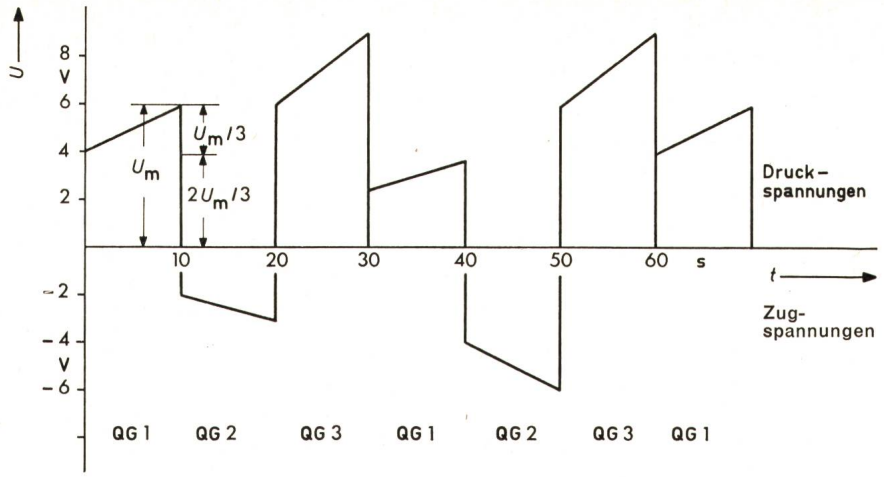

Fig. 3
Ergebnisse bei einem Linienschreiber als Registrierungsteil bei 3 Quarzgebern

U Spannung (den erzeugten Ladungen proportional)
U_m Maximalwert von U für jeden Quarzgeber bei einem Zyklus
t Zeit
QG Quarzgeber

Erläuterungen siehe im Text

einem hochohmigen Zähler gemessen wird. Fig. 5 zeigt die Abhängigkeit der Arbeitsfrequenz f der Schaltung von den inneren mechanischen Spannungen des Einbettungsharzes. f_E ist dabei die Arbeitsfrequenz, die sich bei einem Quarzgeber ohne mechanische Beanspruchung einstellt. Druckspannungen auf die Stirnflächen des Quarzgebers bewirken eine Dämpfung und damit ein Absinken der Frequenz. Zugspannungen an den Stirnflächen bedeuten gleichzeitig Druckspannungen an den Rändern. Auf diese Weise wird die Quarzscheibe und damit auch die Stirnflächen mit einer inneren Vorspannung versehen, was eine Frequenzerhöhung über f_E hinaus bedeutet. Dabei zeigt sich, dass der Quarzgeber auf eine Druckspannung wesentlich stärker mit einer Frequenzänderung reagiert als auf eine gleich grosse Zugspannung. Die Eichung erfolgt analog Abschnitt 2.2 bei konstanter Temperatur.

Ein Nachteil dieser Messmethode liegt darin, dass die Induktivität und Kapazität der Zuleitungen zum Quarzgeber in die Grösse der Arbeitsfrequenz eingehen. Aus diesem Grund muss bei den eigentlichen Messungen entweder absolut der gleiche Messaufbau wie bei der Eichung gewährleistet sein, oder der geänderte Messaufbau muss dadurch berücksichtigt werden, dass man erneut vor dem Vergiessen bei fixierter Lage der Zuleitungsdrähte die Eigenfrequenz der Quarze aufnimmt und die Eichkurve entsprechend korrigiert. Um diese Fehlereinflüsse zu eliminieren, kann die passive Messmethode insoweit abgewandelt werden, dass sie eine Kombination aus aktiver und passiver Methode darstellt. Verwendet werden dazu die gleichen Geber (s. Abschnitt 2.1), bei denen jedoch die beiden versilberten Flächen in der Mitte geteilt werden, so dass vier Elektroden entstehen. Über zwei Elektroden wird der Quarz mit einer definierten Frequenz erregt und schwingt je nach Einbettungsverhältnissen in einer bestimmten Weise im ausgehärteten Harzkörper. Dadurch werden auf den anderen beiden Elektroden Ladungen erzeugt und über den Ladungsverstärker ausgewertet. Damit sind die Einflüsse der Zuleitungen ausgeschaltet. Vorteile dieser Methode sind grössere Genauigkeit und grössere Empfindlichkeit. Nachteile sind der grosse Aufwand für die Geberherstellung und Eichung sowie die Tatsache, dass doppelt so viele Anschlussdrähte ins Harz eingeführt werden müssen.

3. Aufnahme und Weiterverfolgung einer Spannungsverteilung mit Quarzen

Es wurden mehrere Geber nach Abschnitt 2.1 an verschiedenen Orten und mit verschiedenen Messebenen in eine komplizierte Gussform eingebaut, bei der es insbesondere an einigen kritischen Stellen um punktförmige Aufnahme der örtlichen inneren mechanischen Spannungen ging. Dabei wurden zunächst die sich nach dem Vergiessen bei der Aushärtung und der anschliessenden Abkühlung ausbildenden mechanischen Spannungen nach der aktiven Methode aufgenommen. Anschliessend wurden die Messergebnisse bei Raumtemperatur mit der passiven Methode überprüft (es ergaben sich Abweichungen zur aktiven Methode von ca. 4...6 %) und die Veränderung der inneren mechanischen Spannungen über einen

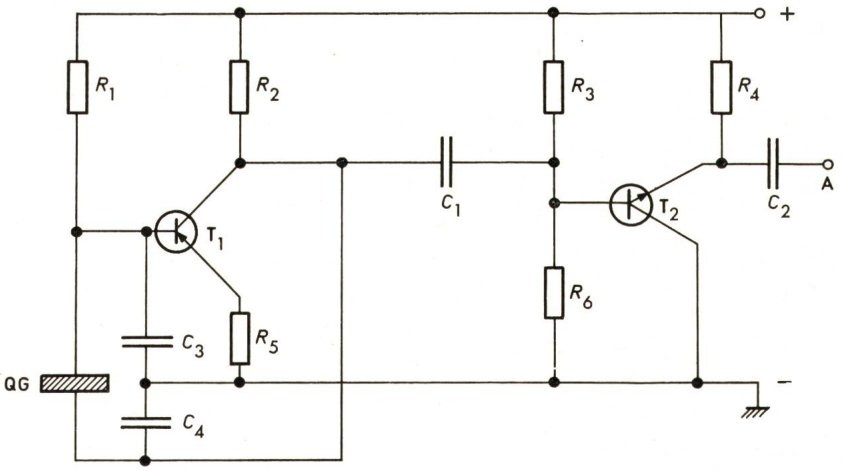

Fig. 4
Dreipunktoszillator mit Emitterfolger für passiven Einsatz der Quarzgeber

$R_1 ... R_6$ Widerstände
$C_1 ... C_4$ Kondensatoren
T_1, T_2 Transistoren
A Ausgang
QG Quarzgeber

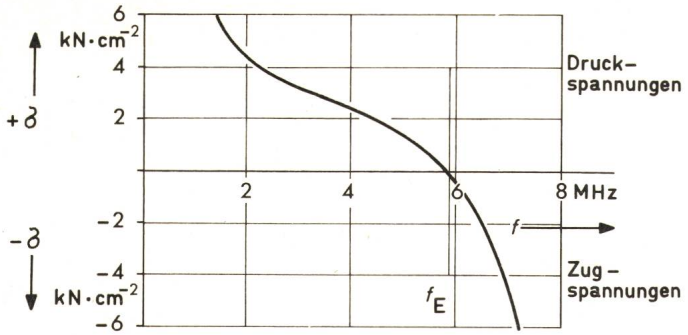

Fig. 5

Beispiel einer Eichkurve für passiven Quarzgeber im Dreipunktoszillator

f_E = 5,82 MHz
ϑ = 20 °C = konst.
σ innere mechanische Spannung im Harzkörper
f Arbeitsfrequenz der Schaltung (s. Fig. 4)
f_E Eigenfrequenz der Schaltung (Quarzgeber ohne Belastung)
ϑ Umgebungstemperatur des Quarzgebers

längeren Zeitraum weiter verfolgt, um einen evtl. einsetzenden Nachschwund des Harzes zu erfassen. Weiterhin wurde das Verhalten des Formkörpers bei Abkühlung auf tiefe Temperaturen und bei Temperaturwechselbeanspruchung untersucht.

Die Autoren danken der Sprecher & Schuh AG, Aarau, für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Untersuchungen.

Literatur

[1] *W. Tochtermann:* Maschinenelemente. 6. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1951.
[2] *H. Stamm* und *K. Hanella:* Ausgewählte Probleme der Hochspannungstechnik. Elektrische Giessharze. Berlin, VEB Verlag Technik, 1968.
[3] *A. Peiter:* Theoretische Spannungsanalyse an Schrumpfpassungen. Konstruktion 10(1958)10, S. 411...416.
[4] *K. Jellinek:* Schwindungsspannungen in Giessharzformstoffen und Schwindungsdrücke auf eingebettete Fremdwerkstoffe. Kunststoffe 56 (1966)7, S. 458...463.
[5] *S. P. Timoshenko:* Strength of materials. Two parts. Third edition. New York a. o., Van Nostrand, 1958/1959.
[6] *G. Lottanti* und *J. Bötschi:* Formbelegungszeiten drastisch reduziert. Maschinenmarkt 77(1971)73, S. 1671...1674.
[7] *A. Wiemer:* Die Schrumpfverbindung zur Übertragung von Drehmomenten. VDI-Zeitschrift 86(1942)17/18, S. 274...278.
[8] *H. Wolf:* Spannungsoptik. Ein Lehr- und Nachschlagebuch für Forschung, Technik und Unterricht. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1968.
[9] *L. Föppl* und *E. Mönch:* Praktische Spannungsoptik. 2. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1959.
[10] *H. Gildemeister* und *R. Tzscheutschler:* Beeinflussung des elektrischen Widerstandes und des dielektrischen Verlustfaktors durch innere mechanische Spannungen bei Epoxidharzen. Elektrie 25(1971)2, S. 57...58.
[11] *L. Merz* und *H. Scharwächter:* Magneto-elastische Druckmessung. ATM -(1937)11, V 132-15.
[12] *H. F. Grave:* Elektrische Messung nichtelektrischer Grössen. 2. Auflage. Frankfurt am Main, Akademische Verlagsanstalt, 1965.
[13] *C. Rohrbach:* Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Grössen. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1967.
[14] *R. Nitsche* und *K. A. Wolf:* Kunststoffe. Struktur, physikalisches Verhalten und Prüfung. Bd. 1: K. A. Wolf: Struktur und physikalisches Verhalten der Kunststoffe. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1962.
[15] *R. N. Sampson* and *J. P. Lesnick:* Strain gauge evaluation of casting resins. Technical Papers presented at the fourteenth Annual National Technical Conference of the Society of Plastics Engineers at Detroit, Michigan, January 1958. Greenwich/Connecticut, Society of Plastics Engineers, 1958; p. 101...108.

Adresse der Autoren:
Prof. Dr.-Ing. *M. Beyer* und Dipl.-Ing. *H.-J. Jähne,* Schering-Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen der TU Hannover, Callinstrasse 35, D-3 Hannover.

LEE DE FOREST

1873–1961

Union Internationale des Télécommunications, Genf

Die Amerikaner nennen Lee de Forest «Vater des Radios». Er erfand 1906 die Triode. Diesen Ruhm muss er allerdings mit dem Österreicher *Robert Lieben* teilen, der unabhängig von ihm in den Jahren 1906–1910 ebenfalls eine Eingitterröhre entwickelte.

Lee de Forest, geboren am 26. August 1873 in Council Bluffs im Staate Iowa, studierte an der Yale University, wo er 1899 den Doktorgrad erhielt mit einer Arbeit über die «Reflexion von Hertzschen Wellen an den Enden paralleler Drähte». Nachher arbeitete er bei der Western Electric Company in Chicago. Nach einem Jahr Studien über Empfänger für drahtlose Telegraphie gründete er eine eigene Unternehmung, in der für die amerikanische Armee Apparate nach eigenem System gebaut wurden.

Da weder der Kohärer von *Branly* noch der Detektor von *Oliver Lodge* befriedigenden Radioempfang erlaubten, suchte de Forest nach neuen Wegen. Auch sein im Jahre 1900 erfundenes elektrolytisches Gerät war noch unzuverlässig. Erst bei der Elektronenröhre von *Fleming* besass man im Gegensatz zu den von Zufälligkeiten abhängigen Kohärern und Detektoren ein Instrument mit eindeutigem Verhalten.

1906 machte de Forest seine einfache, aber folgenschwere Erfindung. Durch Anbringen einer dritten Elektrode zwischen Anode und Kathode, des Gitters, in der Elektronenröhre, entstand das so vielseitig verwendbare Audion (von de Forest auch Trigger genannt), durch das die stürmische Entwicklung von Radio, Tonfilm, Radar und Fernsehen eingeleitet wurde.

1912 nahm de Forest mit der Western Electric Kontakt auf und regte die Verwendung des Audions für transkontinentale Dienste an. Zwei Jahre später war dann das transkontinentale Telephon im Betrieb.

Die «Radio Corporation of America» entwickelte das Audion für die Zwecke des Radios, namentlich für Verstärker, die General Electric Company zu grossen Röhrensendern und schliesslich Westinghouse für industrielle Anwendungen. 1922 arbeitete de Forest in Berlin an Tonfilmproblemen.

Lee de Forest besass etwa 300 Patente, aber deren finanziellen Früchte entgingen ihm meistens. So kam es, dass er bei seinem am 30. Juni 1961 in Hollywood erfolgten Tod nur über bescheidene Mittel verfügte. Und heute, nur 12 Jahre nach seinem Tod, ist die Radioröhre, diese epochemachende Schöpfung vom Transistor schon weitgehend verdrängt. *H. Wüger*