

BAM-BERICHTE Nr.2

DER BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN-DAHLEM

Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern

von Dr.- Ing. Götz Andreae

	Seite
Übersicht	1
Einleitung	3
1. Der Einfluß von Feuchtigkeit auf ungeschützte Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber	
1.1 Der komplexe Eingangswiderstand Z^+ von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern	5
1.2 Die Änderung der elektrischen Eigenschaften von Trägern und Klebern und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+	
1.21 Allgemeine Überlegungen	5
1.22 Der Zusammenhang zwischen komplexem Isolationswiderstand Z_{Is} und komplexem Eingangswiderstand Z^+	5
1.23 Der komplexe spezifische Widerstand ζ von Trägern und Klebern und seine Deutung	10
1.24 Die komplexen Isolationswiderstände Z_{Is} auf Metall geklebter Dehnungsmeßstreifen	
1.241 Berechnete Isolationswiderstände	18
1.242 Gemessene Isolationswiderstände	19
1.243 Diskussion des Vergleichs von Messung und Rechnung	22
1.25 Die komplexen Querwiderstände Z_{Nq} von Dehnungsmeßstreifen	
1.251 Berechnete Querwiderstände	23
1.252 Gemessene Querwiderstände	24
1.253 Diskussion des Vergleichs von Messung und Rechnung	24
1.26 Die komplexen Eingangswiderstände Z^+ auf Metall geklebter Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber	
1.261 Berechnete Eingangswiderstände	24
1.262 Gemessene Eingangswiderstände	26
1.27 Zusammenfassung	27
1.3 Die Quellung und Schrumpfung von Trägern und Klebern und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+	
1.31 Allgemeine Überlegungen	28
1.32 Die Feuchtigkeitsaufnahme von Trägern und Klebern	28
1.33 Die Quellung von Trägern und Klebern	29
1.34 Der Eingangswiderstand Z^+ als Funktion der die Quellung verursachenden relativen Feuchte	
1.341 Der Einfluß der Bauteiloberfläche und der Kleberschichtdicke	29
1.342 Der Einfluß der Meßstreifenlänge	30
1.343 Der Einfluß der Feuchtigkeit zur Zeit der Klebung	30
1.35 Zusammenfassung	38
1.4 Die feuchtigkeitsbedingte Korrosion des Meßdrahtes und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+	38
1.5 Zusammenfassende Betrachtung bezüglich der Änderung des Eingangswiderstandes Z^+ aufgeklebter Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber unter dem Einfluß von Feuchtigkeit	39

2. Der Einfluß von Feuchtigkeit auf die Zuleitungskabel	
2.1 Allgemeine Überlegungen	41
2.2 Die Kabelkenngrößen und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+	41
2.3 Die Isolationseigenschaften von Lötstützpunkten und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+	42
3. Allgemeine Überlegungen zum Feuchtigkeitsschutz und ihre Anwendung auf den Schutz von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitern	
3.1 Die Wirkungsweise des Feuchtigkeitsschutzes	43
3.2 Die Anforderungen an einen Feuchtigkeitsschutz	46
3.3 Die Feuchtigkeitsschutzeigenschaften und die Feuchtigkeitsaufnahme von Feuchteschutzmitteln	
3.31 Die Wahl der Meßmethode	49
3.32 Das angewandte Meßverfahren	50
3.33 Die Meßergebnisse	52
3.4 Der komplexe spezifische Widerstand ζ einiger Schutzmittel	53
3.5 Die mechanischen Eigenschaften der Schutzmittel	
3.51 Allgemeine Überlegungen	54
3.52 Die mechanische Rückwirkung der Schutzschicht auf das Bauteil	54
3.53 Die obere Dehnungsgrenze und die Haftung der Schutzschicht	57
3.54 Der zulässige Temperaturbereich	58
3.55 Die Alterungsbeständigkeit	58
3.6 Technische Regeln für den Feuchteschutz von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitern	58
3.7 Schlußfolgerungen	60
4. Der Einfluß von Feuchtigkeit auf technisch geschützte Dehnungsmeßstreifen	
4.1 Allgemeine Überlegungen	61
4.2 Die Änderung des komplexen Eingangswiderstandes Z^+ als Funktion der Zeit bei Lagerung technisch geschützter Dehnungsmeßstreifen in 100 % relativer Feuchte bzw. unter Wasser	61
4.21 Berechnete Änderungen	61
4.22 Gemessene Änderungen	61
4.23 Diskussion des Vergleichs von Rechnung und Messung	66
4.3 Zusammenfassung	66
5. Zusammenfassung	67
Anhang	69
Literaturverzeichnis	71

Zusammenstellung der wichtigsten verwendeten Symbole

A	Abkürzung für einen Klammerausdruck, vergl. Text zwischen GI (61) und GI (62)
$a_{i,k}$	Geometrische Maße am Dreischichtverbundbalken
$\left. \begin{matrix} \mathcal{O} \\ \mathcal{L} \\ \mathcal{S} \end{matrix} \right\}$	Komplexe Funktionen der verschiedenen, den Eingangswiderstand \mathcal{Z}^+ beeinflussenden Variablen
C	Kapazität
C^*, C^+, C_{1s}, C_N	Kapazitäten im Parallelersatzschaltbild der komplexen Widerstände $\mathcal{Z}^*, \mathcal{Z}^+, \mathcal{Z}_{1s}, \mathcal{Z}_N$
c	Feuchtekonzentration
C_a	Feuchtekonzentration in der Außenschicht der Schutzschicht S
C_i	Feuchtekonzentration in der Innenschicht der Schutzschicht S
C_R	Feuchtekonzentration im geschützten Raum \bar{R}
D_s	Diffusionskoeffizient in der Schutzschicht S
D_R	Diffusionskoeffizient im geschützten Raum \bar{R}
d_R	Dicke des geschützten Raumes \bar{R}
d_s	Dicke der Schutzschicht S
$e_{m, n}$	Geometrische Maße am Dreischichtverbundbalken
$E_{1, 2, 3}$	E-Moduln der 3 Schichten des Dreischichtverbundbalkens
F	Relative Feuchte
$F_{1, 2, 3}$	Querschnittsflächen der 3 Schichten des Dreischichtverbundbalkens
f	Frequenz
I	Diffusionsstrom
I_s	Diffusionsstrom der Feuchte durch S hindurch
$I_{1, 2, 3}$	Trägheitsmomente der 3 Schichten des Dreischichtverbundbalkens
I_e, I_A, I_{A^0}	Elektrische Ströme
K_{I_s}	Proportionalitätsfaktor zwischen $\mathcal{Z}_{N_{I_s}}$ und \mathcal{Z}_{I_s}
\mathcal{K}	Komplexer Proportionalitätsfaktor zwischen \mathcal{Z}_N und \mathcal{Z}_{I_s}
k	k-Faktor des Dehnungsmeßstreifens bzw. Halbleitergebers
L_s	Löslichkeitskoeffizient für Wasser in S
L_R	Löslichkeitskoeffizient für Wasser in \bar{R}
M	Biegemoment
$M_{1, 2, 3}$	Ersatz-Teilmomente, angreifend an den 3 Schichten des Dreischichtverbundbalkens
M_v	Komplexer Verformungsmodul
$N_{1, 2, 3}$	Ersatz-Normalkräfte, angreifend an den 3 Schichten des Dreischichtverbundbalkens
P_s^*	Permeationskoeffizient in S
P_a	Wasserdampfpartialdruck im Außenraum
P_i	Wasserdampfpartialdruck in R
q_R	Oberfläche von R
\bar{R}	Geschützter Raum
R	Ohmscher Widerstand im Parallelersatzschaltbild von \mathcal{Z}

R^*, R^+, R_{Is}, R_N	Ohmscher Widerstand im Parallelersatzschaltbild von Z, Z^+, Z_{Is}, Z_N
R^*	Gleichstromwiderstand des ungestörten Meßstreifens bzw. Halbleitergebers
R_e	Elektrischer Widerstand
R_{ZZ}	Ohmscher Widerstand im Parallelersatzschaltbild von Z_{ZZ}
$R_{1,2,3}$	Krümmungsradien der neutralen Fasern $\mathcal{E}_{1,2,3}$
S	Schutzschicht
\mathcal{E}	Neutrale Faser des Dreischichtverbundbalkens
$\mathcal{E}_{1,2,3}$	Neutrale Fasern der 3 Einzelschichten des Dreischichtverbundbalkens jeweils für sich allein
T	Temperatur
t	Zeit
t_v	Versuchszeit
t_s	Schutzzeit
U, U_c	Elektrische Spannungen
V_R	Volumen von \bar{R}
W_1	Widerstandsmoment der Schicht 1 des Dreischichtverbundbalkens
Z	Komplexer Widerstand
Z^*	Komplexer Eingangswiderstand des nicht durch Isolationsdefekte gestörten Meßstreifens bzw. Halbleitergebers
Z^+	Komplexer Eingangswiderstand des isolationsgestörten Meßstreifens bzw. Halbleitergebers
Z_{Is}	Komplexer Isolationswiderstand
$Z_{N_{Is}}$	Komplexer Nebenschlußwiderstand, bedingt durch Z_{Is}
Z_q	Komplexer Querwiderstand innerhalb einer Leiterschleife eines Meßstreifens
Z_{N_q}	Komplexer Nebenschlußwiderstand auf dem „Querweg“
Z_N	Wirksamer komplexer Nebenschlußwiderstand, bedingt durch die Summe aller Isolationsstörungen
Z_{ZZ}	Komplexer Widerstand zwischen 2 Zuleitungsdrähten
ϵ	Dehnung
ϵ^*	Dehnung des Meßstreifens bzw. Halbleitergebers
$\Delta\epsilon^*$	Scheinbare Dehnung als Folge der verschiedenen Störeffekte (Isolation, Zwängung usw.)
ϵ_D	Dielektrizitätskonstante im Parallelersatzschaltbild von ζ
$\epsilon_{KI}, \epsilon_{Tr}$	Dielektrizitätskonstante im Parallelersatzschaltbild von ζ_{KI}, ζ_{Tr}
ϵ_r	Relative Dielektrizitätskonstante
ζ	Komplexer spezifischer Widerstand
ζ_{KI}, ζ_{Tr}	Komplexer spezifischer Widerstand von Kleber und Träger
ρ	ohmscher spezifischer Widerstand im Parallelersatzschaltbild von ζ
ρ_{KI}, ρ_{Tr}	ohmscher spezifischer Widerstand im Parallelersatzschaltbild von ζ_{KI}, ζ_{Tr}
ρ_0	ohmscher spezifischer Gleichstromwiderstand
σ	mechanische Spannung
τ	Anlaufzeit
ω	Kreisfrequenz

In der vorliegenden Arbeit wird über Untersuchungen zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen (DMS) und Halbleitergebern berichtet.

Nach einer kurzen Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise von DMS und Halbleitergebern werden die verschiedenen Möglichkeiten des Einflusses von Feuchtigkeit auf deren Eingangswiderstand diskutiert. Es ist bekannt, daß Feuchtigkeit eine Änderung des Gleichstromisolationswiderstandes zwischen DMS bzw. Halbleitergeber und metallischem Bauteil bewirkt. Es wird nachgewiesen, daß die Kenntnis dieser Änderung jedoch keinen direkten Schluß auf die Änderung des Gleichstromeingangswiderstandes zuläßt. Es wird ferner gezeigt, daß außer diesem bekannten und stets meßbaren Isolationswiderstand bei den meisten DMS zusätzlich ein Isolationsquerwiderstand wirksam wird, der auch auf nichtleitendem Bauteil Isolationsstörungen verursacht. Werden zur Dehnungsmessung Trägerfrequenzmeßbrücken verwendet, so sind nur die jeweiligen Wechselstromwiderstände bedeutsam. Die ohmschen Widerstände in den Parallelersatzschaltbildern dieser Wechselstromwiderstände wurden als allein maßgebend für eine exakte Dehnungsmessung gefunden; in dem für die DMS-Technik wesentlichen Frequenzbereich zwischen 0 und 50 kHz erwiesen sich diese ohmschen Widerstände als zum Teil sehr stark frequenzabhängig. Die verschiedenen Widerstände werden näherungsweise berechnet und mit gemessenen Widerständen verglichen. Neben Isolationsdefekten bewirkt Feuchtigkeit vor allem auch eine Quellung des Trägers. Wird die Quellung durch Aufkleben auf ein nicht quellendes Bauteil in der Klebebe-

ne verhindert, so entsteht im Träger bei Absorption von Feuchtigkeit eine Zwängungsspannung. Es wird gezeigt, daß die Zwängung den Eingangswiderstand von DMS und Halbleitergebern zum Teil sehr erheblich beeinflusst, und zwar schon bei kleinen relativen Feuchten, bei denen noch keine Störungen durch Isolationsdefekte auftreten; auch die Empfindlichkeit und der Temperaturkoeffizient werden etwas verändert. Ein Einfluß auf die Querempfindlichkeit ist anzunehmen. Auf feuchtebedingte Korrosion wird kurz eingegangen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird der Feuchteschutz behandelt. Zunächst werden die an ihn zu stellenden Anforderungen diskutiert und Gleichungen zur näherungsweisen Berechnung der Schutzdauer angegeben. Dann werden der Permeationskoeffizient und der Löslichkeitskoeffizient verschiedener handelsüblicher Feuchteschutzmittel und eines auf Grund von Überlegungen über die Permeationseigenschaften von Kunststoffen selbst entwickelten Schutzmaterials untersucht. Für die Stoffe mit den günstigsten Permeationskoeffizienten wird auch der komplexe spezifische Widerstand bestimmt. Es folgen eine Untersuchung der für den Feuchteschutz von DMS und Halbleitergebern wichtigsten mechanischen Eigenschaften und eine Zusammenstellung technischer Regeln über den Feuchteschutz.

Abschließend wird über den Einfluß von Feuchtigkeit auf technisch geschützte DMS berichtet. Berechnete und gemessene Schutzzeiten werden miteinander verglichen und Differenzen zwischen beiden werden diskutiert.

Dehnungsmeßstreifen (DMS) und Halbleitergeber werden heute in großem Umfang sowohl zu Dehnungsmessungen als auch sehr häufig zur Messung dehnungsproportionaler Größen, wie z. B. Kräften, Drücken und Momenten, eingesetzt. Da solche Messungen unter sehr verschiedenen Umweltbedingungen durchgeführt werden, die sich nicht selten sogar während der Messung ändern, ist zumindest für genaue Messungen eine Kenntnis des Einflusses dieser Bedingungen auf die Eigenschaften der DMS und Halbleitergeber erforderlich. Während die Einwirkung von Temperatur und Temperaturänderungen schon oft behandelt worden sind, z. B. [L 10], fehlte bisher eine systematische Untersuchung des Einflusses von Feuchtigkeit und Feuchtigkeitsänderungen.

Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber bestehen im allgemeinen aus geraden oder auch in Windungen angeordneten Leitern sehr kleinen Querschnitts, die auf oder in eine dünne Schicht Trägermaterial – meist homogener oder faserhaltiger Kunststoff – gebettet sind [L 11]. Ihr elektrischer Widerstand – er liegt meist zwischen 100 und 600 Ω – ändert sich, sobald sie gedehnt oder gestaucht werden. Sind sie fest auf ein Bauteil aufgeklebt, so erleiden sie die gleichen Verformungen wie dessen Oberfläche. Die relative Widerstandsänderung – sie beträgt bei Dehnungsmeßstreifen nur etwa das 2- bis 2,5-fache der Dehnung – ist ein Maß für die Größe der Verformung. Sollen noch Dehnungen in der Größenordnung 5×10^{-6} mit einer Unsicherheit von $\pm 10\%$ gemessen werden, so müssen die relativen Widerstandsänderungen, die nicht von einer Bauteilverformung herrühren, kleiner als etwa $\pm 1 \times 10^{-6}$ sein. Es liegt daher die Befürchtung nahe, daß verschiedene Einflußgrößen, unter ihnen besonders die Feuchtigkeit, derartige störende Widerstandsänderungen hervorrufen. Es ist ein Ziel dieser Arbeit, festzustellen, in welcher Weise und in welchem Maße Feuchtigkeit derartige unerwünschte Widerstandsänderungen hervorruft.

Feuchtigkeit kann bei DMS und Halbleitergebern z. B. Kor-

rosion verursachen, die elektrischen Eigenschaften der Isoliermaterialien verändern oder das Trägermaterial quellen lassen. Eine denkbare Abhilfe wäre z. B. die Verwendung ausreichend feuchtigkeitsunempfindlicher Materialien. Ist jedoch schon ein bestimmtes Material vorgegeben, muß ein geeigneter Feuchtigkeitsschutz vorgesehen werden. Die richtige Auswahl des Schutzes hängt entscheidend davon ab, wie die Feuchtigkeit jeweils störend wirksam wird. Eine Lackschicht zum Beispiel, die eine Stahloberfläche hervorragend gegen Korrosion schützt, kann – bei gleicher Schichtdicke und bei gleichem Haftvermögen als Schutz gegen Quellung auf ein Kunststoffteil aufgetragen – völlig versagen, da der Störmechanismus der Feuchtigkeit bezüglich des zu schützenden Materials in beiden Fällen gänzlich verschieden ist. Diese Grundtatsache ist von vielen Herstellern von Feuchtigkeitsschutzmitteln für Dehnungsmeßstreifen mißachtet worden, worauf im Kapitel 3 noch näher eingegangen wird. Die von den Herstellern solcher Schutzmittel hinsichtlich der Leistungsfähigkeit ihrer Produkte gemachten Angaben sind daher zum Teil nicht richtig, zumindest aber sehr fragwürdig und somit als Grundlage für ein exaktes Arbeiten unbrauchbar. Aber auch die in der Literatur, z. B. [L 1–L 9], beschriebenen Untersuchungsergebnisse sind praktisch kaum zu verwenden, da nahezu ausnahmslos die benutzte Prüfmethode nicht exakt war. Da der Feuchtigkeitsschutz in der Praxis jedoch von großer Bedeutung ist, wurde in dieser Arbeit versucht, das Problem grundlegend und systematisch zu behandeln und allgemein gültige Unterlagen zu gewinnen. Dazu gehört zunächst die Klärung des Einflusses von Feuchtigkeit auf DMS und Halbleitergeber sowie deren Zuleitungen, ferner eine allgemeine Behandlung des Feuchtigkeitsschutzes und schließlich eine Untersuchung der praktischen Wirksamkeit eines Feuchtigkeitsschutzes dieser Meßelemente. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt stets in der Klärung der grundsätzlichen Zusammenhänge; eine Untersuchung möglichst vieler spezieller Fabrikate wurde nicht angestrebt, sondern nur eine repräsentative Auswahl untersucht.

1. Der Einfluß von Feuchtigkeit auf ungeschützte Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber

1.1 Der komplexe Eingangswiderstand Z^+ von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern

Über den ganz allgemein als komplex angenommenen Eingangswiderstand Z^+ zwischen den Anschlüssen eines Dehnungsmeßstreifens oder Halbleitergebers läßt sich folgendes aussagen: Bei gegebenem DMS oder Halbleitergeber wird Z^+ außer von der Geometrie des Leiters und seinem Gleichstromwiderstand R^* sicher auch noch in irgendeiner Weise von der Dielektrizitätskonstanten ϵ_D und dem spezifischen Widerstand ρ von Träger- und Klebematerial abhängen und ferner vermutlich auch von der Meßfrequenz f ⁺⁾ ; ρ und ϵ_D werden ihrerseits sehr wahrscheinlich von der Temperatur T und der relativen Feuchte F der Meßstreifenumgebung beeinflußt. Die Feuchte F kann darüber hinaus eine Korrosion des Leiters verursachen sowie Träger und Kleber quellen lassen, was zu einer Änderung der ursprünglichen Leitergeometrie (Drahtquerschnittsverformung durch Zwängung usw.) führen kann. Eine Änderung von T und F wirkt sich sicher nicht momentan aus, so daß Z^+ auch noch von der Zeit t abhängt; zuletzt ist Z^+ natürlich auch eine Funktion der Meßstreifendehnung ϵ^* . Ganz allgemein wird daher für den komplexen Eingangswiderstand Z^+ gelten:

$$Z^+ = Z^+(R^*, \epsilon_D, \rho, f, T, F, \epsilon^*, \text{Korrosion, Quellung, Leitergeometrie, } t) \quad (1)$$

Die verschiedenen Variablen der Gl (1) sind nicht alle voneinander unabhängig, sondern in irgendeiner, zunächst noch unbekanntem Weise miteinander verknüpft. Für einen idealen Dehnungsmeßstreifen oder Halbleitergeber gilt $Z^+ = R^*(\epsilon^*)$ und

$$\frac{\Delta g_o^+}{g_o^+} = \frac{\Delta R_o^+}{R_o^+} = \frac{\Delta R_o^*}{R_o^*} = k \cdot \epsilon^* + g_o^+, R_o^+, R_o^* = g_o^+, R^+, R^* \text{ für } \epsilon^* = 0; \quad \text{k-Empfindlichkeitsfaktor=k-Faktor}$$

$\Delta g_o^+ = g_o^+ - g_o^*$; $R^+ = \text{Ohmscher Widerstand im Parallelersatzschaltbild von } g^+$ (2)

eine Bedingung, die bei nicht zu großem f ausreichend gut für einen frei gespannten, geraden Draht erfüllt ist. Es ist daher zweckmäßig, Gl. (1) umzuformen in

$$g_o^+ = R_o^* (1 + k \cdot \epsilon^*) + \mathfrak{B}(\epsilon_D, \rho, f, T, F, \epsilon^*, \text{Korrosion, Quellung, Leitergeometrie, } t); \quad (3)$$

entsprechend gilt:

$$\frac{\Delta g_o^+}{g_o^+} = k \cdot \epsilon^* + \mathfrak{B}(\epsilon_D, \rho, f, T, F, \epsilon^*, \text{Korrosion, Quellung, Leitergeometrie, } t) \quad (4)$$

⁺⁾ Der Skineffekt wurde hier nicht berücksichtigt, da sein Einfluß bei Konstantendraht von $20 \mu \phi$, wie er bei Dehnungsmeßstreifen verwendet wird, bei Frequenzen $< 100 \text{ kHz}$ vernachlässigbar klein ist.

Hierin sind \mathfrak{A} und \mathfrak{B} ganz allgemein komplexe Funktionen, die im Idealfall gleich Null sind. Es ist das Ziel dieses Abschnittes der Arbeit, Kenntnisse über die Funktionen \mathfrak{A} und \mathfrak{B} zu gewinnen und sie, wenn möglich, näherungsweise zu bestimmen.

1.2 Die Änderung der elektrischen Eigenschaften von Trägern und Klebern und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+

1.21 Allgemeine Überlegungen

Die bekannteste Beeinflussung elektrischer Meßelemente durch Feuchtigkeit ist die Veränderung der spezifischen Raum- und Oberflächenwiderstände ihrer Isoliermaterialien. Im Falle der Meßstreifen und Halbleitergeber bedeutet das die Veränderung der spezifischen Widerstände der Trägerwerkstoffe und der Kleber. Dieser Effekt ist bekannt, und es ist daher üblich, mittels gebräuchlicher Gleichspannungs- Ω -Meter den Isolationswiderstand R_{IS} des Meßstreifens gegen das meist ja metallische Bauteil zu messen. Gewöhnlich wird ein Isolationswiderstand von $\geq 100 \text{ M}\Omega$ als ausreichend angesehen, z. B. [L 12]. Eine nähere Begründung dieser Annahme fehlt jedoch genau so wie eine Untersuchung darüber, ob dieser mit Gleichspannung gemessene Isolationswiderstand auch dort von Bedeutung ist, wo die Widerstandsänderungen der Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber mit Trägerfrequenzmeßbrücken gemessen werden; gebräuchlich sind Trägerfrequenzen zwischen etwa 100 Hz und 100 kHz .

Zur Änderung des Widerstandes R_{IS} kommt noch eine feuchtigkeitsbedingte Änderung der Kapazität C_{IS} zwischen Meßstreifen und Bauteil, die grundsätzlich mit betrachtet werden muß, so daß anstatt von R_{IS} der komplexe Isolationswiderstand Z_{IS} zu untersuchen ist, der im allgemeinen außer von der Feuchte auch von der Meßfrequenz abhängen wird.

1.22 Der Zusammenhang zwischen komplexem Isolationswiderstand Z_{IS} und komplexem Eingangswiderstand Z^+

Der zwischen einem auf ein metallisches Bauteil geklebten Dehnungsmeßstreifen oder Halbleitergeber und dem Bauteil meßbare, ganz allgemein komplexe Isolationswiderstand Z_{IS} verursacht einen Nebenschluß Z_{NIS} parallel zum Eingangswiderstand Z^+ gemäß der schematischen Darstellung in Bild 1. Dabei ist $Z_{NIS} \neq Z_{IS}$, eine Tatsache, die selbst in einem erst 1962 erschienenen Fachbuch speziell über Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber übersehen wird [L 12].

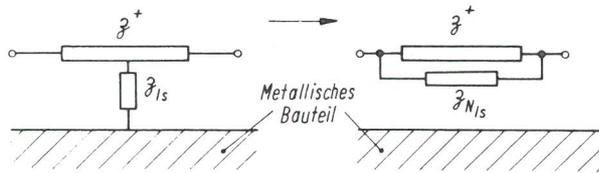


Bild 1
Schematische Darstellung des Zusammenhangs Isolationswiderstand-Nebenschlußwiderstand

Für ein homogenes Einschichtdielektrikum zwischen Draht und Bauteil läßt sich Z_{NIS} grundsätzlich wie folgt bestimmen:

Ist der Spannungsabfall längs des Drahtes A-B gleichmäßig, so läßt sich Z_{NIS} näherungsweise als Summe der in Bild 2 a eingezeichneten Teilwiderstände darstellen. Ist das Bau-

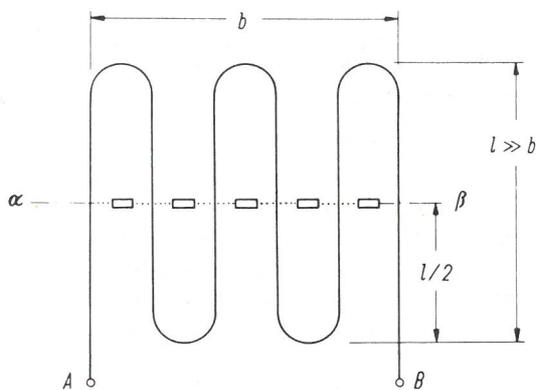


Bild 2a

teil elektrisch nicht mit dem Draht verbunden, so nimmt es aus Symmetriegründen das Potential φ_M der Drahtmitte der Strecke A-B an. Wird dieses Potential gleich 0 gesetzt, also $\varphi_{Bau} = \varphi_M = 0$, so liegt am Anschluß A das Potential $-\varphi/2$ an B das Potential $+\varphi/2$, wenn die Potentialdifferenz $\varphi_A - \varphi_B$ gleich φ ist. An den Drahtenden des Schnittes $\alpha - \beta$ (Bild 2 b)

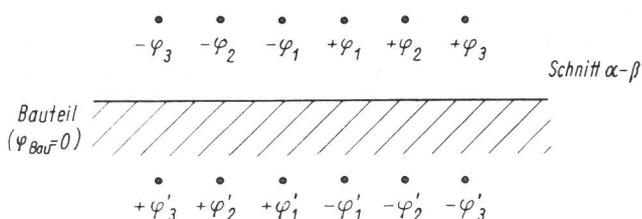


Bild 2b

Bild 2
Schematische Darstellung eines DMS zur Ermittlung von Z_{NIS}

liegen dann die Potentiale $-\varphi_3, -\varphi_2, \dots, +\varphi_2, +\varphi_3$. Um auf der Bauteiloberfläche $\varphi_{Bau} = 0$ realisieren zu können, muß zur mathematischen Behandlung des Problems spiegelbildlich zur Bauteiloberfläche ein „Hilfsmessstreifen“ mit den Potentialen $+\varphi_3, +\varphi_2, \dots, -\varphi_2, -\varphi_3$ angenommen werden. Die Summe aller Potentiale φ und φ' liefert dann die Potentialverteilung im Halbraum oberhalb der Bauteiloberfläche. Gemäß $\mathcal{E} = -\text{grad } \varphi$ läßt sich dann auch die Feldstärke \mathcal{E}

und damit die Stromdichte j und schließlich auch der Widerstand Z_{NIS} berechnen. Bei einer größeren Anzahl von Drähten – es sind Meßstreifen mit bis zu 25 Windungen entsprechend 50 Drähten gebräuchlich – wird die Lösung dieses Problems jedoch sehr schwierig und kaum geschlossen darstellbar sein. Hinzu kommt noch, daß der obere Halbraum nicht unendlich ausgedehnt, sondern durch die Abmessungen des Trägers sehr eng begrenzt ist. Noch wesentlich komplizierter wird das Isolationsproblem jedoch dadurch, daß nicht nur der Meßstreifenträger meist elektrisch stark inhomogen ist, sondern daß vor allem der Kleber, mit dem der Meßstreifen auf das Bauteil geklebt wird, ganz andere elektrische Eigenschaften besitzt als der Träger. So unterscheiden sich Kleber und Träger in ihrer spezifischen Gleichstromleitfähigkeit, in der Dielektrizitätskonstanten und in der Höhe der dielektrischen Verluste, wie später noch gezeigt wird. Es liegt also stets ein sehr kompliziertes Doppelschichtdielektrikum vor.

Der allgemeine Lösungsweg geht über die Anwendung der Maxwell'schen Gleichungen – bei den hier angewendeten relativ niedrigen Frequenzen ≤ 50 kHz näherungsweise in Form der Potentialgleichung $\Delta\varphi = 0$, vgl. [L 15] – auf die beiden Gebiete Träger und Kleber und Integration der Gleichung für die jeweils gültigen Randbedingungen. Eine wesentliche Bedingung ist die Vorgabe der Kleberschichtdicke. Wie später gezeigt wird (Abschnitt 1.26), ist die Kleberschichtdicke jedoch willkürlichen, durch die Klebetechnik bedingten Schwankungen bis zum Verhältnis 1 : 30 innerhalb einer Schicht unterworfen; darüber hinaus treten im Kleber stellenweise Entmischungen der Kleberbestandteile auf, so daß die Klebeschicht auch elektrisch undefiniert inhomogen wird. Allein aus diesem Grunde ist es somit nicht möglich, die Maxwell'schen Gleichungen zu integrieren. Der Widerstand Z_{NIS} läßt sich daher für einen aufgeklebten Meßstreifen bzw. Halbleitergeber grundsätzlich nicht exakt berechnen.

Es hat sich jedoch für das Verständnis der Isolationseffekte als nützlich erwiesen, den Widerstand Z_{NIS} für ein homogenes isotropes Einschichtdielektrikum in grober Näherung wie folgt zu berechnen:

Zwischen den Punkten A und B erstrecke sich – gemäß Bild 3 a – ein gerader Leiter der Länge l in konstantem Abstand über einem metallischen Bauteil. Der Raum zwischen Leiter und Bauteil sei elektrisch homogen und isotrop. Das Bauteil sei elektrisch nicht mit dem Leiter verbunden. Liegt zwischen A und B eine Potentialdifferenz $\Delta\varphi$, so nimmt das Bauteil aus Symmetriegründen das Potential der Leitermitte an. Die Anordnung gemäß Bild 3 a läßt sich deshalb in die elektrisch gleichwertige gemäß Bild 3 b umwandeln, auf die nun die Leitungsgleichungen (vgl. z. B. [L 15]) und ihre Lösungen angewandt werden können.

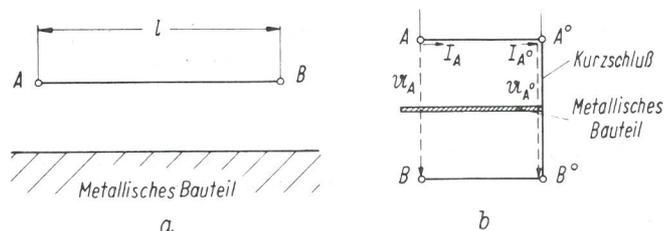


Bild 3
Schematische Darstellung zur Ableitung der Gl. (11) aus den Leitungsgleichungen (5) und (6)

Es sei in der Anordnung gemäß Bild 3 a R' der Gleichstromwiderstand des Leiters pro Längeneinheit, L' die Induktivität des Leiters pro Längeneinheit, C' die Kapazität zwischen Leiter und Bauteil pro Längeneinheit und G' die Ableitung zwischen Leiter und Bauteil pro Längeneinheit. Dann gilt in der Anordnung entsprechend Bild 3 b, auf die nun die Leitungsgleichungen angewandt werden sollen, $R'_1 = 2 R'$, $C'_1 = 1/2 C'$, $G'_1 = 1/2 G'$, $L'_1 = 2 L'$, $I'_1 = 1/2 I$.

Die Leitungsgleichungen lauten

$$U_A = U_{A0} \cdot \cosh \gamma l_1 + I_{A0} \cdot \mathcal{Z}_0 \cdot \sinh \gamma l_1 \quad (5)$$

$$I_A = I_{A0} \cdot \cosh \gamma l_1 + \frac{U_{A0}}{\mathcal{Z}_0} \cdot \sinh \gamma l_1 \quad (6)$$

wobei

$$\mathcal{Z}_0 = \sqrt{\frac{R'_1 + j\omega L'_1}{G'_1 + j\omega C'_1}} \approx \sqrt{\frac{R'_1}{G'_1 + j\omega C'_1}} = 2 \sqrt{\frac{R'}{G' + j\omega C'}} \quad (7)$$

der Wellenwiderstand und

$$\gamma = \sqrt{(R'_1 + j\omega L'_1) \cdot (G'_1 + j\omega C'_1)} \approx \sqrt{R'_1 \cdot (G'_1 + j\omega C'_1)} = \sqrt{R' \cdot (G' + j\omega C')} \quad (8)$$

das Übertragungsmaß bedeuten; da bei DMS die Induktivität $L = L'_1 \cdot l$ nur etwa 1–2 μH beträgt und außerdem praktisch konstant ist, kann $\omega L'_1$ gegenüber R'_1 für Frequenzen $< 100 \text{ kHz}$ vernachlässigt werden.

Der Widerstand der Leitung A–B in Bild 3 a–d. h. also der Eingangswiderstand \mathcal{Z}^+ des DMS bzw. Halbleitergebers – entspricht dem Eingangswiderstand $U_A/I_A = \mathcal{Z}_k$ des Leitungssystems in Bild 3 b im Kurzschlußfall ($U_{A0} = 0$). Für \mathcal{Z}_k folgt aus den Leitungsgleichungen [L 15]:

$$\mathcal{Z}_k = \mathcal{Z}_0 \cdot \tanh \gamma \cdot l_1 \quad (9)$$

Bricht man die tanh-Reihe nach dem zweiten Glied ab, setzt \mathcal{Z}_0 und γ gemäß Gl. (7) bzw. Gl. (8) ein und substituiert (R' , C' , G') $\cdot l$ durch (R , C , G), so folgt

$$\mathcal{Z}_k \approx 2 \sqrt{\frac{R}{G + j\omega C}} \cdot \left[\frac{1}{2} \sqrt{R \cdot (G + j\omega C)} - \frac{1}{8} \frac{\sqrt{R \cdot (G + j\omega C)}}{3} \right] \quad (10)$$

Da der Ausdruck $1/(G + j\omega C)$ den Isolationswiderstand \mathcal{Z}_{Is} zwischen dem Leiter A–B und dem metallischen Bauteil darstellt, wird

$$\mathcal{Z}_k = \mathcal{Z}^+ \approx R \cdot \left[1 - \frac{R}{12 \mathcal{Z}_{Is}} \right] \quad (11)$$

Wäre der Isolationswiderstand \mathcal{Z}_{Is} dem Gleichstromwiderstand R zwischen A und B direkt parallelgeschaltet, so würde mit der praktisch stets erfüllten Annahme $R \ll |\mathcal{Z}_{Is}|$

$$\mathcal{Z}^+ = \frac{R \cdot \mathcal{Z}_{Is}}{R + \mathcal{Z}_{Is}} = \frac{R}{1 + \frac{R}{\mathcal{Z}_{Is}}} \approx R \left(1 - \frac{R}{\mathcal{Z}_{Is}} \right) \quad (12)$$

Daraus folgt, daß als Nebenschlußwiderstand \mathcal{Z}_{NIs} etwa das Zwölffache des Isolationswiderstandes \mathcal{Z}_{Is} einzusetzen ist: $\mathcal{Z}_{NIs} \approx 12 \cdot \mathcal{Z}_{Is}$.

Wird der Leiter bei A oder B elektrisch mit dem Bauteil verbunden, so führt ein ähnlicher Rechengang zu dem Ergebnis

$$\mathcal{Z}^+ \approx R \left[1 - \frac{R}{3 \mathcal{Z}_{Is}} \right] \quad (13)$$

Der Nebenschlußwiderstand ist also in diesem Fall um den Faktor 4 kleiner!

Auf den Zusammenhang gemäß Gl. (12) haben Jones und Masten [L 13] schon vor mehr als 10 Jahren hingewiesen, ohne allerdings zu beachten, daß der Isolationswiderstand komplex ist. Sie übersahen ferner, daß der Isolationsnebenschlus nicht nur auf dem Wege Meßstreifenwiderstand–Bauteil–Zuleitung erfolgt (vgl. Bild 4). Der zweite Nebenschluß-

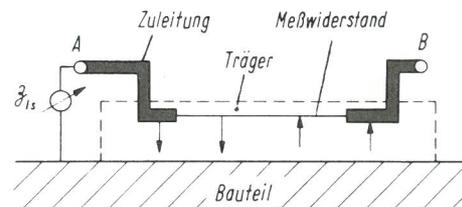


Bild 4 Schematische Darstellung der \mathcal{Z}_{NIs} bestimmenden Nebenschlußwege

weg wirkt sich besonders ungünstig dadurch aus, daß die Zuleitungen zum Meßwiderstand praktisch nichts beitragen und dieser Nebenschluß somit direkt über den Anschlüssen A, B liegt. Wie später gezeigt wird, entfallen – je nach Meßstreifentyp – etwa 8 bis 80 % der Leitung zwischen Anschluß A und dem Bauteil auf den Weg Zuleitungen–Bauteil. Der Faktor 12 in Gl. (12) ist also wesentlich zu groß und auf etwa 5–10 zu ermäßigen:

$$\mathcal{Z}_{NIs} \approx 5-10 \mathcal{Z}_{Is} \quad (14)$$

Auch dieser Wert ist noch nicht der endgültige und gilt außerdem natürlich nur für den Meßstreifen bzw. Halbleitergeber allein, d. h. ohne Anschlußkabel und Lötstützpunkte usw., und nur bei sauberen Meßstreifen, d. h. ohne wesentliche Oberflächenleitung im Bereich der Lötanschlüsse. Allgemein wird also sein

$$\mathcal{Z}_{NIs} = K_{Is} \cdot \mathcal{Z}_{Is} \quad (15)$$

worin K_{Is} stets ≥ 4 ist, da der Isolationsnebenschlus nie ungünstiger sein kann als auf dem Wege Zuleitung–Bauteil–Zuleitung und der Widerstand zwischen einer Zuleitung und dem Bauteil mindestens $2 \times \mathcal{Z}_{Is}$ beträgt.

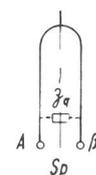
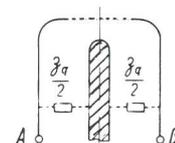
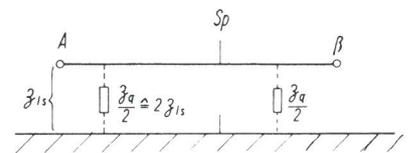


Bild 5 Schematische Darstellung zur Ermittlung von \mathcal{Z}_q

Zu dem Nebenschluß infolge zu kleinen Isolationswiderstandes Meßstreifen—Bauteil kommt aber nun noch, besonders bei Meßstreifen mit gitterförmigem Meßleitersystem, jener auf dem Wege Leiter—Isolation—Leiter; er darf nicht von vornherein vernachlässigt werden, wie noch gezeigt wird. Die Verhältnisse an einer Leiterschleife lassen sich beim Vorliegen des reinen Quereffektes an Hand des Bildes 5 verstehen:

Die Schleife sei durch eine Spiegelebene S_p aufgeschnitten gedacht. Es sei ferner Z_q der Querwiderstand von einer Schlaufenhälfte direkt zur andern; es ist dann $Z_q \hat{=} 4 Z_{Is}$. Da die Spiegelebene — wie oben die Bauteiloberfläche — eine Äquipotentialfläche ist, gilt auch hier die Beziehung (12) mit $Z_{Is} = 1/4 Z_q$. Damit wird

$$S_{AB}^{\Delta} \approx R_{AB} \cdot \left[1 - \frac{R_{AB}}{3 Z_q} \right] \quad (16)$$

der Widerstand zwischen A und β allein unter dem Einfluß des Querwiderstandes Z_q .

Besitzt der Meßstreifen zwei Leiterschleifen, so gilt näherungsweise das in Bild 6 dargestellte Ersatzschaltbild.

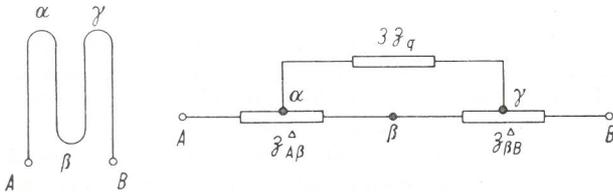


Bild 6

Ersatzschaltbild eines zweischlaufigen DMS bezüglich des reinen Quereffektes

Da $S_{AB}^{\Delta} = S_{BB}^{\Delta}$ ist, wird

$$S_{AB}^{\Delta} \approx \frac{1}{2} S_{AB}^{\Delta} + S_{\alpha\gamma}^{\Delta} + \frac{1}{2} S_{BB}^{\Delta} = S_{AB}^{\Delta} + S_{\alpha\gamma}^{\Delta}$$

Für einen Meßstreifen mit n Schleifen gilt dann

$$S_{AB}^{\Delta} \approx S_{AB}^{\Delta} + (n - 1) S_{\alpha\gamma}^{\Delta} \quad (17)$$

Dabei ist $S_{AB}^{\Delta} \approx R_{AB} \left[1 - \frac{R_{AB}}{3 Z_q} \right]$ (18)

und $S_{\alpha\gamma}^{\Delta} \approx S_{AB}^{\Delta} \left[1 - \frac{S_{AB}^{\Delta}}{3 Z_q} \right]$ (19)

Durch Einsetzen von (18) in (19) und (19) in (17) wird für einen Meßstreifen mit n Leiterschleifen näherungsweise

$$S_{AB}^{\Delta} \approx R_{AB} \left[1 - \left(\frac{2n-1}{n} \right) \cdot \frac{R_{AB}}{3 Z_q} \right] = R_{AB} \left[1 - \frac{R_{AB}}{\left(\frac{2n-1}{n} \right) \cdot 3 Z_q} \right] \quad (20)$$

Hierin ist Z_q der Querwiderstand einer Schleife. Der Nebenschluß auf dem Quer-Weg wirkt also derart, als wenn parallel zu R_{AB} ein Widerstand Z_{Nq} läge:

$$S_{Nq} = \left(\frac{3n}{2n-1} \right) \cdot S_q \quad (21)$$

Bei Dehnungsmeßstreifen mit geradem Leiter und bei Halbleitergebern muß grundsätzlich auch der Längsnebenschluß gemäß Bild 7 beachtet werden. Sind $S_{Tr,Kl}$ und $q_{Tr,Kl}$ der

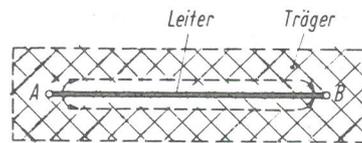


Bild 7

Schematische Darstellung des Längsnebenschlusses

mittlere komplexe spezifische Widerstand bzw. der Querschnitt von Träger und Kleber und ferner ρ_L und q_L der spezifische Widerstand bzw. der Querschnitt des Leiters, so gilt für das Verhältnis des Leiterwiderstandes R_{AB} zum Widerstand $Z_{Tr,Kl}$ von Träger und Kleber zwischen A und B

$$\frac{R_{AB}}{Z_{Tr,Kl}} < \frac{\rho_L/q_L}{\rho_{Tr,Kl}/q_{Tr,Kl}}$$

Um die Größenordnung des Effektes abschätzen zu können, sei $S_{Tr,Kl}$ durch $|S_{Tr,Kl}|$ ersetzt. Für Frequenzen ≤ 50 kHz erhält man mit den im Abschnitt 1.23 beschriebenen Meßwerten von S_{Tr} und S_{Kl} für gebräuchliche Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber stets

$$\frac{R_{AB}}{|S_{Tr,Kl}|} \approx 10^{-5}$$

Dieser Effekt ist deshalb praktisch bedeutungslos. Zur Abschätzung des Widerstandes Z_N sind daher nur die Gleichungen (12) und (21) heranzuziehen. Die darin enthaltenen Widerstände Z_{Is} und Z_q werden in den Abschnitten 1.24 und 1.25 eingehend besprochen.

Der wirksame Nebenschlußwiderstand Z_N wird gebildet durch Parallelschaltung der Nebenschlüsse auf dem „Querweg“ und auf dem „Isolationweg“ Z_{Nq} und Z_{NIs} . Es ist also

$$S_N = \frac{S_{Nq} \cdot S_{NIs}}{S_{Nq} + S_{NIs}} = \mathcal{K} \cdot S_{Is} \quad (22)$$

wobei $\mathcal{K} = (\mathcal{K}/|\mathcal{K}|) \cdot K = \mathcal{K} \cdot K$ im Gegensatz zu K_{Is} komplex ist, da $Z_{Nq} \neq$ Skalar $\times Z_{Is}$ ist. Der Faktor K kann wegen Z_{Nq} auch < 4 sein. Z_{Nq} läßt sich nach Gl. (21) berechnen. Der Widerstand Z_{NIs} wird gebildet durch Parallelschaltung des zwölffachen Isolationswiderstandes Gitter—Bauteil (gemäß Gl. (12)) und des vierfachen Isolationswiderstandes beider Zuleitungen gegen das Bauteil ($2 \times$ Isolationswiderstand einer Zuleitung). Es ist also

$$S_{NIs} = \frac{12(S_{Is})_G \cdot (S_{Is})_{Zl}}{3(S_{Is})_G + (S_{Is})_{Zl}} = K_{Is} \cdot S_{Is} = K_{Is} \cdot \frac{(S_{Is})_G \cdot (S_{Is})_{Zl}}{(S_{Is})_G + (S_{Is})_{Zl}} \quad (23)$$

mit $K_{Is} = \frac{12 \cdot [(S_{Is})_G + (S_{Is})_{Zl}]}{3(S_{Is})_G + (S_{Is})_{Zl}} \geq 4;$

durch Einsetzen in (22) wird

$$Z_N = \frac{12 Z_{Is} \cdot (Z_{Is})_G \cdot (Z_{Is})_{Z1}}{Z_{Is} \cdot [3(Z_{Is})_G + (Z_{Is})_{Z1}] + 12(Z_{Is})_G \cdot (Z_{Is})_{Z1}} \quad (24)$$

Da jeder Widerstand eines homogenen Materials durch das Produkt $Z \cdot G$, G = geometrischer Faktor, darstellbar ist, und hier unter der Voraussetzung der Isotropie für alle drei Widerstände der gleiche spezifische Widerstand Z einzusetzen ist, läßt sich Gl. (24) auch in der Form

$$Z_N = Z \cdot G \quad (25)$$

schreiben. Wie später gezeigt wird, sind aber die Träger meist weder homogen noch isotrop, so daß diese einfache Form nicht anwendbar ist.

Ist der komplexe Widerstand Z_N gemäß Gl. (24) berechnet, so läßt sich nun sein Einfluß auf den ganz allgemein ebenfalls komplexen Eingangswiderstand Z^+ des Dehnungsmeßstreifens oder Halbleitergebers ermitteln. Im hier ausschließlich benutzten Parallelersatzschaltbild lassen sich der durch Isolationsdefekte nicht gestörte Eingangswiderstand Z^* und der wirksame Nebenschlußwiderstand Z_N durch je eine Parallelschaltung eines ohmschen Widerstandes und einer Kapazität darstellen (vgl. Bild 8):

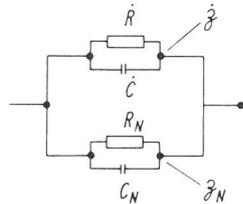


Bild 8
Ersatzschaltbild des gestörten
Eingangswiderstandes Z^+

$$Z^* = \frac{R^* - j \omega C^* R^{*2}}{1 + \omega^2 C^{*2} R^{*2}}$$

$$Z_N = \frac{R_N - j \omega C_N R_N^2}{1 + \omega^2 C_N^2 R_N^2}$$

Der „gestörte“ Eingangswiderstand Z^+ ergibt sich dann wie folgt:

$$Z^+ = \frac{Z^* \cdot Z_N}{Z^* + Z_N} = \frac{R^* \cdot R_N}{[R^* + R_N] \cdot [1 + \omega^2 (C^* + C_N)^2] \cdot \frac{R^{*2} R_N^2}{[R^* + R_N]^2}} \cdot [1 - j \omega (C^* + C_N)] \cdot \frac{R^* \cdot R_N}{R^* + R_N} \quad (26)$$

Der Widerstand Z^* kann bereits als ungestört angesehen werden, wenn $R^* = R^*$ bzw. R_0^* gilt; die Bedingung $C^* = 0$ braucht nicht erfüllt zu sein, wie unten gezeigt wird.

Für Frequenzen ≤ 50 kHz ist, wie später gezeigt wird (s. Abschnitt 1.26), stets $R_N \gg R^*$. Für $R^* \leq 600 \Omega$ (gilt für nahezu alle Meßstreifen und Halbleitergeber) und $(C^* + C_N) \leq 1000$ pF ist unter der gleichen Bedingung auch $\omega^2 (C^* + C_N)^2 R^{*2} \ll 1$. Damit wird

$$Z^+ \approx R^* \cdot [1 - \frac{R^*}{R_N}] \cdot [1 - \omega^2 (C^* + C_N)^2 R^{*2}] \cdot [1 - j \omega (C^* + C_N)] \cdot R^* [1 - \frac{R^*}{R_N}] \quad (27)$$

Da bei homogenem Material $R_N = \rho_N \cdot G$ und $C_N = (\epsilon_D)_N \cdot 1/G$ ist, wobei ϵ_D, ρ die Dielektrizitätskonstante bzw. der ohmsche spezifische Widerstand im Parallelersatzschaltbild des komplexen spezifischen Widerstandes Z sind und G eine geometrische Konstante ist, läßt sich auch schreiben:

$$Z^+ \approx R^* [1 - \frac{R^*}{G} \frac{1}{\rho_N}] [1 - \omega^2 (C^* + \frac{[\epsilon_D]_N}{G})^2 \cdot R^{*2}] \cdot [1 - j \omega (C^* + \frac{[\epsilon_D]_N}{G})] \cdot R^* [1 - \frac{R^*}{G} \cdot \frac{1}{\rho_N}] \quad (28)$$

Da G bei einer Änderung der Temperatur T und der relativen Feuchte F im Vergleich zu ρ und ϵ_D hier praktisch konstant bleibt, wird Z^+ fast nur durch die Funktionen $\rho = \rho(F, T, \omega)$ und $\epsilon_D = \epsilon_D(F, T, \omega)$ verändert. Um Z^+ gemäß Gl. (27) bestimmen zu können, müssen deshalb zuvor die Größen ρ und ϵ_D in Abhängigkeit von Temperatur, relativer Feuchte und Frequenz experimentell ermittelt werden. Setzt man in Gl. (27) $R^* / R_N = \Delta R^*$ und $C_N = \Delta C^*$, so läßt sich diese Gleichung auch in der Form

$$Z^+ \approx [R^* + \Delta R^*] \cdot [1 - \omega^2 (C^* + \Delta C^*)^2 R^{*2}] \cdot [1 - j \omega (C^* + \Delta C^*) \cdot (R^* + \Delta R^*)] \quad (29)$$

schreiben, die etwas übersichtlicher ist als die Gleichungen (27) und (28).

Unter den schon oben genannten Bedingungen $\Delta R^* \ll R$ und $\omega^2 (C^* + \Delta C^*)^2 R^{*2} \ll 1$, die im allgemeinen erfüllt sind, folgt aus Gl. (29) mit $\Delta Z^* = Z^+ - Z^*$

$$\frac{\Delta Z^*}{Z^*} \approx \frac{\Delta R^*}{R^*} - 2 \omega^2 R^{*2} C^{*2} [1 + \frac{\Delta C^*}{C^*}] [\frac{1}{2} \frac{\Delta C^*}{C^*} - \frac{\Delta R^*}{R^*}] - j \omega R^* C^* [(1 + \frac{2 \Delta C^*}{C^*}) \frac{\Delta R^*}{R^*} + \frac{\Delta C^*}{C^*}] \quad (30)$$

meist ist $\frac{\Delta R^*}{R^*} \ll \frac{\Delta C^*}{C^*}$; unter dieser zusätzlichen Voraussetzung wird

$$\frac{\Delta Z^*}{Z^*} \approx \frac{\Delta R^*}{R^*} - \omega^2 R^{*2} C^{*2} [\frac{\Delta C^*}{C^*} + (\frac{\Delta C^*}{C^*})^2] - j \omega R^* C^* \frac{\Delta C^*}{C^*} \quad (31a)$$

Unter der Annahme $R^* = R^*$, s. o., und somit auch $\Delta R^* = R^+ - R^* = \Delta R^* = R^+ - R^*$, wird dann die durch Isolationsdefekte verursachte relative Änderung des ungestörten Eingangswiderstandes Z^*

$$\frac{\Delta R^*}{R^*} \approx \frac{\Delta R^*}{R^*} - \omega^2 R^{*2} C^{*2} [\frac{\Delta C^*}{C^*} + (\frac{\Delta C^*}{C^*})^2] - j \omega R^* C^* \frac{\Delta C^*}{C^*} \quad (31b)$$

Da die Dehnung ϵ^* entsprechend Gl. (2) der Größe $\Delta R_0^* / R_0^*$ proportional ist, ist es hinreichend und notwendig, tatsächlich den ohmschen Widerstand R (d. h. je nach Fall R^* bzw. R_0^* oder R^+ oder R^* usw.) im Parallelersatzschaltbild des komplexen Widerstandes Z (d. h. je nach Fall Z^+ oder Z^* usw.) zu messen, nicht etwa $|Z|$ oder den Realteil von Z .

Bei einer Widerstandsmessung mit Gleichstrom wird am ungestörten Meßstreifen automatisch $\Delta R_0^* / R_0^*$ erhalten, bei

der Messung mit Trägerfrequenz sind mehrere Verfahren gebräuchlich, die jedoch nicht alle ohne weiteres als Meßergebnis $\Delta R_O^*/R_O^*$ liefern.

A) Messung von \mathcal{Z} nach der Null-Methode

A_1 : Erfolgt der Abgleich der Meßbrücke nach Betrag und Phase (R- und C-Abgleich), so wird stets $\Delta R_O/R_O$ (und natürlich auch $\Delta C_O/C_O$) erhalten, was am ungestörten Meßstreifen dem gesuchten $\Delta R_O^*/R_O^*$ entspricht.

A_2 : Wird nur nach Betrag abgeglichen (also kein Phasenabgleich), so wird ohne phasenempfindliche Gleichrichtung nur auf ein Minimum der Diagonalspannung der Wheatstoneschen Brücke kompensiert, was nicht einmal zum $\text{Re} \{ \Delta \mathcal{Z}_O / \mathcal{Z}_O \}$ und schon gar nicht zu $\Delta R_O/R_O$ führt. Mit phasenempfindlicher Gleichrichtung wird der mit der Steuerspannung in Phase befindliche Teil der Diagonalspannung kompensiert, der nur unter bestimmten Voraussetzungen dem $\text{Re} \{ \Delta \mathcal{Z}_O / \mathcal{Z}_O \}$ entspricht; aber auch der liefert gemäß Gl. (31) nur unter bestimmten Bedingungen ungefähr $\Delta R_O/R_O$.

B) Messung von \mathcal{Z} nach der Ausschlag-Methode

B_1 : Wird zu Beginn nach Betrag und Phase abgeglichen (Ausschlag = 0), so wird bei einer Verstimmung um ΔR_O ohne phasenempfindliche Gleichrichtung nur der Betrag der Diagonalspannung gemessen, der weder dem $\text{Re} \{ \Delta \mathcal{Z}_O / \mathcal{Z}_O \}$ noch $\Delta R_O/R_O$ entspricht; mit phasenempfindlicher Gleichrichtung wird unter der meist erfüllten Bedingung $\omega \cdot C_O \ll R_O$ der $\text{Re} \{ \Delta \mathcal{Z}_O / \mathcal{Z}_O \}$ ermittelt, der gemäß Gl. (31) für $\Delta C_O = 0$ der Größe $\Delta R_O/R_O$ entspricht. Eine während der Messung auftretende Kapazitätsänderung ΔC_O täuscht aber auch bei phasenempfindlicher Gleichrichtung eine Änderung ΔR_O vor.

B_2 : Wird zu Beginn nur nach dem Betrag abgeglichen, so ist eine eindeutige Messung von $\Delta R_O/R_O$ überhaupt nicht mehr möglich, wenn nicht zufällig kapazitives Gleichgewicht herrscht.

Die Überlegungen zu B) gelten auch für Meßbrücken, bei denen der Abgleich durch Einspeisen einer Gegenspannung in die Brückendiagonale erfolgt. In diesem Falle erfolgt ja kein echter R-Abgleich, sondern nur eine Messung der Diagonalspannung für $R_{Dia} \rightarrow \infty$ mittels Kompensation!

Diese Betrachtungen zeigen, daß bei einer einwandfreien Dehnungsmessung nur die Änderung des ohmschen Widerstandes im Parallelersatzschaltbild des Eingangswiderstandes \mathcal{Z}^+ (bzw. \mathcal{Z}^*) gemessen werden muß. Diese wird nur durch R_N (nicht durch C_N) beeinflusst. Die wesentliche, durch Isolationsdefekte verursachte Störgröße ist also R_N .

1.23 Der komplexe spezifische Widerstand \mathcal{Y} von Trägern und Klebern und seine Deutung

Zum näheren Verständnis der am Dehnungsmeßstreifen bzw. Halbleitergeber auftretenden Isolationsprobleme hat es sich, wie bereits im Abschnitt 1.22 angedeutet, als notwendig erwiesen, die spezifischen Widerstände von Trägern und Klebern zu untersuchen. Sehr häufig wird unter dem spezifischen Widerstand eines Stoffes sein spezifischer Gleich-

stromwiderstand verstanden (z. B. [L 15, L 21, L 23 (Tabellen)]), was der verbreiteten Denkweise entspricht, als Isolationswiderstand nur den Gleichstromisolationswiderstand anzusehen. Diese auch in der DMS-Technik geübte Praxis kann jedoch zu schweren Fehlern führen, wenn sie bedenkenlos auf Wechselstromschaltungen angewendet wird. Bei der Untersuchung der Isolationsprobleme in mit Trägerfrequenz gespeisten Meßstreifenschaltungen hat sich die rein gleichstrommäßige Betrachtungsweise, die bisher allgemein üblich ist, sogar als völlig falsch erwiesen, da hierbei der z. T. erhebliche Einfluß der dielektrischen Verluste im Träger und Kleber außer acht gelassen wird. Es ist daher zweckmäßig, den spezifischen Widerstand als komplexe Größe \mathcal{Y} einzuführen und durch ein geeignetes, noch zu ermittelndes Ersatzschaltbild zu beschreiben.

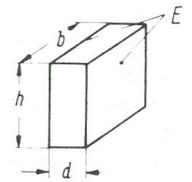


Bild 9 Schematische Darstellung zur Definition von \mathcal{Z}

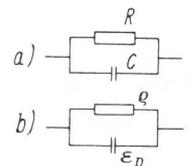


Bild 10 Ersatzschaltbild von \mathcal{Z} (a) und \mathcal{Y} (b)

Ein Probekörper (Bild 9) der Dicke d, der Höhe h und der Breite b trage zwei Elektroden E. Ist \mathcal{Z} der komplexe Widerstand zwischen den Elektroden, so ist

$$\mathcal{Z} = \mathcal{Y} \cdot \frac{b \cdot h}{d} \quad (32)$$

der komplexe spezifische Widerstand des Probenmaterials. Im Parallelersatzschaltbild, das sich für die Behandlung der Isolationsprobleme von Dehnungsmeßstreifen als das zweckmäßigste erwiesen hat und deshalb hier ausschließlich benutzt wird, wird \mathcal{Z} durch Parallelschalten der Größen R (= ohmscher Widerstand im Parallelersatzschaltbild von \mathcal{Z}) und C (= Kapazität im Parallelersatzschaltbild von \mathcal{Z}) dargestellt (siehe Bild 10 a). Der spezifische Widerstand \mathcal{Y} läßt sich dann symbolisch durch das in Bild 10 b gezeigte Ersatzschaltbild beschreiben, wobei

$$\rho = R \cdot \frac{b \cdot h}{d} \quad \text{und} \quad \epsilon_D = C \cdot \frac{d}{b \cdot h} \quad (33)$$

ist. Es ist hierbei als wesentlich zu beachten, daß R und ρ im allgemeinen nicht mit Gleichstromwerten identisch sind und ferner auch C und ϵ_D nicht als frequenzkonstant angesehen werden dürfen! Es ist vielmehr \mathcal{Y} durch Messung der Kapazität C und des Verlustfaktors $\tan \delta = 1/2 \pi f R C$, f = Meßfrequenz, zu bestimmen, woraus sich dann leicht ρ und ϵ_D ergeben.⁺⁾ Zu beachten ist ferner, daß ρ und ϵ_D anisotrop sein können!

Im vorliegenden Fall wurden C und $\tan \delta$ als Funktion der Frequenz mit einer Meßbrücke der Firma Marconi, Typ TF 2700, ermittelt. Aus rein praktischen Gründen erfolgte die eigentliche Messung im Reihenersatzschaltbild, aus dem anschließend mittels der bekannten Formeln, z. B. [L 15], in das Parallelersatzschaltbild umgerechnet wurde. Um die Sicherheit besonders der $\tan \delta$ -Messungen zu kontrollieren, wurde stets neben der an der Probe durchgeführten ersten Meßreihe in einer weiteren Meßreihe der $\tan \delta$ einer Ersatzschaltung gemessen, die aus sehr verlustarmen Kondensatoren und ohmschen Widerständen der in der ersten Meßreihe ermittelten Werte aufgebaut war. Die Differenz der $\tan \delta$ -Werte beider Meßreihen wurde zur Korrektur der ersten Reihe benutzt, so daß die Unsicherheit der im folgenden beschriebenen R-Werte als $\leq \pm 20\%$ anzusehen ist. Im Vergleich zu der sich über viele Größenordnungen erstreckenden Änderung in Abhängigkeit von der Frequenz ist diese Unsicherheit praktisch bedeutungslos.

Außer den im Frequenzbereich 100 Hz bis 50 kHz ermittelten R-Werten wurden stets auch die Gleichstromwiderstände gemessen. Bis zu Widerständen von etwa $10^4 \text{ M}\Omega$ wurde zur Messung ein Gleichspannungsisolationsmesser mit einer Meßspannung von 10 V verwendet, darüber ein solcher mit 108 V. Bei 10 V ist der Einfluß der elektrochemischen Polarisationsspannung praktisch bedeutungslos, während bei 108 V meist noch kein Absinken des Widerstandes infolge zu hoher Feldstärke [L 14] zu beobachten war.

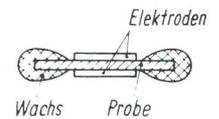
Es wurden insgesamt 5 Trägerarten und 5 Kleber beispielhaft untersucht. Die Kennzeichnung der untersuchten Materialien erfolgt nur durch die Herstellerbezeichnung und gegebenenfalls durch vom Hersteller zusätzlich gemachte Angaben. Eine genauere Kennzeichnung ist ohne weiteres auch nicht möglich, da die Träger und Kleber nicht selbst hergestellt wurden und ihre Herstellung nicht beeinflußt werden konnte. Das Ziel dieser Arbeit war auch nicht die Ermittlung der Isolationseigenschaften als Teil einer Untersuchung über Isolierstoffe. Ein Ziel der Arbeit war vielmehr, das Verhalten gegebener DMS und Kleber unter dem Einfluß von Feuchte zu verstehen und dabei u. a. auch Wirkungsweise und Größe der verschiedenen Isolationsdefekte in Abhängigkeit von den für die DMS-Technik wesentlichen Parametern, wie Frequenz, Feuchte, Temperatur usw., zu erkennen und somit eine Grundlage zu schaffen sowohl für eine exakte DMS-Meßtechnik und ein besseres Verständnis von DMS-Meßergebnissen als auch für eine Weiterentwicklung von Dehnungsmeßstreifen und Klebern.

Als Probekörper wurden bei der Untersuchung der Meßstreifenträger Originalträger mit Dicken zwischen 20μ (Folienmeßstreifen) und etwa 120μ (Papiermeßstreifen) verwendet, bei der Untersuchung der Kleber Schichten mit Dicken zwischen 0,3 mm und 0,8 mm. Auf beide Arten von Probekörpern wurden mittels Leitsilber Elektroden mit Flächen zwischen 2 cm^2 und 4 cm^2 aufgetragen. Auf Schutzringelektroden wurde wegen der geringen Gesamtgenauigkeit verzichtet. Die Leitsilbermethode trug grundsätzlich die

+) Der Verlustfaktor läßt sich auch durch die Gleichung $\delta = \epsilon''/\epsilon'$ einführen, wobei ϵ'' und ϵ' Imaginärteil und Realteil der komplexen Dielektrizitätskonstanten $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$ bedeuten. Da aber, wie im Abschnitt 1.22 gezeigt, in der DMS-Technik die Größe und Frequenzabhängigkeit von R und C interessieren, wurde hier die obige Form der Einführung gewählt.

Bild 11

Schematische Darstellung der Meßanordnung zur Bestimmung von ζ



Gefahr in sich, daß durch das Auftragen der Suspension eine unzulässige Veränderung des Probenmaterials eintritt; das galt besonders für die teilweise von Mikrorissen und feinen Hohlräumen durchsetzten Träger. Es wurden daher mit vier verschiedenen Trägern nacheinander zwei Versuchsserien durchgeführt: in der ersten Reihe wurden als Elektroden auf die Träger aufgepreßte Metallfolien verwendet, in der zweiten Leitsilberelektroden. Da der Unterschied zwischen beiden Reihen innerhalb der Meßunsicherheit lag, konnte somit ein unzulässig großer Einfluß der Leitsilberelektroden ausgeschlossen werden. Wegen der sehr viel einfacheren Handhabung wurde deshalb für alle weiteren Messungen die Leitsilber-Methode verwendet. Zur Vermeidung von Nebenschlüssen durch Oberflächenleitung wurden die Ränder der Proben in mikrokristallines Wachs eingeschmolzen (s. Bild 11), dessen spezifischer Oberflächenwiderstand auch bei 97 % relativer Feuchte im Bereich 0–50 kHz (auch Oberflächenleitung ist allgemein eine Funktion der Frequenz, vgl. [L 18]) als befriedigend groß gefunden wurde. Der durch Oberflächenleitung verursachte Fehler betrug stets $\leq 20\%$.

Während der gesamten Untersuchung befanden sich die Proben in einem Exsikkator, in dem mittels geeigneter gesättigter Salzlösungen nacheinander verschiedene relative Feuchten eingestellt wurden. Vor jeder Messung wurde das Erreichen des Feuchtegleichgewichtszustandes abgewartet. Die Verbindungsleitungen zwischen Probe und Meßbrücke wurden so geführt, daß die Eigenschaften der Leitungen nicht wesentlich in das Meßergebnis eingingen. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Bild 12 wiedergegeben.

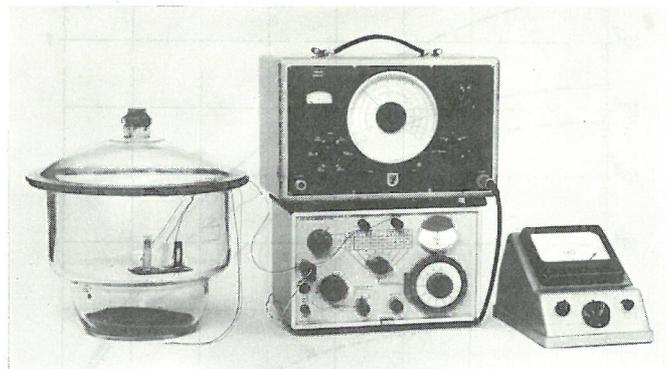


Bild 12

Versuchsaufbau zur Messung des spezifischen Widerstandes ζ von Trägern und Klebern

- a 3 DMS-Träger mit Leitsilberelektroden
- b Gleichspannungsisolationsmesser
- c Marconi-Brücke zur Messung von C und $\tan \delta$
- d Wechselspannungsgenerator für 20 Hz bis 250 kHz

Die bei den Messungen erhaltenen Ergebnisse sind in den Bildern 13 bis 26 dargestellt. Jeder eingetragene Meßwert ist der Mittelwert über die Messungen an zwei bis vier Proben. Die Streuungen um den Mittelwert betragen bei den Klebern und den homogenen Trägern durchweg weniger als $\pm 25\%$. Bei den inhomogenen Trägern (Bild 20 bis 23) kann

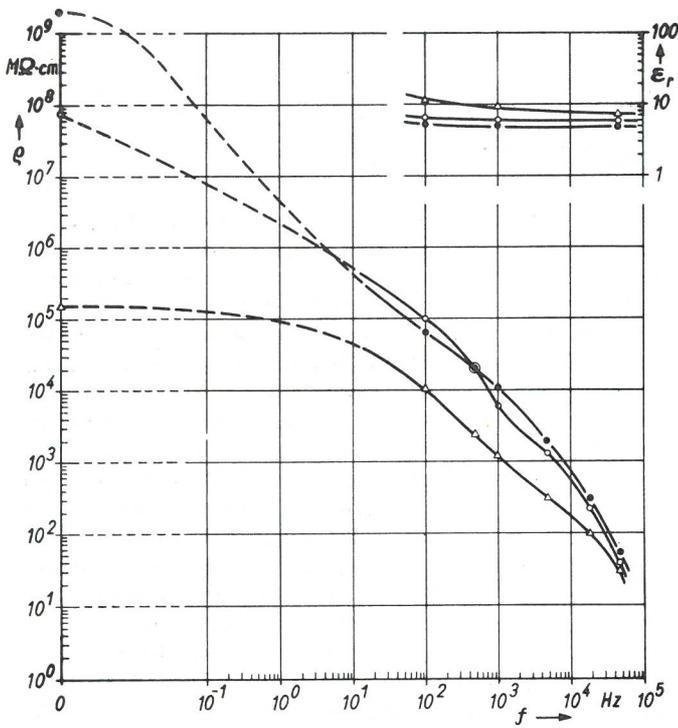


Bild 13
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ des Klebers PR 9244 als Funktion der Frequenz bei 21°C

- bei 2 % rel. Feuchte
- o " 75 % " "
- Δ " 97 % " "

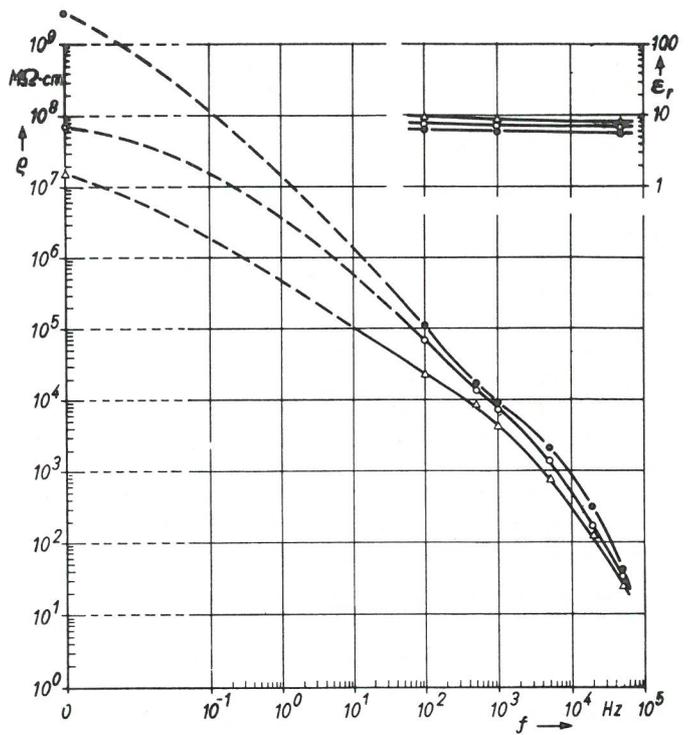


Bild 15
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ des Klebers X-60 als Funktion der Frequenz bei 21°C

- bei 2 % rel. Feuchte
- o " 75 % " "
- Δ " 97 % " "

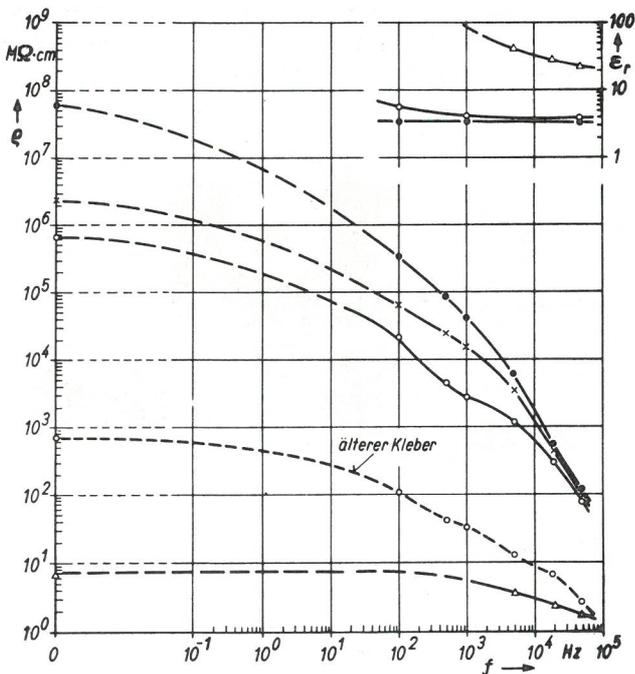


Bild 14
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ des Klebers BC 6035 als Funktion der Frequenz bei 21°C

- bei 2 % rel. Feuchte
- x " 66 % " "
- o " 75 % " "
- Δ " 97 % " "

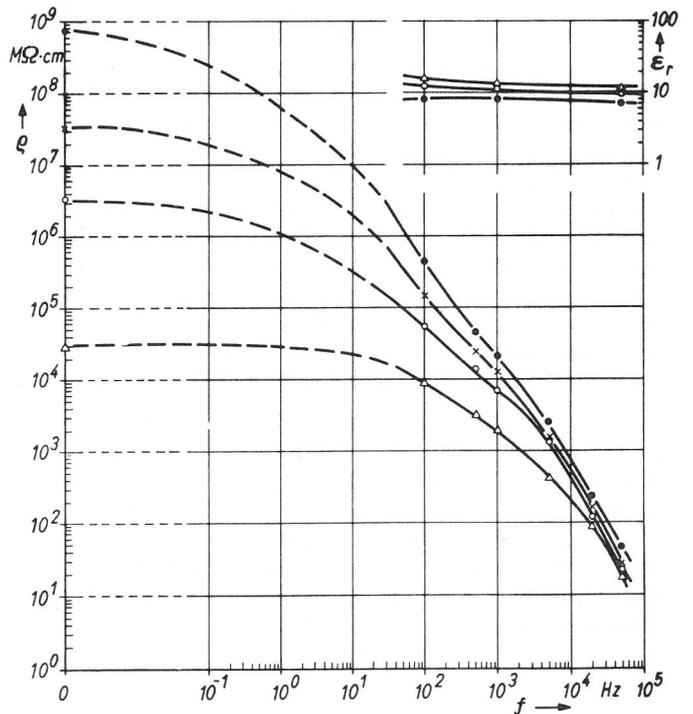


Bild 16
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ des Klebers GM 4479 als Funktion der Frequenz bei 21°C

- bei 2 % rel. Feuchte
- x " 66 % " "
- o " 75 % " "
- Δ " 97 % " "

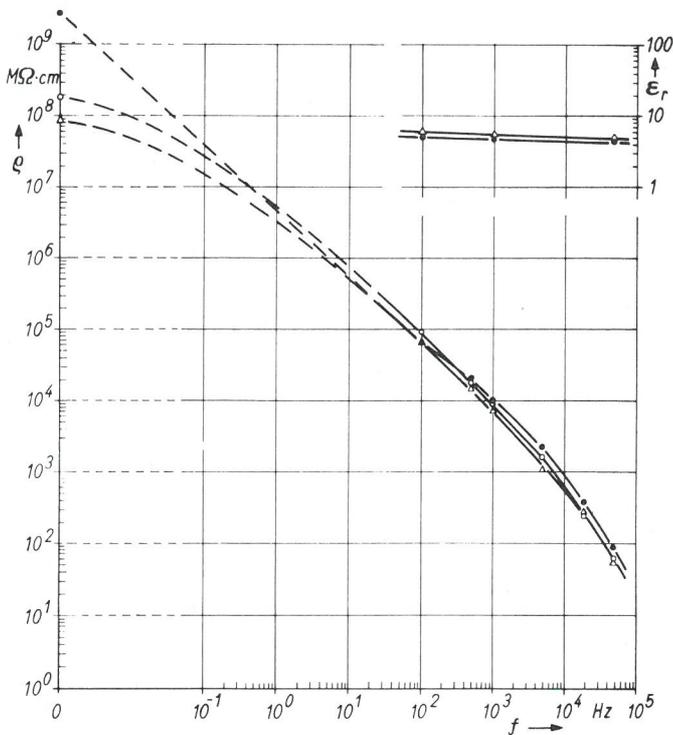


Bild 17
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ des xy-Klebers als Funktion der Frequenz bei 21°C

- bei 2 % rel. Feuchte
- o " 75 % " "
- Δ " 97 % " "

der Streubereich jedoch, abhängig von Feuchte und Meßfrequenz, bis zu einer Zehnerpotenz betragen. Einige Träger und Kleber zeigen beim Durchlaufen eines Feuchtezyklus trocken → feucht → trocken ausgeprägte Hystereseerscheinungen, obwohl vor jeder Messung stets das Erreichen des Feuchtgleichgewichtszustandes abgewartet wurde. Es treten also bei der Absorption offenbar z. T. auch noch sekundäre Effekte auf.

Die Bilder 13 bis 17 zeigen die Abhängigkeit des ohmschen spezifischen Widerstandes ρ und der relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r von der Meßfrequenz bei verschiedenen relativen Feuchten für fünf gebräuchliche Kleber; Bild 18 zeigt ρ als Funktion der relativen Feuchte bei verschiedenen Meßfrequenzen. Die Bilder lassen ganz klar und eindeutig erkennen, daß ρ in der durch die Gleichungen (32) und (33) gegebenen Definition, die allein für die Untersuchung von Isolationsproblemen in Meßstreifenschaltungen wesentlich ist, außerordentlich stark von der Meßfrequenz abhängt. Bei hohen Frequenzen liegen die ρ -Werte, ausgenommen beim Kleber BC 6035, sogar bei großer Trockenheit um mehrere Zehnerpotenzen unter den Gleichstrom- ρ -Werten bei extrem großer relativer Feuchte. Eine an Gleichstrom- ρ -Werte geknüpfte Schlußfolgerung muß daher zu schweren Fehlern führen, wenn sie direkt auf eine Trägerfrequenzmeßanlage übertragen wird. Als besonders ungünstig bei hoher Feuchte hat sich der Kleber BC 6035 erwiesen, und zwar schon bei Verwendung in frischem Zustand; nach längerer, die Klebeeigenschaften noch nicht wesentlich beeinflussender Lagerung werden die Isolations-eigenschaften noch erheblich schlechter, wie aus Bild 14 ersichtlich ist. Möglicherweise zeigen andere chemischhärtende Kleber ein in der Tendenz ähnliches Alterungsverhalten; schlüssige Versuchsergebnisse darüber liegen jedoch nicht vor. Der Kleber

BC 6035 unterscheidet sich von den anderen untersuchten Klebern ferner dadurch, daß bei ihm auch die Dielektrizitätskonstante ϵ_r stark von der Feuchte und der Frequenz abhängt. In Bild 19 ist ρ für drei Frequenzen in Abhängigkeit von der Temperatur T bei konstanter relativer Feuchte aufgetragen. Dieses Bild gibt zwar nicht Auskunft über die Temperaturabhängigkeit im gesamten Feuchtebereich, zeigt aber — und das ist der Sinn dieses Versuches —, daß $\rho(T)$ je nach Meßfrequenz sehr unterschiedlich verlaufen kann. Die vom Gleichstromverhalten abgeleitete Annahme, daß ρ mit steigender Temperatur stets sinkt, ist also nicht allgemein gültig.

Die Bilder 20 bis 26 zeigen die entsprechenden Diagramme für fünf verschiedene Trägertypen. Diese Diagramme unterscheiden sich nur hinsichtlich der Größe der ρ -Werte von denen der Kleber, nicht jedoch bezüglich ihrer Feuchte- und Frequenzabhängigkeit. Auffallend ist jedoch, daß hier auch die Dielektrizitätskonstanten ϵ_r — mit Ausnahme jener des Epoxydharzträgers — beachtlich von Feuchtigkeit und Frequenz abhängen. Wie später noch gezeigt wird, besteht zwischen diesen vier Trägern und dem Kleber BC 6035, der sich ähnlich verhält, einerseits und dem Epoxydharzträger und den anderen vier Klebern andererseits insofern eine Gemeinsamkeit, als die erste Gruppe durch eine starke Inhomogenität der Struktur gekennzeichnet ist, während bei der zweiten Gruppe wesentliche Inhomogenitäten nicht zu erkennen waren.

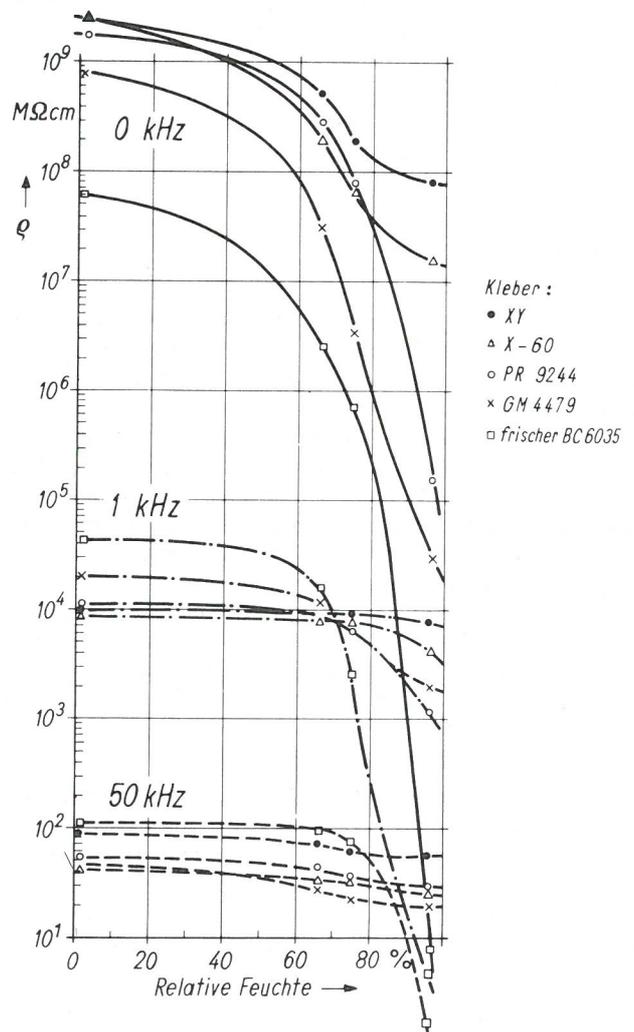


Bild 18
Spezifische Widerstände ρ gebräuchlicher Kleber als Funktion der rel. Feuchte bei ca. 21°C für drei Frequenzen

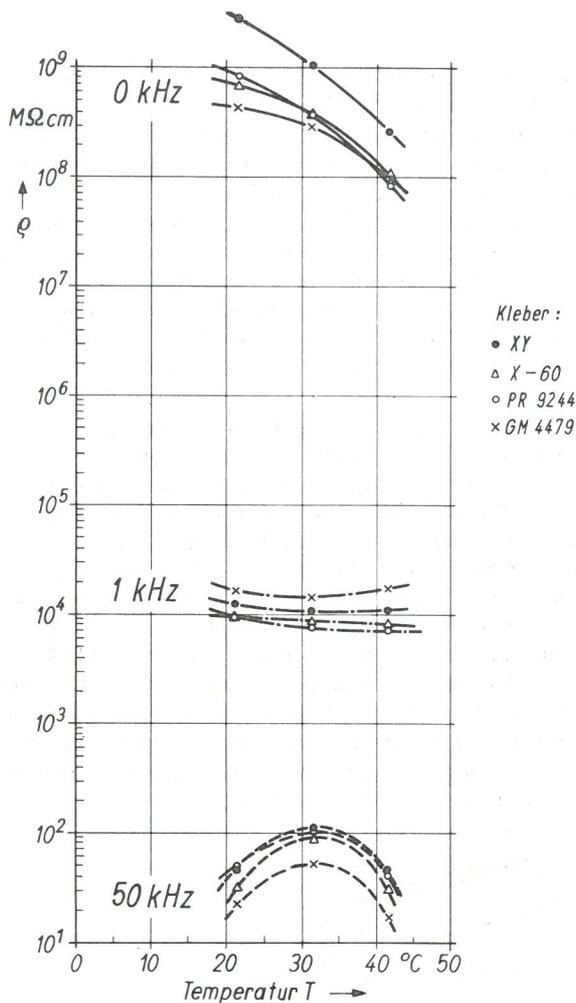


Bild 19
Spezifische Widerstände ρ gebräuchlicher Kleber als Funktion der Temperatur bei 34 % rel. Feuchte für drei Frequenzen

Ein Vergleich der Diagramme für Träger und Kleber legt den Schluß nahe, durch zweckmäßige Kombination von Klebern und Trägern für eine gegebene Trägerfrequenz einen optimalen Isolationswiderstand erzielen zu können. Dieser Schluß ist zwar in seiner Tendenz richtig, doch ist zu beachten, daß der Isolationswiderstand des aufgeklebten Meßstreifens durch die Eigenschaften der aus Kleber- und Trägerschicht bestehenden dielektrischen Doppelschicht bestimmt wird, in die neben ρ und ϵ_D von Träger und Kleber vor allem auch die Schichtdicke des Klebers eingeht, die aber, wie später im Abschnitt 1.24 gezeigt wird, unter dem aufgeklebten Meßstreifen sehr stark und undefiniert schwankt. Die Eigenschaften der Doppelschicht sind deshalb grundsätzlich nicht vorherbestimmbar, so daß sich auch der angedeutete Schluß nur näherungsweise und nur bezüglich der Tendenz ziehen läßt.

Aus den Bildern 13 bis 26 folgt, daß der die Isolationsprobleme in Meßstreifenschaltungen kennzeichnende spezifische Widerstand ρ nicht nur durch Feuchtigkeit beeinflusst wird, sondern auch in sehr erheblichem Maße von der Meßfrequenz abhängt. Die Ursache dieser Frequenzabhängigkeit sei wegen ihrer Bedeutung für die DMS-Technik näher erläutert.

Der Verlustfaktor einer Parallelschaltung entsprechend Bild 10 a ist definitionsgemäß durch die Gleichung

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{2 \pi f \cdot R \cdot C} \quad (34a)$$

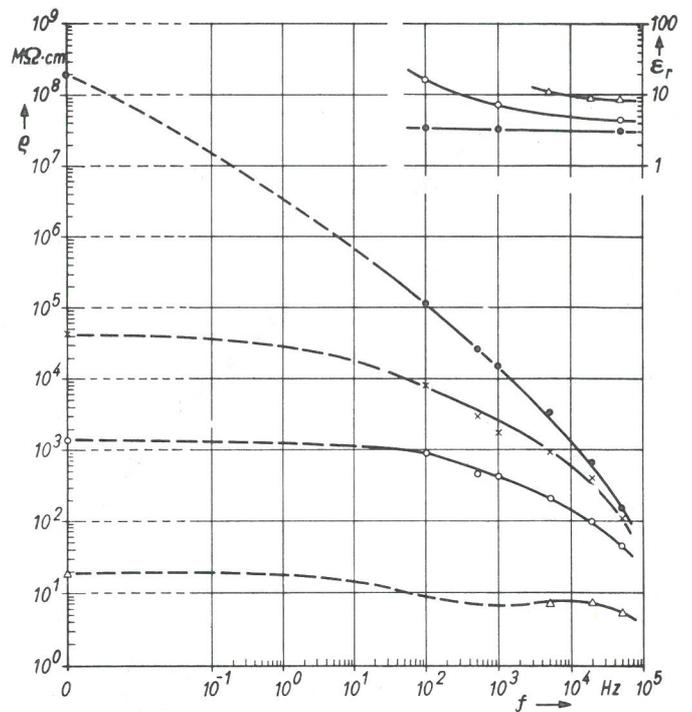


Bild 20
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ eines Acrylharzträgers (Hottinger) als Funktion der Frequenz bei 22°C

- bei 2 % rel. Feuchte
- × " 66 % " "
- " 75 % " "
- △ " 97 % " "

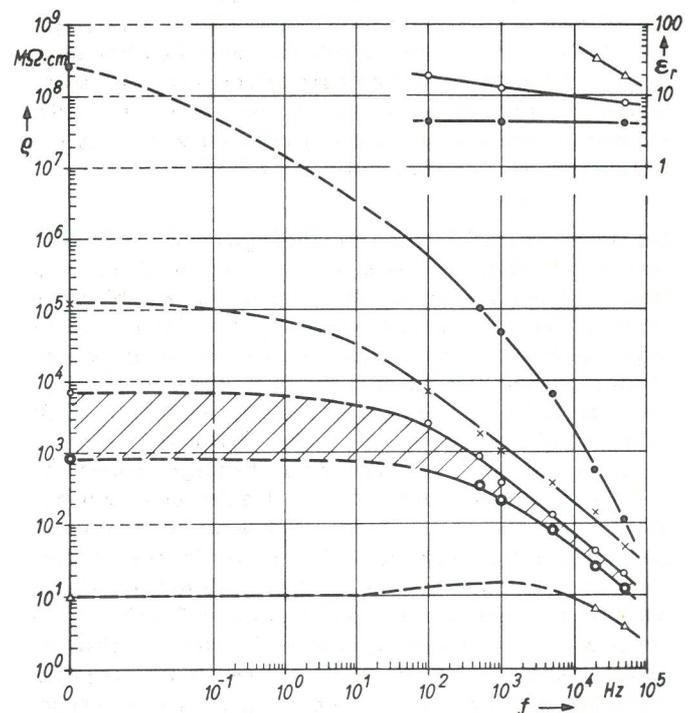


Bild 21
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ eines Papierträgers als Funktion der Frequenz bei 22°C

- bei 2 % rel. Feuchte
 - × " 66 % " "
 - " 75 % " "
 - △ " 97 % " "
 - ⊙ " 75 % " "
- //// Hysteresis-Bereich

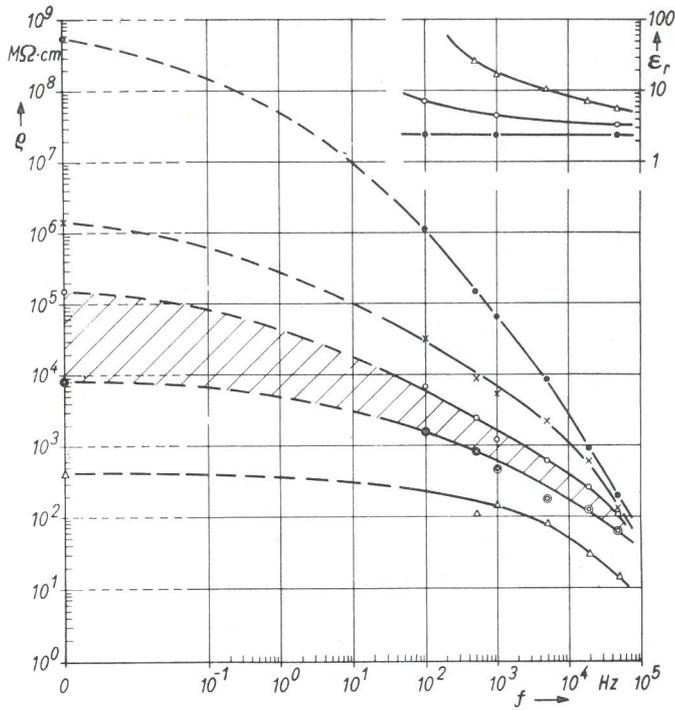


Bild 22
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ eines Kresolharzträgers (Philips) als Funktion der Frequenz bei 22°C

- bei 2% rel. Feuchte
- x " 66% " "
- o " 75% " "
- Δ " 97% " "
- ⊙ " 75% " "
- ////// Hysterese-Bereich

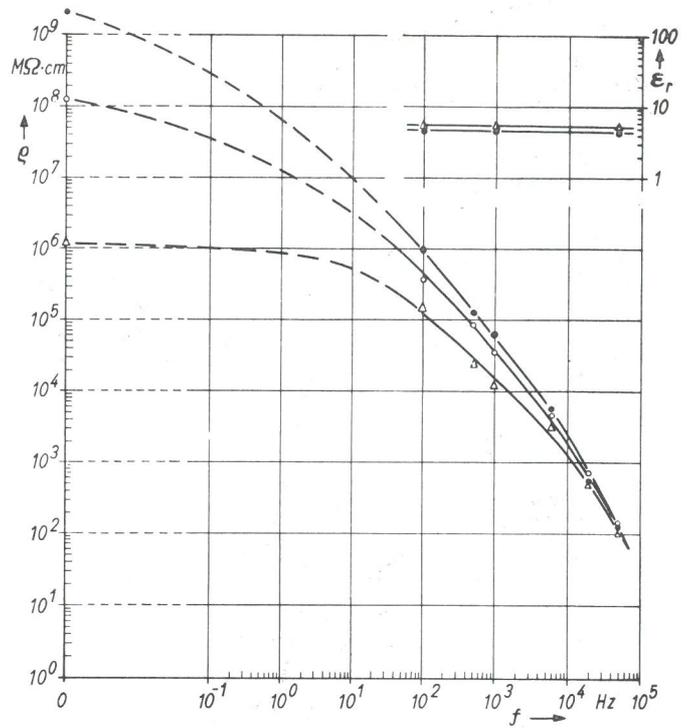


Bild 24
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ eines Epoxydharzträgers (Budd) als Funktion der Frequenz bei 22°C

- bei 2% rel. Feuchte
- o " 75% " "
- Δ " 97% " "

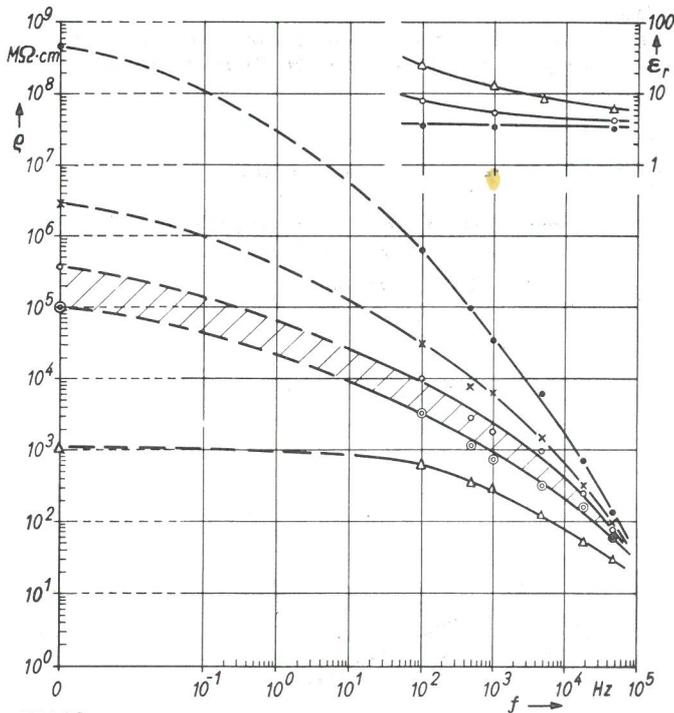


Bild 23
Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und ohmscher spezifischer Widerstand ρ eines Phenolharzträgers (Hottinger) als Funktion der Frequenz bei 22°C

- bei 2% rel. Feuchte
- x " 66% " "
- o " 75% " "
- Δ " 97% " "
- ⊙ " 75% " "
- ////// Hysterese-Bereich

bzw. entsprechend Bild 10 b durch die Gleichung

$$\tan \delta = \frac{1}{2 \pi f \cdot \rho \cdot \epsilon_D} \quad (34b)$$

gegeben, in der I_R den Leitungsstrom und I_C den Ladestrom – im Parallelersatzbild nicht identisch mit Wirkstrom und Blindstrom – sowie f die Meßfrequenz darstellt. Bei frequenzkonstantem C bzw. ϵ_D muß also R bzw. ρ selbst bei konstantem $\tan \delta$ mit steigender Frequenz sinken. Bei gegen Null strebender Frequenz wachsen R bzw. ρ jedoch nicht beliebig, sondern nur bis zu ihren Gleichstromwerten, so daß für $f \rightarrow 0$ stets $\tan \rightarrow \infty$ geht.

Das Frequenzverhalten des Verlustfaktors der untersuchten Kleber und Träger ist beispielhaft für den Kresolharzträger (Philips) und den xy-Kleber (Frischen) in Bild 27 dargestellt. Der $\tan \delta$ -Verlauf des Kresolharzträgers ist typisch für die Stoffe, die im untersuchten Frequenzbereich ein beträchtliches Ansteigen der relativen Dielektrizitätskonstanten ϵ_r mit steigender Feuchte und sinkender Frequenz aufweisen, während der $\tan \delta$ -Verlauf des xy-Klebers die Stoffe mit näherungsweise konstantem ϵ_r kennzeichnet. Zwischen diesen Extremen lassen sich alle anderen Träger und Kleber einordnen. Der Kleber zeigt also bei nahezu konstantem ϵ_r nicht nur keinen gleichbleibenden, sondern sogar einen mit steigender Frequenz wachsenden Verlustfaktor $\tan \delta$, so daß gemäß Gl. (34 b) ρ bei hohen Frequenzen stärker als proportional $1/f$ absinken muß, wie es auch aus Bild 17 zu entnehmen ist. Beim Träger ist der Zusammenhang $\tan \delta - \rho$ nur bei großer Trockenheit ähnlich deutbar. Im feuchten Zustand geht in die Betrachtung auch noch der ϵ_r -Verlauf und die Änderung des Gleichstromwertes ρ_0 durch die

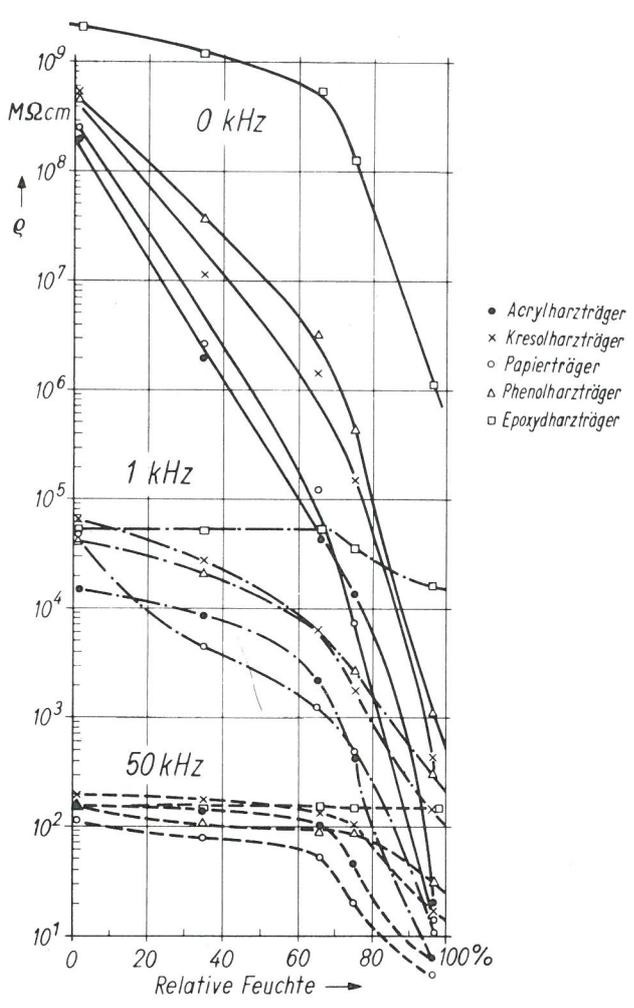


Bild 25
Spezifische Widerstände ρ gebräuchlicher DMS-Trägerarten als Funktion der rel. Feuchte bei ca. 21°C für drei Frequenzen

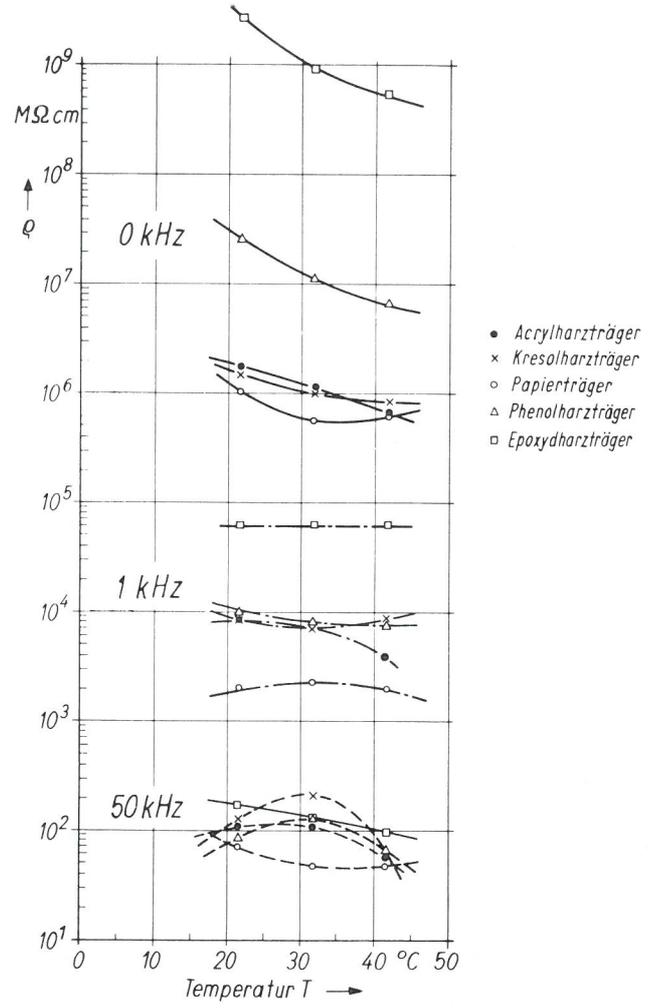


Bild 26
Spezifische Widerstände ρ gebräuchlicher DMS-Trägerarten als Funktion der Temperatur bei 34% rel. Feuchte für drei Frequenzen

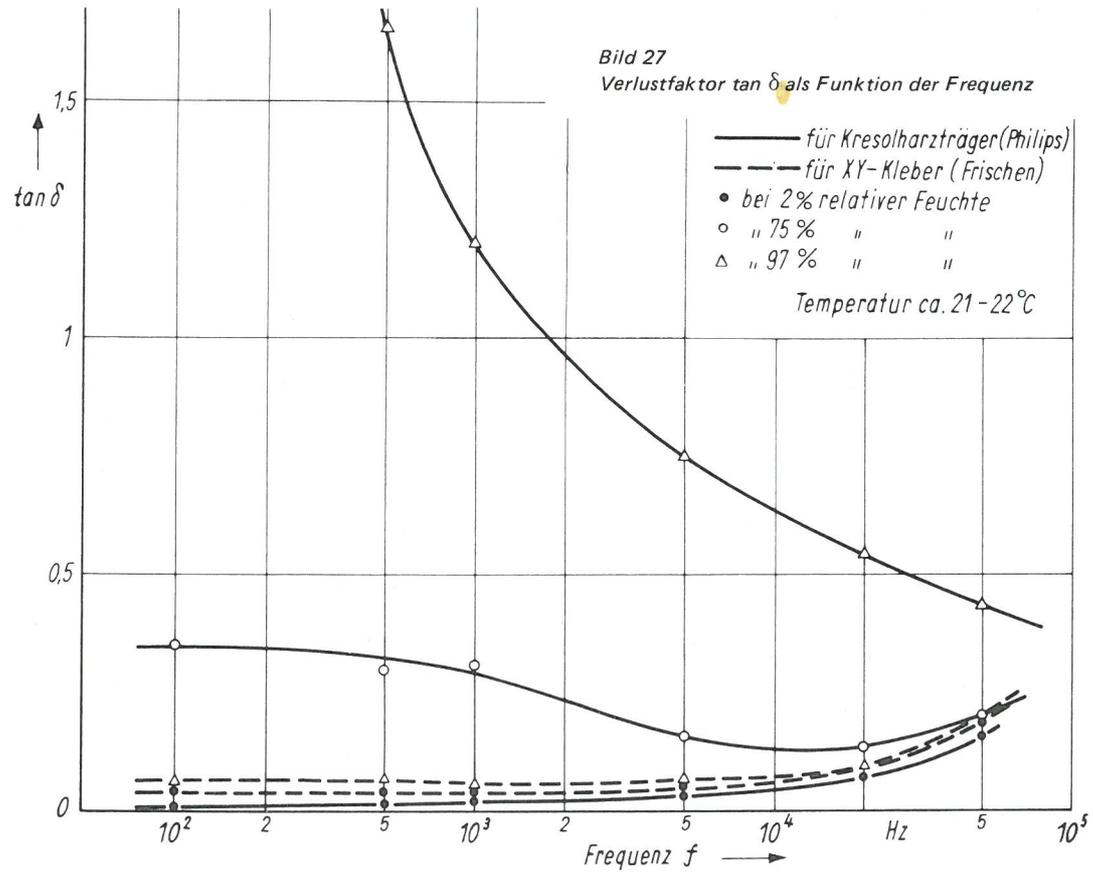


Bild 27
Verlustfaktor $\tan \delta$ als Funktion der Frequenz

Feuchte ein. Insgesamt zeigt diese Betrachtung, daß die Ersatzschaltung gemäß Bild 10 unbefriedigend ist, da ihre Elemente noch Funktionen der Meßfrequenz sind.

Um ein befriedigendes Ersatzschaltbild aufstellen zu können ist es zweckmäßig, zunächst einmal die physikalischen Ursachen der beobachteten Erscheinungen zu klären. Zur Deutung stehen zwei Grundeffekte zur Verfügung: die dielektrischen Erscheinungen gemäß der Debyeschen Theorie der polaren Molekeln [L 16] und jene gemäß der Inhomogenitätstheorie von K. W. Wagner [L 17]. Nach der Debyeschen Theorie ist die Frequenzabhängigkeit dielektrischer Erscheinungen auf die Orientierungspolarisation zurückzuführen. Nach F. H. Müller [L 18] läßt sich das elektrische Verhalten eines polaren Moleküls durch ein Ersatzschaltbild gemäß Bild 28 beschreiben. Beim Vorliegen einer komplizierten Molekülstruktur mit mehreren Resonanzfrequenzen ist die Schaltung gemäß Bild 28 durch weitere Glieder R, C zu ergänzen. Ist das Dielektrikum elektrisch inhomogen, d. h. aus mindestens zwei Substanzen mit unterschiedlichen ρ_0 , ϵ -Werten zusammengesetzt, so tritt, wie K. W. Wagner gezeigt hat, schon bei sehr niedrigen Frequenzen zusätzlich Grenzflächenpolarisation auf, wenn $\epsilon_1/\rho_{O1} \neq \epsilon_2/\rho_{O2}$ ist. Da im vorliegenden Fall ein erhebliches und zugleich stark frequenzabhängiges Ansteigen von ϵ und $\tan \delta$ erst unter dem Einfluß von Feuchtigkeit eintritt, wie besonders die Bilder 20 bis 23 zeigen, wird die elektrische Inhomogenität offenbar erst durch die Absorption von Wasser wesentlich. Das beruht wohl vorwiegend darauf, daß die in den Trägern aus Acrylharz, Phenolharz und Kresolharz enthaltenen Fasern (s. Bild 29), die beim Acrylharzträger als regenerierte Zellulosefasern, Bastfasern und Nadelholz Zellstoff identifiziert werden konnten, bei hoher Feuchte sehr viel besser leiten als unter gleichen Bedingungen die jeweiligen Harze. Der Epoxydharzträger des Folienmeßstreifens läßt dagegen nur eine ausgeprägte Textur, jedoch keine grobe Inhomogenität erkennen. Das Ersatzschaltbild eines aus zwei elektrisch verschiedenen Stoffen bestehenden inhomogenen Dielektrikums hat die in Bild 30 dargestellte Form [L 18].

Bei mehr als zwei verschiedenen Stoffen sind weitere Glieder R, C hinzuzufügen. Es sei schon hier darauf hingewiesen, daß selbst in dem Falle, da Kleber und Träger für sich völlig homogen sind, durch das Aufkleben des Meßstreifens auf Metall eine inhomogene Doppelschicht entstehen kann und meist auch entstehen wird; zur Vermeidung des Inhomogenitätseffektes genügt es deshalb nicht, allein Träger und Kleber für sich homogen auszubilden.

Im Falle der hier untersuchten Kleber und Träger wird neben der Orientierungspolarisation zumindest teilweise auch Grenzflächenpolarisation auftreten. (Die Lichteneckerschen Mischkörperregeln [L 19] wurden zur Deutung nicht herangezogen, da sie hier neben den Polarisierungseffekten ohne Bedeutung sind, worauf schon H. Veith [L 20] hingewiesen hat.) Dann sind die beiden Ersatzschaltbilder 28 und 30 in geeigneter Weise miteinander zu verknüpfen. Die Art der Verknüpfung läßt sich nur durch umfangreiche Versuche speziell für jedes Material bestimmen; da sie nicht das Ziel dieser Untersuchung war, wurde darauf verzichtet.

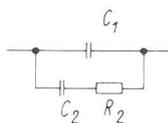


Bild 28
Ersatzschaltbild eines polaren Moleküls nach F. H. Müller [L 18]



Phenolharzträger
(Hottinger)

Vergr. ca. 140



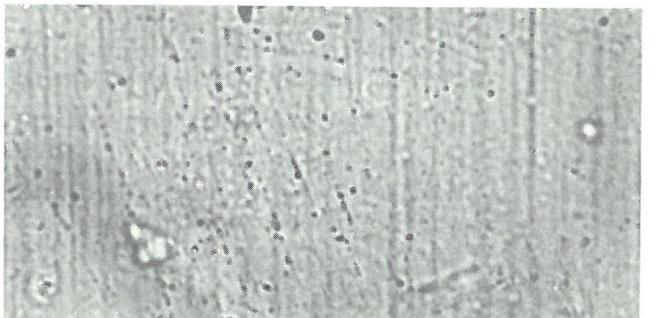
Acrylharzträger
(Hottinger)

Vergr. ca. 140



Kresolharzträger
(Philips)

Vergr. ca. 140



Epoxydharzträger
[Folienmeßstreifen]
(Frischen)

Vergr. ca. 450

Bild 29
Strukturen verschiedener Träger

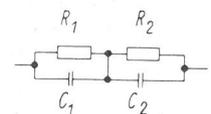


Bild 30
Ersatzschaltbild eines aus zwei Stoffen gebildeten inhomogenen Dielektrikums nach F. H. Müller [L 18]

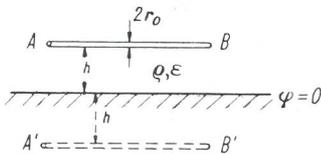


Bild 31

Schematische Darstellung zur Berechnung des Widerstandes zwischen einem geraden Leiter und einer ebenen leitenden Fläche

Ein allgemeingültiges Ersatzschaltbild für den spezifischen Widerstand läßt sich also nicht angeben.

Die Untersuchung der spezifischen Widerstände ζ von Trägern und Klebern hat somit folgendes ergeben:

Die Größen ρ und ϵ gemäß Bild 10 bzw. Gl. (33) sowie $\tan \delta$ gemäß Gl. (34) sind nicht nur z. T. sehr stark von der relativen Feuchte abhängig, sondern ganz erheblich auch von der Meßfrequenz. Selbst wenn diese Frequenzabhängigkeit nicht vorhanden wäre, würden für eine Doppelschicht Träger-Kleber die resultierenden Werte ρ , ϵ , $\tan \delta$ im allgemeinen von der Meßfrequenz abhängen. Es ist deshalb unzulässig, bei der Behandlung von Isolationsproblemen in Meßstreifenschaltungen von Gleichstromwerten auszugehen, wenn zur Dehnungsmessung Trägerfrequenzmeßbrücken verwendet werden.

Es sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, daß in den meisten gebräuchlichen Tabellenwerken (z. B. [L 21—L 23]) Angaben über ϵ_r , ρ_0 und $\tan \delta$ nur mit dem Hinweis auf die Meßtemperatur, nicht jedoch auf die relative Feuchte zur Zeit der Messung erfolgen, obwohl die Feuchte, wie sich gezeigt hat, von z. T. erheblichem Einfluß ist. Ferner wird fast stets übergangen, daß ϵ_r auch bei Frequenzen $< 10^6$ Hz beträchtlich von der Frequenz abhängen kann. Bei Benutzung dieser Angaben, die teilweise sogar auf 3 Stellen genau gemacht werden, ist deshalb stets große Vorsicht geboten! Bemerkenswerterweise schreiben jedoch die VDE-Regeln 0303 für die Prüfung von Isolierstoffen die Angabe der Probenvorbehandlung zwingend vor, was offenbar nicht genügend bekannt ist.

1.24 Die komplexen Isolationswiderstände \mathfrak{Z}_{IS} auf Metall geklebter Dehnungsmeßstreifen

1.24.1 Berechnete Isolationswiderstände

Im Abschnitt 1.22 wurde an Hand der Bilder 1 und 5 beschrieben, in welcher Weise der Widerstand \mathfrak{Z}_{IS} zwischen Meßstreifen und metallischem Bauteil störend wirksam wird. Das Ergebnis dieser Betrachtung war die Gleichung (15)

$$\mathfrak{Z}_{NIS} = K_{IS} \cdot \mathfrak{Z}_{IS}$$

deren Faktor K_{IS} stets ≥ 4 sein muß. Die Größen K_{IS} und \mathfrak{Z}_{IS} hatten sich jedoch für den Fall des aufgeklebten Meßstreifens als nicht berechenbar erwiesen, da allein schon die Kleberschichtdicke undefinierten und nicht vorher bestimmbarer Schwankungen im Verhältnis bis 1 : 30 unterliegt. Für das nähere Verständnis der verschiedenen Isolationseffekte, besonders auch für den Vergleich von \mathfrak{Z}_{NIS} mit \mathfrak{Z}_{NQ} , hat es sich jedoch als nützlich erwiesen, den Widerstand \mathfrak{Z}_{IS} (und später im Abschnitt 1.25 auch \mathfrak{Z}_{NQ}) unter der Annahme eines homogenen, isotropen Einschichtdielektrikums konstanter Dicke näherungsweise zu berechnen.

Das ganz allgemein komplexe Potential φ_k eines geraden, zylindrischen Leiters A—B (s. Bild 31) der Länge s und des Durchmessers $2r_0$, der sich im Abstand h über der ebenen Oberfläche eines auf dem Potential 0 liegenden Bauteils in einem Medium mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ_D und dem komplexen spezifischen Widerstand ζ befindet, beträgt — in Anlehnung an [L 34] —

$$\varphi_k = \frac{\mathcal{Q}}{4\pi\epsilon_D s} \cdot \left[\ln \left(\frac{s + \sqrt{(2r_0)^2 + s^2}}{-s + \sqrt{(2r_0)^2 + s^2}} \right) - \ln \left(\frac{s + \sqrt{(4h+d)^2 + s^2}}{-s + \sqrt{(4h+d)^2 + s^2}} \right) \right] \quad (35 a)$$

Hierin ist \mathcal{Q} die „komplexe“ Gesamtladung des Leiters. Die Bezeichnung „komplex“ besagt, daß bei zeitlich veränderlicher Ladung des Leiters im verlustbehafteten Dielektrikum der zeitliche Verlauf von φ_k gegenüber jenem von \mathcal{Q} phasenverschoben ist. Der erste Ausdruck der Klammer beschreibt das Potential an der Oberfläche des Leiters A—B im unendlich ausgedehnten Raum als Folge seiner eigenen Ladung, der zweite jenes eines gedachten Spiegelbildes A'—B' mit einer gleich großen Ladung umgekehrten Vorzeichens ebendort. Die Überlagerung der von A—B und A'—B' herührenden Potentiale erzwingt auf der Bauteiloberfläche das Potential 0. Die Gleichung (35 a) beschreibt somit das Potential des Leiters A—B in einem Halbraum, der durch die Bauteiloberfläche mit dem Potential $\varphi_k = 0$ begrenzt wird. Da der Leiter bei Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern stets sehr dicht über der Bauteiloberfläche liegt ($h \approx$ einige Leiterdurchmesser), ist der Umstand, daß beim realen Meßstreifen nicht der ganze Halbraum vom Trägermaterial erfüllt ist, im Rahmen dieser Arbeit ohne wesentlichen Einfluß.

Da bei Dehnungsmeßstreifen stets $(2r_0)^2 \ll s^2$ und $4h \ll d$ ist, gilt näherungsweise

$$\varphi_k \approx \frac{\mathcal{Q}}{2\pi\epsilon_D s} \cdot \ln \frac{s}{r_0} \cdot \frac{\sqrt{(4h)^2 + s^2} - s}{\sqrt{(4h)^2 + s^2} + s} \quad (35 b)$$

Da im allgemeinen auch $(4h)^2 \ll s^2$ ist, folgt

$$\varphi_k \approx \frac{\mathcal{Q}}{2\pi\epsilon_D s} \cdot \ln \frac{2h}{r_0}$$

Wegen $\mathcal{Q} = \epsilon_D \iint \mathfrak{E}_k \cdot df = \epsilon_D \cdot \zeta \cdot \iint \mathfrak{J}_k \cdot df = \epsilon_D \cdot \zeta \cdot \mathcal{J}$, worin \mathfrak{E}_k die komplexe Feldstärke, \mathfrak{J}_k die komplexe Stromdichte, \mathcal{J} der komplexe Strom und df das Flächenelement einer \mathcal{Q} umschließende Fläche sei, wird

$$\varphi_k = \frac{\zeta \cdot \mathcal{J}}{2\pi s} \cdot \ln \frac{2h}{r_0}$$

Da das Potential φ_{Bau} des Bauteils Null ist, gilt für die Spannung \mathcal{U} zwischen Leiter und Bauteil $\mathcal{U} = \varphi_k - \varphi_{\text{Bau}} = \varphi_k$. Für den Widerstand \mathfrak{Z}_{IS} zwischen Leiter und Bauteil wird daher

$$\mathfrak{Z}_{IS} = \frac{\mathcal{U}}{\mathcal{J}} \approx \frac{\zeta}{2\pi s} \cdot \ln \frac{2h}{r_0} \quad (36)$$

Im Parallelersatzschaltbild gilt dann für den Widerstand R_{IS} und die Kapazität C_{IS}

$$R_{IS} = \frac{\rho}{2\pi s} \cdot \ln \frac{2h}{r_0} \quad C_{IS} = \frac{2\pi\epsilon_D s}{\ln \frac{2h}{r_0}} \quad (37)$$

Nun ist beim realen Dehnungsmeßstreifen der Leiter zwar nicht gerade, sondern meist mäanderförmig gewunden, doch ist der Abstand Draht—Draht meist wesentlich größer als jener Draht—Bauteil, so daß die Gleichungen dennoch näherungsweise gelten werden.

Hat der Leiter einen rechteckförmigen Querschnitt (z. B. bei Folienmeßstreifen und manchen Halbleitergebern), so sind die Gleichungen (37) nicht anwendbar. Sind die Breite b und die Länge s des Leiters sehr viel größer als der Abstand h zur Bauteiloberfläche (s. Bild 32), so gilt näherungsweise

$$\beta_{IS} \approx \epsilon \cdot \frac{h}{b \cdot s} \quad (38)$$

und ferner entsprechend den Gleichungen (37) hier

$$R_{IS} \approx \rho \cdot \frac{h}{b \cdot s} \quad C_{IS} \approx \epsilon_D \cdot \frac{b \cdot s}{h} \quad (39)$$

Diese Gleichungen sind auch auf die Zuleitungen anzuwenden, falls diese aus Bändern bestehen.

Die Gleichungen (37) und (39) erlauben nun, die Widerstände β_{IS} und β_{NIS} gemäß Gl. (23) unter den oben angegebenen Voraussetzungen näherungsweise zu berechnen.

In Bild 33 sind für elf verschiedene Dehnungsmeßstreifen die wichtigsten Widerstandswerte zusammengestellt, um einen Vergleich der einzelnen Typen zu ermöglichen. Die Tabelle läßt erkennen, wie wesentlich bei kurzen Meßstreifen, und besonders bei Folienmeßstreifen, der Einfluß der Zuleitungen ist. Sie erlaubt ferner eine Abschätzung, welche Meßstreifen von der Geometrie her bezüglich des Isolationswiderstandes am günstigsten sind; und diese Abschätzung ist unabhängig von den Problemen, die beim aufgeklebten Meßstreifen durch die Kleberschicht entstehen.

1.24.2 Gemessene Isolationswiderstände

Die Berechnung der Isolationswiderstände im Abschnitt 1.24.1 war unter anderem unter der Voraussetzung erfolgt, daß das Material von Träger und Kleber elektrisch gleichartig ist (homogenes Einschichtdielektrikum). Diese Voraussetzung ist jedoch in der Praxis meist nicht erfüllt, so daß die tatsächlich gemessenen Isolationswiderstände von den berechneten erheblich abweichen können. Ausschlaggebend

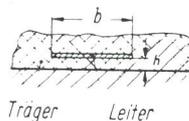


Bild 32

Schematische Darstellung zur Berechnung von β_{IS} bei Folienmeßstreifen

sind deshalb die wirklich am aufgeklebten Meßstreifen gemessenen Isolationswiderstände, während die Rechnung und der später beschriebene Vergleich Rechnung—Messung hauptsächlich dem Verständnis der Probleme dient.

In den Bildern 34 bis 40 ist beispielhaft für sieben verschiedene, auf Metall geklebte Dehnungsmeßstreifen der Widerstand R_{IS} und die Kapazität C_{IS} als Funktion der Frequenz bei verschiedenen relativen Feuchten aufgetragen. Die eingetragenen Meßwerte stellen Mittelwerte über 2 bis 3 Meßstreifen dar; die Einzelwerte können in einem Bereich bis zu etwa 0,3—3 x Mittelwert streuen. Es ist deshalb nicht möglich, mit Hilfe der Diagramme exakte Voraussagen über das Verhalten einzelner Meßstreifen zu machen. Die dargestellten Kurven lassen jedoch sehr gut das grundsätzliche Verhalten erkennen und ermöglichen einen Vergleich der mittleren Isolationseigenschaften der verschiedenen Kombinationen Meßstreifen—Kleber. Naturgemäß ähnelt der Verlauf der R, C-Kurven jenen der in 1.23 beschriebenen ρ , ϵ_D -Kurven. Die Ursache der Frequenzabhängigkeit beruht jedoch hier nicht nur auf den dielektrischen Eigenschaften von Trägern und Klebern jeweils für sich, sondern auch auf der Inhomogenität der Doppelschicht Träger—Kleber. In Bild 41 ist R_{IS} als Funktion der relativen Feuchte beispielhaft an vier Kombinationen Meßstreifen—Kleber für drei verschiedene Frequenzen dargestellt. Die Darstellung läßt sehr gut erkennen, daß der Folienmeßstreifen mit seinem relativ homogenen Träger gleichstrommäßig allen anderen Meßstreifen weit überlegen ist; bei 1 kHz besteht diese Überlegenheit nur noch im Bereich hoher Feuchte (also gerade im kritischen Bereich!), bei 50 kHz ist sie dagegen völlig verschwunden. Sie zeigt ferner, daß die maßgeblichen Isolationswiderstände R_{IS} selbst noch bei 75 % relativer Feuchte für 50 kHz um mehr als 2 Größenordnungen unter denen für Gleichstrom liegen, so daß die häufig zu lesende Forde-

Bild 33

Berechnete Isolations- und Querwiderstände einiger Dehnungsmeßstreifen (DMS). Die zur Ermittlung von Zahlenwerten benötigten ρ -Werte sind den Bildern 20—26 zu entnehmen. F-Typen: Fabrikat Hottinger. PR-Typen: Fabrikat Philips. C-Typen: Fabrikat Budd

DMS-Typ	Gitterlänge in mm	Gitterbreite in mm	Schlaufenanzahl	Trägermaterial	$(R_{IS})_{\text{Gitter}}$ nach Gl. (37) bzw. (39)	$(R_{IS})_{\text{Zuleitung}}$ nach Gl. (37) bzw. (39)	R_{IS} nach Gl. (23)	R_{NIS} nach Gl. (23)	$(R_{NIS})_{\text{min}} = 4R_{IS}$	R_{Nq} nach Gl. (21) und Gl. (40) bzw. (41)
10/600 FA 1	20	5	15	Acrylharz	$6,6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$79 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$6,1 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$63 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 10,3 R_{IS}$	$24 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$0,7 \cdot \rho$
20/600 FB 4	20	5	15	Phenolharz	$6,6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$51 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$5,8 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$57 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 9,8 R_{IS}$	$23 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$0,7 \cdot \rho$
10/120 FB 4	10	2	6	Phenolharz	$33 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$51 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$20 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$135 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 6,7 R_{IS}$	$80 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$1,45 \cdot \rho$
3/120 FB 4	3,5	3	10	Phenolharz	$49 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$51 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$25 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$151 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 6 R_{IS}$	$100 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$4,25 \cdot \rho$
PR 98 14	3,5	2	11	Kresolharz	$56 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$20 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$16 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$71 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 4,4 R_{IS}$	$64 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$3,2 \cdot \rho$
PR 98 12	7,5	6	25	Kresolharz	$10,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$15,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$41 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 6,8 R_{IS}$	$24 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$1,35 \cdot \rho$
PR 98 10	25	6	8	Kresolharz	$8 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$12 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$4,8 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$32 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 6,7 R_{IS}$	$19 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$0,8 \cdot \rho$
PR 98 30	10	5	17	Kresolharz	$8 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$27 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$51 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 8,5 R_{IS}$	$24 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$4 \cdot \rho$
C 6—121	3,5	3	10	Epoxydharz	$47 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$77 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$29 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$200 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 6,9 R_{IS}$	$116 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$23 \cdot \rho$
C 6—141	7	6	10	Epoxydharz	$12 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$19 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$7,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$50 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 4,3 R_{IS}$	$30 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$22 \cdot \rho$
EC 6—121	3,5	3	10	Epoxydharz	$47 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$36 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$20 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$115 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 5,8 R_{IS}$	$80 \cdot 10^{-3} \cdot \rho$	$12 \cdot \rho$

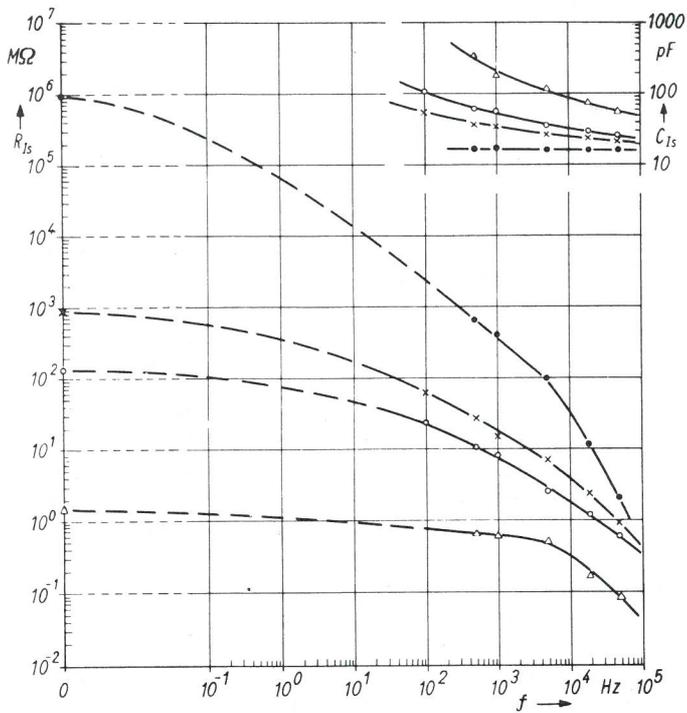


Bild 34
 Isolationswiderstand R_{1s} und Kapazität C_{1s} eines mit BC 6035 auf Stahl geklebten DMS des Typs 10/120 FB 3 (Hottinger) als Funktion der Frequenz

- bei 2 % rel. Feuchte
- x " 66 % " "
- o " 75 % " "
- Δ " 97 % " "

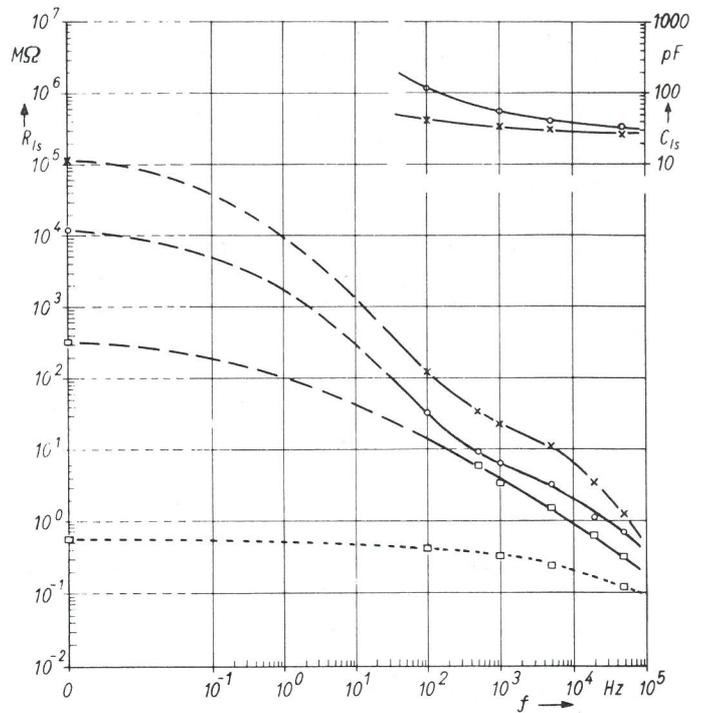


Bild 36
 Isolationswiderstand R_{1s} und Kapazität C_{1s} eines mit X-60 auf Stahl geklebten DMS des Typs 20/600 FA 1 (Hottinger) als Funktion der Frequenz

- bei 2 % rel. Feuchte
- x " 66 % " "
- o " 75 % " "
- " 86 % " "
- Messung an einem anderen Exemplar

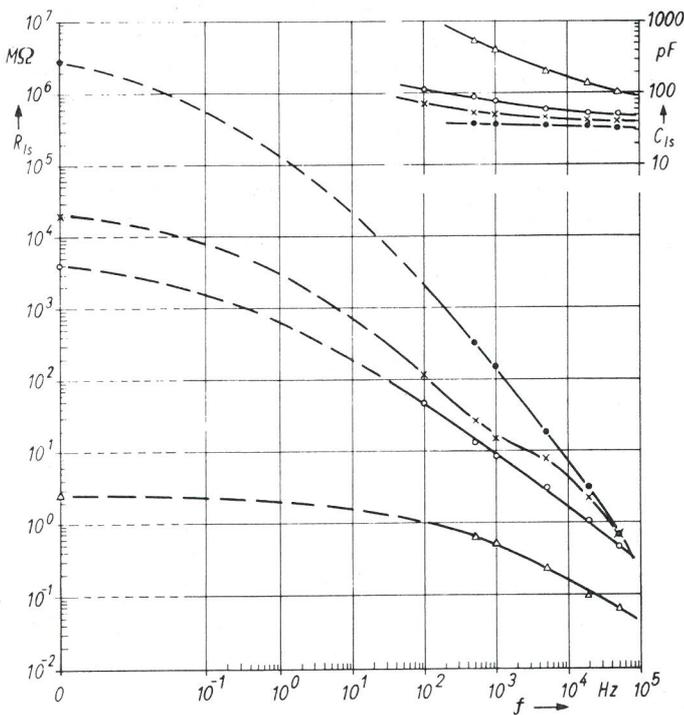


Bild 35
 Isolationswiderstand R_{1s} und Kapazität C_{1s} eines mit PR 9244 auf Stahl geklebten DMS des Typs PR 9812 (Philips) als Funktion der Frequenz

- bei 2 % rel. Feuchte
- x " 66 % " "
- o " 75 % " "
- Δ " 97 % " "

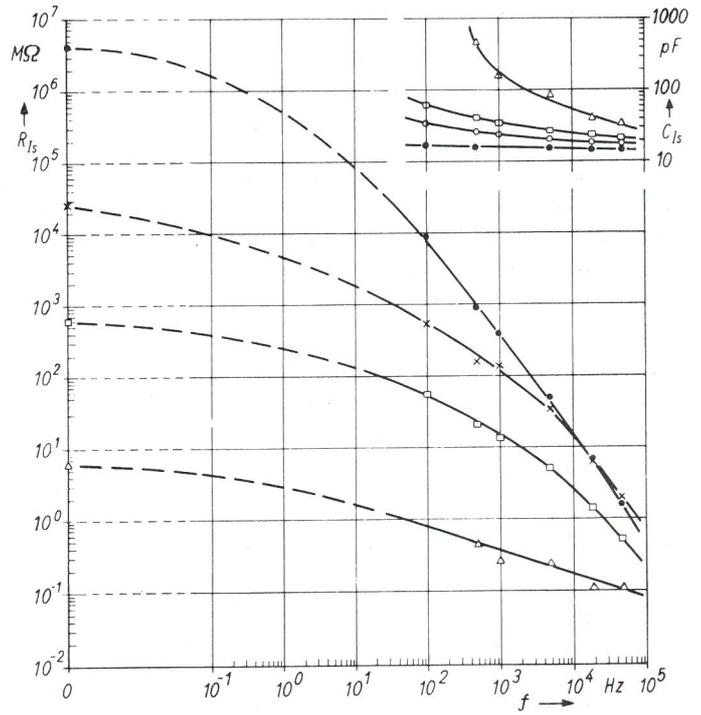


Bild 37
 Isolationswiderstand R_{1s} und Kapazität C_{1s} eines mit EPY-150 auf Stahl geklebten Halbleiters des Typs MS 105 (Micro-Systems) als Funktion der Frequenz

- bei 2 % rel. Feuchte
- x " 66 % " "
- " 86 % " "
- Δ " 97 % " "

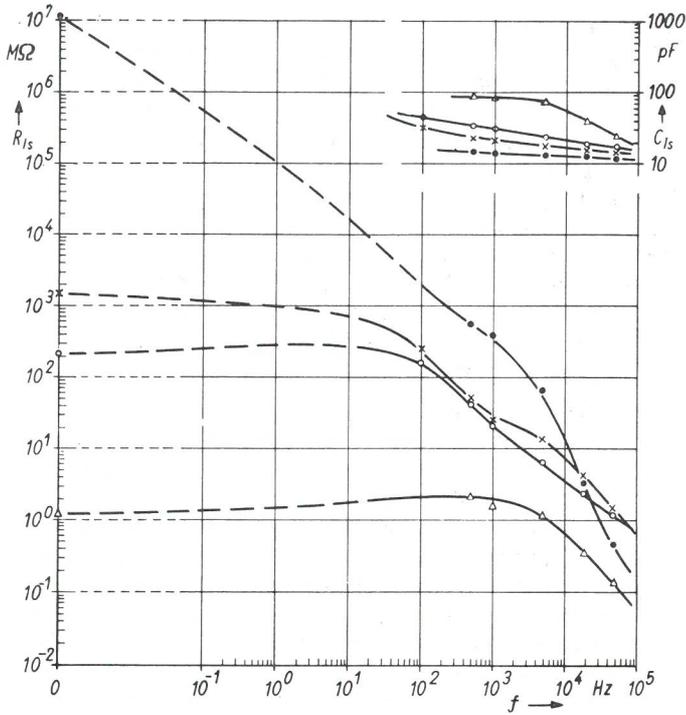


Bild 38
Isolationswiderstand R_{1s} und Kapazität C_{1s} eines mit GM 4479 auf Stahl geklebten DMS des Typs BP 1/120 f (Huggenberger) als Funktion der Frequenz

- bei 2 % rel. Feuchte
- x " 66 % " "
- o " 75 % " "
- Δ " 97 % " "

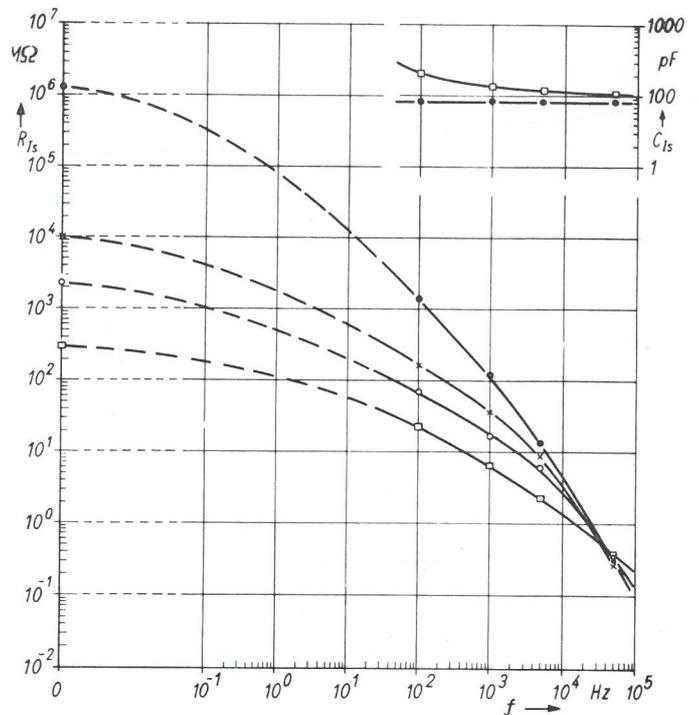


Bild 40
Isolationswiderstand R_{1s} und Kapazität C_{1s} eines mit X-60 auf Stahl geklebten DMS des Typs 20/600 FB 4 (Hottinger) als Funktion der Frequenz

- bei 2 % rel. Feuchte
- x " 66 % " "
- o " 75 % " "
- " 86 % " "

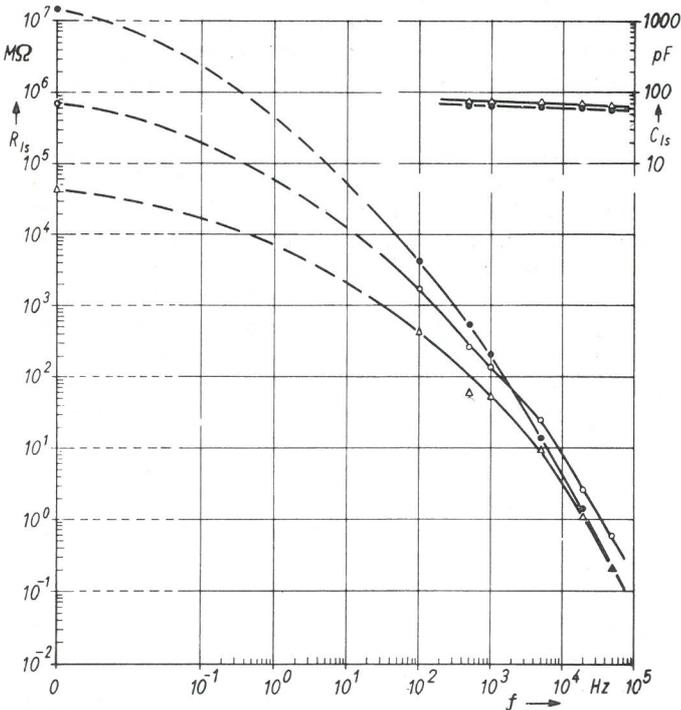
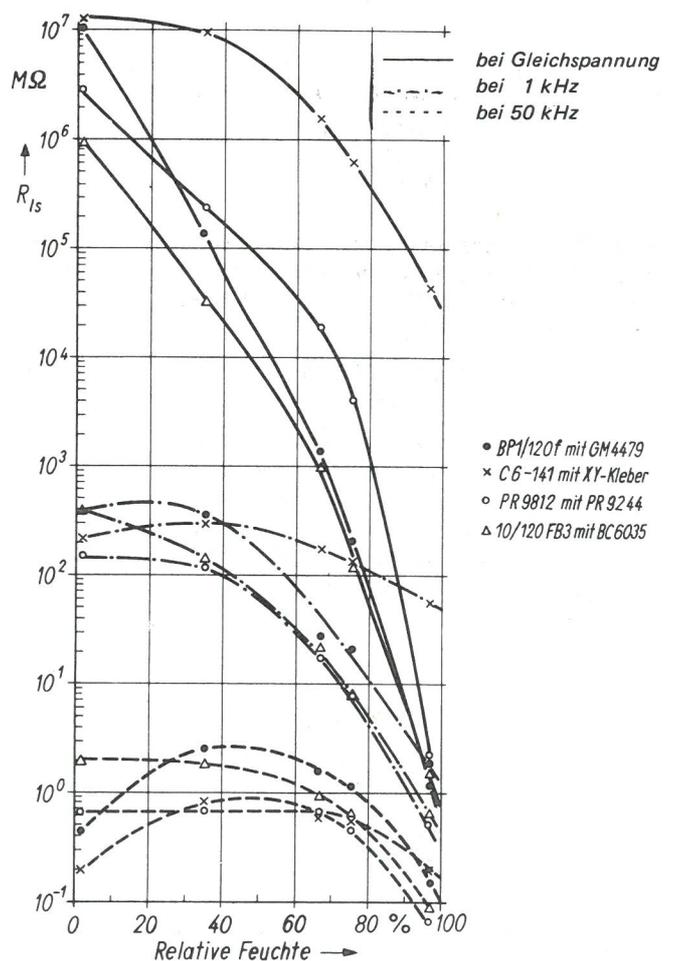


Bild 39
Isolationswiderstand R_{1s} und Kapazität C_{1s} eines mit xy-Kleber auf Stahl geklebten DMS des Typs C 6-141 (Budd) als Funktion der Frequenz

- bei 2 % rel. Feuchte
- o " 75 % " "
- Δ " 97 % " "

Bild 41
Isolationswiderstand R_{1s} als Funktion der rel. Feuchte für verschiedene auf Stahl geklebte Dehnungsmeßstreifen bei ca. 22°C



- BP1/120f mit GM4479
- x C6-141 mit XY-Kleber
- o PR 9812 mit PR 9244
- Δ 10/120 FB3 mit BC6035

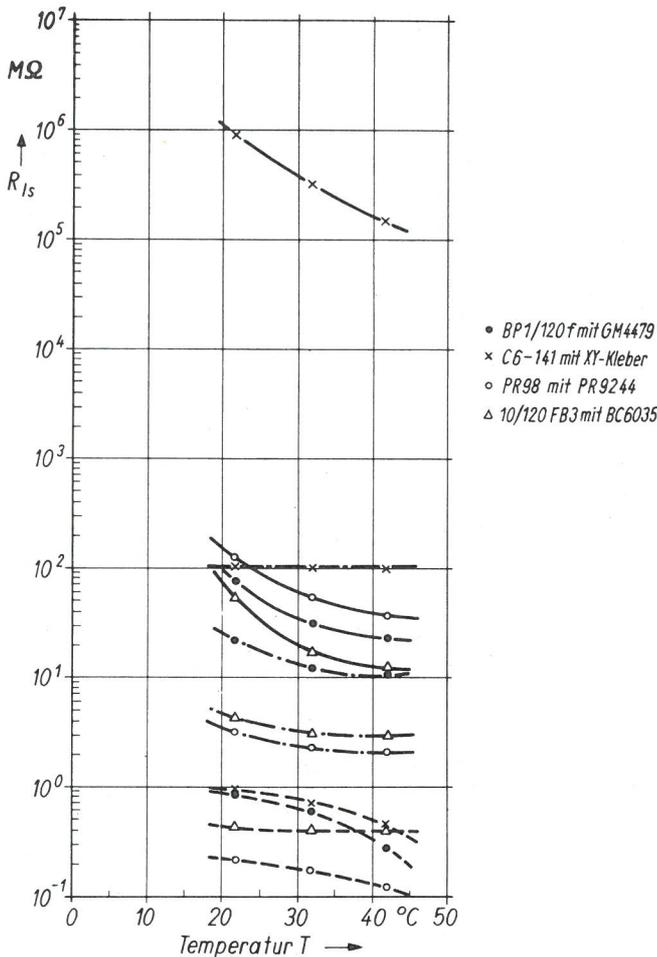


Bild 42
Isolationswiderstand R_{1s} bei 75 % rel. Feuchte für auf Stahl aufgeklebte Dehnungsmeßstreifen als Funktion der Temperatur T

- bei Gleichspannung
- - - bei 1 kHz
- · - · bei 50 kHz

nung, der Gleichstrom-Isolationswiderstand müsse mindestens 100 MΩ betragen, noch recht fragwürdig ist. Bild 42 zeigt den Einfluß der Temperatur auf R_{1s} bei konstanter relativer Feuchte von 75 %.

1.24.3 Diskussion des Vergleichs von Messung und Rechnung

Wegen der großen Streuung, der die Werte von ρ und ϵ_D von Meßstreifen zu Meßstreifen unterliegen können, wurde ein Vergleich von Messung und Rechnung in einem besonderen Versuch für drei Meßstreifen — 20/600 FA 1 (Acrylharzträger); 20/600 FB 4 (Phenolharzträger); PR 9810 (Kresolharzträger) — in folgender Weise durchgeführt:

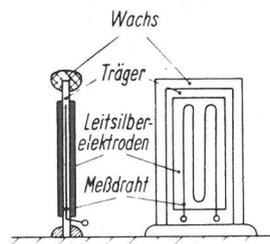


Bild 43
Versuchsanordnung zur Durchführung eines Vergleichs von Messung und Rechnung

Zunächst wurde jeder Träger auf beiden Flächen mit Leitsilberelektroden versehen (vgl. Bild 43) und dann freistehend auf einer Bodenplatte befestigt. Die Trägerränder wurden wie früher mit mikrokristallinem Wachs gegen Oberflächenleitung geschützt. Zwischen den Elektroden wurden bei verschiedenen relativen Feuchten mittlere Werte von ρ und ϵ_D als Funktion der Frequenz gemessen, zwischen dem Meßdrahtgitter und den Elektroden Werte von R_{1s} und C_{1s} . Ferner wurden die zur Berechnung von R_{1s} und C_{1s} erforderlichen geometrischen Daten ermittelt. Dadurch, daß hier ρ und ϵ_D sowie R_{1s} und C_{1s} am selben Meßstreifen im gleichen Versuch gemessen wurden, konnte die sonst von Träger zu Träger auftretende Streuung ausgeschlossen werden.

Das Ergebnis des Vergleichs Rechnung—Messung ist beispielhaft für den Meßstreifen 20/600 FB 4 in Bild 44 dargestellt; bei den anderen beiden Meßstreifen liegen die Verhältnisse ähnlich. Die Darstellung läßt folgendes erkennen: Messung und Rechnung stimmen umso besser überein, je trockener — und damit elektrisch homogener — der Träger ist; die Differenz ist also wohl vorwiegend eine Folge der Inhomogenität, die bei der Rechnung ja gerade ausgeschlossen worden war. Die Übereinstimmung wird mit steigender Frequenz besser, d. h. also umso besser, je weniger der Leitungsstrom im Vergleich zum Verschiebungsstrom am Gesamtstrom beteiligt ist, bzw. je mehr das statische Feld gegenüber dem Strömungsfeld bestimmend für das Gesamtverhalten wird. Bei Gleichspannung (nur Strömungsfeld!) ist die Differenz Rechnung—Messung am größten, besonders bei hoher Feuchte; vermutlich wird daher der Inhomogenitätseffekt hauptsächlich durch die verschiedene Gleichstromleitfähigkeit der Trägerbestandteile (Harz und Fasern) verursacht, die bei hoher Feuchte besonders stark in Erscheinung tritt. Dafür spricht auch, daß die Übereinstimmung bei den Kapazitäten (statisches Feld) am besten ist. Insgesamt gesehen, zeigt der Versuch, daß Rechnung und Messung verhältnismäßig gut übereinstimmen.

Anschließend an diesen Versuch mit freistehenden Trägern wurde jeweils eine der beiden Leitsilberelektroden vorsichtig abgelöst, die andere jedoch für Kontrollmessungen belassen. Die drei Meßstreifen wurden dann mit der freien Fläche auf Metall geklebt. In einer weiteren Versuchsreihe wurden nun R_{1s} und C_{1s} bei verschiedenen relativen Feuchten als Funktion der Frequenz für die aufgeklebten Meßstreifen bestimmt; dabei wurde durch Messung zwischen Meßdrahtgitter und der verbliebenen Leitsilberelektrode kontrolliert, ob gegenüber dem Versuch mit freistehendem Träger wesentliche Veränderungen im Träger erfolgt sind, was jedoch nicht der Fall war. In Bild 45 ist das Verhältnis der R_{1s} - bzw. C_{1s} -Messungen am aufgeklebten Meßstreifen zu jenem am freistehenden beispielhaft für zwei Meßstreifen aufge-tragen.

Die Darstellung zeigt, daß die Schicht des Klebers X-60 beim Meßstreifen 20/600 FA 1 gleichstrommäßig eine sehr erhebliche Vergrößerung des Isolationswiderstandes verursacht, während die Vergrößerung bei hoher Frequenz nur gering ist. Bei der Kombination Meßstreifen PR 9810—Kleber PR 9244 tritt bei hoher Frequenz sogar eine Verschlechterung der Isolation ein, die ihre Ursache in den Verlusten der Doppelschicht Träger—Kleber haben dürfte. Hieraus wird erneut deutlich, wie schwer überschaubar das Isolationsproblem durch das Auftreten einer dielektrischen Doppelschicht wird. Interessanterweise werden die Kapazitäten C_{1s} — der Überschaubarkeit wegen hier nur für 66 % r. f. angegeben, da bei höherer r. f. kaum Änderungen auftreten — durch die Kleberschicht kaum verändert, was nur durch die

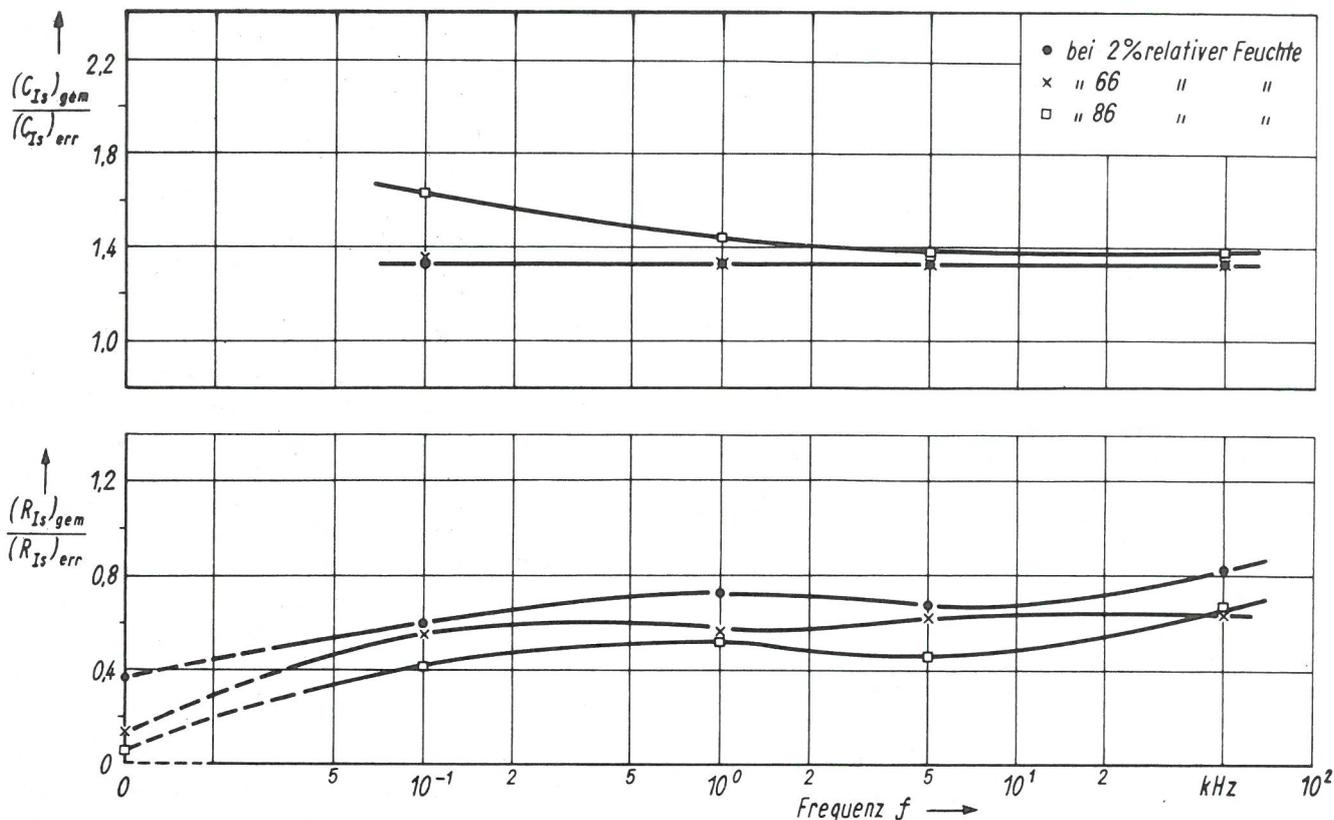


Bild 44
Verhältnis von gemessenen zu errechneten Kapazitäts- bzw. Widerstandswerten, beispielhaft für einen Meßstreifen 20/600 FB 4

Inhomogenitätseffekte überhaupt deutbar wird; da der Abstand Leitersystem—Bauteiloberfläche durch die Kleberschicht im Mittel etwa um den Faktor 2,5–3 vergrößert wird, hätte die Kapazität des aufgeklebten Meßstreifens konstant auf ungefähr 0,4–0,3 des ursprünglichen Wertes absinken müssen, was aber nicht der Fall ist.

1.25 Die komplexen Querwiderstände \mathfrak{Z}_{Nq} von Dehnungsmeßstreifen

1.25.1 Berechnete Widerstände

Wie bereits im Abschnitt 1.22 erwähnt, tritt außer dem Nebenschluß \mathfrak{Z}_{NIs} infolge zu kleinen Isolationswiderstandes Meßstreifen—Bauteil noch jener auf dem Wege Leiter—Isolation (vorwiegend Träger)—Leiter auf. Gemäß Gl. (21) gilt für diesen Nebenschlußwiderstand

$$\mathfrak{Z}_{Nq} = \left(\frac{3n}{2n-1} \right) \cdot \mathfrak{Z}_q,$$

wobei n die Anzahl der Schlaufen und \mathfrak{Z}_q der Querwiderstand einer Schlaufe ist.

Die Größe von \mathfrak{Z}_q läßt sich nun in Anlehnung an Abschnitt 1.24.1 in folgender Weise leicht bestimmen: Der Widerstand \mathfrak{Z}_q zwischen zwei geraden Leitern der Länge $s/2$ — zur Länge $s/2$ s. Bild 46 —, die sich im Abstand d voneinander im unendlich ausgedehnten Raum befinden, ist doppelt so groß wie jener zwischen einem Draht und der Mittelebene. Daraus folgt unter Verwendung von Gl. (36)

$$\mathfrak{Z}_q = \frac{2\epsilon}{\pi \cdot s} \cdot \ln \frac{d}{r_0}.$$

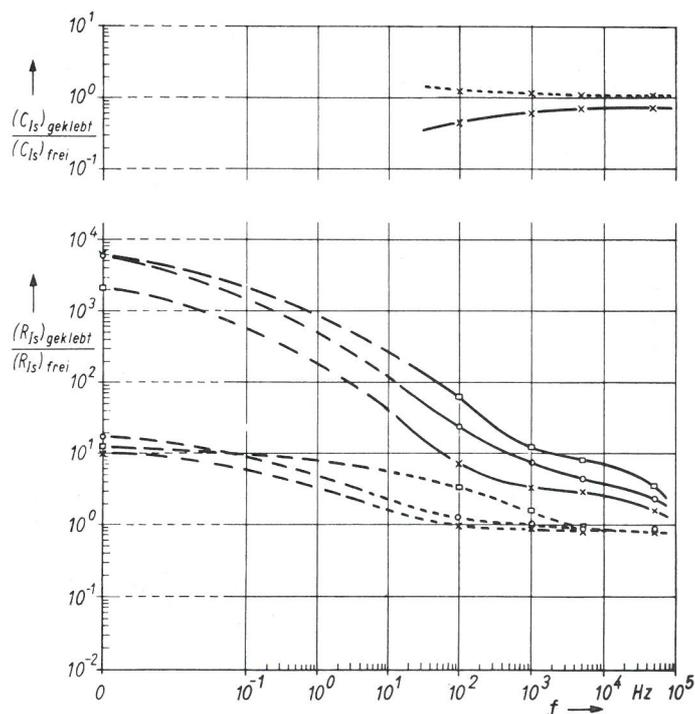


Bild 45
Verhältnis der Isolationskenngrößen C_{Is} bzw. R_{Is} von auf Stahl aufgeklebten DMS zu freistehenden DMS als Funktion der Frequenz; vgl. hierzu den Text

x bei 66 % rel. Feuchte
o " 75 % " "
□ " 86 % " "
— 20/600 FA 1 (mit X-60)
..... PR 9810 (mit PR 9244)

Hat der Meßstreifen n Leiterschlaufen, so entfällt auf jede Schlaufe näherungsweise nur die Länge s/n . Für eine Schlaufe eines n -schlaufigen Meßstreifens gilt daher

$$\mathcal{Z}_q = \frac{2n\zeta}{n \cdot s} \cdot \ln \frac{d}{r_0} \quad (40)$$

Bei Folienmeßstreifen läßt sich \mathcal{Z}_q nur in sehr grober Weise abschätzen. Ist $s/2$ die Länge der Leiterstege und ferner b , $s/2 \gg h$ (siehe den Querschnitt Bild 47), so gilt in grober Näherung

$$\mathcal{Z}_q \approx \zeta \cdot \frac{a}{h \cdot \frac{s}{2n}} = \zeta \cdot \frac{2na}{h \cdot s} \quad (41)$$

Diese Abschätzung berücksichtigt nicht die Oberflächenleitung, die bei Verschmutzung der ungeschützten Meßstreifenoberfläche zusätzlich auftreten kann. Wie die Gleichungen (40) und (41) zeigen, ist \mathcal{Z}_q umgekehrt proportional der Meßdrahtlänge s und proportional der Schlaufenzahl n . Am unempfindlichsten gegen Nebenschlüsse auf dem „Querweg“ sind deshalb kurze Meßstreifen mit großer Schlaufenzahl. In Bild 33 sind die für das Verhalten von Meßstreifen wesentlichen Widerstände R_{Nq} für elf verschiedene Meßstreifen zusammengestellt. Diese Zusammenstellung läßt erkennen, welche Meßstreifen allein von der Geometrie her empfindlich gegen Nebenschlüsse auf dem Querweg sind.

1.25.2 Gemessene Widerstände

Eine direkte Messung des Querwiderstandes R_{Nq} von Dehnungsmeßstreifen scheint zunächst insofern möglich zu sein, als bei z. B. auf Glas geklebten DMS eine Nullpunktwanderung infolge von Isolationsdefekten nur durch den Querwiderstand verursacht worden sein kann. Wie im Abschnitt 1.3 gezeigt wird, bewirkt aber auch die Quellung des Trägers eine Nullpunktwanderung, so daß unmittelbar keine Bestimmung von R_{Nq} möglich ist. Eine Untersuchung an einem elektrolytischen Trog schied aus, da es nicht ohne weiteres möglich ist, den Trog mit einem Dielektrikum zu füllen, das die gleichen Eigenschaften hat wie der Träger. Dennoch gelang es, R_{Nq} unter Ausnutzung der Frequenzabhängigkeit des spezifischen Widerstandes ρ wie folgt näherungsweise zu bestimmen.

Es wurden beispielhaft drei Meßstreifen verschiedenen Typs auf Glas geklebt und ihre Nullpunkt drift $\Delta\epsilon^*$ als Funktion der relativen Feuchte mit je drei Dehnungsmeßbrücken der Trägerfrequenzen 180 Hz, 5 kHz und 50 kHz gemessen. Solange Isolationsdefekte – wegen der Klebung auf Glas ist nur R_{Nq} wirksam – keine Rolle spielen, muß die Nullpunkt drift unabhängig von der Trägerfrequenz sein. Da ρ mit steigender Meßfrequenz sinkt (vgl. Bild 20 bis 24), muß bei wachsender relativer Feuchte zuerst die 50 kHz-Anzeige von jener der beiden anderen Meßbrücken abweichen; bei noch höherer Feuchte muß die ursprünglich einheitliche Nullpunkt drift-Kurve sogar in drei einzelne Kurven aufgespreizt erscheinen. Das ist tatsächlich der Fall, wie Bild 48 beispielhaft an Hand der Nullpunkt drift $\Delta\epsilon^*$ des Meßstreifens 20/600 FB 4 (Fabrikat Hottinger) zeigt; die Driftkurven der beiden anderen Meßstreifen (Hottinger FA 1 und Philips PR 9810) verhalten sich ähnlich.

In Bild 49 ist die durch den „Quereffekt“ verursachte relative Widerstandsänderung $(\Delta R^*/R^*)_q$ als Funktion der relativen Feuchte aufgetragen. Die ausgezogenen Kurven wurden nach der Gleichung

$$\left(\frac{\Delta R^*}{R^*}\right)_q \approx -\frac{R^*}{R_{Nq}} \quad (42)$$

berechnet, wobei R_{Nq} mit Hilfe der Gl. (40) und der Kurven in Bild 23 bestimmt wurde. Die gestrichelten Kurven wurden nach der Gleichung

$$\left[\left(\frac{\Delta R^*}{R^*}\right)_q\right]_{50;5\text{kHz}} = [(\Delta\epsilon^*)_{50;5\text{kHz}} - (\Delta\epsilon^*)_{180\text{Hz}}]_{\text{gemessen}} \cdot k + \left[\left(\frac{\Delta R^*}{R^*}\right)_{180\text{Hz}}\right]_{\text{berechnet}}$$

$k = k$ -Faktor, ermittelt; sie stellen näherungsweise die tatsächlich durch den Quereffekt verursachten relativen Widerstandsänderungen dar. Setzt man die Werte dieser „gemessenen“ Kurven rückwärts in Gl. (42) ein, so lassen sich die tatsächlich auftretenden Querwiderstände R_{Nq} gewinnen. Sie sind für die drei untersuchten Meßstreifen in Bild 50 eingetragen.

Die Querkapazitäten C_{Nq} ließen sich mit geeigneten Meßbrücken nach der gleichen Methode bestimmen, doch wurde hier darauf verzichtet, da sie für alle weiteren Überlegungen – wie früher erwähnt – bedeutungslos sind.

1.25.3 Diskussion des Vergleichs von Rechnung und Messung

Die Darstellung in Bild 49 zeigt, daß $(\Delta R^*/R^*)_q$ bei großer Trockenheit zu groß, d. h. also R_{Nq} zu niedrig berechnet wird, bei hoher Feuchte – d. h. gerade im kritischen Fall – jedoch zu hoch; bei den beiden anderen untersuchten Meßstreifen liegen die Verhältnisse ähnlich. Die Ursache der Differenz Messung–Rechnung liegt sehr wahrscheinlich darin, daß die in der Rechnung vorausgesetzte Isotropie von ρ tatsächlich nicht vorhanden ist. Das ist auch insofern verständlich, als sich die groben Inhomogenitäten des Trägers (Fasern, Blasen, Füllstoffe) hauptsächlich in der Trägerebene erstrecken, während ρ durch eine Messung senkrecht zur Trägerebene bestimmt wurde. Die Anisotropie von ρ macht somit eine genaue Berechnung von R_{Nq} unmöglich. Damit entfällt auch die Grundlage dafür, den Faktor K der Gleichung $\mathcal{Z}_N = \mathcal{Z} \cdot \mathcal{Z}_{Is} = \mathcal{Z} \cdot K \cdot \mathcal{Z}_{Is}$ – Gl. (22) – wenigstens näherungsweise für den Fall vernachlässigbarer Kleberschicht zu berechnen. Der für die Abschätzung des Einflusses der Isolationseffekte so entscheidend wichtige Faktor K läßt sich daher nur experimentell als mittlerer Erfahrungswert bestimmen (vgl. Abschnitt 1.26).

In Bild 50 sind die hier ermittelten R_{Nq} -Werte R_{NIs} -Werten gegenübergestellt, die nach der Gleichung

$$R_N = \frac{R_{Nq} \cdot R_{NIs}}{R_{Nq} + R_{NIs}} \rightarrow R_{NIs} = \frac{R_{Nq} \cdot R_N}{R_{Nq} - R_N}$$

aus den im Abschnitt 1.26 ermittelten R_N -Werten errechnet wurden. R_{Nq} und R_N wurden zwar an verschiedenen Meßstreifen ermittelt, doch läßt der Vergleich erkennen, daß R_{Nq} durchaus etwa die Größe von R_{NIs} haben kann. Der Querwiderstand ist deshalb bei der Betrachtung der Isolationsprobleme keineswegs zu vernachlässigen.

1.26 Die komplexen Eingangswiderstände \mathcal{Z}^+ auf Metall geklebter Meßstreifen

1.26.1 Berechnete Widerstände

Nach Gleichung (3) im Abschnitt 1.1 ist $\mathcal{Z}^+ = R_0^* (1 + k \cdot \epsilon^*) + \mathcal{U}$, wobei \mathcal{U} eine komplexe Funktion verschiedener Variabler ist. Dafür läßt sich nun auch schreiben

$$\beta^+ = R_0^* (1 + k \cdot \epsilon^*) + \Delta R^* + \mathfrak{C} \quad (44a)$$

(T, Quellung, Korrosion, t; ρ , ϵ_D , f, F)

$$\text{bzw. } R^+ = R_0^* (1 + k \cdot \epsilon^*) + \Delta R^* + \mathfrak{D} \quad (44b)$$

(T, Quellung, Korrosion, t),

wobei $\Delta R^* = -R^2/R_N$ die ohmsche Widerstandsänderung infolge von Isolationsdefekten ist. Da k , ϵ^* und ρ , ϵ_D voneinander und von den anderen Größen näherungsweise unabhängig sind, wird

$$\frac{\Delta \beta_0^+}{\beta_0^+} \approx k \cdot \epsilon^* + \frac{\Delta R^*}{R^*} + \mathfrak{J} \quad (45a)$$

(T, Quellung, Korrosion, t; ρ , ϵ_D , f, F)

$$\text{bzw. } \frac{\Delta R_0^+}{R_0^+} \approx k \cdot \epsilon^* + \frac{\Delta R^*}{R^*} + G \quad (45b)$$

(T, Quellung, Korrosion, t; ρ , ϵ_D , f, F)

Hierin ist \mathfrak{J} eine komplexe und G eine reelle Funktion der in der Klammer enthaltenen Variablen.

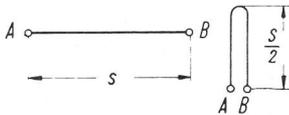


Bild 46
Schematische Darstellung zur Ableitung der Gleichung (40)

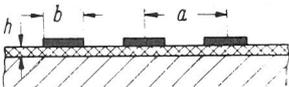


Bild 47
Schematische Darstellung zur Ableitung der Gleichung (41)

Bild 49
Durch den Querwiderstand R_{Nq} verursachte relative Widerstandsänderung $(\Delta R^*/R^*)_q$ des Meßstreifens Typ 20/600 FB 4 gemäß Bild 48: — berechnet, - - - - gemessen

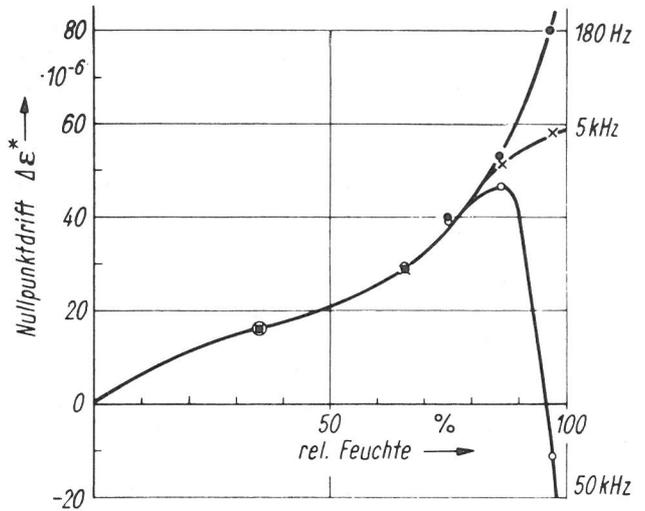


Bild 48
Nullpunktdrift eines auf Glas geklebten Meßstreifens Typ 20/600 FB 4 als Funktion der relativen Feuchte für drei Trägerfrequenzen

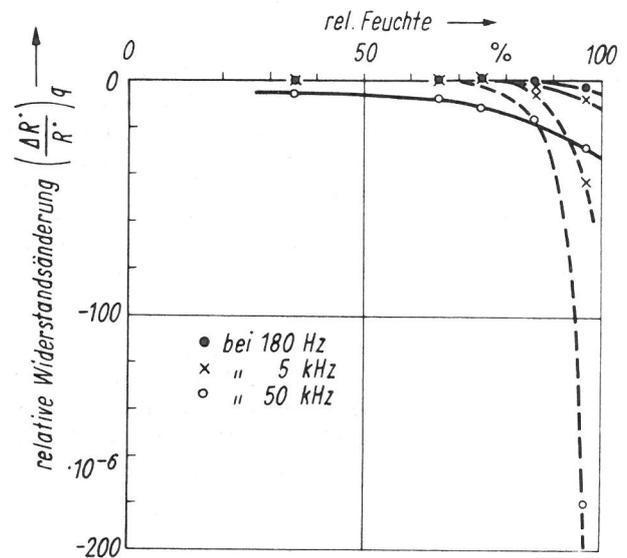


Bild 50
Vergleich von aus Nullpunktdriften ermittelten R_{Nq} -, R_{NIs} - und R_N -Werten. R_{Nq} wurde zwangsläufig an einem anderen DMS ermittelt als R_{NIs} und R_N . * geschätzt

Meßstreifentyp	Meßfrequenz in kHz	bei 66 % rel. Feuchte			bei 75 % rel. Feuchte			bei 86 % rel. Feuchte			bei 97 % rel. Feuchte		
		R_{Nq} in $M\Omega$	R_N in $M\Omega$	R_{NIs} in $M\Omega$	R_{Nq} in $M\Omega$	R_N in $M\Omega$	R_{NIs} in $M\Omega$	R_{Nq} in $M\Omega$	R_N in $M\Omega$	R_{NIs} in $M\Omega$	R_{Nq} in $M\Omega$	R_N in $M\Omega$	R_{NIs} in $M\Omega$
20/600 FB 4	0,18	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*
	5	≳ 100	≳ 100	> 100	≳ 100	≳ 100	> 100	≈ 80	≈ 60	≈ 240	≈ 15	≈ 10	≈ 30
	50	≳ 100	≳ 100	> 100	≳ 100	≈ 45	≈ 80	≈ 35	≈ 15	≈ 26	≈ 3,5	≈ 2	≈ 4,7
20/600 FA 1	0,18	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	≈ 15*	≈ 30*	—	≈ 0,5*	≈ 10*	—
	5	≳ 100	≳ 100	> 100	≳ 100	≈ 50	≈ 100	≈ 9	≈ 15	—	≈ 0,4	≈ 4,5	—
	50	≳ 100	≈ 30	≈ 45	≈ 25	≈ 12	≈ 25	≈ 5	≈ 4	—	≈ 0,3	≈ 1	—
PR 9810	0,18	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	> 300*	≈ 25*	≈ 25*	—	≈ 6*	≈ 2*	≈ 3
	5	≈ 120	≈ 50	≈ 85	≈ 25	≈ 18	≈ 65	≈ 9	≈ 5	≈ 11	≈ 3	≈ 0,6	≈ 0,75
	50	≈ 50	≈ 10	≈ 12	≈ 12	≈ 4,5	≈ 8	≈ 3,5	≈ 1,3	≈ 2	≈ 2	≈ 0,2	≈ 0,2

In beiden Gleichungen ist $\Delta R^* = -R^2/R_N$ durch R_N vom spezifischen Widerstand ζ von Träger und Kleber abhängig. Zwei Ursachen machen jedoch eine spezielle Angabe über den Zusammenhang von R_N bzw. ζ^+ als Funktion von ζ unmöglich:

- Wie im Abschnitt 1.25 beschrieben, ist ζ nicht isotrop. Da ζ aber nur in einer Richtung meßbar ist, zur Berechnung von R_N jedoch in zwei Richtungen benötigt wird, läßt sich $R_N(\zeta)$ nicht angeben.
- Gemäß Gl. (22) ist $\zeta_N = \mathcal{K} \cdot \zeta_{Is}$. Hierin ist sowohl ζ_{Is} als auch \mathcal{K} nicht nur von ζ , sondern auch sehr wesentlich von der Kleberschichtdicke abhängig. Wie schon im Abschnitt 1.21 angedeutet, unterliegt die Kleberschichtdicke unter einem Meßstreifen jedoch Schwankungen bis zum Verhältnis 1 : 30, was nun unten näher erläutert sei. Infolge dieser Schwankungen ist eine Berechnung von R_N selbst dann nicht möglich, wenn Träger und Kleber elektrisch gleich und isotrop wären. Da die Schwankungen der Kleberschichtdicke völlig willkürlich sind, läßt sich auch der Faktor \mathcal{K} nicht berechnen.

Die Ermittlung der Kleberschichtdicke wurde wie folgt durchgeführt:

Verschiedene Meßstreifen wurden in normaler Klebetechnik mit ihren Klebern auf einen nicht klebbaren Kunststoff „aufgeklebt“, wobei jedoch zwischen Meßstreifen und Kleber eine nicht klebende, sehr dünne Kunststoffolie konstanter Dicke lag. Nach dem Aushärten des Klebers konnte die Kleberschicht, deren Dicke jener bei normalen Klebungen entsprach, leicht herausgelöst und vermessen werden. Das Ergebnis dieser Versuche ist in den Bildern 51 und 52 dargestellt.

Bild 51 zeigt beispielhaft den Dickenverlauf einer Schicht PR 9244 im Bereich des Meßgitters. Die Messung erfolgte mit einem Perth-O-Meter; Radius der Tastspitze $\approx 2 \mu$, Auflagekraft ≈ 80 mp. Die Schichtdicke schwankt hier etwa im Verhältnis 1 : 7. Beim sorgfältigen Abtasten kleiner Berei-

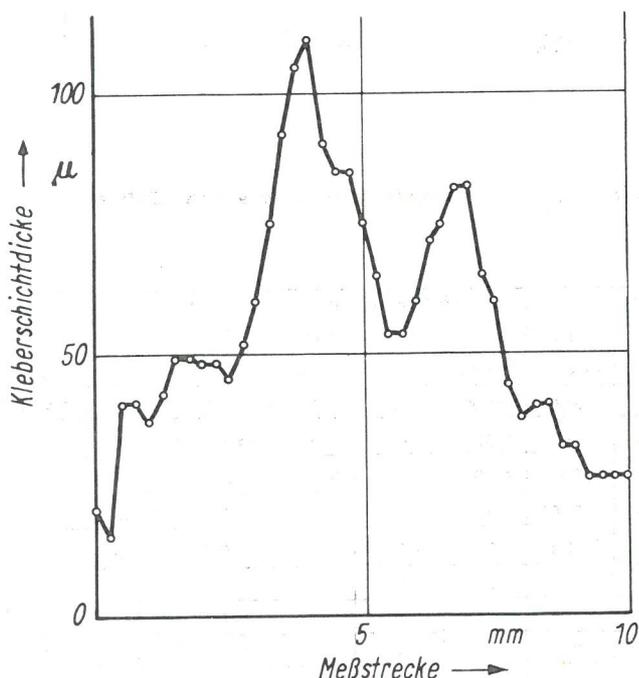


Bild 51
Schichtdickenverlauf einer Schicht PR 9244 unter einem Meßstreifen PR 9810

che, die schon beim Betrachten auf eine große Dicken-schwankung schließen ließen, konnten Schwankungen bis zum Verhältnis 1 : 30 gefunden werden. Die ebenfalls untersuchten Kleber BC 6035 und X-60 zeigten ähnliche Verhältnisse.

Bild 52 zeigt die Strukturen derartig gewonnener Kleberschichten bei Aufsicht gegen einen dunklen Hintergrund. Beim Kleber PR 9244 ist deutlich das Wabenmuster der Unterseite des Meßstreifens PR 9810 zu erkennen; beim Kleber X-60 haben sich die Zuleitungsdrähte des Meßstreifens 20/600 FB 3 tief eingedrückt. Wie eine mikroskopische Untersuchung ergab, beruht der starke Kontrast nicht nur auf Dicken-schwankungen, sondern auch auf Entmischungen Kleber-Füllstoff; der Kleber wird also in dünner Schicht noch zusätzlich stark inhomogen.

Obige Überlegungen zeigen somit, daß eine Berechnung von R_N und damit auch von ζ^+ aus grundsätzlichen Gründen nicht möglich ist.

3.26.2 Gemessene Widerstände

Eine direkte Messung der Störung ΔR^* des in diesem Kapitel als nur durch Isolationsdefekte gestört angenommenen Widerstandes ζ^+ ist nicht möglich, da ζ^+ gemäß Gl. (44) auch von der Funktion \mathcal{L} (T, Quellung, Korrosion, t) abhängt. Die Frequenzabhängigkeit der Isolationsdefekte ermöglicht jedoch eine angenäherte Bestimmung von ΔR^* und R_N . Entsprechend der im Abschnitt 1.25.2 beschriebenen Versuchstechnik wurden wiederum beispielhaft drei Meßstreifen – 20/600 FB 4, 20/600 FA 1 und PR 9810 – untersucht; die beiden Meßstreifen 20/600 waren mit X-60 auf Stahl geklebt, der PR 9810 mit PR 9244. Bild 53 zeigt beispielhaft die Nullpunktdrift $\Delta \epsilon^*$ des 20/600 FB 4 als Funktion der relativen Feuchte bei drei verschiedenen Meßfrequenzen. Entsprechend dem in 1.25.2 beschriebenen Verfahren wurde für die drei Meßstreifen R_N ermittelt und in Bild 50 eingetragen. In Bild 54 ist neben ΔR^* und R_N der am gleichen Meßstreifen unter den gleichen Bedingungen gemessene Isolationswiderstand R_{Is} und der durch die Beziehung $R_N = K_O \cdot R_{Is}$ definierte K_O -Wert eingetragen, wobei nur für $\varphi = 1$ auch $K_O = K$ gemäß Gl. (22) gilt. Ihr ist zu entnehmen, daß K_O sowohl von der Frequenz als auch von der relativen Feuchte abhängt und in den wirklich kritischen Fällen mit kleinem R_N -Wert zwischen 1 und 25 liegt. Diese Angaben zeigen zwar, daß es praktisch nicht möglich ist, von R_{Is} auf R_N und damit auf die Größe der Isolationsstörung zu schließen, sie ermöglichen jedoch näherungsweise die Abschätzung der oberen Störgrenze unter der Bedingung, daß R_{Is} tatsächlich bei der Frequenz gemessen wird, die auch zur Dehnungsmessung verwendet wird. Bemerkenswert ist noch, daß R_N in allen Fällen stets so groß bleibt, daß die durch R_N bewirkte Änderung des k-Faktors unter 1 % bleibt.

Können K_O und R_{Is} ermittelt werden, so läßt sich in Gl. (44) R_N durch $K_O \cdot R_{Is}$ ersetzen und man erhält:

$$\zeta^+ = R_O^* (1 + k \cdot \epsilon^*) - \frac{R^2}{K_O R_{Is}} + \mathcal{L} \quad (46a)$$

(T, Quellung, Korrosion, t; ϵ_D, ρ, f, F)

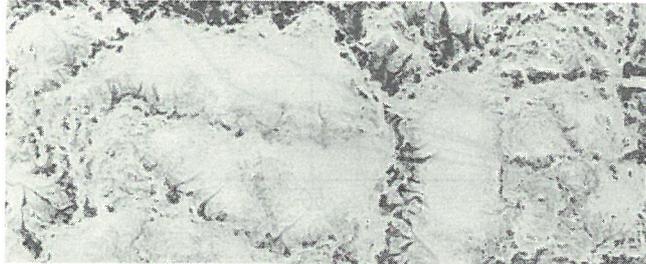
$$\text{bzw. } R^+ = R_O^* (1 + k \cdot \epsilon^*) - \frac{R^2}{K_O R_{Is}} + \mathcal{D} \quad (46b)$$

(T, Quellung, Korrosion, t)

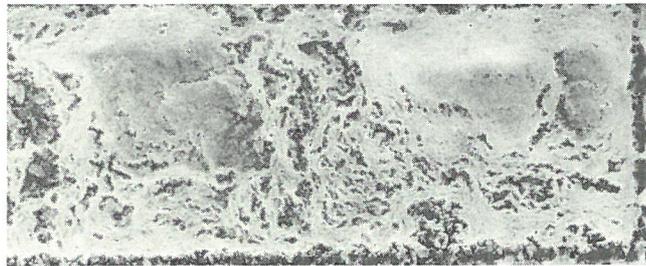
Entsprechend läßt sich Gl. (45) umformen.



PR 9244



X-60



BC 6035

Bild 52
Strukturen von Kleberschichten bei Aufsicht (Maßstab 3 : 1)

1.27 Zusammenfassung

Die eingehende Untersuchung des Einflusses der elektrischen Eigenschaften von Trägern und Klebern auf den Eingangswiderstand Z^+ hat folgendes ergeben:

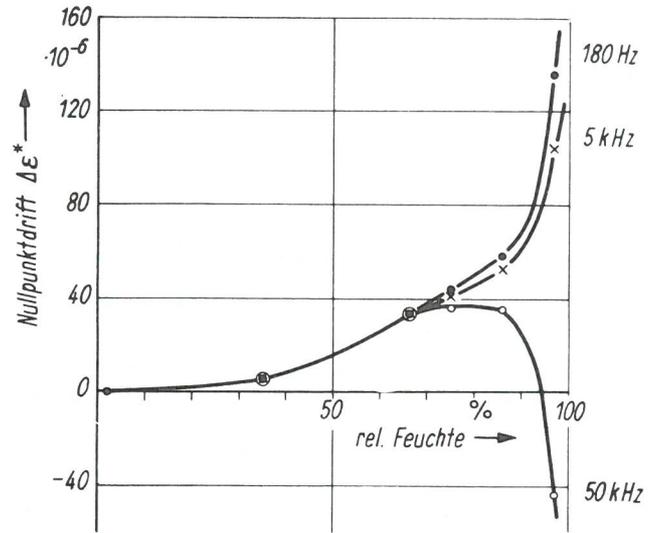


Bild 53
Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ eines mit X-60 auf Stahl geklebten Dehnungsmeßstreifens 20/600 FB 4 für drei Trägerfrequenzen

- Die durch die Eigenschaften von Trägern und Klebern bedingten Isolationsstörungen sind nicht nur eine Funktion der relativen Feuchte, sondern vor allem auch eine Funktion der Meßfrequenz. Infolgedessen können Schlußfolgerungen, die an eine Gleichstromisolationswiderstandsmessung geknüpft werden, um viele Größenordnungen falsch sein, wenn die Dehnung mit Trägerfrequenzmeßbrücken gemessen wird.
- Bei einer technisch einwandfreien Dehnungsmessung mit R- und C-Abgleich in der Brücke ist allein der ohmsche Widerstand R^+ im Parallelersatzschaltbild des komplexen Eingangswiderstandes Z^+ maßgebend.
- R^+ wird allein durch den ohmschen Widerstand R_N im Parallelersatzschaltbild des komplexen Nebenschlußwiderstandes Z_N gestört.
- Z_N und damit auch R_N stehen in keinem einfach überschaubaren Zusammenhang zum Isolationswiderstand Z_{Is} bzw. zu R_{Is} .
- Auch bei hohem Isolationswiderstand können große Isolationsstörungen durch den Isolationsquerwiderstand

Bild 54
Vergleich von ΔR^+ , R_N , R_{Is} und K_O -Werten, die jeweils an ein und demselben Meßstreifen ermittelt wurden

* geschätzt

Meßstreifen- typ	Meß- frequenz in kHz	66 % r. F.			75 % r. F.			86 % r. F.			97 % r. F.			K_O bei			
		ΔR^+ in $M\Omega$	R_N in $M\Omega$	R_{Is} in $M\Omega$	ΔR^+ in $M\Omega$	R_N in $M\Omega$	R_{Is} in $M\Omega$	ΔR^+ in $M\Omega$	R_N in $M\Omega$	R_{Is} in $M\Omega$	ΔR^+ in $M\Omega$	R_N in $M\Omega$	R_{Is} in $M\Omega$	66 % r.F.	75 % r.F.	86 % r.F.	97 % r.F.
20/600 FB 4	0,18	< 1	> 300*	207	< 1	> 300*	124	< 1	> 300*	59	< 1	> 300*	19	-	-	-	-
	5	\approx 3,6	\approx 100	15,5	\approx 3,6	\approx 100	10,4	\approx 6	\approx 60	7,1	\approx 36	\approx 10	2	\approx 6,5	\approx 9,6	\approx 8,4	\approx 5
	50	\approx 3,6	\approx 100	0,83	\approx 8	\approx 45	0,51	\approx 24	\approx 15	0,68	\approx 180	\approx 2	0,25	\approx 120	\approx 88	\approx 22	\approx 8
20/600 FA 1	0,18	< 1	> 300*	103	< 1	> 300*	41	\approx 12	\approx 30*	13,2	\approx 36	\approx 10*	3,8	-	-	\approx 2,3	\approx 2,6
	5	\approx 3,6	\approx 100	8,6	\approx 7,2	\approx 50	4,7	\approx 24	\approx 15	2,1	\approx 8	\approx 4,5	1,1	\approx 11,6	\approx 10,5	\approx 7,2	\approx 4,3
	50	\approx 12	\approx 30	0,72	\approx 30	\approx 12	0,64	\approx 90	\approx 4	0,43	\approx 360	\approx 1	0,16	\approx 42	\approx 18,7	\approx 9,3	\approx 6,3
PR 9810	0,18	< 1	> 300*	29	< 1	> 300*	12,5	\approx 14,4	\approx 25*	4,5	\approx 180	\approx 2*	1,7	-	-	\approx 5,6	\approx 1,2
	5	\approx 7,2	\approx 50	3,6	\approx 20	\approx 18	1,8	\approx 72	\approx 5	0,67	\approx 600	\approx 0,6	0,1	\approx 14	\approx 10	\approx 7,5	\approx 6,2
	50	\approx 36	\approx 10	0,44	\approx 80	\approx 4,5	0,31	\approx 277	\approx 1,3	0,15	\approx 1800	\approx 0,2	0,03	\approx 23	\approx 14,5	\approx 8,7	\approx 6,9

ζ_{N_G} bzw. durch R_{N_G} entstehen, so daß der Isolationswiderstand ohne weiteres keinen Schluß auf die Größe der Isolationsstörung zuläßt.

f) Selbst bei Kenntnis des meßbaren komplexen spezifischen Widerstandes ζ von Träger und Kleber ist im realen Fall eine Berechnung der Absolutwerte von R_{I_S} , R_{N_G} und R_N aus grundsätzlichen Gründen nicht möglich. Mit Hilfe abgeleiteter Formeln lassen sich jedoch die verschiedenen Meßstreifentypen hinsichtlich ihrer typenbedingten Anfälligkeit gegen die verschiedenen Isolationsstörungen vergleichen.

Es sei hier abschließend noch darauf hingewiesen, daß der Einfluß von Isolationsstörungen bei Halbleitergebern wegen ihres großen k-Faktors im Verhältnis $k_{DMS}/k_{Halbl.}$ kleiner ist als bei Dehnungsmeßstreifen. Desgleichen ist er bei niederohmigen Meßstreifen (z. B. 120 Ω) niedriger als bei hochohmigen (z. B. 600 Ω), was bei der Auswahl des Meßstreifentyps berücksichtigt werden sollte.

1.3 Die Quellung und Schrumpfung von Trägern und Klebern und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand ζ^+

1.31 Allgemeine Überlegungen

In der Gl. (3) war in der den Eingangswiderstand ζ^+ störend beeinflussenden Funktion α ganz allgemein die Quellung von Träger und Kleber als Variable eingeführt worden. Der Zusammenhang von ζ^+ und Quellung, der in der Literatur im Gegensatz zu den Isolationseffekten bisher keine Beachtung gefunden hat, soll nun näher untersucht werden. Träger und Kleber bestehen im allgemeinen aus Kunststoffen mit einem gewissen Prozentsatz an Füllmaterialien. Als Füllstoffe werden in Trägern Fasern und in Klebern anorganische Substanzen verwendet. Werden Träger und Kleber der Feuchte ausgesetzt, so nehmen sie einen von der Art des Materials abhängigen Prozentsatz Wasser auf und quellen dabei. Die Wasseraufnahme und die Quellung sind der relativen Feuchte proportional. Beim aufgeklebten Träger wird die Quellung in der Ebene der Bauteiloberfläche behindert, was zum Aufbau von Zwängungsspannungen führt. Quellung und Zwängungsspannung können den Widerstand ζ^+ störend beeinflussen, wie in Abschnitt 1.34 gezeigt wird; die ausführliche Darstellung der Meßergebnisse erfolgt der Geschlossenheit und Systematik halber nur im Abschnitt 1.34.3.

1.32 Die Feuchtigkeitsaufnahme von Trägern und Klebern

In den Bildern 55 und 56 ist die Gleichgewichtsfeuchtigkeitsaufnahme verschiedener gebräuchlicher Kleber- und Trägermaterialien als Funktion der relativen Feuchte bei einer konstanten Temperatur von 21°C aufgetragen. Die Darstellung zeigt, daß die Feuchteaufnahme meist näherungsweise der Feuchte direkt proportional ist. Der Huggerberger-Papierträger unterscheidet sich von den anderen Trägern insofern erheblich, als die Trägeroberseite mit einer filzartigen Schicht bedeckt ist, so daß neben der Absorption auch noch beträchtlich Adsorption eintritt; dieser Unterschied mag zu dem Knick bei 66 % r. F. mit beitragen, da in der Nähe der Sättigung leicht eine starke Zunahme der Adsorption infolge vorzeitiger Kondensation auftritt. Auch bei den beiden Klebern EPY-150 und GM 4479 mögen Adsorptionser-

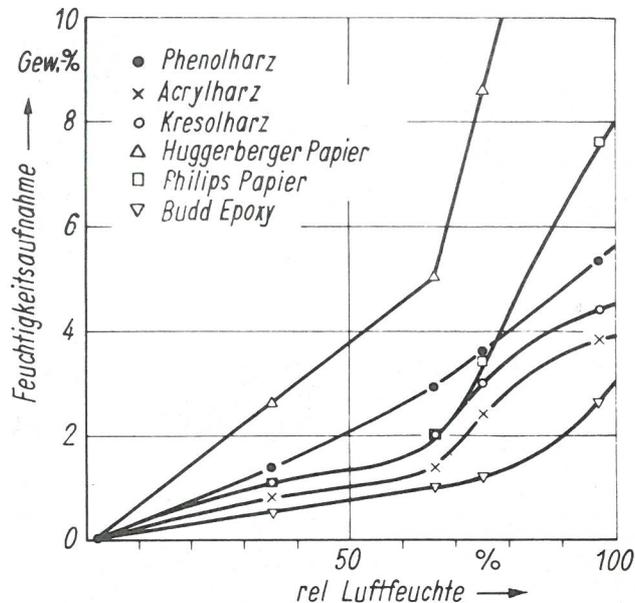


Bild 55
Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener gebräuchlicher Träger als Funktion der relativen Feuchte

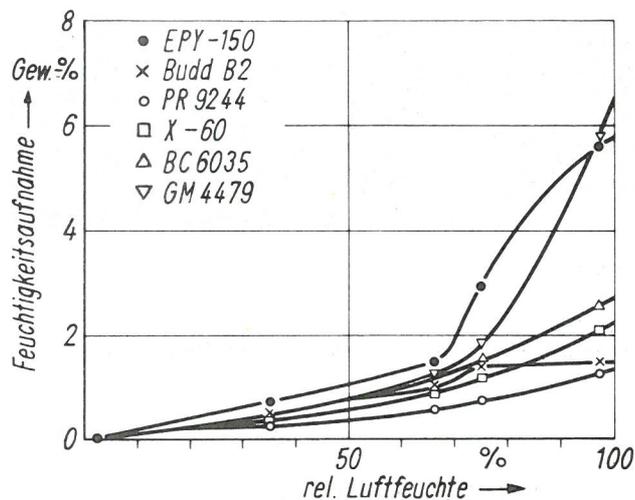


Bild 56
Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener gebräuchlicher Kleber als Funktion der relativen Feuchte

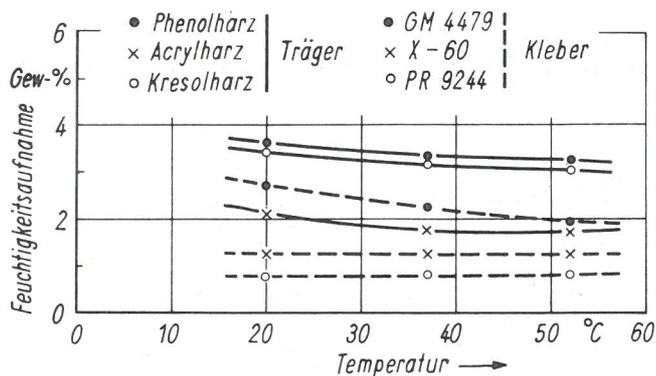


Bild 57
Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener Kleber und Träger als Funktion der Temperatur bei konstanter relativer Feuchte von 75 %

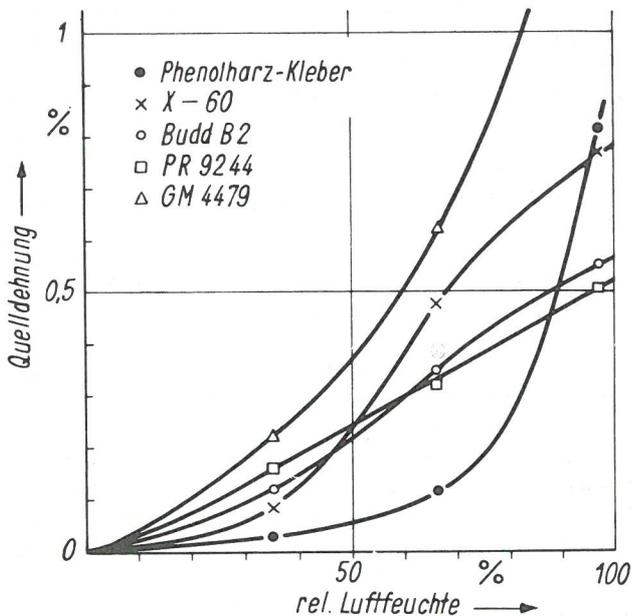


Bild 58
Quelldehnung verschiedener Kleber als Funktion der relativen Feuchte

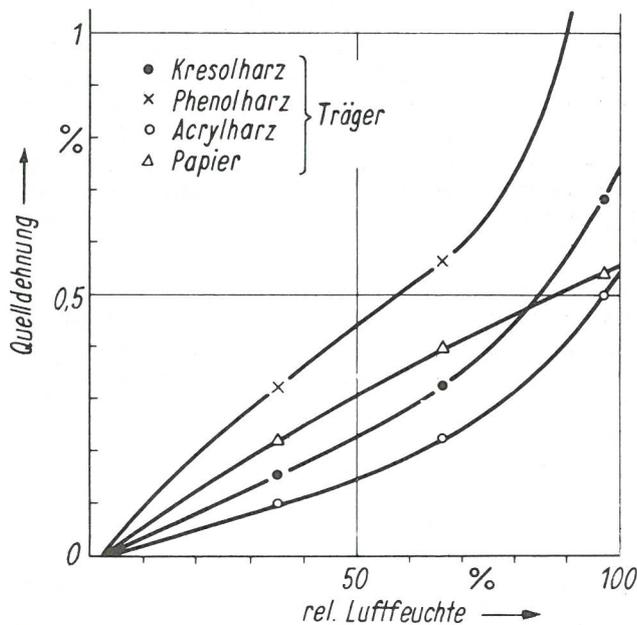


Bild 59
Quelldehnung verschiedener Träger als Funktion der relativen Feuchte

scheinungen (z. B. Kondensation in inneren Hohlräumen, wie Bläschen oder Kapillaren) Ursache für das abweichende Verhalten sein. In Bild 57 ist die Gleichgewichtsfeuchtheitsaufnahme einiger Kleber und Träger bei konstanter relativer Feuchte als Funktion der Temperatur aufgetragen. Die Darstellung läßt erkennen, daß die Feuchtheitsaufnahme bei konstanter relativer Feuchte in einem weiten Temperaturbereich angenähert konstant bleibt; bei 34 % relativer Feuchte wurde ähnliches Verhalten beobachtet. Da andererseits die Quelldehnung der Feuchteaufnahme proportional ist, ist die Quelldehnung in einem weiten Temperaturbereich näherungsweise nur von der relativen Feuchte abhängig. Dieser für viele Kunststoffe gültige Zusammenhang

wird bei allen auf Quelleffekten beruhenden Hygrometern ausgenutzt, deren Anzeige ja temperaturunabhängig sein muß.

1.33 Die Quellung von Trägern und Klebern

In den Bildern 58 und 59 ist die eindimensionale Quelldehnung verschiedener Kleber und Träger als Funktion der relativen Feuchte bei 20°C aufgetragen. Zwischen 2 % und 97 % relative Feuchte können also durchaus Dehnungen bis zu 1,5 % auftreten. Bei den anisotrop aufgebauten Trägern ist hierbei zu beachten, daß die Dehnung in der Trägerebene gemessen wurde; die Dehnung senkrecht dazu kann von diesen Werten merklich verschieden sein.

Wird die Quellung eines Trägers durch Aufkleben auf ein nicht quellendes Bauteil verhindert, so tritt in der Bauteiloberfläche gemäß $\sigma \sim \epsilon \cdot E$ eine Zwängungsspannung auf, die bei Trägern z. B. aus Phenolharzpapier zwischen 2 % und 97 % immerhin einen Wert von etwa 15 kp/mm² annehmen kann. Diese Spannung zwingt einmal den Leiter des Meßstreifens (Draht oder Halbleiter), zum anderen versucht sie als Scherspannung eine Ablösung des Trägers vom Bauteil herbeizuführen (und z. T. durchaus mit Erfolg).

Quelldehnung und Zwängungsspannung lassen sich nicht in einfacher Weise durch eine Gleichung beschreiben, da zu viele nicht genau bekannte Einflüsse, u. a. auch die Vorgesichte des Materials, wesentlich eingehen.

1.34 Der Eingangswiderstand Z^+ als Funktion der die Quellung verursachenden relativen Feuchte

1.34.1 Der Einfluß der Bauteiloberfläche und der Kleberschichtdicke

Wird ein Meßstreifen auf eine raue Oberfläche geklebt (vgl. die schematische Darstellung in Bild 60), so ist die effektive Kleberschichtdicke eine Funktion des Ortes. Bei einer Quellung um z. B. 0,5 % ist die absolute Dickenänderung dann ebenfalls von Ort zu Ort verschieden; der vor der Quellung ebene Träger wird infolgedessen nun wellig, d. h. also gedehnt, sein. Ein ähnlicher Effekt tritt ein, wenn auf ebener Oberfläche eine Kleberschicht schwankender Dicke vorhanden ist (vgl. Abschnitt 1.26.1).

Zur Abschätzung der Größe dieses Effektes wurde die Rauigkeit verschieden geschmirgelter Metalloberflächen mit einem Perth-O-Meter ausgemessen und anschließend die maximal mögliche Dehnung für eine mittlere Kleberschichtdicke von 30 μ berechnet. Dabei zeigte sich, daß bei 0,5 % Quellung auf einer mit einem Papier vom Typ 60 geschmirgelten Stahloberfläche theoretisch ca. 0,5 ‰ Dehnung auftreten können. Da der Drahtdurchmesser — entsprechendes gilt für die Leiterdicke von Folienmeßstreifen — groß im Vergleich zur Breite und Tiefe der Schmirgelrifen ist, wird jedoch sicher nur ein Bruchteil dieser theoretischen Dehnung auf den Meßdraht übertragen.

Um die Größenordnung des tatsächlichen Effektes zu ermitteln, wurden zwei Versuche durchgeführt. Zunächst wurden drei Meßstreifen des Typs 10/120 FB 3 unter gleichen Bedingungen auf eine polierte, eine leicht und eine stark geschmirgelte Stahloberfläche (die gleiche, die zuvor mit einem Perth-O-Meter ausgemessen worden war) aufgeklebt. Anschließend wurden die Meßstreifen stufenweise relativen Feuchten von 2 % bis 97 % ausgesetzt und die Dehnungsanzeige im jeweiligen Gleichgewichtszustand gemessen. Dabei ergab sich auf der rauhen Oberfläche keine größere Null-

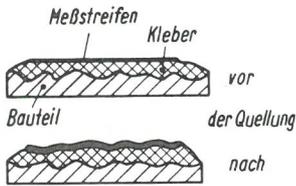


Bild 60
Schematische Darstellung des Einflusses der Bauteiloberfläche auf die quellungsbedingte Nullpunktdrift

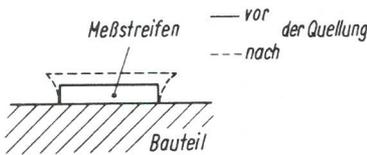


Bild 61
Verformung eines aufgeklebten Trägers infolge quellungsbedingter Zwängungsspannung, schematisch

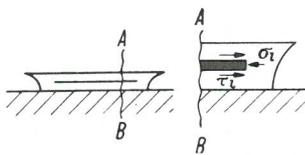


Bild 62
Wirkung der Zwängung in Drahtlängsrichtung, schematisch

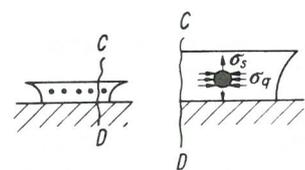


Bild 63
Die Wirkung der Zwängung quer zur Drahtachse, schematisch

punktdrift als auf der polierten. In einer zweiten Meßreihe wurden je drei Phenolharz-Meßstreifen 10/120 FB 3 einer Packung unter gleichen Bedingungen auf eine schwach geschmirgelte Glasplatte (Glas zur Verminderung der Isolationseffekte) geklebt: die ersten drei mit einer relativ dicken und ungleichmäßigen Schicht X-60 (im Mittel ca. 80 μ dick), die zweiten drei mit einer ca. 5 μ dicken Schicht XY-Kleber (Fabrikat Frischen). Auch diese Meßstreifen wurden stufenweise relativen Feuchten von 2 % bis 97 % ausgesetzt, wobei hinsichtlich der Nullpunktdrift zwischen beiden Gruppen kein im Verhältnis zum Gesamteffekt eindeutiger Unterschied beobachtet werden konnte. Die Versuche haben somit gezeigt, daß der Zustand der Bauteiloberfläche bzw. jener der Kleberschicht keinen wesentlichen Einfluß auf die durch Quelleffekte verursachte Änderung des Eingangswiderstandes Z^+ hat. Es sei jedoch ausdrücklich vermerkt, daß diese Aussage nur für ebene Oberflächen gilt; auf gekrümmten Oberflächen führt die Quellung von Träger und Kleber direkt zu einer Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$. Ist a die Schichtdicke von Träger und Kleber zwischen Draht und Bauteiloberfläche, $\Delta a/a$ die relative Quelldehnung und r der Krümmungsradius, so ist $\Delta\epsilon^* = \Delta a/r$. Für $r = 10$ mm, $a = 60$ μ und $\Delta a/a = 1$ % wird z. B. $\Delta\epsilon^* = 60 \times 10^{-6}$.

1.34.2 Der Einfluß der Meßstreifenlänge

Infolge der Quellung verformt sich der Träger gemäß der schematischen Darstellung in Bild 61. Dabei kann die Scher-

spannung im Träger an der Bauteiloberfläche so groß werden, daß vom Rande her eine Ablösung des Meßstreifens vom Bauteil beginnt. Bevor dieser Extremfall einsetzt, ist jedoch schon ein starkes Kriechen des Trägers im Sinne einer positiven Dehnung denkbar.

Bei kurzen Meßstreifen könnten dann schon wesentliche Teile des Meßgitters von dieser Kriechdehnung erfaßt werden. Zur Klärung dieser Hypothese wurden zwei Meßstreifen des Typs 3/120 FB 4 auf Glas geklebt: bei einem Meßstreifen wurde der über das Meßgitter hinausstehende Träger bis auf ca. 0,5 mm entfernt, bei dem anderen dagegen auf ca. 30 mm verlängert. Trotz dieser großen Verschiedenheit wurde hinsichtlich der quellungsbedingten Nullpunktdrift kein eindeutiger Unterschied beobachtet. Der Effekt kann daher nur von geringer Bedeutung sein. Der Versuch zeigt zugleich, daß auch die elastische Verformung des Trägers gemäß Bild 61 nur in den Randbezirken des Trägers wesentlich sein kann, was mit den Untersuchungen von Rohrbach und Czaika über die Dehnungseinleitung in Meßstreifen in Einklang steht [L 24].

Ein zweiter und zugleich wesentlicher längenabhängiger Effekt wird der Geschlossenheit halber im Abschnitt 1.34.3 beschrieben.

1.34.3 Der Einfluß der Feuchtigkeit zur Zeit der Klebung

Wie bereits oben erwähnt, entsteht im aufgeklebten Meßstreifen unter der Einwirkung von Feuchtigkeit eine Zwängungsspannung. Es ist nun die Frage naheliegend, ob der Widerstand Z^+ des Meßstreifenleiters (Draht, Metallfolie, Halbleiterkristall) unter dieser Zwängung direkt, d. h. ohne äußere Dehnung des Trägers in der Klebeebene, eine Änderung erfährt. Das ist in der Tat, und zwar in einer sehr komplizierten Weise, der Fall.

Allgemein bekannt ist die Widerstandsänderung ΔR eines Leiters in Längsrichtung bei einer einachsigen Spannungsänderung $\Delta\sigma_{xx}$ in dieser Richtung. Beim Einwirken auf einen Leiter aus Konstantan tritt eine relative Widerstandsänderung

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon_{xx} \approx 2 \frac{\sigma_{xx}}{E} = \frac{1,25 \cdot 10^{-6}}{k_p \cdot \text{cm}^{-2}} \cdot \sigma_{xx} = \quad (47)$$

$$\alpha_{xx} \cdot \sigma_{xx} = (\alpha_p + \alpha_G)_{xx} \cdot \sigma_{xx}$$

auf [L 25]. Darin ist k der k -Faktor des Leiters, E der Elastizitätsmodul, ϵ_{xx} die Dehnung unter der Spannung σ_{xx} , α_{xx} der „einachsige“ Spannungswiderstandskoeffizient, α_p und α_G die vom spezifischen Widerstand und der Leitergeometrie herrührenden Anteile an α_{xx} . Da $\alpha_G = (1 + 2 \mu)/E \approx 1 \cdot 10^{-6}/k_p \cdot \text{cm}^{-2}$ beträgt, wird $\alpha_p \approx 0,25 \cdot 10^{-6}/k_p \cdot \text{cm}^{-2}$. Bei dreiaxig gleichgroßer Spannung wird dagegen [L 25]

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{0,45 \cdot 10^{-6}}{k_p \cdot \text{cm}^{-2}} \cdot \sigma = \alpha \cdot \sigma = (\alpha_p + \alpha_G) \cdot \sigma \quad (48)$$

$$\text{Da } \alpha_G = -\left(\frac{1-2\mu}{E}\right) \approx -0,25 \cdot 10^{-6}/k_p \cdot \text{cm}^{-2}$$

beträgt, wird folglich

$$\alpha_p \approx 0,7 \cdot 10^{-6}/k_p \cdot \text{cm}^{-2}$$

In einem beliebigen dreiaxigen Spannungszustand, für den sich in Anlehnung an Gl. (47) und Gl. (48) $\Delta R/R = \alpha_z \cdot \Delta\sigma_z$ schreiben läßt – Index Z für „Zwängung“ –, sind daher obi-

gen Überlegungen zufolge bei einer Spannungsänderung von $\Delta\sigma_Z = 1 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2}$ mit positiven und negativen Komponenten $\{(\Delta\sigma_Z)_1; (a \cdot \Delta\sigma_Z)_2; (b \cdot \Delta\sigma_Z)_3\}$ – $a, b < 1$ – relative Widerstandsänderungen im Bereich von $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ zu erwarten. Wie unten gezeigt wird, treten tatsächlich relative Widerstandsänderungen in dieser Größe auf.

Zunächst jedoch sei erst einmal betrachtet, welcher Art der Spannungszustand eines Leiters in einem Träger ist, der im aufgeklebten Zustand gequollen ist. Die Quellung des Trägers wird durch das Aufkleben nur in der Klebefläche unterdrückt, senkrecht dazu jedoch nicht. Die Zwängungsspannung wirkt daher nur in der Ebene des Meßstreifens, und zwar hauptsächlich in zweifacher Weise:

a) Gemäß der sehr vereinfachten schematischen Darstellung in Bild 62 wirkt sie als Längsspannung σ_1 auf die Stirnflächen des Leiters und verursacht eine Längsstauchung. Der sich der Verformung widersetzen- de Träger leitet jedoch eine entgegengerichtete Schubspannung τ_1 in den Leiter, so daß nur die äußersten Leiterenden von der Stauchung erfaßt werden; in Anlehnung an die schon oben erwähnte Untersuchung von Rohrbach und Czaika wird der Bereich auf etwa 10 Leiterdurchmesser geschätzt. Bei einem Meßstreifen von 4 mm Gitterlänge, einem Leiterdurchmesser von 20 μ , einem E-Modul des Leiters von 16 000 $\text{kp} \cdot \text{mm}^{-2}$ und des Trägers von 500 $\text{kp} \cdot \text{mm}^{-2}$ folgt daraus für eine Quellung des freien Trägers von 1 % eine relative Widerstandsänderung bei einem aufgeklebten Meßstreifen von etwa $10\text{--}15 \cdot 10^{-6}$; der Effekt ist also sehr klein.

b) Gemäß der schematischen Darstellung in Bild 63 wirkt die Zwängung auch als Querspannung σ_q auf den Leiter, wodurch dieser, falls er vorher rund war, wie in der Darstellung hier, ellipsenartig verformt wird. Über die Querkontraktion versucht der Leiter aber gleichzeitig auch seine Länge zu ändern, wird aber daran durch Abstützung gegen σ_1 und τ_1 im Einleitungsbereich am Leiterende gehindert. Zum besseren Verständnis der Verhältnisse sei hervorgehoben, daß σ_q und σ_1 ohne Verformung des Trägers in der Klebeebene allein durch die hineindiffundierte Feuchtigkeit verursacht werden und daher ohne Einleitungsbereich unmittelbar auf den Leiter wirken. Im Gegensatz dazu tritt τ_1 erst als Folge einer Längenänderung Δl des Leiters und einer dadurch bewirkten Verformung des Trägers auf. Da das Verhältnis der E-Moduln (und entsprechend auch der Schubmoduln) von Draht zu Träger sehr groß ist (etwa 30 : 1), entsteht ein merkliches τ_1 erst bei einer wesentlichen Verformung des Trägers; im vorliegenden Fall ist das nur an den Leiterenden im sogenannten Einleitungsbereich der Fall.

Als Folge der Quellung durch Feuchte dehnt sich der Träger senkrecht zur Klebeebene unbehindert aus (bei der Quellung tritt ja keine Querkontraktion auf); hinzu kommt noch die von den Zwängungsspannungen σ_q und σ_1 herrührende Querdehnung. Der Träger versucht dabei auch den in ihn eingebetteten Leiter in dieser Richtung zu dehnen und übt, da dieser widerstrebt, eine Zugspannung σ_s senkrecht zur Längsachse auf ihn aus. Wegen des großen Verhältnisses der E-Moduln von Draht zu Träger und der gegenüber dem Drahtdurchmesser nur etwa 1,5-fach größeren Trägerschichtdicke über dem Draht wird aber nur ein kleiner Teil der Spannung, die sich theoretisch aus der Verhinderung von Quell- und Querdehnung ϵ_q im Drahtbereich und dem E-Modul des Trägers gemäß $\sigma = \epsilon_q \cdot E$ ergibt, in den Draht eingeleitet; er wird auf etwa 10 bis 20 % geschätzt. Der Lei-

ter steht somit unter einem komplizierten dreiachsigen Spannungszustand, dessen Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+ nur schwer zu übersehen ist.

Die Verhältnisse bei einem derart gezwängten Leiter lassen sich jedoch in grober Vereinfachung versuchsweise wie folgt beschreiben, wobei der Träger als isotrop angenommen und der runde Leiterquerschnitt durch eine quadratische Form mit der Seitenlänge n angenähert sei:

- In Leiterlängsrichtung tritt infolge Abstützung gegen σ_1 und τ_1 nahezu keine Verformung auf.
- Die Querspannung σ_q bewirkt in der Trägerebene eine Verformung Δn und senkrecht dazu $-\mu \Delta n$.
- Die Spannung σ_s bewirkt senkrecht zur Trägerebene ganz allgemein $-\lambda \cdot \Delta n$ und in der Trägerebene $\mu \cdot \lambda \cdot \Delta n$, wobei λ der Einleitungsfaktor ist.

Aus b) und c) folgt eine Querschnittsänderung

$$\frac{\Delta F}{F} \approx \frac{\Delta n}{n} - \mu \frac{\Delta n}{n} - \lambda \frac{\Delta n}{n} + \mu \lambda \frac{\Delta n}{n}$$

Die durch die Zwängung verursachte (rein ohmsche!) relative Widerstandsänderung beträgt somit

$$\frac{\Delta R^*}{R^*} \approx \frac{\Delta \rho^*}{\rho^*} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta F}{F}, \text{ woraus mit } \frac{\Delta l}{l} \approx 0 \text{ gemäß a) folgt}$$

$$\frac{\Delta R^*}{R^*} \approx \frac{\Delta \rho^*}{\rho^*} - \frac{\Delta n}{n} (1 - \mu - \lambda + \mu \lambda) = (\alpha_\rho + \alpha_{qZ}) \cdot \Delta \sigma_Z = \alpha_Z \cdot \Delta \sigma_Z$$

Darin ist α_Z der „Zwängungswiderstandskoeffizient“ und σ_Z die Zwängungsspannung. Mit der Annahme, daß $\lambda \approx 0,2$ und $\mu \approx 0,3$ beträgt, wird $\alpha_Z = (\Delta n/E \cdot n) \cdot (1 - \mu - \lambda + \mu \lambda) \approx -0,35 \cdot 10^{-6} \cdot \text{kp}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, $E = E$ -Modul des Leiters. In den Fällen gemäß Gl. (47) und Gl. (48) lag α_ρ für einachsige bzw. dreiachsige (Zug-) Spannung bei $0,25 \cdot 10^{-6}$ bzw. $0,7 \cdot 10^{-6}/\text{kp} \cdot \text{cm}^2$. Da hier positive $-\sigma_s$ und negative $-\sigma_q$ und σ_1 – Spannungen gleichzeitig auftreten, liegt α_ρ vermutlich zwischen 0 und $0,2 \cdot 10^{-6}/\text{kp} \cdot \text{cm}^2$. Daraus folgt $\alpha_Z \approx 0,15$ bis $0,35 \cdot 10^{-6}/\text{kp} \cdot \text{cm}^2$. Da bei einem Träger-E-Modul von z. B. 500 kp/mm^2 und einer unterdrückten Trägerquellung von 1 % eine Zwängungsspannung von $\sigma_Z = 500 \text{ kp}/\text{cm}^2 \cdot (1 + \mu)$ auftritt, ist zu vermuten, daß bei einer Änderung der relativen Feuchte von 0 auf 100 % als Folge der Quelleffekte relative Widerstandsänderungen bis zu einigen $100 \cdot 10^{-6}$ auftreten können. Es ist ferner auch einleuchtend, daß der Spannungszustand des Meßstreifens vor dem Einwirken der Feuchte von wesentlichem Einfluß auf den Verlauf der Widerstandsänderung infolge der Quellung sein muß, weil davon abhängt, wann und wo bei Quellung die Elastizitätsgrenze überschritten und dadurch die Linearität des Effektes beeinflußt wird. Dieser Anfangszustand hängt entscheidend von den Herstellungsbedingungen sowie von der relativen Feuchte (gegebenenfalls auch vom Gehalt an Lösungsmitteln) und der Temperatur des Meßstreifens im Augenblick der Härtung des Klebers ab.

Die Meßstreifen mit Phenolharzträger z. B. werden bei etwa 150°C ausgehärtet. Das Phenolharz schrumpft bei der Härtung insgesamt um etwa 1 bis 2 %. Beim Abkühlen nach dem Härteprozeß schrumpft der Träger nochmals um ca. 0,8 % mehr als der eingebettete Draht. Der Draht steht daher im abgekühlten Meßstreifen unter einer allseitigen sehr starken Zwängungsspannung, die in Drahtlängsrichtung außerhalb des kleinen Einleitungsbereiches sicher voll eingeleitet ist und den Draht plastisch staucht; senkrecht zur Längsrichtung wird der Draht nur bis zur Fließgrenze des Phenolharzes gezwängt. Wird der Meßstreifen trocken aufgeklebt,

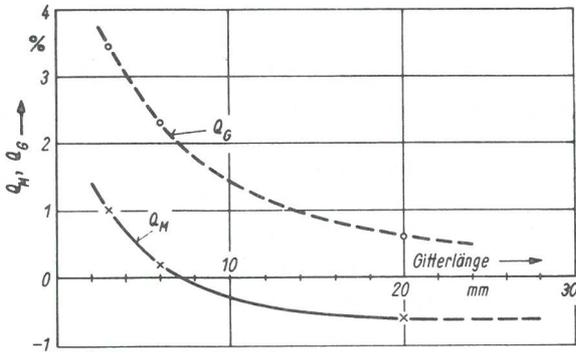


Bild 64
Querempfindlichkeit von Dehnungsmeßstreifen des Typs FB 1 von Hottinger nach Messungen von Wieringa [L 26]

bleibt diese Zwängung erhalten; wird er vorher hoher Feuchte ausgesetzt oder warm aufgeklebt, so wird er aus dem Bereich plastischer Stauchung in den Bereich allseitiger Zugspannung übergeführt bzw. stark entlastet. Die Ausgangsbedingungen sind also jeweils völlig andere, so daß auch ein anderes Quellverhalten zu erwarten ist. Für andere Meßstreifentypen gilt entsprechendes.

Einen ersten Anhalt für die Richtigkeit der Zwängungshypothese liefert eine Analyse der in der Literatur mehrfach beschriebenen Untersuchungen über die Querdehnungsempfindlichkeit von Dehnungsmeßstreifen, hier speziell jener von Wieringa [26]. Ein idealer Meßstreifen soll nur die Dehnung in Meßstreifenlängsrichtung anzeigen und für Dehnungen senkrecht dazu absolut unempfindlich sein. Tatsächlich aber zeigt der Meßstreifen auch eine Querempfindlichkeit, und zwar allein schon deshalb, weil ein breites Leitergitter auch Leiteranteile quer zur Längsrichtung haben muß (Geometrie-Effekt); ein quergedehnter Meßstreifen muß also demzufolge eine positive Dehnung anzeigen. Der Geometrie-Effekt ist aber zur Beschreibung der wirklich gemessenen Querempfindlichkeit Q_M nicht ausreichend, wie die Darstellung in Bild 64 zeigt. Dort ist Q_M über der Gitterlänge von Meßstreifen des Typs Hottinger FB 1 aufgetragen. Alle drei Meßstreifen haben die gleiche Gitterform und gleichartige Träger; sie unterscheiden sich nur in der Gitterlänge und, betreffend den Meßstreifen mit 3 mm Gitterlänge, in einem etwas kleineren Drahtdurchmesser (Faktor ca. 0,82). In das Bild ist ferner gestrichelt die Querempfindlichkeit Q_G eingetragen, die auf Grund des reinen Geometrie-Effektes zu erwarten gewesen wäre. Q_M ist also nicht nur stets erheblich kleiner als Q_G (bei großer Gitterlänge konstant ca. 1 %), sondern erreicht sogar negative Werte, was dem Geometrie-Effekt zufolge gar nicht möglich ist. Es muß also noch ein weiterer Effekt vorliegen.

Bei der Messung von Q_M wird dem sich näherungsweise nur zweiachsig erstreckenden Meßstreifen eine einachsige Dehnung und somit zweiachsige Spannung aufgezwungen. Bei einer Querstauchung z. B. steht der Meßdraht in der Klebeebene unter einer zweiachsigen Druckspannung und senkrecht dazu durch den in die Dicke ausweichenden Träger unter einer Zugspannung. Dieser Zustand ähnelt jenem des aufgeklebten Meßstreifens unter Feuchtigkeit, d. h. auch hier steht der Meßdraht unter einer dreiachsigen Spannung. Es ist deshalb naheliegend, zur Deutung von Q_M versuchsweise die Zwängungshypothese heranzuziehen.

In folgender Weise läßt sich die Größenordnung des Zwängungseffektes aus den an den FB 1-Meßstreifen erhaltenen Meßergebnissen von Wieringa abschätzen:

Die gemessene Querempfindlichkeit Q_M setzt sich hauptsächlich zusammen aus Q_G mal dem Einleitungsfaktor K – da die Dehnung ja erst über eine endliche Einleitungslänge vom Träger auf den Draht übertragen wird [L 24] – gemäß der Beziehung $(Q_G)_{\text{eff}} = K \cdot Q_G$ sowie aus den durch die Zwängung bedingten Empfindlichkeiten $(Q_Z)_I$ und $(Q_Z)_Q$ längs und quer zur Drahtachse. Bei konstantem Drahtdurchmesser, konstantem Radius an den Umkehrstellen des Gitters und gleichem Träger muß der Einleitungsfaktor K bei allen Meßstreifen gleich sein. Bei wenig unterschiedlichem Drahtdurchmesser wird näherungsweise gelten $K \sim \text{Drahtumfang} / \text{Drahtquerschnitt} \sim 1 / \text{Drahtdurchmesser}$. $(Q_Z)_I$ wird durch die Einleitungslänge in Drahtlängsrichtung bestimmt und ist somit $\sim 1 : \text{Gitterlänge}$. $(Q_Z)_Q$ wird durch die Änderung des spezifischen Widerstandes ρ und des Querschnittes bestimmt und ist daher unabhängig von der Gitter- und der Drahtlänge. Es ist also

$$Q_M = K \cdot Q_G + (Q_Z)_Q + (Q_Z)_I \quad (49)$$

Durch Anwendung von Gl. (49) auf die Meßstreifen 3/120, 6/120 und 20/120 FB 1 bei Beachtung der Gitterlängenabhängigkeit von $(Q_Z)_I$ und des etwas kleineren Drahtdurchmessern beim 3/120 FB 1 erhält man mit den Meßergebnissen von Wieringa

$$K = 0,37$$

$$(Q_Z)_I = 0,64 \% \text{ für eine Gitterlänge von ca. } 3,5 \text{ mm}$$

$$(Q_Z)_Q = -0,91 \%$$

Bei einem E-Modul des Trägers E_{Tr} bewirkt eine Querdehnung ϵ_Q eine Querspannung σ_Q , die bei einem DMS mit dem k -Faktor k eine relative Widerstandsänderung

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_Q \cdot \sigma_Q = k \cdot (Q_Z)_Q \cdot \epsilon_Q = k \cdot (Q_Z)_Q \cdot \frac{\sigma_Q}{E_{Tr}}$$

verursacht.

Daraus folgt für den „Querspannungskoeffizienten“ $\alpha_Q \approx -0,4 \cdot 10^{-6} / k p \cdot \text{cm}^{-2}$ (Vorzeichen für Zug-Spannung). Nun handelt es sich hier zwar nur um eine Abschätzung, doch liegt der erhaltene Wert sehr gut in dem Bereich, der auf Grund der an die Gleichungen (47) und (48) geknüpften Überlegungen mit $\alpha_Z \approx \pm 1 \cdot 10^{-6} k p \cdot \text{cm}^{-2}$ abgegrenzt wurde, und sogar sehr nahe bei dem auf Grund einer groben Vereinfachung berechneten α_Z -Wert. Es muß daher angenommen werden, daß die Zwängungsspannungen von wesentlichem Einfluß auf das Verhalten von Dehnungsmeßstreifen sind. Die quellungsbedingte relative Widerstandsänderung der aufgeklebten Meßstreifen – im folgenden kurz als Nullpunkt drift $\Delta \epsilon^*$ bezeichnet – muß daher von den Ausgangsbedingungen, d. h. also der Art der Herstellung, der Art der Klebung (warm oder kalt) und der Feuchte zur Zeit der Klebung wesentlich abhängen. Die im folgenden beschriebenen Versuchsergebnisse bestätigen diese Annahme.

Zur Klärung der durch Quellung verursachten Widerstandsänderungen wurden zahlreiche Versuche mit einer großen Anzahl von unter verschiedenen Bedingungen aufgeklebten Meßstreifen durchgeführt. Die Bilder 65 bis 72 zeigen eine repräsentative Auswahl von Versuchsergebnissen, die dabei erhalten wurden. Bei allen Versuchen wurde wie folgt verfahren: Die Meßstreifen wurden vor dem Aufkleben mehrere Tage in einer definierten Atmosphäre gelagert, so daß sie sich in einem dieser Atmosphäre entsprechenden Gleichgewichtszustand befanden. Anschließend wurden sie in diesem Zustand mit einem schnellhärtenden Klebstoff auf einem

Bauteil fixiert; beim Aufkleben mit dem wärmhärtenden Kleber BC 6035 war der Gleichgewichtszustand im Augenblick des Aushärtens hauptsächlich durch die hohe Temperatur von 120°C bestimmt. Als Bauteil wurde in einigen Fällen Stahl, sonst aber wegen des dann entfallenden Isolationswiderstandes aufgerautes Glas verwendet. Zur Verminderung von Isolationsdefekten aller Art erfolgte die „Dehnungsmessung“ (Messung der Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$) mit einer Trägerfrequenz von nur 180 Hz (Manueller Kompensator von Hottinger). Durch diese Maßnahmen wurde erreicht, daß die quellungsbedingten Nullpunktdriften zumindest nicht wesentlich durch Isolationsdefekte gestört wurden. Zur Vermeidung von Oberflächenleitung im Bereich der Anschlußdrähte wurden die Anschlüsse in mikrokristallines Wachs eingeschmolzen (vgl. auch Abschnitt 1.23). Die aufgeklebten Meßstreifen wurden dann nacheinander, jeweils bis zum Gleichgewichtszustand, verschiedenen relativen Feuchten ausgesetzt und die dabei auftretende Drift $\Delta\epsilon^*$ als Funktion der Zeit gemessen. Bild 65 zeigt beispielhaft zwei auf diesem Wege erhaltene Driftkurven. Die dem Gleichgewichtszustand entsprechenden Endwerte wurden dann für die Diagramme $\Delta\epsilon^*$ als Funktion der relativen Feuchte verwendet.

Bild 66 zeigt die quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ als Funktion der relativen Feuchte, gemessen an drei Meßstreifen Hottinger 3/120 FB 4, die mit X-60 auf Stahl geklebt wurden: ein Meßstreifen wurde vor dem Kleben bei 2 % relativer Feuchte gelagert, der zweite bei ca. 35 % und der dritte bei 97 %. Das Verhalten der drei Meßstreifen ist, der unterschiedlichen Vorbehandlung entsprechend, in charakteristischer Weise völlig verschieden: der Draht des „trockenen“ Meßstreifens steht unter einer starken Schrupfzwängung, zu der durch die Wasseraufnahme noch die Quellungs-zwängung hinzukommt; bei relativen Feuchten über ca. 70 % tritt ein erhebliches Entlastungskriechen des Drahtes im Träger auf, d. h. also eine Dehnung des Drahtes ohne äußere Dehnung des Trägers in der Klebeebene. 90 % des Endwertes dieser Kriechdrift werden nach etwa zehn Tagen erreicht. Beim Trocknen erfolgt daher nur eine kleine Rückdrift, beim erneuten Durchfeuchten eine wesentlich kleinere Quelldrift und beim erneuten Trocknen eine noch kleinere Rückdrift. Mehrere Zyklen trocken—feucht—trocken führen also zu einer teilweisen Entspannung und damit Stabilisierung des Meßstreifens, wobei der Nullpunkt in Richtung positiver Dehnung wandert. Der Draht des „feuchten“ Meßstreifens steht dagegen nach dem Aufkleben und Trocknen auf 2 % r. F. unter einer starken Zugspannung, die bei relativen Feuchten über ca. 70 % durch Entlastungskriechen abgebaut wird. Mehrere Zyklen trocken—feucht—trocken führen wie beim trockenen Meßstreifen zu einer weiteren Entlastung, jedoch naturgemäß mit umgekehrtem Vorzeichen. Der bei ca. 35 % relativer Feuchte aufgeklebte Meßstreifen zeigt eine mittlere Nullpunktdrift und erreicht nach dem Rücktrocknen etwa den Ausgangsnulldpunkt. Die drei Driftkurven des Bildes 66 sind typisch für das Verhalten kurzer Meßstreifen.

Bild 67 zeigt die quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ von mittellangen und sehr langen Hottinger-Meßstreifen, wiederum mit Phenolharzträger und jeweils dem gleichen Meßstreifenpäckchen entnommen. Bei diesen Meßstreifen ist im Gegensatz zu den 3/120 FB 4 der Bereich, in dem die Schrupfzwängung (beim trockenen Meßstreifen) bzw. Quellungsdehnung (beim feuchten Meßstreifen) vom Träger in den Draht eingeleitet wird und in dem auch das Kriechen erfolgt, vernachlässigbar (beim 150/300 FB 1) bzw. klein

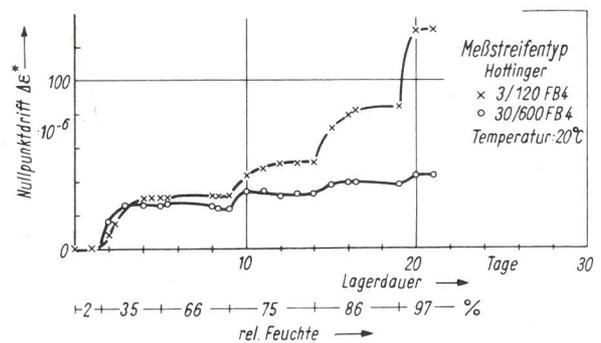


Bild 65
Quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ als Funktion der Lagerdauer bei verschiedenen relativen Feuchten

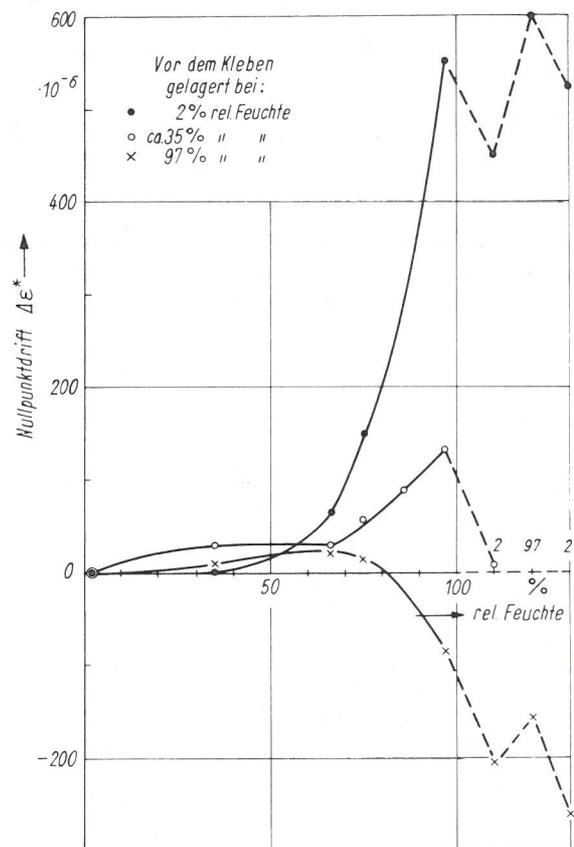


Bild 66
Quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ als Funktion der relativen Feuchte, gemessen an drei Meßstreifen Hottinger 3/120 FB 4 Klebung mit X-60 auf Stahl

(beim 30/600) gegenüber der gesamten Gitterlänge. Das Verhalten dieser Meßstreifen muß daher von dem der 3/120 FB 4 verschieden sein und läßt sich etwa folgendermaßen deuten: der trockene 150/300 FB 1 steht nahezu im ganzen Gitterbereich unter einer plastischen Schrupfzwängung in Drahtlängsrichtung. Mit steigender Feuchte wird vor allem ohne Dehnung des Trägers in der Klebeebene! — σ_q dem Betrage nach vergrößert, während σ_s infolge Trägerquellung dem Betrage nach verkleinert wird; σ_1 wird durch Abstützung der von σ_q und σ_s herrührenden Querdehnung und durch die Quellungsdehnung in Längsrichtung etwas ver-

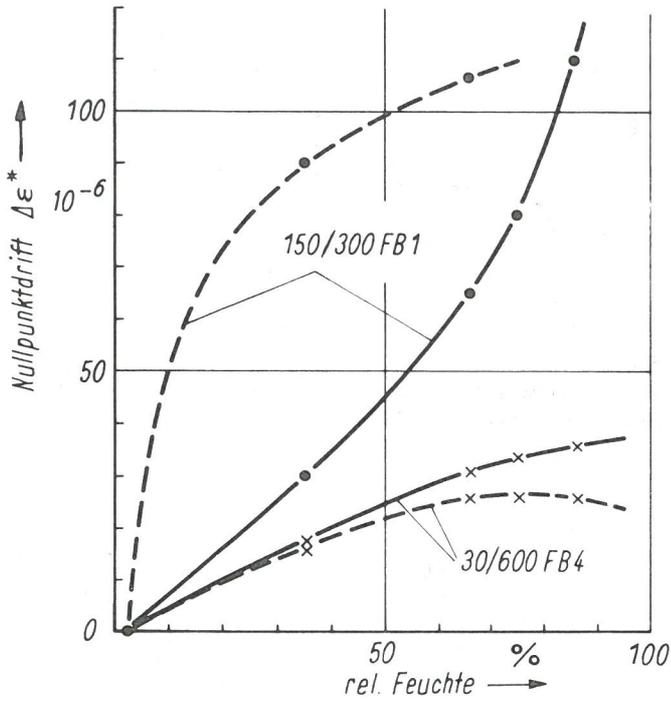


Bild 67
 Quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ von Dehnungsmeßstreifen, die nach Lagerung bei ----- 2 % bzw. ————— 50 % relativer Feuchte mit X-60 auf Glas geklebt wurden

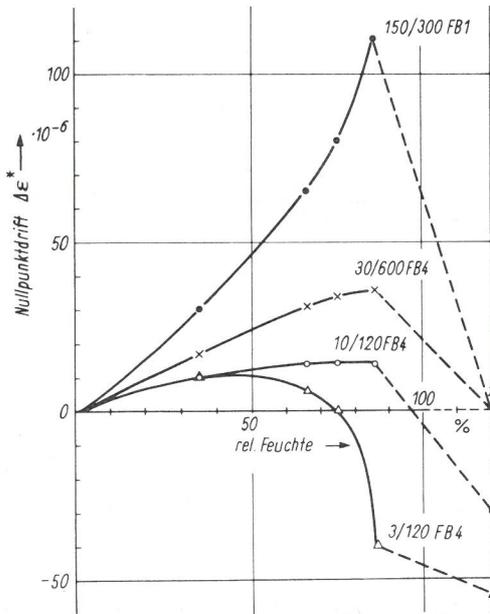


Bild 68
 Quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ von Hottinger Dehnungsmeßstreifen, die nach Lagerung bei 50 % relativer Feuchte mit X-60 auf Glas geklebt wurden

ändert. Mit steigender Feuchte wird der Draht auch durch σ_q zunehmend plastisch verformt, wobei die Steigerung von σ_q nicht durch eine Verformung des Trägers verursacht wird, sondern durch die absorbierte Feuchte. Unter diesen Bedingungen steigt $\Delta\epsilon^*$ nur anfangs stark an; mit zunehmender plastischer Verformung wird die Steigung kleiner, da dann bei angenähert konstanter Drahtlänge die Querschnittsverringerng und die Änderung des spezifischen Widerstandes kleiner werden. Der mittelfeuchte 150/300 FB 1 ist vermutlich näherungsweise entspannt, da die Feuchte-

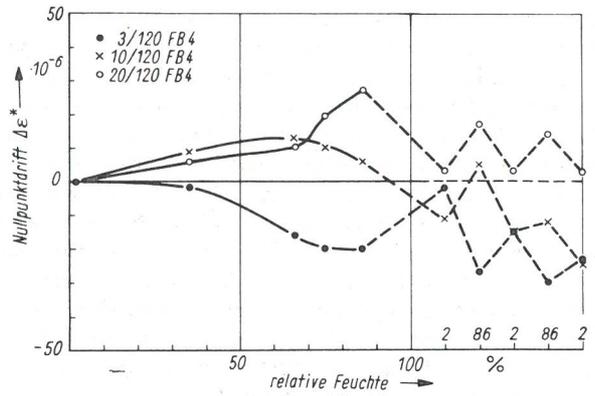


Bild 69
 Quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ von Hottinger Dehnungsmeßstreifen, die mit BC 6035 auf Stahl geklebt wurden

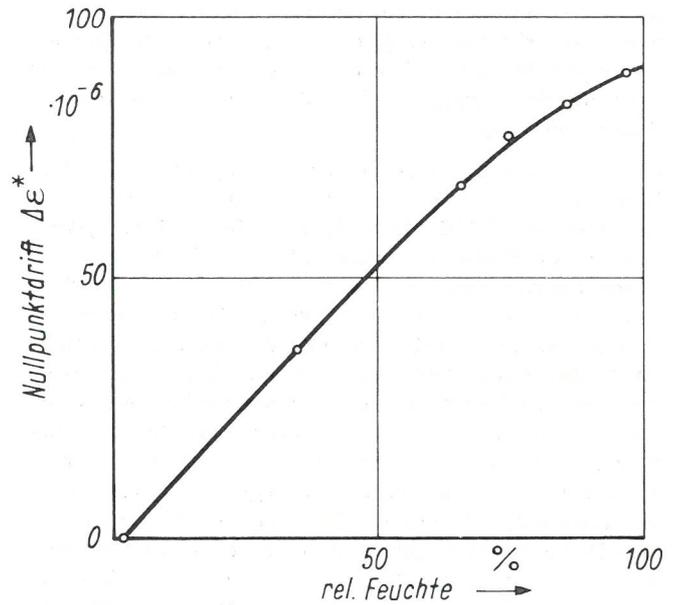


Bild 70
 Quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ eines Halbleitersgebers, Typ MS 105-350, mit unbekannter Vorgeschichte

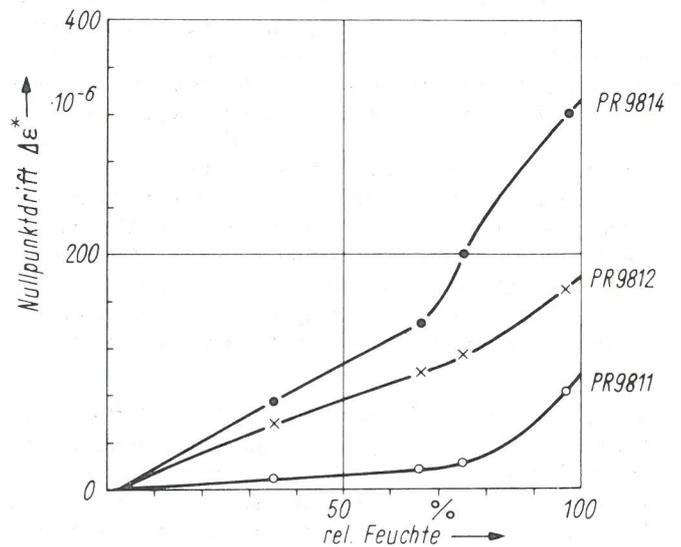


Bild 71
 Quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ als Funktion der relativen Feuchte für drei Philips-Dehnungsmeßstreifen, die bei ca. 40 % relativer Feuchte mit PR 9244 auf Glas geklebt wurden.

quellung die Abkühlungsschrumpfung des Herstellungsprozesses etwa ausgeglichen hat. Wird er so aufgeklebt und dann getrocknet, so steht er unter einer ebenen Zugspannung und senkrecht dazu unter einer leichten Schrumpfungsdruckspannung σ_s . Bei steigender relativer Feuchte wird besonders σ_Q abgebaut, was mit einer elastischen Verformung verbunden ist; bei hoher Feuchte wird der Draht sogar elastisch quergestaucht. Eine plastische Verformung tritt nicht ein, so daß die Drift $\Delta\epsilon^*$ mit steigender relativer Feuchte ständig zunimmt.

Zwischen den beiden extrem verschiedenen Verhaltensweisen der kurzen (Bild 66) und der langen Meßstreifen (Bild 67) liegt das weite Feld der mittellangen Meßstreifen z. B. der 30/600 FB 4 in Bild 67, bei denen eine Überlagerung der beiden Grundeffekte „Kriechen unter Zwängung“ und „reine Zwängung“ erfolgt. Die Driftkurven des Bildes 68 lassen dieses deutlich erkennen. Bemerkenswert an diesen vier Kurven ist ferner, daß bei den langen Meßstreifen, bei denen das Entlastungskriechen nicht wesentlich zum Gesamtverhalten beiträgt, nach dem Rücktrocknen wieder der alte Nullpunkt erreicht wird, wie es zu erwarten ist.

Das Verhalten der Meßstreifen läßt sich also mit Hilfe der Zwängungshypothese grundsätzlich verstehen. Diese Hypothese ist zwar in der erläuterten einfachen Form sicher nicht ausreichend, um alle Einzelheiten des Kurvenverlaufs zu deuten, doch ist stark zu vermuten, daß sie bei der Deutung der quellungsbedingten Nullpunktdriften etwa in dieser Form eine wesentliche Rolle spielt.

In Bild 69 sind die Nullpunktdriften von drei Meßstreifen aufgetragen, die mit dem warmhärtenden Kleber BC 6035 auf Stahl geklebt wurden; die Härtung erfolgte bei ca. 120°C. Die Meßstreifen werden bei dieser Temperatur offenbar im etwa entlasteten Zustand fixiert und stehen nach dem Abkühlen wegen der gegenüber Stahl viel größeren Abkühlungsschrumpfung in der Klebeebene unter Zugspannung. Sie verhalten sich daher ähnlich wie feucht geklebte Meßstreifen.

Bild 70 zeigt die Nullpunktdrift eines auf Stahl geklebten Halbleitergebers des Typs Micro-Systems MS 105–350, dessen Vorgeschichte jedoch nicht näher bekannt ist. Bild 71 zeigt die hauptsächlich quellungsbedingte Nullpunktdrift dreier Meßstreifen von Philips, die bei ca. 40 % relativer Feuchte auf Glas geklebt wurden. Bild 72 zeigt die quellungsbedingte Nullpunktdrift zweier Hottinger-Meßstreifen des Typs 10/120 FA 1, die unter extrem verschiedenen Feuchtigkeiten aufgeklebt wurden. Auch hier zeigt der trockene Meßstreifen bei relativen Feuchten > etwa 70 % sehr starke positive Drift, der feuchte Meßstreifen dagegen eine leicht negative Tendenz. Bei diesen Meßstreifen mit Acrylharzträgern tritt im Verlaufe der Herstellung ebenfalls eine starke Trägerschrumpfung auf, jedoch weniger durch Abkühlung wie bei den Phenolharzträgern, als vielmehr durch die mit dem Aushärten verbundene sehr erhebliche Volumenverminderung. Die Bilder 70 bis 72 zeigen, daß die an Meßstreifen mit Phenolharzträgern gefundenen Verhaltensweisen im Prinzip auch für andere Meßstreifen gültig sind. Die Meßstreifen mit filzabgedeckten Papierträgern von Huggenberger verhalten sich ähnlich, doch treten dort immer unüberlichtliche Isolationsstörungen auf, da die Zuleitungen unisoliert durch den stark Feuchte absorbierenden Filz geführt werden.

Besondere Schwierigkeiten ergaben sich bei der Untersuchung des Verhaltens von Folienmeßstreifen, speziell jener

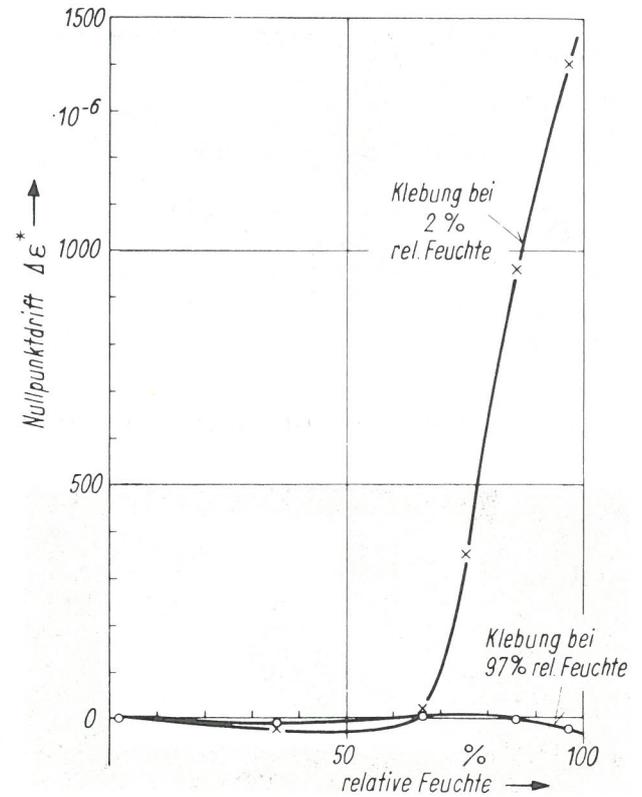


Bild 72
Quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ für zwei mit X-60 auf Stahl geklebte Meßstreifen Hottinger 10/120 FA 1

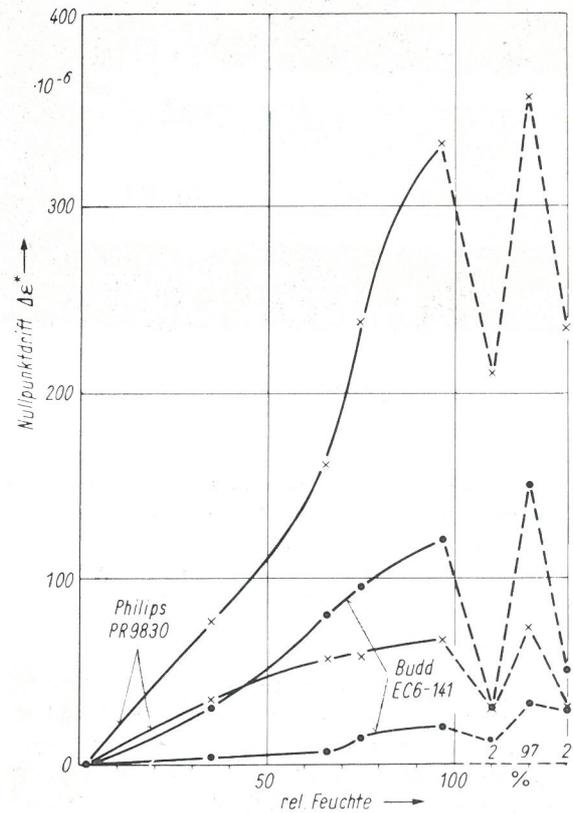


Bild 73
Quellungsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ gekapselter Folienmeßstreifen PR 9830 aufgeklebt bei 35 % relativer Feuchte EC 6-141 aufgeklebt bei 60 % relativer Feuchte

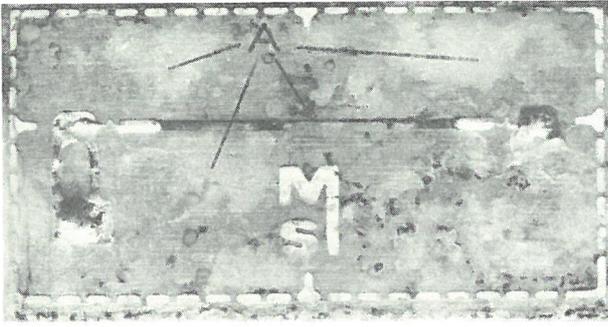


Bild 74
Durch Quellung verursachte Ablösungen A an einem Halbleitergeber

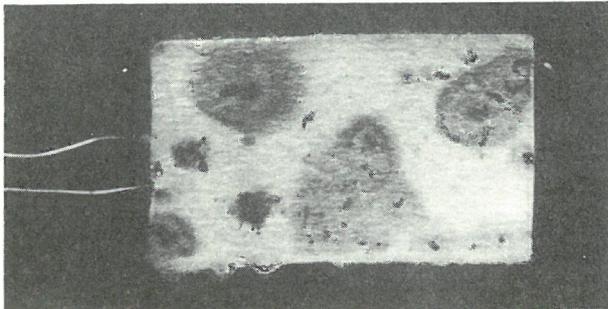


Bild 75
Rostbildung unter einem durch Quellung abgelösten Papierträgermeßstreifen

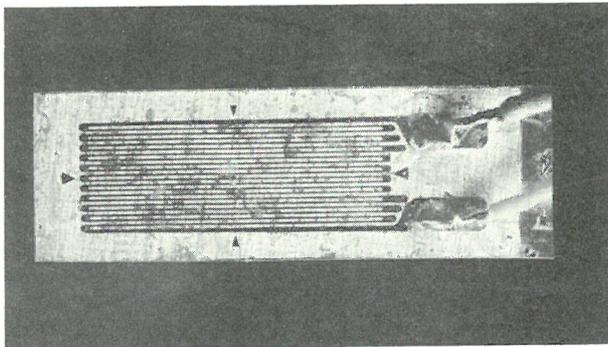


Bild 76
Rostbildung unter einem Folienmeßstreifen

mit ungekapseltem Gitter. Wegen des im Vergleich zu den Meßstreifen mit Drahtleiter großen Verhältnisses zwischen Leiterumfang und Leiterquerschnitt sind Folienmeßstreifen sehr viel anfälliger gegen Korrosion (vgl. Abschnitt 1.4); aber auch der Herstellungsprozeß ist zum Teil ein wesentlich anderer.

Bei den gekapselten Folienmeßstreifen treten offenbar ähnlich Zwängungseffekte auf wie bei den Meßstreifen mit Drahtleiter, nur sind die Streuungen erheblich größer. Bild 73 zeigt vier Driftkurven, die an zwei Meßstreifentypen ermittelt wurden. Die Folienmeßstreifen mit ungekapseltem Gitter unterscheiden sich vor allem in Folgendem von den anderen Meßstreifenarten:

a) Da der Leiter nicht im Träger eingebettet ist, tritt keine allseitige Zwängung auf. Gelangt aber beim Kleben mit sehr dünnflüssigen Klebern etwas Kleber auf das Gitter,

was sehr leicht erfolgt und meist nicht bemerkt wird, so wird der Leiter zumindest zum Teil doch eingebettet und unterliegt dann wieder allseitigen Zwängungen. Die Art und Größe des Zwängungseinflusses ist daher sehr unterschiedlich und schwer überschaubar.

- b) Die große freie Oberfläche macht korrosionsanfällig. Die geringste Unsauberkeit (z. B. ein direkter oder auch nur ein indirekter Fingerabdruck) vergrößert die Anfälligkeit in unkontrollierbarer Weise.
- c) Die Leiterfolie hat mit einer Dicke von ca. 4μ nur etwa $1/5$ der „Dicke“ des Drahtes normaler Meßstreifen. Der Einfluß von Schmirgelriefen (vgl. Abschnitt 1.34.1) ist wegen der besseren Einleitungsbedingungen deshalb wesentlich größer. Aus allen diesen Gründen lassen sich die an ungekapselten Folienmeßstreifen erhaltenen Driftkurven sehr viel schwieriger deuten. Da hierzu bisher keine befriedigenden Ergebnisse erhalten wurden, wird auf eine Diskussion dieser Versuche an dieser Stelle verzichtet.

Bei all den Versuchen zur Ermittlung der quellungsbedingten Nullpunktdrift wurden noch folgende bemerkenswerte Beobachtungen gemacht:

- a) Bei sehr trocken aufgeklebten Meßstreifen treten bei relativen Feuchten oberhalb etwa 65 % so große Druckspannungen auf, daß zum Teil Ablösungen vom Bauteil einsetzen. Die Ablösungen lassen sich besonders gut bei einer Klebung auf Glasplatten von der Plattenunterseite her beobachten; sie sind jedoch auch bei Klebung auf Metall erkennbar, wenn der Träger durchsichtig ist (Bild 74) oder ganz vom Bauteil abfällt (Bild 75). Bei feuchter oder bei warmer Klebung wurden entsprechend keine Ablösungen dieser Art beobachtet. In Bild 74 sind auch Ablösungen des Trägers vom Halbleiterkristall zu erkennen. Möglicherweise tritt ähnliches auch bei Dehnungsmeßstreifen auf.
- b) Bei feucht geklebten und anschließend getrockneten Meßstreifen treten im Träger große Zugspannungen auf. Bei den durchsichtigen Acrylharzträgern lassen sich in diesem Fall rißartige Erscheinungen beobachten, die als Ablösung des Harzes von den Fasern gedeutet werden. Bei anderen Meßstreifen treten möglicherweise ähnliche Erscheinungen auf, die jedoch wegen Undurchsichtigkeit des Trägers nicht erkennbar sind. Es ist zu vermuten, daß die meßtechnischen Eigenschaften der Meßstreifen in solchen Fällen verändert werden.
- c) Bei vielen Meßstreifen, die nach dem Aufkleben auf Stahl längere Zeit bei relativen Feuchten $> 70 \%$ gelagert wurden, entsteht unter dem Träger Rost. Bild 76 zeigt beispielhaft Rostbildung unter einem Folienmeßstreifen, Bild 75 Rostbildung unter einem abgelösten Papierträgermeßstreifen. Rost kann nur dort entstehen, wo zumindest in Mikrobereichen eine kleberfreie Stahloberfläche vorliegt, auf der sich eine zusammenhängende Wasserschicht bilden kann. Entweder sind von Anbeginn solche Bereiche vorhanden, oder sie entstehen unter dem Einfluß von Quell- bzw. Schrumpfspannungen. Sicher ist, daß durch das „Aufblühen“ solcher Roststellen die ursprünglich sehr kleinen Bereiche vergrößert werden und der Meßstreifen in dieser Weise langsam unbrauchbar wird. Bei längerer Lagerung in hoher Feuchte wird also auch eine Nullpunktdrift durch Rost bzw. gemäß a) durch Ablösungen auftreten.

Bisher wurde nur die durch die Zwängung verursachte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ betrachtet. Nachdem deren Einfluß nun als gesichert anzusehen ist, sind folgende weitere Schlußfolgerungen zu ziehen:

Wenn die quellungsbedingte Zwängung eine Widerstandsänderung hervorruft, deren Größe von den Anfangszwängungen abhängt, ist zu erwarten, daß auch der k-Faktor der Meßstreifen durch Zwängungen beeinflusst wird. Diese Erwartung beruht auf der Überlegung, daß eine Spannung durch Dehnung des Meßstreifens zu einer Änderung der Anfangszwängung führt, die sich nicht grundsätzlich von einer Änderung durch Quellung unterscheidet. Die Ursache des Effektes dürfte vorwiegend in örtlichen Überschreitungen der Fließgrenze des Trägers liegen, so daß bezüglich der auf den Draht wirkenden Spannung keine lineare Superposition von Zwängungsspannung und Spannung durch Dehnung des Meßstreifens eintritt. Bei unterschiedlicher Anfangszwängung ergeben sich dann trotz gleicher Dehnung des Meßstreifens unterschiedliche Spannungen am Draht. Zum Beweis dieser Vermutung wurden drei Meßstreifen Hottinger 3/120 FB 4 mit xy-Kleber (Frischen) nebeneinander auf einen Biegebalken von 8 mm Dicke geklebt; bei dieser Balkendicke beträgt die Versteifung durch die Meßstreifen gemäß Abschnitt 3.5 nur etwa 0,1 %. Ein Streifen war zuvor bei 2 % relativer Feuchte gelagert worden, der zweite bei 60 %, der dritte bei 97 %; alle drei Meßstreifen waren dem gleichen Päckchen entnommen worden, ihre k-Faktoren sollten daher innerhalb $\pm 0,5$ % übereinstimmen. Dieser Balken wurde bei den relativen Feuchten ca. 25 %, ca. 65 %, ca. 95 % jeweils nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes bei konstantem Hebelarm nacheinander mit drei verschiedenen Gewichten belastet; die dabei auftretenden Dehnungen wurden mit allen drei Meßstreifen gemessen. Dabei ergab sich, daß der k-Faktor besonders des „feuchten“ Meßstreifens mit zunehmender relativer Feuchte kleiner wird, wie der Darstellung in Bild 77 zu entnehmen ist. Der Effekt ist nicht sehr groß, jedoch reproduzierbar, und dürfte bei Präzisionsmessungen, besonders solchen mit Kombinationsgeräten unter Verwendung von Dehnungsmeßstreifen, durchaus schon erheblich störend sein.

Außer dem k-Faktor muß auch der Temperaturkoeffizient aufgeklebter Dehnungsmeßstreifen durch die feuchtebedingten Zwängungen beeinflusst werden. Der Temperaturkoeffizient α , definiert durch die Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*/\text{grad}$, wird bestimmt durch die unterschiedlichen Wärmedehnungen von Bauteil und Meßstreifen, durch die Änderung des spezifischen Widerstandes des Leiters und durch die Änderung der relativen Feuchte, die bei einer Temperaturänderung unter konstanter absoluter Feuchte stets eintritt. Die beiden ersten Ursachen sind allgemein bekannt, die letzte dagegen wurde bisher nicht beachtet.

Die Messung von α erfolgt im allgemeinen in der Weise, daß ein aufgeklebter Meßstreifen in einem Thermostaten nacheinander verschiedenen Temperaturen ausgesetzt und dabei seine Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ gemessen wird. Bleibt die absolute Feuchte im Raum während des Versuches konstant, was meist der Fall sein wird, so sinkt die relative Feuchte im Thermostaten mit steigender Temperatur ab; der quellungsbedingte Zwängungszustand ändert sich also, was mit einer Drift $\Delta\epsilon^*$ verbunden ist. Ist die absolute Raumfeuchte sehr klein, zum Beispiel entsprechend einem Wasserdampfpartialdruck von 3,6 Torr $\hat{=}$ 20 % relativer Feuchte bei 20°C, so beträgt die relative Feuchte im Thermostaten bei 50°C nur noch 3,8 %. Ist die absolute Raum-

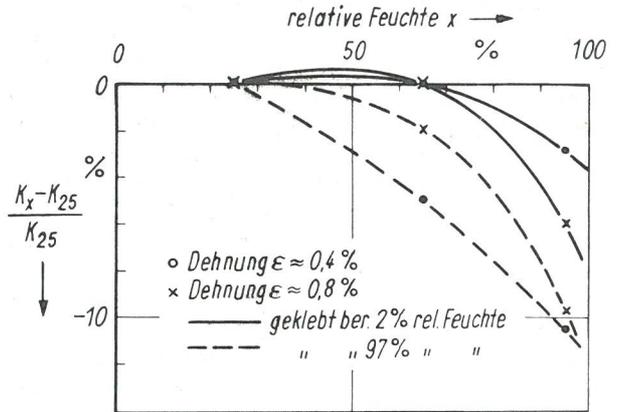


Bild 77
Änderung des k-Faktors als Funktion der relativen Feuchte bei Dehnungsmeßstreifen Hottinger 3/120 FB 4

feuchte groß, zum Beispiel entsprechend einem Wasserdampfpartialdruck von 14,4 Torr $\hat{=}$ 80 % relativer Feuchte bei 20°C, so beträgt die relative Feuchte im Thermostaten bei 50°C nur noch ca. 15 %. Die bei der Temperaturänderung durchlaufenen Bereiche der relativen Feuchte sind also in beiden Fällen sehr verschieden und im zweiten Fall auch von erheblichem Betrag. Die quellungsbedingten Driftkurven werden also im allgemeinen ebenfalls sehr verschieden und natürlich auch von den Aufklebebedingungen und der Zahl der schon durchlaufenen Temperatur- und/oder Feuchtezyklen abhängig sein.

Es ist deshalb zu erwarten, daß die gemessenen Temperaturkoeffizienten von den Ausgangs- und Versuchsbedingungen abhängen. Ein beispielhaft an vier mit X-60 auf ein Stück Stahl aufgeklebten Meßstreifen des Typs 3/120 FB 4 durchgeführter Versuch bestätigt diese Annahme, wie Bild 78 zeigt. Der Effekt ist nicht sehr groß, zeigt aber, daß die Anwendung von temperaturkompensierten Meßstreifen, deren Koeffizienten zum Teil auf $\pm 0,5 \times 10^{-6}/\text{grad}$ angegeben werden, fragwürdig wird und ggf. zu unangenehmen Überraschungen führen kann.

Neben dem k-Faktor und dem Temperaturkoeffizienten muß noch eine weitere Größe von der Zwängung abhängen:

Konstante Feuchte (relativ in % bzw. absolut als Dampf- druck in Torr)	Temperaturkoeffizient auf Stahl in $10^{-6}/10^\circ\text{C}$ nach Klebung bei einer relativen Feuchte von		Zustand der Meßstreifen
	2 %	97 %	
29 %	-20	-10	nicht gealtert
15,5 Torr	-52	-68	
85 %	wegen irreversibler Entlastungsdrift nicht definiert	- 5	
29 %	- 2	+ 4	durch zahlrei- che Feuchte- und Tempera- turzyklen gealtert
15,5 Torr	-24	-19	
85 %	+ 14	+ 8	

Bild 78
Temperaturkoeffizienten auf Stahl geklebter Dehnungsmeßstreifen des Typs 3/120 FB 4 von Hottinger bei verschiedenen Klebe- und Versuchsbedingungen. Temperaturzyklus: 20°-34°-20°C

die Querempfindlichkeit. Es war oben gezeigt worden (vgl. Gl. (49)), daß zur Deutung der Größe der gemessenen Querempfindlichkeit Q_M die Annahme eines Einflusses der Zwängung erforderlich ist. Es ist daher naheliegend und sehr zu vermuten, daß unter diesen Umständen die Aufklebebedingungen und die gesamte Vorgeschichte des Meßstreifens für die Größe Q_M von Bedeutung sein werden. Darauf deuten auch die Untersuchungen von Charles T. Wu hin [L 27], der gefunden hat, daß Q_M bei konstanter Gitterform vom Trägermaterial, von der Art des Drahtes und seiner Querschnittsform sowie von den Klebebedingungen (bonding area und bonding strength) abhängt, d. h. also gerade jenen Bedingungen, die wesentlich den Zwängungseinfluß bestimmen. Vermutlich liegt hier die Ursache dafür, daß sich die Meßergebnisse von Wu und von Wieringa, die zum Teil die gleichen Meßstreifentypen untersucht haben, nicht grundsätzlich, aber doch um eine nahezu konstante Differenz unterscheiden; diese Differenz könnte auf unterschiedlichen Aufklebebedingungen beruhen. Es sei hier noch darauf hingewiesen, daß die Querbrückenstreifen entgegen der Annahme von Huggenberger auch querempfindlich sein müssen, da der Geometrieeffekt, wie oben gezeigt wurde, ganz sicher nicht zur Deutung der gemessenen Q_M -Werte ausreicht. Eine systematische Untersuchung des Zwängungseinflusses auf Q_M liegt jedoch noch nicht vor.

1.35 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß die feuchtebedingte Quellung bzw. Schrumpfung des Trägers von zum Teil erheblichem Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+ ist, während die Quellung des Klebers nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Größe dieses Einflusses hängt sehr wesentlich von der relativen Feuchte zur Zeit der Klebung, von der Meßlänge und von der Anzahl der nach dem Aufkleben durchlaufenen Feuchte- bzw. Wärmezyklen ab. Durch häufige Feuchte- oder Wärmewechsel wird der Einfluß verringert. Bei Halbleitern ist zu beachten, daß zur Vermeidung einer unerwünschten Vorspannung des Kristalls nicht nur die Temperatur sondern auch die relative Feuchte zur Zeit der Klebung zu beachten ist. Die durch die Quellung verursachten Zwängungsspannungen beeinflussen jedoch nicht nur Z^+ ,

sondern auch direkt den k-Faktor und vermutlich die Querempfindlichkeit sowie indirekt den Temperaturkoeffizienten.

1.4 Die feuchtigkeitsbedingte Korrosion des Meßdrahtes und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+

Feuchtigkeit führt nicht nur zu Isolationsstörungen und Quelleffekten, sie ist auch wesentlich mit Ursache für chemische Veränderungen der Oberfläche des Leitersystems, d. h. also für die Korrosion. Sie kann hier auf zwei Wegen erfolgen:

- Bildet sich auf dem Leiter ein auch nur teilweise zusammenhängender Feuchtigkeitsfilm, so ist die Voraussetzung für Korrosion durch Lokalelemente gegeben.
- Sind im Träger und/oder Kleber chemisch aggressive Substanzen enthalten, so kann in Gegenwart von Feuchtigkeit chemische Korrosion eintreten.

Zur Vermeidung von Korrosion muß der Leiter also wirklich vollständig von einem chemisch neutralen Trägerwerkstoff eingekapselt sein. Diese Forderung scheint bei den gekapselten Meßstreifen leicht erfüllbar und bei den gebräuchlichen Typen auch tatsächlich erfüllt zu sein. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß dies zumindest nicht immer ausreichend der Fall ist. An Hand einer Abschätzung der Korrosionsempfindlichkeit der Meßstreifen wird das auch verständlich: Ändert sich die Dicke des z. B. 4μ dicken Leiters eines Folienmeßstreifens auch nur um ein Angström Å , so erfolgt eine Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ von ungefähr 12×10^{-6} ; ändert sich der Durchmesser des Drahtleiters eines Meßstreifens um 1 Angström, so erfolgt eine Nullpunktdrift von $\Delta\epsilon^* \approx 5 \cdot 10^{-6}$. Das Abkorrodieren einer Atomschicht (ca. $2-2,5 \text{ Å}$) bewirkt also schon Nullpunktdriften im Bereich von $10 - 30 \times 10^{-6}$.

Die Messung des Einflusses von Korrosion ist wegen des gleichzeitigen Auftretens anderer Effekte sehr schwierig. Merkliche Korrosion ist nur bei relativen Feuchten über etwa 70 % zu erwarten; bei so hoher Feuchte tritt aber auch

Bild 79

Korrosionsbedingte Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ verschiedener auf Stahl geklebter Dehnungsmeßstreifen

Meßstreifentyp Kleber	rel. Feuchte in %	Temperatur in C	Zahl der Wärme- oder Feuchtezyklen vor Versuchsbeginn	Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ in 10^{-6} /Tag		Bemerkungen
				stromlos	bei 5 mA =	
Philips PR 9812 PR 9244	75	21	1	≤ 1	≈ 30	
	97	21	1	≈ 60	—	
	97	21		$\approx 30-40$	—	
	97	33	2	≈ 90	—	
Hottinger 6/120 FB 3 BC 6035	75	21	2	≤ 1	—	
	97	21		4-5	15-70	
Huggenberger BP 2/500 Philips GM 4479	75	20	unbekannt	≤ 1	bis 30	wegen Gefahr der Ablösung nicht genügend lange beobachtet
	97	20		—	—	
Philips PR 9830 PR 9244	75	23	ohne	≤ 5	—	gekapselter Fo- lienmeßstreifen
	97	23		60-70	—	
Budd ECG-141 Frischen XY	75	23	ohne	≤ 5	—	gekapselter Fo- lienmeßstreifen
	97	23		≤ 12	—	

schon Entlastungskriechen auf. Wird ein Abklingen des Kriechens abgewartet oder durch Wärme und/oder Feuchtezyklen beschleunigt, so ist mit Ablösungseffekten bzw. auch Korrosion der Bauteiloberfläche zu rechnen. Die im Folgenden beschriebenen Versuchsergebnisse geben daher nur ungefähre Anhaltswerte, zumal von Meßstreifen zu Meßstreifen innerhalb eines Typs erhebliche Streuungen auftreten können. Eventuell hängt die Korrosion auch noch von der Art der Zwängungsspannungen ab. Eine eingehendere Untersuchung der Korrosionseffekte erschien im Rahmen dieser Arbeit aber nicht sinnvoll, da die Notwendigkeit eines Feuchtigkeitsschutzes schon aus den anderen Untersuchungen hervorgeht.

Wird ein in feuchter Atmosphäre befindlicher Meßstreifen ständig von Gleichstrom durchflossen, so tritt zusätzlich eine Korrosion durch die infolge nicht ausreichender Isolation im Träger „vagabundierenden“ Nebenschlußströme auf. An einigen Meßstreifen wurde daher die Korrosion auch unter der Einwirkung eines ständigen Gleichstromes von 5 mA beobachtet.

In Bild 79 sind die Ergebnisse von Versuchen an fünf verschiedenen Meßstreifentypen eingetragen. Sie lassen erkennen, daß bei relativen Feuchten $\leq 75\%$ im stromlosen Zustand keine wesentliche Korrosion eintritt, bei ständigem Gleichstrom jedoch schon mit erheblichen Störungen zu rechnen ist. Ungekapselte Folienmeßstreifen wurden zwar auch untersucht, doch wurden aus den im Abschnitt 1.34.3 geschilderten Gründen keine eindeutigen Ergebnisse erhalten; sie wurden daher in Bild 79 nicht aufgenommen. Bild 80 zeigt eine außergewöhnlich starke Korrosion an einem Meßstreifen, der einige Jahre wechselnden Feuchten bis zu ca. 80°C ausgesetzt war. Etwa 50 % aller Meßstreifen dieser Lieferung zeigten derartige Schäden, so daß offenbar eine unsaubere Fabrikation vorlag.

1.5 Zusammenfassende Betrachtung der Änderung des Eingangswiderstandes Z^+ aufgeklebter Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber unter dem Einfluß von Feuchtigkeit

Im Abschnitt 1.1 waren die beiden Gl. (3) und (4) aufgestellt worden, die den Zusammenhang zwischen Z^+ bzw. $\Delta Z^+ / Z_0^+$ einerseits und der Dehnung sowie der verschiedenen durch Feuchtigkeit beeinflussten Störgrößen andererseits beschreiben. In den Abschnitten 1.2 bis 1.4 wurde der Einfluß der verschiedenen Störgrößen näher untersucht mit dem Ziel, die komplexen Störfunktionen \mathcal{U} und \mathcal{L} der

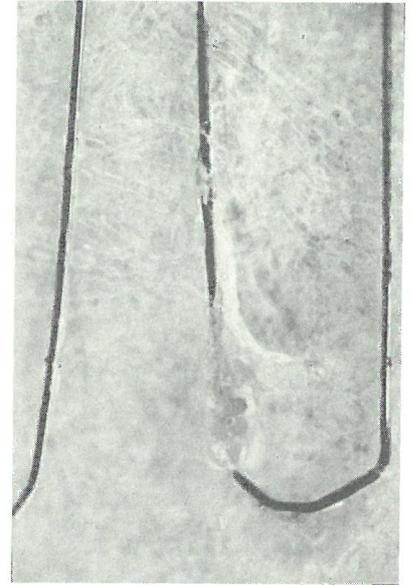


Bild 80
Korrosionsschäden an einem Dehnungsmeßstreifen, der mehrere Jahre wechselnden relativen Feuchten bis zu 80 % ausgesetzt war

Gl. (3) und (4) zu ermitteln. Dabei hatte sich gezeigt, daß es aus grundsätzlichen Gründen nicht möglich ist, \mathcal{U} und \mathcal{L} auch nur näherungsweise explizit zu bestimmen. Es konnten jedoch umfangreiche allgemeine Kenntnisse über \mathcal{U} und \mathcal{L} gewonnen werden, die es ermöglichen, das Verhalten der Meßstreifen und Halbleitergeber unter den verschiedenen Bedingungen zu verstehen. Sie geben vor allem auch Hinweise, welche Meßstreifen und Meßmethoden sowie Aufklebedingungen zu wählen sind, um die verschiedenen Störungen möglichst klein zu halten, und unter welchen Bedingungen mit erheblichen Störungen zu rechnen ist.

Als Ergebnis der Untersuchung lassen sich folgende Anforderungen an einen idealen Träger noch zusätzlich zu den üblichen, in der Literatur [L 11] beschriebenen Forderungen stellen:

Der Träger soll dielektrisch homogen und verlustarm sein; Träger und Kleber sollen dielektrisch möglichst gleich sein, der Träger soll möglichst wenig quellen.

2.1 Allgemeine Überlegungen

Im Kapitel 1. wurde der Einfluß von Feuchtigkeit auf ungeschützte Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber beschrieben. Dieser Einfluß kann nach der im Abschnitt 3 beschriebenen Methode sehr weitgehend ausgeschaltet werden. Diese den einzelnen Meßstreifen betreffende Maßnahme ist jedoch sinnlos, wenn die Feuchtigkeit in den Zuleitungen Störungen verursacht. Da zum Verschalten von Meßstreifen meist abgeschirmte Kabel (Koaxialleitungen) verwendet werden, handelt es sich bei den Zuleitungsstörungen hauptsächlich um Isolationsnebenschlüsse zwischen Mittelader und Abschirmung. Da die Zuleitungen meist über Lötstützpunkte mit den Anschlüssen eines Meßstreifens verbunden werden, sind auch deren Isolationseigenschaften in die Untersuchung einzubeziehen.

2.2 Die Kabelkenngrößen und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+

Die Eigenschaften eines homogenen Kabels sind ganz allgemein gekennzeichnet durch seine Eingangswiderstände, d. h. also durch den komplexen Leerlaufwiderstand Z_L und den komplexen Kurzschlußwiderstand Z_K . Es ist

$$Z_L = \frac{Z_0}{\text{Tang } \gamma \cdot \ell} \quad \text{und} \quad Z_K = Z_0 \cdot \text{Tang } \gamma \cdot \ell,$$

wobei $Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$ der Wellenwiderstand der Leitung ist (vgl. Kapitel 1, Abschnitt 1.22),

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} \quad \text{und } \ell \text{ die Leitungslänge}$$

Für den Eingangswiderstand Z^+ des Meßstreifens ist jedoch nur der ohmsche Widerstand im Parallelersatzschaltbild von Z_L von Bedeutung, denn nur dieser stellt bei der allein exakten Meßmethode mittels Abgleich nach Betrag und Phase – vgl. Abschnitt 1.22 – den tatsächlich wirksamen Nebenschluß zu Z^+ dar. Er wird praktisch ausschließlich durch die Größe $1/G'$ bestimmt, da R' gegenüber $1/G'$ stets vernachlässigbar klein ist. Für gebräuchliche Meßkabel gelten für Frequenzen zwischen etwa 100 Hz und 50 kHz folgende Werte:

- $R' \approx 20 \text{ bis } 200 \text{ m}\Omega \text{ pro m}$
- $C' \approx 50 \text{ bis } 200 \text{ pF pro m}$
- $L' \approx 20 \text{ bis } 150 \mu\text{H pro m}$
- $G' \approx \frac{1}{15 \text{ k}\Omega} \text{ pro m, je nach Feuchtigkeit und Frequenz.}$

Die wichtige Größe $1/G'$ kann direkt durch Messung von C und $\tan \delta$ (vgl. Kapitel 1) im Leerlaufall bestimmt werden. In Bild 81 ist der reziproke Ableitungsbelag $1/G'$ als Funktion der Frequenz beispielhaft für drei Kabel bei zwei verschiedenen Feuchten aufgetragen. Die Darstellung läßt er-

kennen, wie wichtig bei hohen Trägerfrequenzen die Auswahl des geeigneten Kabels ist und wie gefährlich lange Zuleitungen für das Meßergebnis werden können. Bei 100 m Kabellänge und 50 kHz Trägerfrequenz beträgt der Nebenschluß des gummiisolierten Kabels nur noch etwa 2–3 k Ω und ist damit schon so niedrig, daß der k-Faktor eines 600 Ω -Meßstreifens um ca. 25 % erniedrigt wird. Die polyäthylenisolierte Leitung liegt bei etwa gleichgroßem C um etwa eine Größenordnung besser; zumindest bei langen Leitungen und/oder hoher Frequenz sollte deshalb stets ein Kabel mit verlustarmer Polyäthylen- (oder auch Teflon-) Isolierung verwendet werden. Außer der k-Faktoränderung treten bei langen Kabeln natürlich auch leicht Nullpunktdriften auf, und zwar nicht nur durch Feuchteschwankungen, sondern auch durch mechanische Einflüsse, wie Kabelbewegungen, Druckstöße usw., weil diese Änderungen von C und evtl. auch von $\tan \delta$ und damit von $1/G'$ verursachen. Bei Dehnungsmessungen mit Gleichspannung gilt bezüglich

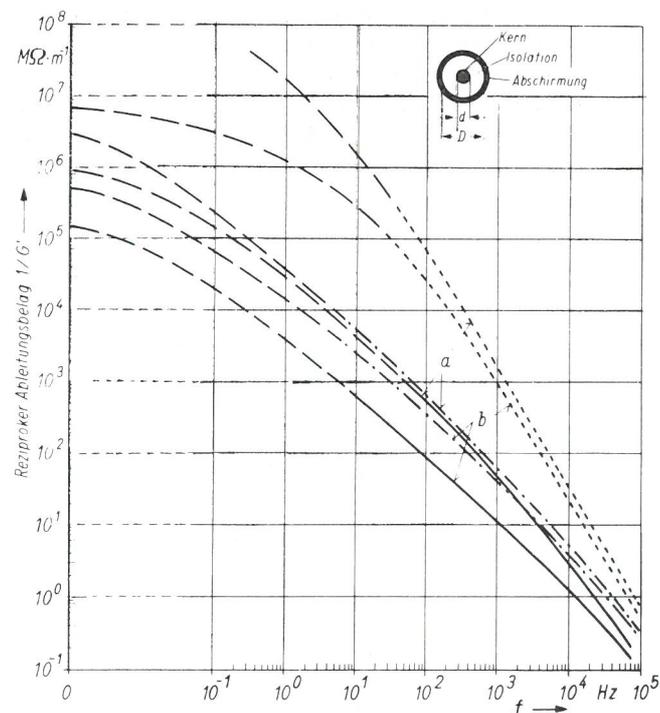


Bild 81
Reziproker Ableitungsbelag $1/G'$ verschiedener Kabel bei a) ca. 20 % rel. Feuchte und b) ca. 100 % rel. Feuchte als Funktion der Frequenz

- abgeschirmtes Kabel NLHCl;
 $d \approx 0,45 \text{ mm}, D \approx 1,7 \text{ mm}; \text{ Gummi}$
- abgeschirmte HF-Leitung;
 $d \approx 0,45 \text{ mm}; D \approx 1,7 \text{ mm}; \text{ Polyäthylen}$
- - - - - zwei eng verdrehte Schaltdrähte YV;
 $d \approx 0,6 \text{ mm}, D \approx 1,3 \text{ mm je Draht}; \text{ PVC}$

der Nullpunktdrift zwar der hohe Gleichspannungsnebenschlusßwiderstand, für dynamische Dehnungen gilt jedoch der für die Dehnungsfrequenz gültige Wert. Während bei Messung mit Trägerfrequenz der k-Faktor für alle Signale gleich stark verkleinert wird, werden bei Messung mit Gleichspannung Signale verschiedener Frequenz bezüglich der Amplitude und – bei nicht sinusförmigen Signalen – der Kurvenform verschieden verfälscht.

2.3 Die Isolationseigenschaften von Lötstützpunkten und ihr Einfluß auf den Eingangswiderstand Z^+

Die Anschlußdrähte von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern werden meist nicht direkt, sondern über Lötstützpunkte mit den Zuleitungen verbunden; dadurch wird vermieden, daß Zerrungen der Zuleitungen zu Beschädigungen der Meßstreifen führen. Diese Stützpunkte stellen jedoch auch eine neue Quelle für Isolationsstörungen dar: Sind die Stützpunkte auf Metall geklebt, so beträgt der Nebenschlußwiderstand Stützpunkt–Stützpunkt, der ja Z^+ direkt parallel liegt, das Doppelte des Isolationswiderstandes Stützpunkt–Metall; bei unsauberem Löten kommt noch ein Nebenschluß durch Oberflächenleitung hinzu. Es war daher zu prüfen, inwiefern und unter welchen Bedingungen dieser Nebenschluß unzulässig niedrig wird.

Bild 82 zeigt den Nebenschlußwiderstand zwischen den beiden Stützpunkten eines Stützpunktpaares als Funktion der Frequenz für zwei handelsübliche Lötstützpunktsorten. Die Stützpunkte der Firma Budd haben als Isolation mit Epoxydharz (?) getränktes Glasgewebe, jene von Baldwin Teflon; beide haben etwa gleich große Metallflächen und gleiche Isolationsschichtdicken. Die Darstellung zeigt, daß auch bei diesen hochwertigen Stützpunkten bei Frequenzen oberhalb etwa 5 kHz Isolationsstörungen auftreten. Diese Störungen sind zwar unbedeutend solange sie konstant sind, z. B. bei konstanter hoher Feuchte, doch gerade diese Voraussetzung ist meist nicht erfüllt. Es ist deshalb selbst bei guten Stützpunkten angebracht, diese in den Feuchteschutz

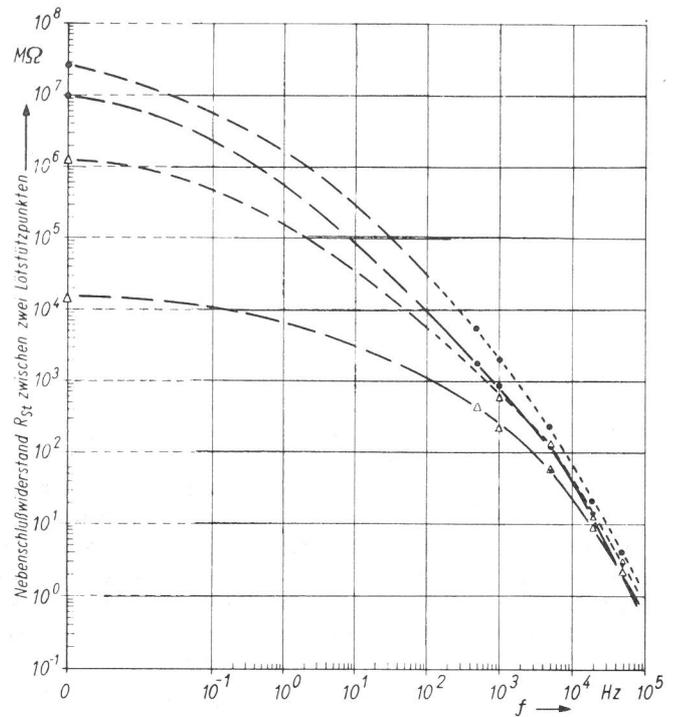


Bild 82
Nebenschlußwiderstand R_{St} zwischen zwei mit X-60 auf Stahl aufgeklebten Lötstützpunkten als Funktion der Frequenz

— Fabrikat Budd, kleiner Typ
- - - - - Fabrikat Baldwin, kleiner Typ
• bei 2 % rel. Feuchte
△ " 97 % " "

mit einzubeziehen, zumal auf diese Weise auch eine nachträgliche Verschmutzung der Stützpunkte und eine dadurch verursachte Oberflächenleitung vermieden wird.

3. Allgemeine Überlegungen zum Feuchtigkeitsschutz und ihre Anwendung auf den Schutz von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern

3.1 Die Wirkungsweise eines Feuchtigkeitsschutzes

Der Sinn eines Feuchtigkeitsschutzes besteht darin, den störenden Einfluß der Feuchtigkeit zu unterdrücken; das bedeutet keineswegs zwingend, daß der Zutritt von Feuchtigkeit zum geschützten Objekt zu verhindern ist. Die Wirkungsweise des Schutzes muß vielmehr dem „Störmechanismus“ angepaßt sein. Ein Beispiel möge das erläutern: Feuchtigkeit verursacht in Gegenwart von Sauerstoff auf Stahl Rostbildung, sobald die relative Feuchte so hoch ist, daß sich auf der Oberfläche zusammenhängende Bereiche eines adsorbierten Wasserfilms bilden können. Als Schutz genügt in diesem Fall z. B. eine gut haftende Lackschicht die auch in kleinsten Bereichen die Bildung eines derartigen Wasserfilms verhindert; die Schicht darf jedoch ohne Einbuße an Schutzwirkung die Wassermoleküle zur Stahloberfläche hindurchdringen lassen, so daß z. B. die Schichtdicke sehr klein sein kann. Soll dagegen eine Schutzschicht das Quellen eines Kunststoffteils verhindern, so muß gerade das Durchdringen von Wassermolekülen zum Kunststoff verhindert werden, während eine gute Haftung der Schutzschicht auf der Oberfläche völlig belanglos ist.

Im Falle der Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber soll der Feuchteschutz, wie im Kapitel 1 ausführlich begründet worden ist, jeglichen Zutritt von Feuchte zum Meßelement verhindern. Es ist daher falsch, die Wirksamkeit eines Feuchteschutzes für Dehnungsmeßstreifen danach zu beurteilen, ob unter einer auf Stahl aufgetragenen Schutzschicht bei hoher Feuchte Rost entsteht oder nicht; dieses Kriterium wird jedoch zum Teil zur Beurteilung der Güte von Schutzmitteln angegeben. Andere Autoren prüfen ihre Schutzmittel in der Weise, daß der Gleichstrom-Isolationswiderstand eines abgedeckten Meßstreifens bei Lagerung unter Wasser als Funktion der Zeit gemessen wird. Die Voraussetzung für die Verwendbarkeit dieser Methode, nämlich die genaue Kenntnis des Zusammenhangs Isolationswiderstand—relative Feuchte für aufgeklebte Meßstreifen und Zuleitungskabel, war jedoch, wie eine Befragung ergab, nicht erfüllt. Die Methode ist auch, wie im Kapitel 1 gezeigt worden ist, recht fragwürdig insofern, als manche Meßstreifen selbst bei 97 % relativer Feuchte noch Gleichstrom-Isolationswiderstände $\gg 10^4 \text{ M}\Omega$ zeigen (und andererseits dennoch bei dieser Feuchte unbrauchbar sind!), während andere unter gleichen Bedingungen nur noch $1 \text{ M}\Omega$ aufweisen.

Unter diesen Umständen ist es nicht verwunderlich, daß sowohl Prospekte als auch Literaturstellen [L 1—L 9] äußerst fragwürdige bis falsche Angebote und Empfehlungen enthalten, von denen einige ihrer negativen Bedeutung wegen hier genannt seien: Als Schutzmittel wird z. B. Schaumgummi angeboten; von einer Gummilösung und auch von anderen lösungsmittelhaltigen Schutzmitteln wird behauptet, die Abdeckschicht solle und könne so dünn wie möglich sein und könne sogar ohne Verlust an Schutzwirkung Blasen enthal-

ten; es werden lösungsmittelhaltige Produkte angeboten, die nach dem Trocknen schon ohne Bauteildehnung Schrumpfrisse aufweisen; andere enthalten hydrophile Lösungsmittel, die das Eindringen von Feuchte schon während des Trocknens erleichtern, oder solche Lösungsmittel, die Meßstreifen und/oder Kleber angreifen. Als Temperaturgrenzen für die Anwendung werden Werte bis zu 480°C genannt, obwohl es sich hierbei nur um die Grenze der Temperaturbeständigkeit des Materials handeln kann (bei 370°C ist der Wasserdampfpartialdruck gleicher relativer Feuchte immerhin um etwa den Faktor 10^4 größer als bei 20°C !).

Bezeichnenderweise enthält jedoch keiner der Prospekte und fast keine der Literaturstellen irgendeine Zahlenangabe, aus der man exakte Aussagen über die Schutzwirkung entnehmen könnte. Eine Literaturstelle [L 8] enthält allerdings folgende Angabe: Nach neun Monaten waren von 48 in feuchten Beton eingegossenen, sorgfältig geschützten Meßstreifen noch 44 innerhalb des Abgleichbereichs der Meßbrücke, der immerhin $\pm 6 \cdot 10^{-3}$ betrug; diese „Schutzwirkung“ wurde als genügend erachtet! In allen Prospekten fehlen auch Angaben über die entscheidende Bedeutung der richtigen Anwendungstechnik, besonders im Bereich der Zuleitungen; und auch in den Literaturstellen fehlt z. B. der Hinweis, daß Litze als Zuleitung durch die Schutzschicht hindurch ungeeignet ist, da die Feuchtigkeit längs der einzelnen Drähte innerhalb der Isolierung auch die beste Schutzschicht rasch unterwandert.

Alle diese Umstände zeigen, daß exakte Angaben über einen wirksamen Feuchtigkeitsschutz von Meßstreifen und Halbleitergebern nicht vorliegen oder zumindest nicht bekannt geworden sind. Es sei deshalb im Folgenden versucht, das Problem systematisch zu lösen.

Im Falle der Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber soll der Feuchtigkeitsschutz eine Trennung zwischen einem mehr oder weniger feuchten Außenraum und einem konstant trocken geschützten Innenraum bewirken, in dem sich das Meßelement befindet. Leider ist jedoch, wie noch gezeigt wird, eine völlige Trennung in der normalen Praxis nicht möglich, da auf die Verwendung von Kunststoffen — zumindest als Kleber- oder Dichtmaterial — nicht verzichtet werden kann, diese aber andererseits selbst im günstigsten Fall noch eine erhebliche spezifische Feuchtigkeitsdurchlässigkeit zeigen. Der Schutz kann daher nur bewirken, daß die pro Zeiteinheit in den geschützten Raum eindringende Feuchte möglichst klein gehalten wird.

Feuchtigkeit kann grundsätzlich auf sehr verschiedene Weisen durch eine Schutzschicht dringen. Wie Buchner [L 28] an Hand einer großen Anzahl von Versuchen gezeigt hat, erfolgt jedoch der Feuchtigkeitstransport durch Kunststoffe mit spezifischen Durchlässigkeiten, wie sie hier erforderlich sind (Permeationskoeffizienten $<$ einige

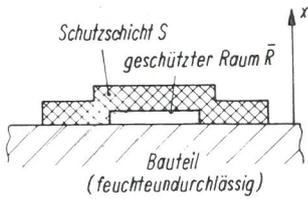


Bild 83
Schematische Darstellung eines
Feuchtigkeitsschutzes

$10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$), im wesentlichen durch Lösungsdiffusion. Das heißt also: die ursprünglich trockene Schutzschicht absorbiert an ihrer Außenfläche aus der feuchten Umgebung eine dem Gleichgewichtszustand entsprechende Wassermenge, von der dann etwas auch in die äußere Randschicht adsorbiert (gelöst) wird; dadurch entsteht in der Schutzschicht ein Konzentrationsgefälle von außen nach innen, das dann die Diffusion auslöst. Materialspezifisch entscheidend ist also die Sättigungskonzentration in der äußeren Randschicht und der Diffusionskoeffizient.

Die Diffusion der Feuchtigkeit durch die Schutzschicht sowie die „Aufladung“ des geschützten Raumes lassen sich näherungsweise wie folgt beschreiben:

Es sei (vgl. Bild 83)

- d_s = Dicke der Schutzschicht S
- \bar{R} = geschützter Raum, ausgefüllt mit dem DMS bzw. Halbleitergeber und Luft
- d_R = Dicke des geschützten Raumes \bar{R}
- q_R = Oberfläche von \bar{R}
- V_R = Volumen von \bar{R}
- c = Feuchtekonzentration
- C_a = Feuchtekonzentration in der Außenschicht von S
- C_i = Feuchtekonzentration in der Innenschicht von S
- C_R = Feuchtekonzentration in \bar{R}
- I_s = Diffusionsstrom der Feuchte durch S nach \bar{R}
- D_S = Diffusionskoeffizient in S
- P_S^* = Permeationskoeffizient in S
- D_R = Diffusionskoeffizient in \bar{R}
- L_S = Löslichkeitskoeffizient für Wasser in S
- L_R = Löslichkeitskoeffizient für Wasser in \bar{R}
- P_i = Wasserdampfpartialdruck in \bar{R}
- P_a = Wasserdampfpartialdruck im Außenraum (als konstant angenommen)
- t_v = Versuchszeit

Nach dem 1. Fickschen Gesetz (z. B. [L 16, L 29]) gilt für einen Feuchtestrom I in x -Richtung allgemein

$$I = q \cdot D_S \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

Ist D_S unabhängig von c und x , was für kleine c – wie es hier auftreten – und homogenes Material angenommen werden kann [L 28–L 30 und L 36], so wird im stationären Zustand $\partial c / \partial x = (C_a - C_i) / d_s$. Nach dem Henryschen Gesetz (z. B. [L 29]) ist ferner bei konstanter innen und außen gleicher Temperatur $C_{a,i} = L_S \cdot P_{a,i}$, solange C_i und C_a (oder zumindest die Differenz $C_a - C_i$) klein sind und zwischen Wasserdampf und Schutzschichtmaterial keine Reaktionen stattfinden; auch diese Voraussetzung gilt näherungsweise für Materialien – z. B. reine Kohlenwasserstoffe –, die für Schutzzwecke hoher Anforderung in Frage kommen [L 28–L 30 und L 36]. Damit wird hier, da die Anordnung praktisch nahezu eben ist,

$$I_s = \frac{q_R (P_a - P_i) \cdot L_S \cdot D_S}{d_s} = \frac{q_R (P_a - P_i)}{d_s} \cdot P_S^*$$

mit $L_S \cdot D_S = P_S^*$ = Permeationskoeffizient. Durch den Feuchtestrom I_s wird die Feuchtekonzentration C_R , die gemäß $C_R = L_R \cdot P_i$ stets P_i proportional ist – formal auch dann, wenn im geschützten Raum R kein Luftraum wäre –, geändert. Da C_R unter den bei DMS-Schutzproblemen vorliegenden Bedingungen im ganzen Volumen V_R angenähert als konstant anzusehen ist, wird

$$\frac{\partial C_R}{\partial t} = \frac{I_s}{V_R} = \frac{q_R (P_a - P_i) \cdot P_S^*}{d_s \cdot V_R} = \frac{(P_a - P_i) \cdot P_S^*}{d_s \cdot d_R}$$

bzw.

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = \frac{(P_a - P_i) P_S^*}{d_s \cdot d_R \cdot L_R}$$

Da P_a als zeitlich konstant angenommen wurde, folgt weiter

$$\frac{\partial (P_i - P_a)}{\partial t} = \frac{-(P_i - P_a) \cdot P_S^*}{d_s \cdot d_R \cdot L_R}$$

und schließlich

$$P_i = (P_{i_0} - P_a) \cdot \exp\left(\frac{-P_S^* \cdot t}{d_s \cdot d_R \cdot L_R}\right) + P_a; t = \frac{d_s \cdot d_R \cdot L_R}{P_S^*} \cdot \ln\left(\frac{P_{i_0} - P_a}{P_i - P_a}\right) \quad (50)$$

wobei $P_{i_0} = P_i$ zur Zeit $t = 0$ ist. Gleichung (50) ermöglicht für gegebene Versuchsbedingungen – Materialkonstanten P_S^* und L_R , Schutzschicht- und Schutzraumdicken d_s und d_R sowie Anfangswerte P_{i_0} und P_a – eine Berechnung der Schutzzeit t_s , d. h. der Zeit, in der P_i von P_{i_0} bis zu einem maximal zulässigen Wert ansteigt. Sie läßt ferner sofort erkennen, welche Größen zur Erzielung einer möglichst großen Schutzzeit wesentlich sind: bei gegebenen Anfangsbedingungen P_{i_0} und P_a eine große Schichtdicke d_s und ein kleiner Permeationskoeffizient P_S^* , was unmittelbar einleuchtend ist; ferner eine große Feuchteaufnahmefähigkeit von \bar{R} pro Einheit der Oberfläche q_R , was durch großes d_R und/oder L_R erreicht werden kann. Sie gilt für den bereits erreichten Gleichgewichtszustand, berücksichtigt also nicht die Anlaufzeit τ , d. h. die Zeit, in der sich in der Schutzschicht erst ein gleichmäßiges Konzentrationsgefälle $(C_a - C_i) / d_s$ ausgebildet. Ist am Anfang ($t = 0$) die Feuchtekonzentration in S gleich C_S und für $t > 0$ außen C_a und innen C_i , so gilt für τ gemäß der durch Bild 84 gegebenen Definition, vgl. z. B. [L 31],

$$\tau = \frac{d_s^2}{6 D_S} \left[1 - \frac{3 (C_S - C_i)}{C_a - C_i} \right] \quad (51)$$

τ kann also je nach den Anfangsbedingungen die Schutzzeit t_s nach Gl. (50) verlängern oder verkürzen. Die insgesamt längste Schutzzeit wird für $C_S = C_i = 0$ erreicht. Während $C_i = 0$ meist nicht zu erreichen sein wird, läßt sich $C_S \approx 0$ durch geeignete Trocknung stets erzielen, sofern ein geeignetes Schutzmittel verwendet wird. Auf die Bedeutung der Anlaufzeit τ und der Anfangsbedingungen wird später noch näher eingegangen (s. Abschnitt 3.6). Für die besten organischen Materialien ergibt sich für eine 2 mm dicke Schicht bei $C_S = C_i = 0$ für die Anlaufzeit $\tau \approx 60$ bis 80 Tage bei 20°C ; dieser immerhin beachtliche Wert ist t_s hinzuzufügen. Ist jedoch $C_S > C_i + (C_a - C_i) / 3$, so wird τ negativ, d. h. es ist t_s um dieses τ zu verringern. Es sollte daher stets $C_S \approx 0$ angestrebt werden, da sonst allein die in der Schutzschicht gespeicherte, im Verhältnis zur Feuchteaufnahmefähigkeit eines Meßstreifens große Feuchtemenge leicht ausreicht, den „geschützten“ Meßstreifen zu durchfeuchten.

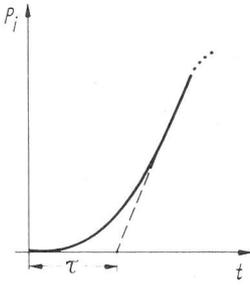


Bild 84
Definition der Anlaufzeit τ nach Barrer [L 32]

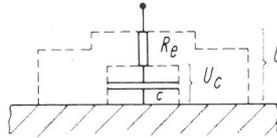


Bild 85 a
Elektrisches Analogon
zum Schutzproblem

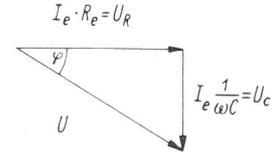


Bild 85 b
Die Phasenlage bei periodischen
Druckschwankungen

Der durch Bild 84 und Gl. (50) beschriebene Vorgang lässt sich sehr einfach und vorteilhaft auch durch ein elektrisches Analogon beschreiben: die Aufladung eines Kondensators C über einen Widerstand R (vgl. Bild 85).

Es entspricht:

$$\left. \begin{aligned} P_a, P_i &\hat{=} U, U_C \\ V_R \cdot L_R &\hat{=} C \\ \frac{d_s}{q_R \cdot P_S} &\hat{=} R_e \end{aligned} \right\} I_e = \frac{U - U_C}{R_e}$$

Damit wird $U_C \hat{=} (U_{C_0} - U) \cdot e^{-\frac{t}{R_e C}} + U$ (52)

Diese Darstellung erleichtert die Lösung folgenden Problems:

Ist $U = U_0 + U_m \cdot \sin(\omega t - \varphi)$ eine Gleichspannung mit überlagerter periodischer Wechselspannung – d. h. ist P_a periodischen Schwankungen unterworfen –, so bilden C und R_e gemäß $Z = R_e + 1/j\omega C$ für U einen komplexen Widerstand. Durch den Feuchteschutz wird nun, wenn U_0 „ungefährlich“ ist, angestrebt, das $U_C \ll U$ bleibt, z. B. $U_C : U = 1 : x$. Für diesen Fall wird dann

$$\frac{U_C}{U} = \sin \varphi = 1 : x \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega R_e C}$$

Daraus folgt als Bedingung für den Feuchteschutz

$$\frac{\omega}{x} = \frac{P_S^*}{d_s \cdot d_R \cdot L_R} \quad (53)$$

Gl. (53) zeigt, was auch unmittelbar einleuchtend ist, daß die Anforderung an den Schutz bei kleinem ω besonders schwer zu erfüllen ist. Wie Bild 86 a zeigt, hat der Wasserdampfpartialdruck der freien Atmosphäre in Bodennähe über das Jahr hin einen angenähert sinusförmigen Verlauf mit einer Kreisfrequenz $\omega \approx 7,17 \cdot 10^{-4}/h$, während er gemäß Bild 86 b im Verlauf eines Tages angenähert konstant bleibt. Soll z. B. die „gefährliche“ Jahresschwankung von $\pm 4,5$ Torr um den Mittelwert 6,5 Torr im Verhältnis 1 : 10 unterdrückt werden, so muß P_S^* bei einer Schutzschichtdicke von $d_s = 2$ mm, einer Meßstreifendicke von $d_R = 0,1$ mm und einem Löslichkeitskoeffizienten $L_R \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{Torr}^{-1}$ (vgl. Bild 87) einen Wert von $P_S^* \approx 4,3 \cdot 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ haben. Dieser Wert wird, wie in Abschnitt 3.3 gezeigt wird, selbst von den besten für Schutzzwecke geeigneten Materialien nicht ganz erreicht, so daß besondere Maßnahmen zu ergreifen sind, worauf noch eingegangen wird. Es sei noch vermerkt, daß die Anforderung an P_S^* durch die Anlaufzeit τ der Schutzschicht etwas gemildert wird.

Bei einer Änderung der Temperatur T ändert sich, wie noch im Abschnitt 3.3 gezeigt wird, auch P_S^* im gleichen Sinne. Die im geschützten Raum eingeschlossene, meist im Träger und im Kleber befindliche Feuchtemenge entsprechend C_R bleibt bei im Vergleich zu t_S kurzen Temperaturschwankungen praktisch konstant; wie aus Bild 57 hervorgeht, bleibt dann auch die relative Feuchte näherungsweise konstant, so daß P_i dadurch zwangsläufig entsprechend der Temperatur-Dampfdruck-Kurve ansteigt und L_R gemäß $L_R = C_R/P_i$ ebenso absinkt. Da das Feuchtigkeitsaufnahmevermögen jedenfalls mit sinkender Temperatur nicht kleiner wird, ist bei Abkühlung nicht mit einer Übersättigung des geschützten Raumes, d. h. mit dem Auftreten von flüssigem Wasser, zu rechnen.

In der Praxis des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern treten besonders drei Fälle auf:

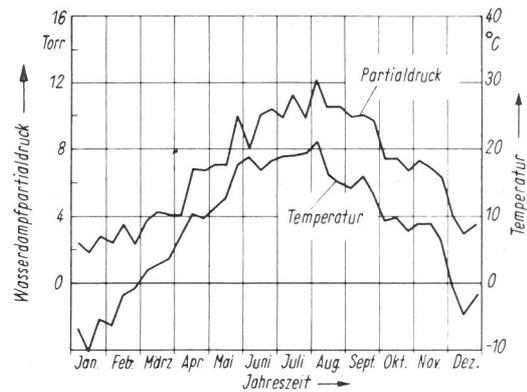


Bild 86 a
Der Wasserdampfpartialdruck und die Temperatur, jeweils gemittelt über 10 Tage, im Verlaufe des Jahres 1963, gemessen vom Meteorologischen Institut der Freien Universität in Berlin-Dahlem

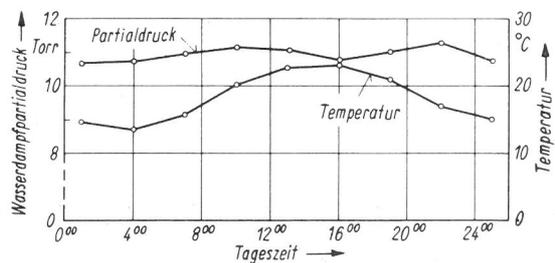


Bild 86 b
Mittlerer Tagesverlauf des Wasserdampfpartialdrucks und der Temperatur im Juli 1964, gemessen vom Meteorologischen Institut der Freien Universität in Berlin-Dahlem

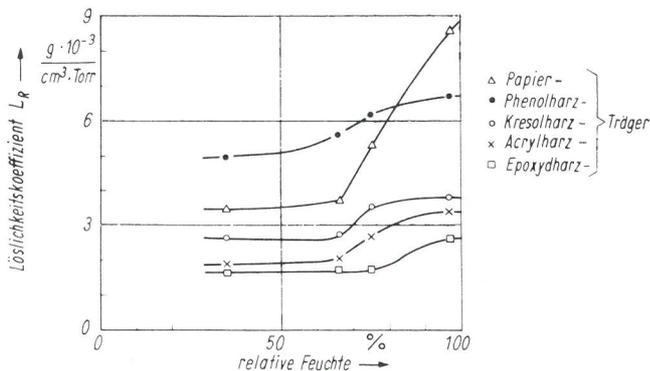


Bild 87 a
Mittlere Löslichkeitskoeffizienten L_R verschiedener Träger, gemessen bei ca. 21°C

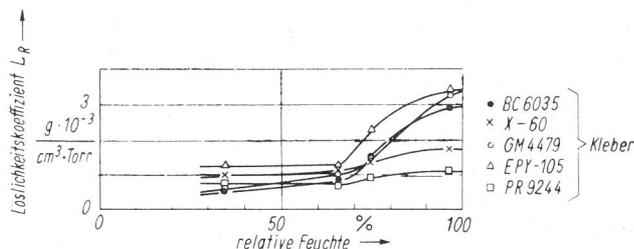


Bild 87 b
Mittlere Löslichkeitskoeffizienten L_R verschiedener Kleber, gemessen bei ca. 21°C

- a) In heizbaren Räumen ist über das ganze Jahr hin $T \approx 20 - 25^\circ\text{C}$, d. h. in grober Näherung konstant. Der Wasserdampfpartialdruck variiert aber, wie Bild 86 a zeigt, im Jahresverlauf in der freien Atmosphäre zwischen ca. 2 und 11 Torr; die gleiche Variation tritt auch in diesen Räumen auf, sofern nicht die Feuchte beein-

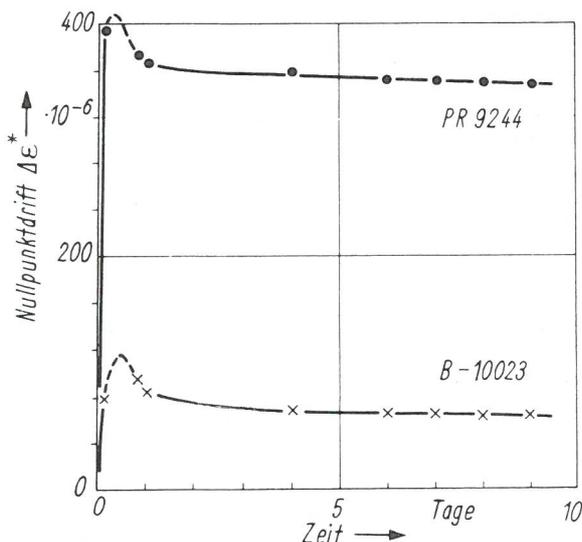


Bild 88
Nullpunktdrift von Dehnungsmeßstreifen mit Papierträgern (Typ Philips PR 9210) nach dem Abdecken mit Feuchteschutzmitteln
Bauteil: 6 mm dicker Stahlbalken
Schutzmittel: PR 9244: chemisch härtend, jedoch eine langsam verdunstende Komponente enthaltend
B-10023: physikalisch, d. h. durch Verdunsten eines Lösungsmittels härtend

flussende Maßnahmen getroffen wurden. Hinsichtlich des Feuchteschutzes gilt also $P_a \approx 2 - 11$ Torr bei $T \approx$ konstant. Interessiert nur die Schwankung um einen „ungefährlichen“ Mittelwert von P_i , so ist Gl. (53) anzuwenden. Kommt es auf eine möglichst große Schutzzeit t_S an, so ist Gl. (50) zu benutzen, dabei jedoch zu beachten, daß der für den angestrebten Schutzzeitbereich gültige Mittelwert der Funktion

$$\ln \left(\frac{P_{i0} - P_a(t)}{P_i - P_a(t)} \right) \quad \text{einzusetzen ist.}$$

- b) Im Freien tritt neben der Variation von P_a zwischen ca. 2 – 11 Torr auch eine Temperaturschwankung zwischen etwa -10°C und $+20^\circ\text{C}$ auf. Infolgedessen ändert sich nun auch P_i als Funktion der Temperatur und damit der Zeit. In diesem Falle gilt wiederum Gl. (53) bzw. Gl. (50), doch ist der Wert des \ln in Gl. (50) angenähert konstant, sofern $P_{i0} \ll P_a$. Dafür ist nun der Mittelwert von P_S^* und L_R einzuführen, die ja beide eine Funktion der Temperatur sind.
- c) Bei Messungen unter Wasser liegt stets 100 % relative Feuchte vor; der Wasserdampfpartialdruck P_a entspricht dabei stets dem Sättigungsdruck bei der Temperatur des Wassers. Im Falle schwankender Temperatur bleibt der Wert des \ln wie im Fall b) angenähert konstant, da, wie oben erläutert, bei Temperaturschwankungen die relative Feuchte im geschützten Raum konstant bleibt. Für P_S^* und L_R sind wiederum die Mittelwerte einzusetzen.

Bei der Behandlung dieser drei Beispiele wurden etwas idealisierte Voraussetzungen gemacht, die tatsächlich meist nicht streng gültig sind. Die Beispiele zeigen jedoch, nach welchen Gesichtspunkten bei praktischen Schutzproblemen vorzugehen ist.

3.2 Die Anforderungen an einen Feuchtigkeitschutz

Im Abschnitt 3.1 wurde die Wirkungsweise des Feuchteschutzes beschrieben und gezeigt, welche Größen für eine lange Schutzzeit t_S wesentlich sind. Die Festlegung dieser Größen und die Entscheidung über das beste Schutzmaterial kann jedoch nicht in freier Wahl erfolgen, sondern muß den jeweiligen Verhältnissen angepaßt werden. Folgende Gesichtspunkte sind bei der Wahl zu beachten:

- Der Schutz darf die Messung mit dem DMS nicht stören. Insbesondere darf das Bauteil, dessen Dehnung mit Meßstreifen gemessen werden soll, durch die Schutzschicht nicht unzulässig versteift werden (vgl. hierzu Abschnitt 3.5). Ferner darf der Schutz die Meßelemente nicht beeinflussen, was z. B. bei lösungsmittelhaltigen Schutzmaterialien meist der Fall ist.
- Das Schutzmaterial muß in einem ausreichenden Temperaturbereich einen hinreichend kleinen Permeationskoeffizienten P_S^* haben und in diesem Bereich chemisch und physikalisch stabil bleiben.
- Das Schutzmaterial muß in einem weiten Temperaturbereich trocken und feucht gut auf dem Bauteil haften und zugleich eine ausreichende obere Dehnungsgrenze besitzen.
- Das Schutzmaterial muß auch feucht ein guter Isolator sein, da es unmittelbar die Meßstreifenanschlüsse berühren muß (vgl. Abschnitt 3.6).
- Das Schutzmaterial muß technisch praktikabel sein.

f) Bei ungekapselten Folienmeßstreifen muß das Schutzmaterial gut und dicht auf der Folie haften und darf nicht korrosiv wirken.

Diese Forderungen bedingen folgende Einschränkungen:

- a) Die Schutzschichtdicke d_S und/oder der E-Modul des Schutzmaterials müssen so klein sein, daß die Steifigkeit des Bauteils durch die Schutzschicht nicht wesentlich beeinflusst wird. Diese Forderung gilt natürlich auch für den Meßstreifen selbst, was leicht übersehen wird. — Lösungsmittel führen stets zu einer Quellung von Träger und Kleber des geschützten Meßstreifens und damit zu einer Nullpunktdrift. Viele Lösungsmittel greifen aber auch chemisch und/oder physikalisch Träger und Kleber direkt an (Azeton z. B. löst Acrylharz und zerstört die Kleber X-60, PR 9244, Eastman 910). Bild 88 zeigt beispielhaft die Nullpunktdrift zweier Meßstreifen mit Papierträger nach dem Überziehen mit einer Feuchteschutzschicht. Lösungsmittelhaltige Schutzmittel — und gleiches gilt auch für chemisch härtende mit einer flüssigen Komponente — wären deshalb nur dann überhaupt diskutabel, wenn sie außergewöhnlich niedrige P_S^* -Werte aufweisen würden, was jedoch nicht der Fall ist (vgl. Abschnitt 3.3); sie sind allein schon deshalb zu verwerfen. Lösungsmittel machen darüber hinaus die Anwendung von Trockenmitteln unter der Schutzschicht zur Vergrößerung von L_R unmöglich, da die Ad- und Absorber sich sofort mit Lösungsmittel beladen würden, chemische Trockenmittel aber wegen der Korrosionsgefahr ausscheiden. Ähnlich einzustufen sind auch Materialien, die die Meßelemente durchfetten; hierzu gehören z. B. auch die Wachse bei Temperaturen oberhalb des Schmelzbereiches. Gegen Durchfettung lassen sich jedoch sehr viel einfacher geeignete Maßnahmen (z. B. eine Doppelschicht aus Wachs und einem anderen Material) ergreifen als bei Lösungsmitteln. Bei bestimmten Wachsen ist ein solches Verfahren wegen ihrer sehr kleinen P_S^* -Werte auch sinnvoll.
- b) Um unter der großen Anzahl von Kunststoffen eine kleine Gruppe zu Schutzzwecken geeigneter mit kleinem P_S^* herauszufinden, ist es zweckmäßig, die Kunststoffe unter Verwendung der umfangreichen Literatur, z. B. [L 28, L 33–L 38], systematisch nach ihren Permeationseigenschaften zu ordnen. Der kleinstmögliche Permeationskoeffizient P_S^* wird erhalten, wenn sowohl L_S als auch D_S minimal sind. Aus den in [L 33–L 38] genannten zahlreichen Untersuchungen ergibt sich nun folgendes:

Wasser ist eine polare Flüssigkeit; es löst sich daher besser in polaren als in unpolaren Stoffen, so daß polare Substanzen als Feuchteschutzmittel zu verwerfen sind [L 28, L 36, L 37]. Weichmacher, besonders hydrophile, pflegen L_S meist zu vergrößern [L 28, L 33, L 36], desgleichen wächst L_S mit steigender Neigung zur quellungsbedingten Volumenvergrößerung [L 36]; entsprechende Stoffe sind daher als Schutzmittel nicht geeignet. Steigende Kristallinität verkleinert L_S [L 28, L 33, L 36], während größere Vernetzung ohne wesentlichen Einfluß ist [L 28].

Der Diffusionskoeffizient D_S ist sozusagen ein Maß für die innere „Lockerheit“ der Struktur. Die H_2O -Moleküle müssen ja auf ihrer Wanderung durch Lücken in der Struktur, insbesondere durch solche, die kurzzeitig infolge der thermischen Bewegung der einzelnen Strukturelemente gegeneinander entstehen, von Platz zu Platz weiterspringen (aktivierte Diffusion). Je „straffer“ daher die Struktur ist — je höher also auch der Ordnungszustand — desto kleiner ist D_S [L 28, L 37]. Je größer ferner die — vermutlich undurchdringlichen — kristallinen Bereiche sind, desto kleiner ist wiederum D_S [L 28, L 33]. Gesucht wird also eine Substanz mit möglichst hohem Ordnungszustand. Weichmacher und überschüssige Vernetzer (Härter) verursachen eine Lockerung und damit Vergrößerung von D_S [L 28]; auch mechanische Spannungen können D_S vergrößern [L 28].

Wenig oder gar nicht polar sind die reinen Kohlenwasserstoffe. Unter ihnen sind z. B. Polyisobutylen und mikrokristallines Wachs Substanzen, die keine Weichmacher, Vernetzer oder korrosive Bestandteile enthalten, chemisch inaktiv sind und nach Angaben in der Literatur [L 30], wie zu erwarten, sehr kleine Permeationskoeffizienten P_S^* besitzen. Da ihre Moleküle mangels Vernetzung sehr beweglich sind, beruht ihr kleines P_S^* nicht auf einem kleinen D_S , sondern auf sehr kleinem L_S und ist somit Ausdruck ihres unpolaren Charakters (vgl. auch Abschnitt 3.3). Diesen beiden Stoffen ist daher bei der Auswahl geeigneter Schutzmaterialien besondere Beachtung zu widmen. Durch Zusatz geeigneter — keinesfalls hydrophiler — Füllstoffe lassen sich ihre Eigenschaften noch verbessern (vgl. Abschnitt 3.3).

Bei der Auswahl der meisten in der Literatur zum Schutz von Meßstreifen empfohlenen Materialien sind obige Überlegungen offenbar gar nicht oder nicht genügend be-

Bild 89
 P_S^* , L_S - und D_S -Werte verschiedener Silicone
und Kohlenwasserstoffe bei ca. 20°C

Material	P_S^* in $g \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1} \cdot h^{-1}$	L_S in $g \cdot cm^{-3} \cdot Torr^{-1}$	D_S in $cm^2 \cdot h^{-1}$	Autor
Silopren K ₁	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	Bayer-Prospekt
Silopren K ₂	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$0,84 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Bayer-Prospekt
Silicon-Lack	$0,8 \cdot 10^{-6}$	—	—	eigene Messung
Silicongummi	$3 \cdot 10^{-6}$	—	—	Lebovits [L 36]
Polyisobutylen	$2 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	BASF-Prospekt eigene Messung
Mikrokristallines Wachs	$0,9 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	eigene Messung
Paraffin	$0,2 \cdot 10^{-9}$	$0,17 \cdot 10^{-5}$	$12 \cdot 10^{-5}$	Heering [L 35] Laudolt-Börnstein
Ceresin	$0,6 \cdot 10^{-9}$	—	—	Taylor, Herrmann, Kemp [L 30]

achtet worden. So wird z. B. immer wieder Silicongummi oder Siliconharz empfohlen, obwohl diese polar sind und daher, wie z. T. schon aus Prospektangaben hervorgeht, sehr große Permeationskoeffizienten besitzen (vgl. Bild 89). Auch werden häufig Stoffe angeboten, die zum Aushärten einen Vernetzer benötigen, z. B. Thiokole. Allen diesen Stoffen ist eigen, daß zum hinreichenden Aushärten in technisch annehmbarer Zeit entweder die Temperatur erhöht oder Vernetzer im Überschuß zugegeben werden muß. Da eine genügende Temperaturerhöhung häufig nicht möglich ist, wird meist der zweite Weg gewählt. Durch den Überschuß an Vernetzer entstehen aber Lockerstellen, die zu einer Vergrößerung von P_S^* und auch der spezifischen Leitfähigkeit führen. — Auf die Unbrauchbarkeit lösungsmittelhaltiger Materialien wurde schon oben mehrfach hingewiesen. Hier ist noch hinzuzufügen, daß ihre Permeationseigenschaften während des gerade bei guten Mitteln langdauernden Trocknens undefiniert sind, nach Abschluß des Trocknens aber meist durch Schrumpfungsrisse beeinflusst werden.

Ein besonders kleiner Permeationskoeffizient ist wegen des sehr hohen Ordnungszustandes bei den Metallen zu erwarten; Literaturangaben hierüber konnten aber nicht gefunden werden. Zunächst ist es fraglich, ob überhaupt eine Lösung von H_2O in Metall auftritt; eventuell erfolgt nur eine chemische Reaktion an der Metalloberfläche [L 39], die einen Zerfall des H_2O -Moleküls zur Folge hat. Diffundieren dann Wasserstoff und Sauerstoff getrennt, so kann u. U. auch ohne besondere Energiezufuhr eine Rekombination stattfinden. Doch selbst der Permeationskoeffizient, errechnet aus D-Werten von W. Seith [L 40] und L-Werten von Landolt-Börnstein, des sehr kleinen Wasserstoffatoms ist z. B. im α -Eisen bei 20°C mit ca. $1-2 \cdot 10^{-13} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ noch sehr viel kleiner als jener von H_2O in Kunststoffen mit besonders kleinem Permeationskoeffizienten. Wenn aber eine Lösung stattfindet, so ist sie sicher sehr viel kleiner als in Kunststoffen. Die Diffusion von H_2O in Metallen läßt sich in grober Näherung wie folgt abschätzen (vgl. Bild 90): Die Diffusionskoeffizienten [L 22] von Stickstoff und Kohlenstoff in α -Eisen sind etwa 7–8 Größenordnungen kleiner als die von H_2O in mikrokristallinem Wachs. Die Atomradien [L 23] von N (0,71 Å) und C (0,77 Å) sind aber viel kleiner als der „Molekülradius“ von H_2O (0,96 Å), so daß der Diffusionskoeffizient von H_2O in α -Eisen sicher noch erheblich kleiner ist als jener von N und C. Selbst wenn also die H_2O -Löslichkeit in Metallen gleich der in Kunststoffen wäre, würde der Permeationskoeffizient mehr als 7 Größenordnungen kleiner sein. Aus diesem Grunde ist es naheliegend, zur Verbesserung des Feuchteschutzes aus organischen Substanzen auf die Kunststoffabdeckung zusätzlich noch eine sehr dünne Metallfolie aufzukleben, worauf später noch näher eingegangen wird.

- c) Um auf einer Oberfläche gut kleben zu können, muß das Schutzmaterial hinreichend dicht und innig mit der Oberfläche in Verbindung gebracht werden, damit die — je nach Art der zu verklebenden Stoffe verschiedenen — Bindungskräfte wirksam werden können. Dünnflüssig aufgetragene lösungsmittelhaltige Stoffe kommen zwar bald in innigen Kontakt mit der Oberfläche, scheiden aber schon aus oben genannten Gründen aus. Zweikomponentenstoffe können unausgehärtet ebenfalls flüssig sein. Sind sie ausgehärtet gummielastisch, so zeigen sie zum Teil auch bei starken Feuchte- und Temperaturwechslern

hervorragende Haftfähigkeit; Thiokole z. B. haften selbst auf Teflon noch recht gut. Hartelastisch aushärtende Stoffe verlieren meist ihre Haftfähigkeit bei hoher Feuchte — besonders unter Wasser —, da die durch die Quellung verursachten Scherkräfte die Haftkräfte übersteigen. Ther-

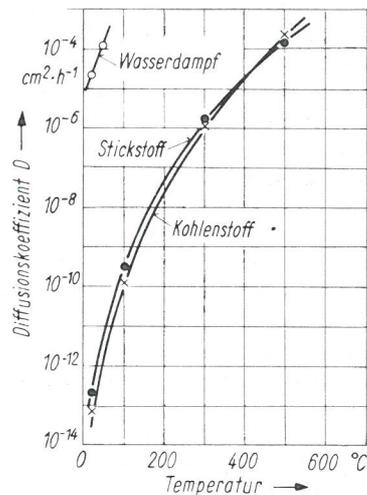


Bild 90
Vergleich der Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf in mikrokristallinem Wachs und Kohlenstoff bzw. Stickstoff in α -Eisen

moplastische Materialien (z. B. viele Wachse) werden durch Erwärmung hinreichend dünnflüssig. Infolge ihres großen Ausdehnungskoeffizienten treten aber beim Abkühlen in der Klebegrenzschicht so hohe Scherspannungen auf, daß meist schon ohne Bauteildehnung eine Ablösung erfolgt. Aufknetbare Substanzen — z. B. manche mikrokristalline Wachse oder Gemische aus Polyisobutylen mit Wachsen, Harzen und/oder anderen Füllstoffen — zeigen ein zäh-plastisches Verhalten; im hauptsächlich interessierenden Temperaturbereich von 10 bis 40°C beginnen sie schon bei geringer Schubbeanspruchung zu fließen (vgl. Bild 91). Beim Aufkneten fließen sie daher auf die Oberfläche. Je klebriger und knetbarer sie sind, desto mehr neigen sie allerdings auch zu ungewolltem Fließen; durch geeignete Kombination mit Füllstoffen läßt sich dieser Vorgang jedoch in zulässigen Grenzen halten. Aus Bild 91 folgt z. B., daß das eigene Versuchsprodukt (spezifisches Gewicht ca. $0,93 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), in 3 mm Schichtdicke auf eine senkrechte Fläche aufgetragen, erst oberhalb etwa 60°C abwärts zu fließen beginnt. Da sie oberhalb des Einfrierbereiches zäh-plastisch bleiben, entstehen durch Quellung keine unzulässig hohen Scherspannungen, so daß die Haftung auch unter Wasser erhalten bleibt.

Eine ausreichende obere Dehngrenze in einem weiten Temperatur- und Feuchtebereich ist nur bei den Stoffen zu erwarten, bei denen ohne Bauteildehnung keine wesentlichen Scherspannungen in der Klebegrenzschicht vorhanden sind, also bei den gummielastischen und den zäh-plastischen.

- d) Wie im Abschnitt 3.6 noch näher begründet wird, muß das Schutzmaterial unmittelbar auf die blanken Zuleitungsdrähte aufgetragen werden. Um einen Nebenschluß zum Meßwiderstand zu vermeiden, muß das Schutzmaterial daher auch feucht ein guter Isolator sein. Wie im Ka-

pitel 1 gezeigt wurde, muß im interessierenden Temperatur- und Frequenzbereich sowohl der spezifische Gleichstromwiderstand sehr groß als auch der dielektrische Verlustfaktor sehr klein sein. Die bereits oben erwähnten unpolaren Kohlenwasserstoffe erfüllen auch diese Forderung.

- e) Ein Feuchteschutzmaterial ist technisch brauchbar, wenn seine Anwendung einfach ist und keinerlei aufwendiger Maßnahmen bedarf. So soll es in seiner Handhabung ungefährlich sein, zum Aushärten keine erhöhte Temperatur benötigen, auch an senkrechten Flächen nicht fortfließen und möglichst unempfindlich gegen gebräuchliche Lösungsmittel und Öle sein.
- f) Bei ungekapselten Folienmeßstreifen ist der Leiter besonders stark auch durch Korrosion gefährdet. In diesem Fall muß das Schutzmaterial also sowohl den Anforderungen zum Schutz eines Raumes als auch jenen zum Schutz einer Oberfläche genügen.

Diese Aufstellung zeigt, daß die Zahl der einschränkenden Anforderungen an das Material sehr groß ist. Sie läßt aber auch deutlich erkennen, daß die zum Feuchteschutz von Meßstreifen geeigneten Stoffe unter den unpolaren Kohlenwasserstoffen, besonders den aufknetbaren, zu finden sein werden.

3.3 Die Feuchtigkeitsaufnahme und die Feuchtigkeitsdurchlässigkeit von Feuchteschutzmitteln

3.3.1 Die Wahl der Meßmethode

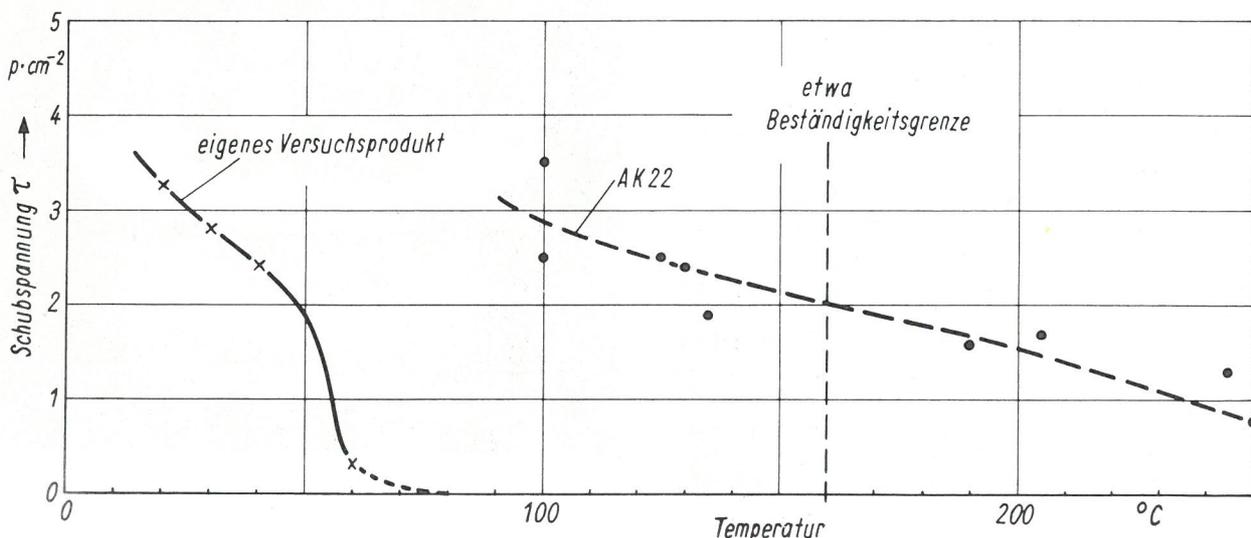
Im Abschnitt 3.1 wurde gezeigt, daß die materialspezifische Wirksamkeit eines Feuchteschutzmittels durch seinen Permeationskoeffizienten P_S^* gekennzeichnet ist. Bei der Untersuchung der verschiedenen Schutzmittel wurde daher vorwiegend P_S^* gemessen. Bei den im Verlaufe der Untersuchung als wichtig erkannten Stoffen wurde auch L_S gemessen, um gemäß $D_S = P_S^*/L_S$ den Diffusionskoeffizienten berechnen zu können. Die Kenntnis von D_S ermöglicht einmal die Berechnung von τ gemäß Gl. (51), zum anderen läßt sie in Verbindung mit P_S^* und L_S erkennen, welche Größe jeweils bestimmend für den Permeationsablauf ist, und ermöglicht somit ein besseres Verständnis für den Gesamtvorgang.

Die Messung von P_S^* kann auf zwei grundsätzlich verschiedenen Wegen erfolgen: stationär und dynamisch. Bei der stationären Methode wird die Feuchtemenge gemessen, die bei konstantem Wasserdampfdruckgefälle durch eine

Schicht konstanter Dicke und Fläche pro Zeiteinheit hindurchtritt; dieser Weg erlaubt eine Messung über beliebige Zeit. Bei der dynamischen Methode wird ein Probekörper von einem Feuchtezustand – meist entsprechend ca. 0 % relativer Feuchte – in einen anderen überführt und dabei die Änderung des Feuchtegehalts als Funktion der Zeit bis zum Gleichgewichtszustand gemessen. Aus der Gesamtänderung des Feuchtegehalts und aus dem zeitlichen Verlauf läßt sich dann D_S und daraus über L_S auch P_S^* berechnen [L 42]. Aus folgenden Gründen wurde hier die stationäre Methode gewählt: Die hier interessierende Größe ist P_S^* ; sie wird bei der stationären Methode direkt gemessen, läßt sich über längere Zeit beobachten und berücksichtigt den Einfluß eventuell für das Material typischer Bläschen und Mikrorisse. Bei der dynamischen Methode wird D_S ermittelt und P_S^* daraus erst errechnet; Bläschen sind nahezu ohne Einfluß auf D_S im Gegensatz zu P_S^* , und eine zeitliche Änderung von P_S^* kann direkt nicht beobachtet werden. Es ist deshalb zu erwarten, daß nach der dynamischen Methode wohl richtige D_S -Werte, aber zu kleine P_S^* -Werte erhalten werden; diese Vermutung wurde, wie später gezeigt wird, durch Messungen bestätigt. Eine entsprechende Differenz zwischen den nach beiden Methoden gemessenen Werten wurde auch von anderen Autoren beobachtet [L 29]. Sie ist möglicherweise Ursache für die in der Literatur für gleiche Materialien angegebenen unterschiedlichen Werte.

Die Messung von L_S erfolgte fast nur für 100 % relative Feuchte, da Feuchtesättigung im Außenraum die größte Anforderung an den Feuchteschutz stellt. Es wurde hierzu die Feuchtigkeitsaufnahme des Schutzmaterials – durch Wägung von Probekörpern bei ca. 0 % und ca. 100 % r. F. – im Gleichgewichtszustand bestimmt, d. h. ein wirklich materialspezifischer Wert. Im Gegensatz dazu liefert die Bestimmung der Wasseraufnahme nach DIN 53 472 keinen materialspezifischen Wert, da unter den dort angegebenen Bedingungen der Gleichgewichtszustand meist nicht erreicht wird bzw. das Erreichen nicht sicher festgestellt wird. Nach DIN – ähnliches gilt auch für andere Normen – wird die Feuchtigkeitsaufnahme von Formmassen an Probekörpern der Abmessungen 50 x 50 x 4 (oder x 1) mm³ bzw. 50 mm Durchmesser und 3 mm Dicke gemessen, jene von Folien-

Bild 91
Fließgrenze zweier Feuchteschutzmaterialien. – (Im gestrichelten Bereich ist die Messung unsicher)



und Tafelmaterial an Körpern von $50 \times 50 \text{ mm}^2$ x jeweilige Dicke der Folie bzw. Tafel. Die Feuchtigkeitsaufnahme gegenüber dem völlig undefinierten Anlieferungszustand wird nach vier Tagen Lagerung in Wasser von 22°C durch Wägen gemessen. Nach vier Tagen ist aber für viele Kunststoffe bei diesen Abmessungen der Gleichgewichtszustand nicht einmal näherungsweise erreicht; der Meßwert ist deshalb vom Feuchteaufnahmevermögen und vom Diffusionskoeffizienten abhängig und liefert, da das Verfahren in dieser Form keine Aufspaltung des Meßwertes in die beiden maßgebenden Größen erlaubt, einen von der Probenform abhängigen und deshalb nicht materialspezifischen Wert. Selbst der Vergleich der Meßwerte, die für mehrere Kunststoffarten bei gleicher Probenform erhalten wurden — die Norm läßt sogar mehrere Probenformen zu! —, ist nicht materialspezifisch; für eine andere Probenform kann der Vergleich ganz anders ausfallen. Noch fragwürdiger ist die Bestimmung der Wasseraufnahme gegenüber dem „Trockenzustand“. Hierzu werden die Proben 24 Stunden im Wärmeschrank bei 50°C gelagert und anschließend in einem Exsikkator über Phosphor-pentoxid mindestens eine Stunde abgekühlt; durch Wägung vor und nach der Trocknung wird der Wasserverlust bestimmt. Abgesehen davon, daß auch hier der Gleichgewichtszustand meist nicht erreicht wird, ist nicht einmal die relative Feuchte im Wärmeschrank vorgeschrieben, die auch in einem sauberen Schrank bei 50°C im Sommer noch 20–25 % betragen kann, im Winter dagegen nur 2 bis 3 %; das Meßergebnis hängt also auch noch von der Jahreszeit und der jeweiligen Witterung ab. Die Prüfung nach DIN 53 472 liefert daher meist Werte, die weder untereinander sinnvoll vergleichbar sind noch eine Materialeigenschaft beschreiben.

3.32 Das angewandte Meßverfahren

Die Messung von P_S^* nach der stationären Methode erfolgte durchweg mit Meßzellen, deren schematischer Aufbau aus Bild 92 a ersichtlich ist. Zwei Scheiben und ein Ring der Dicke d wurden gemäß Darstellung zusammengeklebt, wobei wegen der Eigenklebrigkeit der untersuchten Schutzmaterialien keine Fremdstoffe verwendet zu werden brauchten. Der so entstandene Hohlraum wurde vorher mit feuchtem Fließpapier oder mit Wasser gefüllt, so daß im Zelleninneren stets 100 % relative Feuchte herrschten. Aus thermodynamischen Gründen ist es gleichgültig, ob die Zelle mit gesättigtem Wasserdampf oder mit Wasser gefüllt ist, worauf bereits zahlreiche Autoren hingewiesen haben [L 29, L 33, L 36, L 37, L 42]. Es wurde auch experimentell kein Unterschied gefunden. Die innere Feuchtigkeit konnte dann durch die beiden seitlichen Begrenzungsflächen von je ca. $3,1 \text{ cm}^2$ nach außen wandern; der Einfluß der Permeation durch die radialen Begrenzungsflächen betrug stets nur etwa 1 bis 2 % der Gesamtpermeation und konnte daher vernachlässigt werden. Die fertigen Meßzellen wurden an einem dünnen Golddraht aufgehängt und in einem Exsikkator über Silicagel bzw. Phosphor-pentoxid (bei erhöhten Temperaturen) bei relativen Feuchten $\leq 2 \%$ aufbewahrt (vgl. Bild 92 b). Das die Permeation bewirkende Partialdampfdruckgefälle innen—außen betrug daher stets etwa 98–100 % des Wasserdampf-sättigungsdruckes bei der jeweiligen Meßtemperatur. Das Druckgefälle auf dem Wege Meßzelle—Trockenmittel ist bei der beschriebenen Anordnung wegen des in Luft im Vergleich zum Schutzmaterial sehr großen Diffusionskoeffizienten (Faktor 10^7 bis 10^8) sehr klein. Es wurde an Hand einer Rechnung von Müller und Helmuth [L 29] auf etwa $2 - 4 \cdot 10^{-2}$ Torr bei 20°C abgeschätzt und beträgt daher nur etwa 1 bis 2 ‰ des für die Permeation durch das Schutzmaterial maßgebenden Gefälles.

Außer den mit Wasser oder feuchtem Fließpapier gefüllten Meßzellen wurden stets auch zwei nicht mit Wasser gefüllte Blindzellen im gleichen Exsikkator aufbewahrt. Um die in ihrem Material und in ihrem luftgefüllten Hohlraum enthaltene Feuchtigkeit schneller herausdiffundieren zu lassen, wurden die Zellen zunächst etwas erhöhter Temperatur (in Bild 93 sind es 40°C) ausgesetzt, bevor mit der Messung begonnen wurde.

Die Meßzellen wurden in etwa regelmäßigen Abständen — meist täglich — mit einer Mikrowaage — Auflösung $\pm 2 \mu\text{g}$, Meßunsicherheit $\pm 5 \mu\text{g}$ — gewogen; die Gewichtsänderung wurde als Funktion der Zeit aufgetragen (vgl. Bild 93). Nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes (in Bild 93 für die Blindzelle nach 18 Tagen) blieb die Gewichtsänderung pro Tag konstant. Aus der Differenz der Gewichtsänderung der aktiven Zellen gegenüber den Blindzellen in g, bezogen auf die Schichtdicke d in cm, die freie Permeationsfläche in

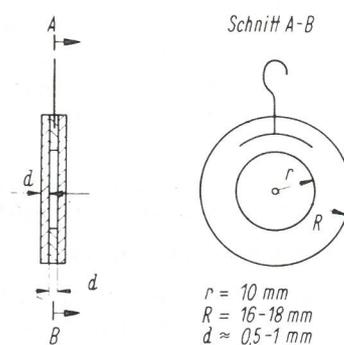


Bild 92 a
Permeationsmeßzelle in schematischer Darstellung

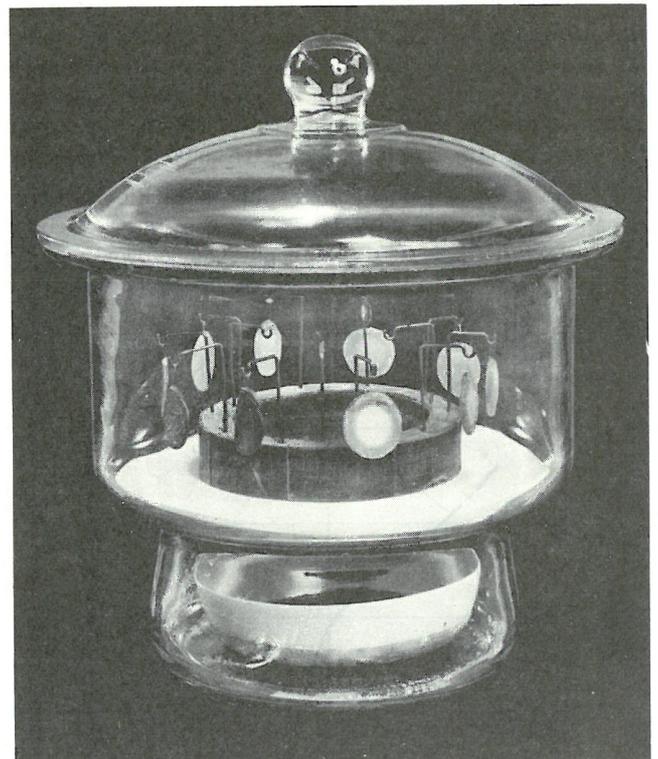


Bild 92 b
Permeationsmeßzellen aus verschiedenen Feuchteschutzmaterialien in einem Exsikkator über Silica-Gel

Bild 93

Gewichtsabnahme einer aktiven und einer Blindzelle aus mikrokristallinem Wachs als Funktion der Zeit

(Die sprunghafte Gewichtsabnahme der Blindzelle beim Erwärmen von 20°C auf 40°C beruht vermutlich auf dem beschleunigten Herausdiffundieren von Resten flüchtiger Substanzen, insbesondere Feuchtigkeit, d. h. die Blindzelle hatte beim Übergang von 40°C auf 20°C nach 17,5 Tagen noch nicht ganz das Trockengleichgewicht erreicht.)

cm², das Partialdampfdruckgefälle in Torr und die Zeit in Stunden, wurde dann der Permeationskoeffizient P_S^* in $g \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1} \cdot h^{-1}$ berechnet. Die Wägungen der Blindzellen dienten als Kontrolle dafür, daß die Gewichtsänderungen der aktiven Zellen tatsächlich nur auf dem durch die Permeation bedingten Wasserverlust beruhen und nicht auf Veränderungen des Materials.

Zur Bestimmung des Löslichkeitskoeffizienten L_S wurden aus dem zu untersuchenden Material ebene Scheiben der Dicke d und des Durchmessers $2R$ hergestellt und ebenfalls an Golddrähten aufgehängt. Die Scheiben wurden zunächst bis zur Gewichtskonstanz über Silicagel oder Phosphorpentoxid getrocknet und anschließend in ca. 100 % relativer Feuchte aufbewahrt. Die Gewichtsänderung wurde als Funk-

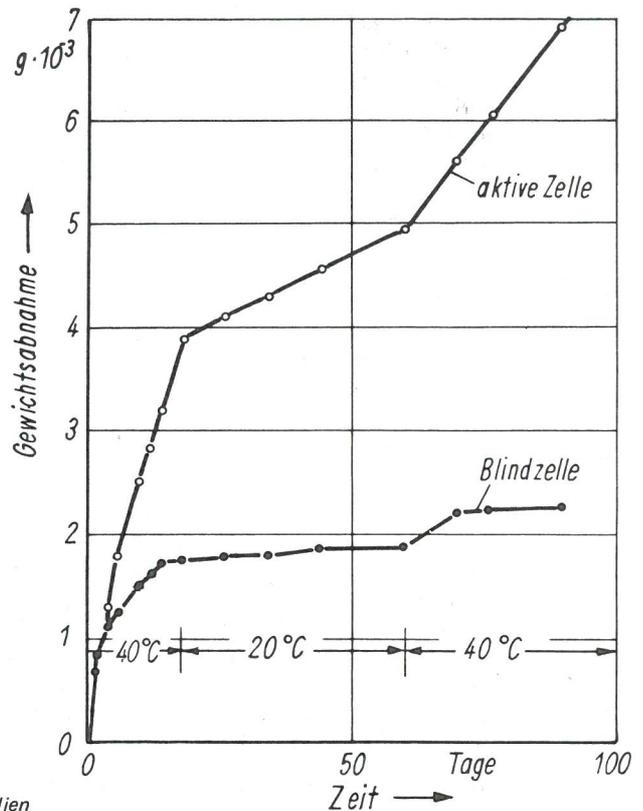


Bild 94

Die wichtigsten Angaben über die untersuchten Feuchtigkeitsschutzmaterialien

Lfd. Nr.	Material	Hersteller bzw. Lieferant	P_S^* bei 20°C in $g \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1} \cdot h^{-1}$	Zusammensetzung (1) Herstellerangabe (2) eigene Untersuchung	Allgemeine Bemerkungen (zu mechan. u. elektr. Eigenschaften vgl. auch Abschnitte 3.5 und 3.4)
1	PR 9244/03	Philips	$3,2 \cdot 10^{-8}$	unbekannt (2 Komponenten)	Unter Wasser bald einsetzende Ablösung
2	B-10023	Budd	$1,2 \cdot 10^{-8}$	Zinkharz + Talkum + unbekannte Zusätze + Lösungsmittel (2)	Ist trocken sehr spröde. Zeigt auf Metall nach dem Trocknen grobe Schrumpfungsrisse. Weicht unter Wasser auf.
3	Dekaplast B 2	Dekalin Deutsche Klebstoffwerke	$5 \cdot 10^{-9}$	Polyisobutylen + mineralische Füllstoffe (2)	Nur unter Verwendung eines geeigneten Haftvermittlers aufklebbar, z. B. mit mikrokristallinem Wachs
4	Dekaplast 6340 a	Dekalin	$1,5 \cdot 10^{-8}$	Polyisobutylen + Füllstoff (2)	Nur unter Verwendung eines geeigneten Haftvermittlers anwendbar
5	Dekaplast 6880 a	Dekalin	$1,8 \cdot 10^{-8}$	Polyisobutylen + Füllstoff (2)	Selbstklebend, jedoch sehr weich
6	Gagekote 1	W. T. Bean	$1,3 \cdot 10^{-8}$	Synthetisches Harz + Lösungsmittel (1)	Soll plastisch bleiben, ist aber trocken brüchig. Neigt auf Metall zu feinen Schrumpfungsrissen
7	Gagekote 2	W. T. Bean	$6 \cdot 10^{-8}$	Nitril-Gummi + Lösungsmittel (1)	Bleibt elastisch
8	Gagekote 3	W. T. Bean	$8 \cdot 10^{-7}$	Silicone-Lack + Lösungsmittel	Ist trocken brüchig. Neigt auf Metall zu feinen Schrumpfungsrissen. Unter Wasser bald einsetzende Ablösg. Oberh. 40°C weich
9	Gagekote 4	W. T. Bean	$3,9 \cdot 10^{-8}$	Silicone-Phenol-Lack + Lösungsmittel (1)	Unter Wasser schlechte Haftung
10	Gagekote 5	W. T. Bean	$1 \cdot 10^{-7}$	Gummiartiges Epoxyd-Harz (2 Komponenten) (1)	Haftet auch unter Wasser gut. Bleibt elastisch und ist ein guter mechanischer Schutz
11	KA 1	Frischen	$2,4 \cdot 10^{-7}$	Gummilösung (1)	Unter Wasser tritt Erweichung und bald einsetzende Ablösung auf
12	Formflex WS 60	Formflex GmbH	$3 \cdot 10^{-7}$	Thiokol + Vernetzer (1)	Auch unter Wasser sehr gute Haftung. Hervorragender mechanischer Schutz
13	Mikrokrist. Wachs (Wachsp. 192 a)	Mobil Oil	$0,9 \cdot 10^{-9}$	Montan-Wachs (1)	Auch unter Wasser kurzzeitig sehr gute Haftung. Oberhalb 40°C zu weich
14	AK 22	Hottinger	$1,9 \cdot 10^{-8}$	Polyisobutylen + Esterwachs + mineral. Füllstoff (2)	Haftet auch unter Wasser sehr gut. Nach längerer Zeit von der Oberfläche her beginnende Versprödung
15	Eigenes Versuchsprodukt	B A M	$0,8 \cdot 10^{-9}$	Polyisobutylen + mikrokrist. Wachs + Aluminium-Flitter (x) (2)	Auch unter Wasser sehr gute Haftung. Oberhalb 60°C zähfließend. Als Schutz noch bis ca. 60°C verwendbar

tion der Zeit aufgetragen. Nach Erreichen der Sättigung wurde aus der Gewichtszunahme in g, bezogen auf das Probenvolumen in cm^3 und den Wasserdampfpartialdruck in Torr, der Koeffizient L_S in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{Torr}^{-1}$ berechnet. Für einige Proben wurde auch aus dem zeitlichen Verlauf der Gewichtszunahme und aus L_S nach der von Jouwersma [L 42] angegebenen Methode der Diffusionskoeffizient D_S in $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ berechnet.

Da P_S^* und L_S allgemein Funktionen der Temperatur sind, wurden die Exsikkatoren mit den Proben in Thermostaten aufbewahrt. Für die Temperaturabhängigkeit gilt nach Barrer [L 43] ein exponentieller Zusammenhang:

$$L_S = L_0 \cdot e^{-\frac{\Delta H}{R_G \cdot T}}; D_S = D_{S_0} \cdot e^{-\frac{\Delta E_D}{R_G \cdot T}}; P_S^* = P_{S_0}^* \cdot e^{-\frac{\Delta E_P}{R_G \cdot T}}$$

Hierin sind L_0 , D_{S_0} , $P_{S_0}^*$ die Koeffizienten für $T \rightarrow \infty$, R_G die Gaskonstante, T die absolute Temperatur, ΔH die Lösungswärme und ΔE_D bzw. ΔE_P die Aktivierungsenergien der Diffusion bzw. der Permeation. Auf halblogarithmischem Papier sollte daher der Zusammenhang $P_S^* = F(1/T)$ eine Gerade ergeben. Wie in 3.33 noch gezeigt wird, gilt dieser Zusammenhang jedoch hier meist nur näherungsweise, da die idealisierenden Voraussetzungen, wie z. B. homogenes Material, bei uns sicher nicht erfüllt sind.

Die Herstellung der Meßzellen bzw. Probenscheiben bereitete teilweise erhebliche Schwierigkeiten. Um die jeweilige Versuchsdauer in erträglichen Grenzen zu halten – z. B. Erreichen des Gleichgewichtszustandes innerhalb von zwei bis drei Wochen – mußten die Scheibendicken < 1 mm sein. Da die für Schutzzwecke geeigneten Materialien andererseits eine große Klebefähigkeit besitzen sollten, gelang es anfangs

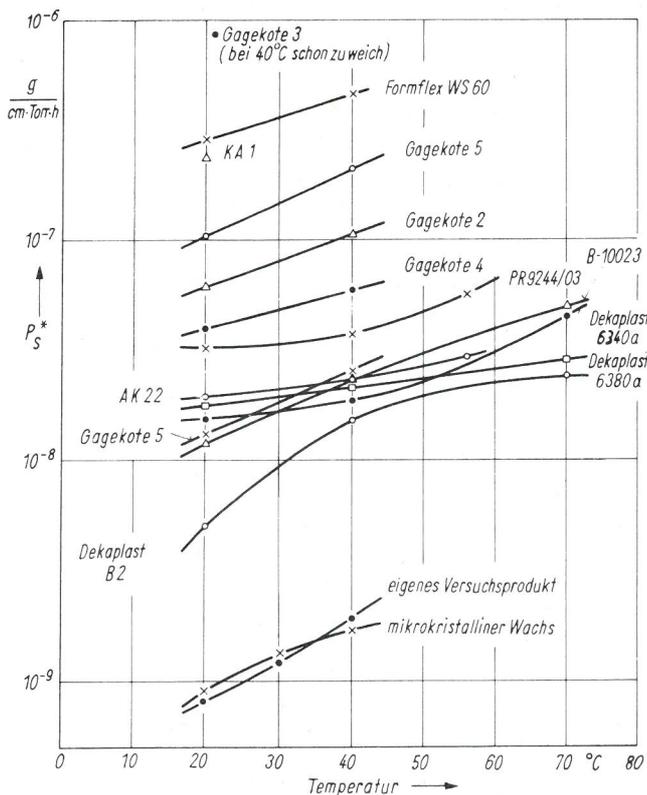


Bild 95
 P_S^* als Funktion der Temperatur für verschiedene Schutzmittel

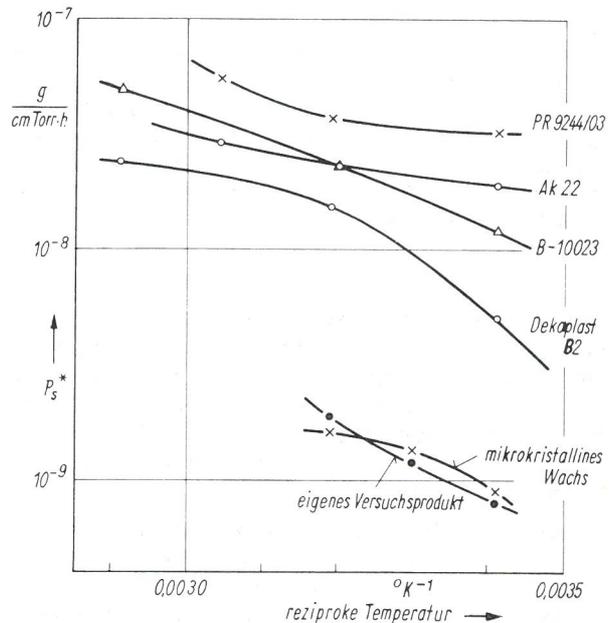


Bild 96
 P_S^* als Funktion der reziproken Temperatur, beispielhaft dargestellt für einige Schutzmittel

in vielen Fällen nicht, Scheiben der geforderten geringen Dicke von der Unterlage, auf der sie ausgehärtet oder ausgewalzt worden waren, unbeschädigt abzulösen. Zwei Methoden führten schließlich zum Ziel:

- Nach dem Aushärten bzw. Auswalzen auf einer sehr dünnen und flexiblen Metall- oder Kunststoffolie wurden die Proben mit der Unterlage auf -40°C bis -70°C abgekühlt – Unterschreiten der Einfriertemperatur der Proben –; die flexible Unterlage ließ sich dann bei einigem Geschick von der Probe abziehen.
- Als Unterlage wurde eine sehr dünne Aluminiumfolie verwendet, die nach dem Aushärten bzw. Auswalzen in einer verdünnten wässrigen Lösung von Hg Cl_2 in wenigen Minuten aufgelöst wurde.

Nach beiden Methoden wurden Meßzellen hergestellt; ein Unterschied in den P_S^* - und L_S -Werten wurde nicht beobachtet.

3.33 Die Meßergebnisse

Nach der im Abschnitt 3.32 beschriebenen Methode wurden insgesamt 15 verschiedene Materialien untersucht; in Bild 94 sind die wichtigsten Angaben über sie eingetragen. Im Verlaufe der Untersuchungen wurden die Materialien 1–11 als ungeeignet für DMS-Schutz ausgeschieden, und zwar vorwiegend wegen zu großem P_S^* . Aus den jeweils an 3 bis 6 Meßzellen erhaltenen Werten wurden Mittelwerte gebildet; die Streuung um den Mittelwert war meist $\leq \pm 10$ bis 20 %, beim mikrokristallinen Wachs $\leq \pm 50$ %. In Bild 95 sind die Permeationskoeffizienten P_S^* als Funktion der Temperatur dargestellt. Die Darstellung läßt den weiten Bereich erkennen, über den die P_S^* -Werte gebräuchlicher Schutzmittel verteilt sind; sie zeigt ferner die große Überlegenheit des mikrokristallinen Wachses bzw. geeigneter Wachs-Polyisobutylene-Kombinationen, wie z. B. des eigenen Versuchsproduktes. Dieses Produkt wurde auf Grund obiger Überlegungen entwickelt, weil keines der handelsüblichen Schutzmittel einen ausreichend kleinen Permeationskoeffizienten aufwies und

das mikrokristalline Wachs unter Wasser bzw. in 100 % relativer Feuchte keine genügende Haftfähigkeit zeigte. Bei steigender Temperatur wird P_S^* durchweg größer. In Bild 96 ist P_S^* für einige Schutzmittel als Funktion der reziproken Temperatur aufgetragen. Da sich in dieser halblogarithmischen Darstellung keine strenge Gerade ergibt, ist der Zusammenhang zwischen P_S^* und der Temperatur auch nicht durch eine Exponentialfunktion gegeben, wie es in der ideale Verhältnisse voraussetzenden Theorie angenommen wird.

Am Formflex WS 60 und am Gagekote 5 wurde beispielhaft untersucht, inwieweit sich P_S^* durch Zusatz geeigneter Füllstoffe verkleinern läßt. Als Füllstoff wurde Litho-Aluminium Eckartina 000 verwendet. Die Wahl fiel auf Metallflitter, weil nach den im Abschnitt 3.2 angestellten Überlegungen Metalle für Wasserdampf praktisch undurchlässig sind. Blanke Metallflitter haben ferner noch den Vorteil, Licht- und Wärmestrahlung gut zu reflektieren; sie schützen daher den Kunststoff vor Alterung und die Meßstelle vor Erwärmung. Bild 97 zeigt am Beispiel des Formflex, daß durch den Zusatz von bis zu 18 Gewichtsprozent Metallflittern P_S^* bis auf ca. 1/3 verkleinert werden kann; ähnliches gilt für Gagekote 5. Aus diesem Grunde enthält auch das eigene Versuchsprodukt Metallflitter. Mehr als 18 Gewichtsprozent ließen sich nicht zufügen, ohne das Material bröcklig werden zu lassen. Der Elastizitätsmodul steigt natürlich durch den Zusatz an. Aus der Darstellung in Bild 97 kann jedoch nicht gefolgert werden, daß andere Füllstoffe einen ähnlichen Einfluß ausüben werden, wie zum Beispiel eine Untersuchung der Kombination Polyesterharz-Quarzmehl bzw. Titandioxyd zeigt [L 37]. Dort erwies sich ein Zusatz von 20 % Quarzmehl bzw. 25 % Titandioxyd als nahezu bedeutungslos für P_S^* .

In Bild 98 ist der Löslichkeitskoeffizient L_S und in Bild 99 der gemäß $D_S = P_S^*/L_S$ berechnete Diffusionskoeffizient D_S für verschiedene Schutzmittel als Funktion der Temperatur aufgetragen. Die Darstellung zeigt, daß die kleinen Permeationskoeffizienten von mikrokristallinem Wachs und von Wachs-Polyisobutylene-Kombinationen nicht auf kleinen Diffusionskoeffizienten, sondern auf geringer Löslichkeit für Wasser beruhen. Das Anwachsen von P_S^* mit der Temperatur wird dagegen von der großen Temperaturabhängigkeit der Diffusion verursacht. In Bild 100 sind für vier Schutzmittel die stationär ermittelten P_S^* -Werte den dynamisch ermittelten gegenübergestellt. Wie schon im Abschnitt 3.31 vermutet und begründet, sind die dynamischen Werte stets kleiner als die stationären; für den Feuchteschutz sind jedoch die stationären Werte maßgebend.

3.4 Der komplexe spezifische Widerstand ζ einiger Schutzmittel

Wie im Abschnitt 3.6 noch näher begründet wird, muß das Feuchtigkeitsschutzmittel unmittelbar auf die blanken Zuleitungsdrähte der Meßstreifen aufgebracht werden, um einen sicheren Schutz zu garantieren. Um dennoch einen störenden Nebenschluß Zuleitung-Zuleitung zu verhindern, muß der spezifische Widerstand des Schutzmittels auch im feuchten Zustand hinreichend hoch sein. Wie im Kapitel 1 gezeigt wurde, ist im Falle der Meßstreifen die für die Isolation wesentliche Materialgröße der ohmsche spezifische Widerstand ρ im Parallelersatzschaltbild des komplexen spezifischen Widerstandes ζ . Dort wird auch abgeleitet, daß für den ohmschen Widerstand R_{ZZ} im Parallelersatzschaltbild des komplexen Widerstandes ζ_{ZZ} zwischen den beiden Zuleitungsdrähten Z

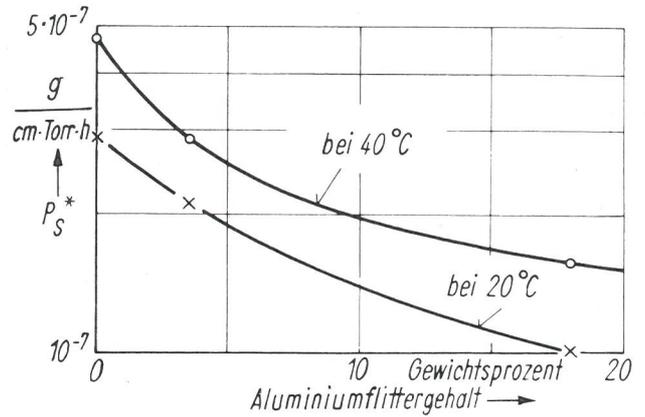


Bild 97
Der Einfluß des Aluminiumflittergehaltes von Formflex WS 60 auf den Permeationskoeffizienten

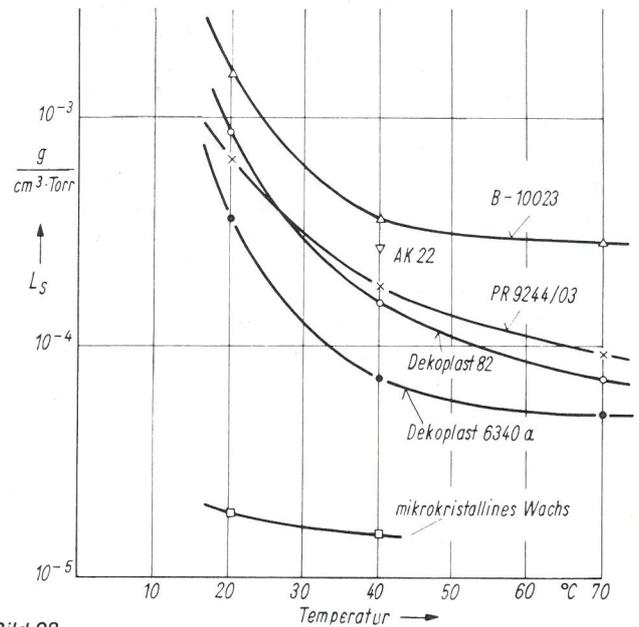


Bild 98
Löslichkeitskoeffizienten für 100 % relative Feuchte als Funktion der Temperatur, beispielhaft dargestellt für einige Schutzmittel

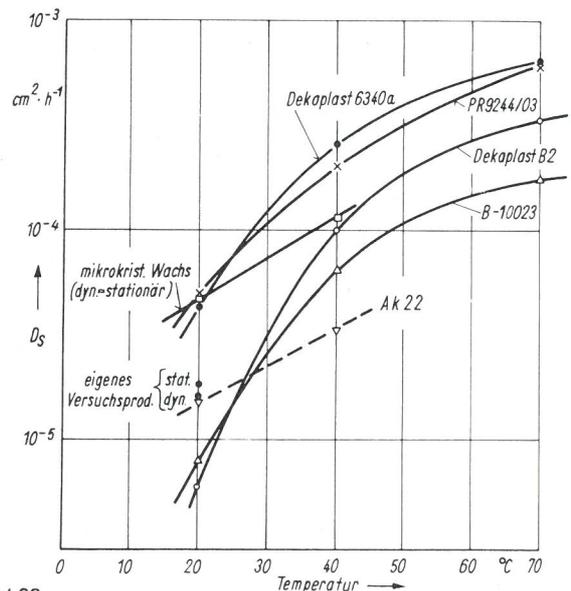


Bild 99
Diffusionskoeffizienten als Funktion der Temperatur, berechnet aus P_S^* und L_S (----- dynamisch gemessen), beispielhaft dargestellt für einige Schutzmittel

Material	P_s^* in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ bei 20°C	
	stationär	dynamisch
B-10023	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$0,52 \cdot 10^{-8}$
PR 9244/03	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$0,83 \cdot 10^{-8}$
Dekaplast B 2	$0,5 \cdot 10^{-8}$	$0,23 \cdot 10^{-8}$
Dekaplast 6340 a	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$0,39 \cdot 10^{-8}$

Bild 100
Vergleich von stationär und dynamisch ermittelten Permeationskoeffizienten

$$R_{ZZ} \approx \frac{\rho}{\pi \cdot s_Z} \cdot \ln \frac{d_{ZZ}}{r_0} \quad (54)$$

gilt, wenn s_Z die Länge der blanken Zuleitungen, d_{ZZ} ihr Abstand voneinander und r_0 den Radius darstellt. In den meisten Fällen ist $d_{ZZ} \approx 2$ mm und $r_0 \approx 0,1$ mm, während s_Z erfahrungsgemäß etwa 10 bis 15 mm betragen wird. Für die Schutzmittel mit den günstigsten Schutzeigenschaften (in Bild 94 jene mit der lfd. Nummer 12–15) ist ρ als Funktion der Frequenz für 97 % relative Feuchte in Bild 101 dargestellt; die zur Bestimmung von ρ angewandte Meßmethode ist in Kapitel 1 beschrieben. Durch Einsetzen dieser ρ -Werte in Gl. (54) läßt sich R_{ZZ} berechnen. Eine solche Rechnung ergibt, daß beim mikrokristallinen Wachs und dem eigenen Versuchsprodukt selbst bei großer Feuchte und hoher Frequenz keine wesentliche Störung durch R_{ZZ} zu erwarten ist.

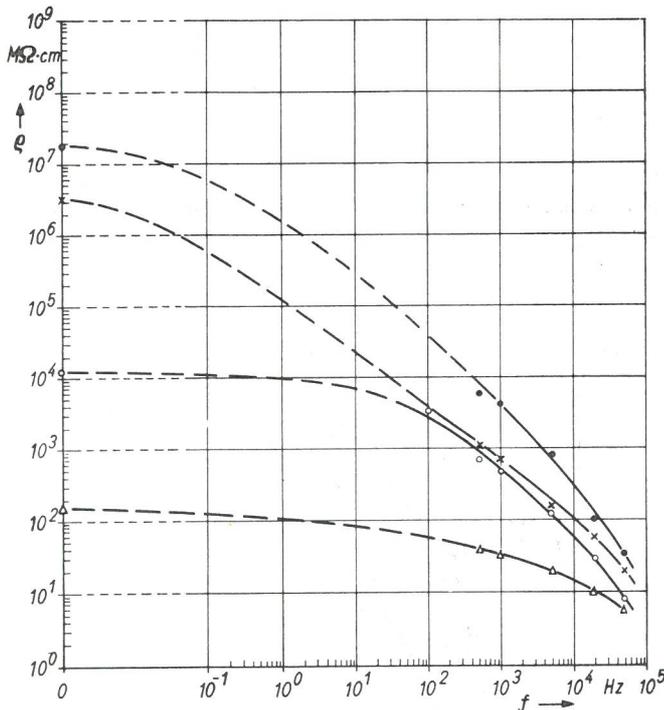


Bild 101
Spezifische Widerstände ρ einiger Feuchteschutzmittel bei 97 % rel. Feuchte und 22°C als Funktion der Frequenz

- eigenes Versuchsprodukt
- △ Ak 22
- x mikrokristallines Wachs
- o Formflex Ws 60

3.5 Die mechanischen Eigenschaften der Schutzmittel

3.5.1 Allgemeine Überlegungen

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt wurde, kann die Brauchbarkeit eines Schutzmaterials nicht allein nach der Größe des Permeationskoeffizienten beurteilt werden. Sehr wesentlich ist, daß auch die mechanischen Eigenschaften den im Abschnitt 3.2 aufgestellten Forderungen genügen. Es darf also besonders die Versteifung des Bauteils durch die Schutzschicht und die Rückwirkung der Schutzschicht auf das Bauteil durch thermische Ausdehnung und Quellung nicht stören, und die Haftfestigkeit auf dem Bauteil muß bis zur oberen Dehngrenze, die von Fall zu Fall verschieden sein kann, gewährleistet sein. Gelegentlich wird auch die Beständigkeit der Schutzschicht gegen Dauerwechselformung interessieren, die jedoch im allgemeinen größer sein wird als die der Meßstreifen [L 44]; auf eine eingehende Untersuchung dieses Problems wurde deshalb im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Von Bedeutung ist ferner bei Lang-

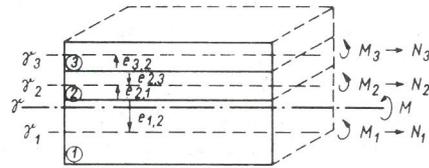


Bild 102
Schematische Darstellung eines Dreischichtverbundbalkens
Bedeutung der Symbole siehe Text

zeitversuchen die Alterungsbeständigkeit; ausreichende Versuchsergebnisse hierüber liegen zur Zeit noch nicht vor, doch wird die Beständigkeit der besten bisher untersuchten Schutzmittel (mikrokristallines Wachs, eigenes Versuchsprodukt, AK 22) wegen ihrer günstigen chemischen Konstitution sehr wahrscheinlich stets die Schutzzeit t_s überdauern (vgl. Abschnitt 3.55).

3.5.2 Die mechanische Rückwirkung der Schutzschicht auf das Bauteil

Wenn eine Feuchtigkeitsschutzschicht – und entsprechendes gilt auch für Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergeber – auf ein Bauteil aufgeklebt wird, erfolgt dadurch unvermeidlich eine Änderung der Eigenschaften dieses Bauteils, besonders wenn dessen Elastizitätsmodul und/oder Querschnitt klein ist. Zunächst einmal wird die Steifigkeit gegenüber Biege- und Normaldehnungen vergrößert, so daß bei vorgegebener Belastung zu kleine Dehnungen gemessen werden. Es kann sich aber bei einem größeren Bauteil auch die Dehnungsverteilung ändern. Außer diesem Versteifungseffekt tritt aber eine störende Rückwirkung auch noch insofern auf, als eine thermische Ausdehnung oder Quellung der Schutzschicht (bzw. des Meßstreifens) durch Feuchtigkeit umgekehrt zu einer Verformung des Bauteils führt.

Es sei nun zunächst einmal für den Fall einer einachsigen Biegespannung eine Abschätzung des durch die Bauteilversteifung verursachten Fehlers vorgenommen, und zwar der Vollständigkeit halber gleich für ein Dreischichtensystem Bauteil (1) – Meßstreifen (2) – Schutzschicht (3). In Anlehnung an K. Sattler [L 45], Theorie der Verbundkonstruktionen, gelten für einen Dreischichtverbundbalken nach der elementaren Biegetheorie folgende Überlegungen:

In Bild 102 bedeuten $M_{1,2,3}$ Ersatzteilmomente und $N_{1,2,3}$ an den neutralen Fasern $z_{1,2,3}$ angreifende Ersatznormal-

kräfte, die jeweils zusammen die Schichten (1), (2) und (3) einzeln so biegen, als würden sie im schubfesten Verbund durch das äußere Moment M gebogen. Die Gleichgewichtsbedingungen lauten dann:

$$N_1 + N_2 + N_3 = 0 \quad (55)$$

(da keine äußere Normalkraft angenommen wurde)

$$M = M_1 + M_2 + M_3 - N_3 \cdot a_{1,3} - N_2 \cdot a_{1,2} \quad (56)$$

wobei als Abkürzung $a_{1,2} = e_{2,1} + e_{1,2}$ und $a_{1,3} = a_{1,2} + e_{3,2} + e_{2,3}$ gesetzt wurde. Die Kontinuitätsbedingungen lauten unter der Voraussetzung, daß die Krümmungsradien $R_{1,2,3}$ der neutralen Fasern $\tilde{\sigma}_{1,2,3}$ groß gegenüber der Dicke der Verbundschicht sind:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \frac{M_1}{E_1 J_1} = \frac{M_2}{E_2 J_2} \quad (57)$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_3} = \frac{M_2}{E_2 J_2} = \frac{M_3}{E_3 J_3} \quad (58)$$

wobei $E_{1,2,3}$ die Elastizitätsmoduln und $J_{1,2,3}$ die Flächenträgheitsmomente der Schichten (1), (2) und (3) sind. Da ferner die Dehnung an den Grenzen (1) – (2) und (2) – (3) kontinuierlich verläuft, wird

$$\frac{N_1}{E_1 F_1} - \frac{M_1}{E_1 J_1} \cdot e_{1,2} = \frac{N_2}{E_2 F_2} + \frac{M_2}{E_2 J_2} \cdot e_{2,1} \quad (59)$$

$$\frac{N_2}{E_2 F_2} - \frac{M_2}{E_2 J_2} \cdot e_{2,3} = \frac{N_3}{E_3 F_3} + \frac{M_3}{E_3 J_3} \cdot e_{3,2} \quad (60)$$

wobei $F_{1,2,3}$ die Querschnittsflächen der drei Schichten sind. Aus diesen 6 Gleichungen lassen sich die Größen $N_{1,2,3}$ und $M_{1,2,3}$ eliminieren. Die Rechnung^{x)} ergibt:

$$M_{1,2,3} = M \cdot E_{1,2,3} \cdot J_{1,2,3} \cdot \left[\frac{\Sigma E \cdot F}{A} \right]$$

$$N_1 = M \cdot E_1 F_1 \cdot \left[\frac{E_2 F_2 \cdot a_{1,2} + E_3 F_3 \cdot a_{1,3}}{A} \right] \quad (61)$$

$$N_2 = -M \cdot E_2 F_2 \cdot \left[\frac{E_1 F_1 \cdot a_{1,2} - E_3 F_3 (a_{1,3} - a_{1,2})}{A} \right]$$

$$N_3 = -M \cdot E_3 F_3 \cdot \left[\frac{E_1 F_1 \cdot a_{1,2} + (E_1 F_1 + E_2 F_2)(a_{1,3} - a_{1,2})}{A} \right]$$

wobei $A = \Sigma E F \cdot [\Sigma E J + E_3 F_3 \cdot a_{1,3}(a_{1,3} - a_{1,2})]$
 $+ [E_2 F_2 \cdot a_{1,2} + E_3 F_3 \cdot a_{1,3}]$
 $\cdot [E_1 F_1 a_{1,2} - E_3 F_3 (a_{1,3} - a_{1,2})]$

An der Grenze (1) – (2), d. h. also auf der Bauteiloberfläche, gilt für die Biegespannung

$$\sigma_{1,2} = \frac{M_1}{W_1} - \frac{N_1}{F_1} \quad \text{mit } W_1 = \text{Widerstandsmoment der Schicht (1)}$$

Ist σ_1 die Spannung an der Bauteiloberfläche bei Fehlen von (2) und (3) und

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{1,2} - \sigma_1, \text{ so wird } \frac{\Delta \sigma_1}{\sigma_1} = \frac{\frac{M_1}{W_1} - \frac{N_1}{F_1}}{\frac{M}{W_1}} - 1$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (61) folgt daraus für die relative Änderung der einachsigen Biegespannung

$$\frac{\Delta \sigma_1}{\sigma_1} = -1 + \frac{E_1}{A} \cdot [J_1 \Sigma E F - W_1 (E_2 \cdot F_2 \cdot a_{1,2} + E_3 \cdot F_3 \cdot a_{1,3})] \quad (62)$$

Diese Gleichung gilt nur für den Fall, daß die Schichten über den ganzen Balken hin gleichmäßig dick und ferner schubfest miteinander verbunden sind. In der Praxis der Dehnungsmeßstreifenanwendung ist diese Bedingung allerdings meist nicht streng erfüllt, so daß Gl. (62) etwas zu große Änderungen liefert; denn die Breite des Balkens (bzw. allgemeiner: „Bauteils“) ist fast immer größer als die des Meßstreifens, und die Schutzschicht muß breiter und länger sein als dieser und soll im allgemeinen nicht auf dem Meßstreifen haften. Die nach Gl. (62) berechneten Werte sind deshalb stets größer als die gemessenen. Die Rechnung eignet sich deshalb in den meisten Fällen nicht zu einer Korrektur, sondern nur zur Abschätzung der oberen Fehlergrenze. Eine Korrektur wäre auch schon deshalb fragwürdig, weil die Größen E, F, a der Schichten fast stets nur in grober Näherung bekannt sind.

Wird der Dreischichtverbundbalken durch eine reine Normalkraft N beansprucht, so folgt aus den nun unmittelbar einleuchtenden Bedingungen

$$N = N_1 + N_2 + N_3; \quad \frac{N_1}{E_1 F_1} = \frac{N_2}{E_2 F_2}; \quad \frac{N_2}{E_2 F_2} = \frac{N_3}{E_3 F_3}$$

die der Gl. (62) entsprechende Beziehung für einachsige Normalspannung

$$\frac{\Delta \sigma_1}{\sigma_1} = -1 + \frac{E_1 F_1}{\Sigma E F} \quad (63)$$

Auch Gl. (63) gilt nur für den Fall, daß die Schichten über den ganzen Balken hin gleichmäßig dick und ferner schubfest miteinander verbunden sind.

In den Bildern 103 und 104 ist für ein Zweischichtensystem Bauteil–Schutzschicht unter der Bedingung Bauteilbreite = Schutzschichtbreite – diese Bedingung führt zur Abschätzung der oberen Fehlergrenze – die durch die Versteifung des Bauteils verursachte relative Dehnungsänderung $\Delta \epsilon / \epsilon$ als Funktion des E -Modulverhältnisses der Schichten für reine Biegedehnung und reine Normaldehnung aufgetragen. In Verbindung mit den in Bild 106 angegebenen E -Modulwerten von Klebern, Trägern und Schutzmaterialien ermöglichen diese Diagramme eine rasche Abschätzung der durch Meßstreifeninstallationen verursachten maximalen Störungen.

Die Gültigkeit der Gl. (62) wurde durch Dehnungsmessungen an einem 0,2 mm Stahlblech und einem 0,5 mm Messingblech geprüft. Die beiden Bleche wurden unter anderem nacheinander mit verschiedenen dicken Schichten des Klebers X-60 – E -Modul $\approx 600 \text{ kp/mm}^2$ – versehen und dann jeweils immer wieder mit dem gleichen Biegemoment belastet. In Bild 105 sind die hierbei erhaltenen Meßwerte der durch die Versteifung verursachten Dehnungsänderung $\Delta \epsilon / \epsilon$ und die nach Gl. (62) berechneten Werte als Funktion der Schichtdicke aufgetragen. Die Darstellung zeigt, daß Rechnung und Messung recht gut übereinstimmen, die Gl. (62) also zur Abschätzung gut geeignet ist.

x) siehe Anhang

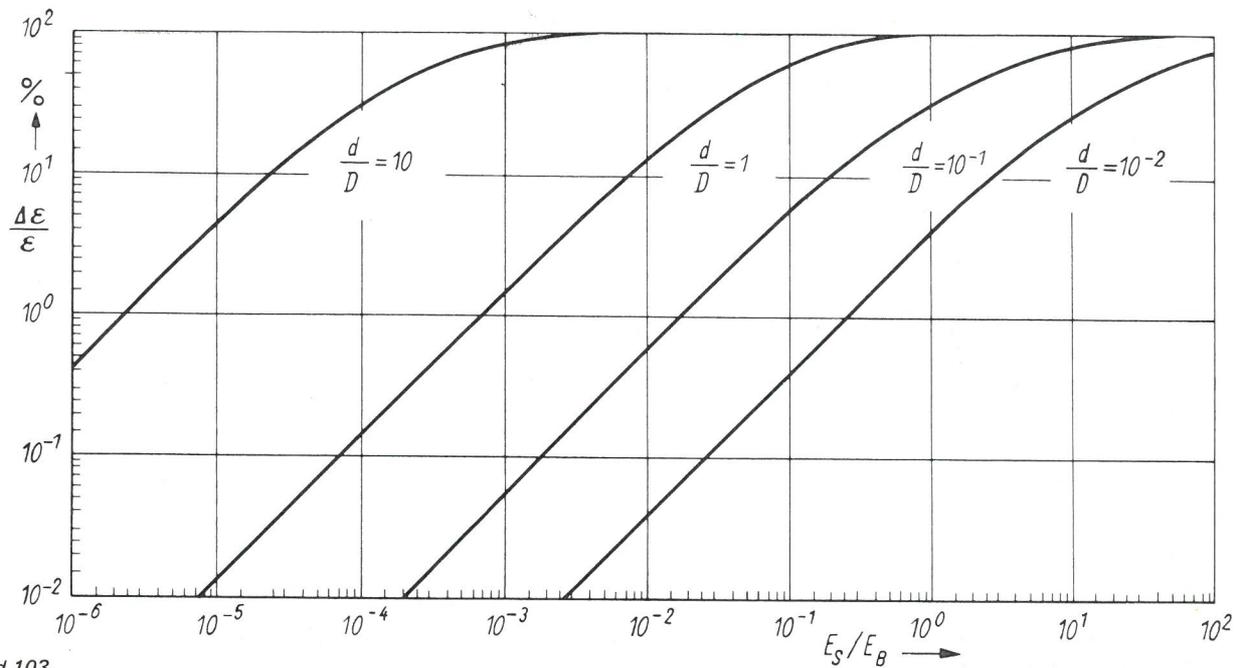


Bild 103

Die durch eine Schutzschicht mit dem E-Modul E_S auf einem Bauteil mit dem E-Modul E_B durch Versteifung verursachte Änderung der Biegedehnung ϵ für vier verschiedene Verhältnisse Schichtdicke d zu Bauteildicke D bei einachsiger Biegung unter konstantem Biegemoment

Zur praktischen Anwendung der Gleichungen (62) und (63) bzw. der Diagramme Bild 103 und Bild 104 ist die Kenntnis der Elastizitätsmoduln von Klebern, Trägern und Schutzmitteln erforderlich. Während die E-Moduln von Klebern und Trägern praktisch frequenzunabhängig und daher im statischen Zugversuch leicht bestimmbar sind, bereitet die Angabe geeigneter Moduln gerade bei den Stoffen, die für Feuchtigkeitsschutzzwecke besonders geeignet sind, wegen ihrer ausgeprägt viskoelastischen Eigenschaften Schwierigkeiten. Die viskoelastischen Eigenschaften lassen sich durch einen komplexen Verformungsmodul

$$M'_V = \frac{\sigma}{\epsilon} = M'_V + j M''_V$$

beschreiben, wobei σ die Spannung, ϵ die Dehnung, M'_V den dynamischen oder auch Speichermodul und M''_V den Verlustmodul bedeutet [L 46, L 47]. Je nach Anwendungsfall ist für M'_V der Elastizitätsmodul E oder der Schubmodul G einzusetzen. Sowohl M'_V als auch M''_V sind im allgemeinen Funktionen der Dehngeschwindigkeit $d\epsilon/dt$. Da diese Funktionen für die Schutzmaterialien weder bekannt noch ohne erheblichen Aufwand bestimmbar sind, und andererseits M'_V nur zur Abschätzung einer oberen Fehlergrenze benutzt werden soll, wurden hier nur die maximalen Werte für den praktisch wichtigsten Fall $M'_V = E$ ermittelt. Da aber auch E_{\max} für $d\epsilon/dt \rightarrow \infty$ direkt schwer zu messen ist, wurde als Näherungslösung $E_{\text{eingf.}}$ unterhalb der Einfriertemperatur

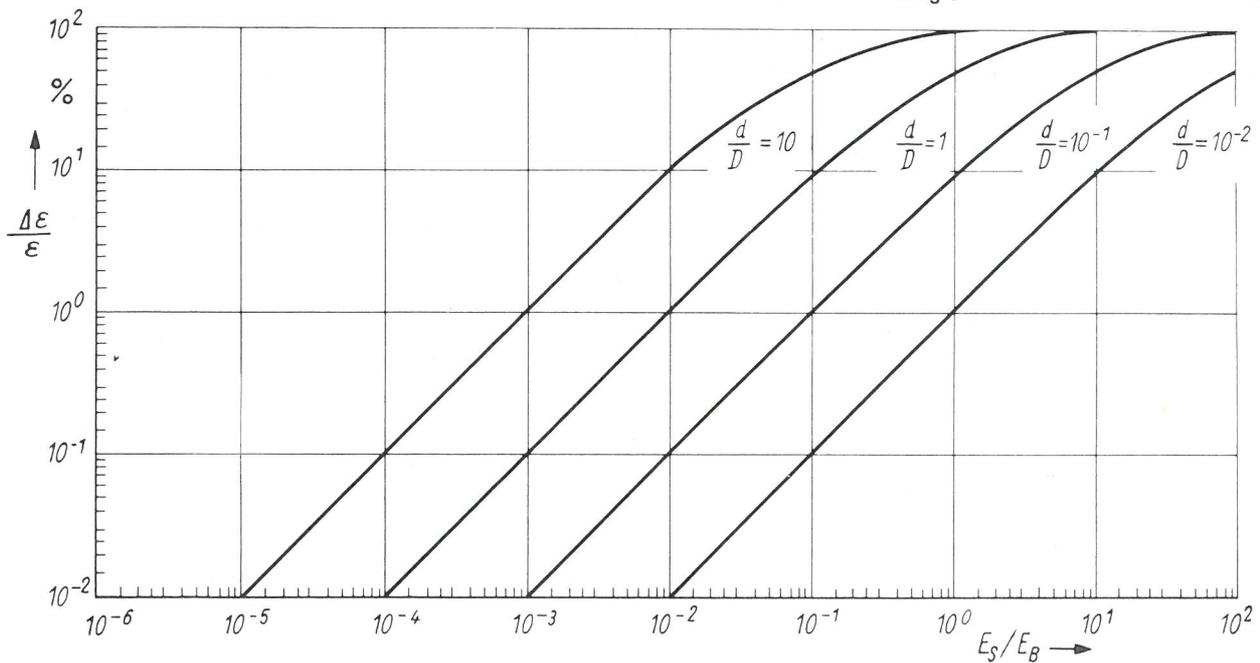


Bild 104

Die durch eine Schutzschicht mit dem E-Modul E_S auf einem Bauteil mit dem E-Modul E_B durch Versteifung verursachte Änderung der Normaldehnung ϵ für vier verschiedene Verhältnisse Schichtdicke d zu Bauteildicke D bei einachsiger Dehnung unter konstanter Normalspannung

bestimmt, wobei sicher $E_{\text{eingf.}} > E_{\text{de}}/dt \rightarrow \infty$ gilt, da unterhalb der Einfriertemperatur mehr Bindungen wirksam sind als oberhalb. Es gilt dann auch $E_{\text{eingf.}} \approx E'_{\text{eingf.}}$, da die Verluste unterhalb der Einfriertemperatur sehr klein sind. $E_{\text{eingf.}}$ konnte daher im einfachen Zugversuch gemessen werden. Die Meßwerte sind in Bild 106 eingetragen.

Außer der durch die Gleichungen (62) und (63) beschriebenen Versteifung tritt eine Rückwirkung der Schutzschicht auf das Bauteil auch dadurch auf, daß thermische und quellungsbedingte Längenänderungen der Schicht das Bauteil verformen. Bild 107 läßt erkennen, daß diese Rückwirkung sehr beträchtlich sein kann.

3.53 Die obere Dehngrenze und die Haftung der Schutzschicht

Für den praktischen Einsatz von Feuchteschutzmitteln ist auch die Kenntnis der maximal zulässigen Dehnungen wesentlich. Dabei interessiert nicht die eigentliche Bruchdehnung des freien Materials, sondern die Dehnung ϵ_{max} , die von der auf das Bauteil aufgetragenen Schutzschicht maximal ohne Schaden vertragen wird. Sie wird begrenzt durch das Entstehen von Rissen in der Schutzschicht und/oder durch Ablösung vom Bauteil.

Zur Untersuchung von ϵ_{max} wurden von den wichtigsten Schutzmitteln ca. 1 mm dicke Schichten auf einen 2 mm

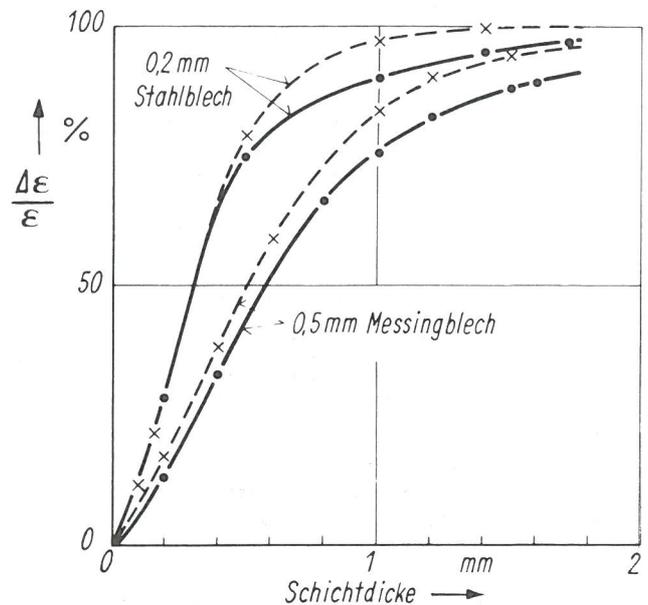


Bild 105
Dehnungsänderung $\Delta\epsilon/\epsilon$ zweier mit konstantem Biegemoment belasteter Bleche als Folge des Auftragens einer gleichmäßig dicken Schicht des Klebers X-60

----- berechnete Änderung
———— gemessene Änderung

Material	Temperatur in °C	E-Modul in $\text{Kp} \cdot \text{mm}^{-2}$	Modul $E_{\text{eingef.}}$ in $\text{Kp} \cdot \text{mm}^{-2}$	Bemerkungen
Träger aus Papier (Philips)	20	ca. 250		nach Rohrbach und Czaika Materialprüfung (1959) Nr. 4
Kleber GM 4479 (Philips)	20	ca. 180		"
Träger aus Phenolharzpapier	20	700–1500		nach Rohrbach und Czaika (unveröffentlicht)
Phenolharzkleber	20	ca. 700		"
Kleber X-60	20	ca. 600		mehr als 8 Tage nach Härtung eigene Messung
Kleber PR 9244	20	ca. 900		"
Formflex WS 60	-70		2,5–3,5	überwiegend eingefroren eigene Messung
AK-22	-70		2–3	"
Mikrokristallines Wachs (Produkt 192 a der Mobil Oil)	-2; -70		5–6	eingefroren eigene Messung
Eigenes Versuchsprodukt	-70		8–10	überwiegend eingefroren

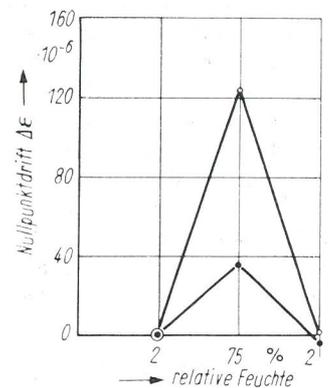
Bild 106
Elastizitätsmodul E bzw. Elastizitätsmodul $E_{\text{eingefr.}}$ für verschiedene Träger, Kleber und Abdeckmaterialien

dicken Stahlbalken aufgetragen. Dieser Balken wurde dann nacheinander über Zylinder verschiedener Durchmesser gebogen. Ist d_B die Balkendicke und D_Z der Zylinderdurchmesser, so ist die Biegedehnung ϵ an der Balkenoberfläche

$$\epsilon = \frac{d_B}{D_Z + d_B}$$

Nach dieser Methode wurde ϵ_{max} geprüft; das Ergebnis ist in Bild 108 eingetragen. Es ist ersichtlich, daß ϵ_{max} bis zu Temperaturen von ca. -20°C sicher größer als 1 % ist und damit für die weitaus meisten Anwendungsfälle ausreicht.

Der Einfluß der Bauteildehnung ϵ auf den Permeationskoeffizienten der Schutzschicht wurde hier nicht untersucht, da eine solche Untersuchung sehr umfangreich und nur bei gleichzeitiger Berücksichtigung von thermischen und von Quelldehnungen sinnvoll wäre. Bei Dehnungen unter 1 % ist ein wesentlicher Einfluß auch nicht zu erwarten, da bei



o bei freiem Blech
· nach dem Aufkleben des Blechs auf eine 5 mm dicke Stahlplatte

Bild 107
Mittlere Nullpunktdrift $\Delta\epsilon$ von zwei mit BC 6035 auf ein 0,2 mm Stahlblech von 30 mm Breite aufgeklebten Meßstreifen des Typs Hottinger 10/120 FB 3 bei einer Änderung der relativen Feuchte von 2 % \rightarrow 75 % \rightarrow 2 %

Bild 108
Maximal ertragene Dehnungen ϵ_{max} auf Stahl aufgetragener Schutzschichten

Material	Temperatur in °C	ϵ_{max} in %	Bemerkungen
AK-22	20 -22	> 2 > 2	
eigenes Versuchsprodukt	20 -20	> 2 > 2	
mikrokristallines Wachs	20 -22	> 2 > 1	platzt bei tiefen Temperaturen ab
Formflex WS 60	20 -20	> 2 > 2	

Material	Temperatur in °C	b_z in g	Bemerkungen
AK 22	20 29	> 2,5 > 1,7	Ablösung erfolgt stets durch Kohäsionsbruch
Eigenes Versuchsprodukt	20 29	> 1,7 > 1	Fließt ohne Ablösung
Mikrokristallines Wachs	20 40	> 20 > 2	
Formflex WS 60	20 40	> 20 > 20	
AK 22 mit ca. 1,5 mm dicker Deckschicht aus Formflex WS 60	20 40	> 15 > 7	AK 22 löst sich durch Kohäsionsbruch vom Stahl und fließt dann sehr langsam mit dem Formflex fort
Eigenes Versuchsprodukt mit ca. 1,5 mm dicker Deckschicht aus Formflex WS 60	20 40	> 15 > 12	Fließt ohne Ablösung mit dem Formflex fort

Bild 109

Von auf einen rotierenden Stahlzylinder mit horizontaler Rotationsachse aufgeklebten Scheiben aus Abdeckmaterial über länger als eine Stunde ertragene Zentrifugalbeschleunigung b_z

den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Permeationsmessungen an sehr unterschiedlich durchgekneteten – d. h. also plastisch verformten – und auch thermisch verschieden behandelten Proben keine ungewöhnliche Streuung auftrat.

Neben der oberen Dehngrenze interessiert auch die mit ihr verknüpfte Haftfestigkeit der Schutzschicht auf dem Bauteil. Sie spielt besonders bei Messungen an bewegten – speziell rotierenden – Teilen eine Rolle. Als kennzeichnende Größe wurde daher die Zentrifugalbeschleunigung b_z gewählt, die eine auf einen rotierenden Stahlzylinder mit horizontaler Rotationsachse aufgeklebte Scheibe von ca. 3 mm Dicke und etwa 25 mm ϕ länger als eine Stunde ohne erkennbare Veränderung erträgt. Um möglichst gut die Verhältnisse bei abgedeckten Meßstreifen nachzubilden, bei denen die Schutzschicht ja nicht auf dem Meßstreifenträger haften soll, wurde unter die Mitte der Probenscheibe eine nicht auf dem Stahl klebende Papierscheibe von 10 mm ϕ gelegt. Das Ergebnis der Versuche ist in Bild 109 wiedergegeben.

3.54 Der zulässige Temperaturbereich

Der Temperaturanwendungsbereich der Schutzmittel wird nach oben durch den Übergang in den flüssigen Zustand – z. B. beim AK 22, dem mikrokristallinen Wachs und dem eigenen Versuchsprodukt – oder durch den chemischen Zerfall begrenzt. Zu beachten ist jedoch, daß die Feuchteschutzwirkung wegen des starken Ansteigens der Permeation mit der Temperatur eventuell schon vor Erreichen der Grenztemperatur ungenügend ist, was sehr häufig übersehen wird.

Bild 110

Der Temperaturanwendungsbereich der wichtigsten Feuchteschutzmittel, abgeschätzt auf Grund eigener Erfahrungen beim praktischen Einsatz

Material	Temperaturbereich in °C	Erläuterungen
mikrokristallines Wachs	ca. 0 + 40	bei < 0°C spröde bei > 35°C zu weich, aber noch nicht flüssig
AK 22	ca. -30 + 50	bei < -30°C zunehmend spröde bei > 50°C zu weich, aber nicht flüssig
eigenes Versuchsprodukt	ca. -30 + 50	bei < -30°C zunehmend spröde bei > 50°C zu weich, aber nicht flüssig
Formflex WS 60	ca. -50 + 120	bei < -50°C spröde bei > 120°C nach Herstellerangabe nicht mehr dauerbeständig

Nach unten wird er begrenzt durch die Versprödung mit folgender Rißbildung bzw. Ablösung vom Bauteil infolge starker thermischer Schrumpfung relativ zum Bauteil. In Bild 110 sind Anhaltswerte für die wichtigsten Schutzmittel gegeben.

3.55 Die Alterungsbeständigkeit

Bei Langzeitversuchen muß die Schutzschicht auch alterungsbeständig sein. Von besonderer Bedeutung ist dabei Beständigkeit gegen Sauerstoff, Feuchtigkeit und Licht, da diese drei Einflußgrößen fast immer gegenwärtig sind. Ergebnisse eingehender Langzeitversuche im Freien liegen zur Zeit noch nicht vor, doch lassen orientierende Versuche mit einem Xenotestgerät darauf schließen, daß besonders das eigene Versuchsprodukt und auch das AK 22 innerhalb einer technisch interessanten Schutzzeit keine bedeutsamen Veränderungen erfahren. Proben aus diesen Materialien und aus mikrokristallinem Wachs wurden bei ca. 65 % relativer Feuchte und 38 bis 42°C über 1200 Stunden mit dem fünf-fachen Betrag der natürlichen Gesamtstrahlung innerhalb der gemäßigten Klimazone (etwa Raum Berlin–Hannover) bestrahlt: das mikrokristalline Wachs wurde schwarzbraun verfärbt und spröde, das AK 22 war an der Oberfläche etwas verhärtet, das eigene Versuchsprodukt zeigte keine erkennbaren Veränderungen. Die gute Beständigkeit des eigenen Versuchsproduktes dürfte sehr wesentlich auf die Al-Flitter zurückzuführen sein, die den schädlichen Einfluß der ultravioletten Strahlung weitgehend durch Reflektion verhindern.

3.6 Technische Regeln für den Feuchteschutz von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern

Die Auswahl eines guten Feuchteschutzmittels ist wohl eine Vorbedingung für einen ausreichenden Feuchteschutz, doch ist sie nutzlos, wenn die Installation der Schutzschicht unzweckmäßig ist. Folgende Grundregeln sollten deshalb sorgfältig beachtet werden, da sonst selbst Schutzschichten aus den besten Schutzmaterialien leicht aus scheinbar unerklärlichen Gründen versagen können.

- Das Schutzmaterial soll vor der Anwendung hinreichend lange gut getrocknet werden, da sonst unter Umständen allein schon die in der Schutzschicht enthaltene Feuchtigkeit – unabhängig von der äußeren Atmosphäre – den zu schützenden Meßstreifen unbrauchbar machen kann. Zumindest aber wird die Schutzzeit um die Anlaufzeit τ gekürzt. Für eine zum Abdecken vorbereitete Schicht von 2 mm Dicke, die auf beiden Seiten frei ist, sollten zum Vortrocknen – z. B. über tiefblauem Silica-Gel oder Phosphorpentoxid – bei 20°C ca. 30 bis 40 Tage ange-

4. Der Einfluß von Feuchtigkeit auf technisch geschützte Dehnungsmeßstreifen

4.1 Allgemeine Überlegungen

Alle bisherigen Versuche und Überlegungen dienten dem Zweck, die theoretischen und praktischen Voraussetzungen für einen technisch brauchbaren Schutz zu finden. Der letzte Beweis für die Richtigkeit dieser Überlegungen und besonders für die Brauchbarkeit der Schutztechnik wird aber erst durch das technisch reale Experiment erbracht.

Untersuchungen des Einflusses von Feuchtigkeit auf technisch geschützte Dehnungsmeßstreifen sind schon häufig durchgeführt worden (z. B. [L 1—L 9]). Da jedoch alle diese Versuche, soweit aus den Veröffentlichungen erkennbar ist, gänzlich unsystematisch und unter völlig willkürlichen Voraussetzungen und Anfangsbedingungen durchgeführt wurden, sind als Ergebnisse anstatt präziser Zahlenangaben oder Diagrammdarstellungen meist nur allgemeine Formulierungen wie „brauchbar“ oder „zufriedenstellend“ usw. mitgeteilt. Alle diese Untersuchungen sind daher ziemlich wertlos.

Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse einiger Langzeitversuche beschrieben werden, deren Ziel es ist, die grundsätzliche Richtigkeit obiger Überlegungen zu bestätigen und alle erst bei der praktischen Anwendung hervortretenden Mängel aufzuzeigen.

4.2 Die Änderung des komplexen Eingangswiderstandes Z^+ als Funktion der Zeit bei Lagerung technisch geschützter Dehnungsmeßstreifen in 100 % relativer Feuchte bzw. unter Wasser

4.2.1 Berechnete Änderungen

Im Kapitel 3 wurde die Gl. (50) aufgestellt, die den zeitlichen Verlauf des Feuchtegehaltes eines geschützten Raumes beschreibt. Sie ermöglicht nun hier die Berechnung der Schutzzeit t_s , innerhalb der die Feuchte im geschützten Raum von einem Anfangswert bis zu einem Endwert ansteigt:

$$t_s = \frac{d_s \cdot d_R \cdot L_R}{P_S^*} \cdot \ln \left(\frac{P_{i_0} - P_a}{P_i - P_a} \right)$$

Der Permeationskoeffizient P_S^* ist aus Bild 95 zu entnehmen, der Löslichkeitskoeffizient L_R aus Bild 87. Bei den im Folgenden beschriebenen Versuchen, die zur Verkürzung der Versuchszeit bei 34°C durchgeführt wurden, betrug die Dicke d_R des geschützten Raumes ca. 0,1 mm entsprechend der Dicke von Träger und Kleberschicht, da der über dem DMS befindliche Luftraum praktisch nichts zum Koeffizienten L_R beiträgt; die Dicke d_s der Schutzschicht betrug etwa 3 mm; der Anfangsinnendruck P_{i_0} entsprach etwa 5 % relativer Feuchte — zwischen dem Herausnehmen aus dem Exsikkator und dem völligen Verschließen des geschützten Raumes nimmt der Meßstreifen ja aus der Umgebung wieder etwas Feuchtigkeit auf —, als maximal zulässiger Innendruck P_i sei für die folgenden Versuche ein Wasserdampf-

partialdruck entsprechend 60 % relativer Feuchte angenommen; der Wasserdampfaußendruck P_a entspricht bei allen Versuchen 100 % relativer Feuchte.

Bei einer Meßstreifendicke von ca. 0,06 mm und einer mittleren Kleberschichtdicke von ca. 0,04 mm folgt aus Bild 87 für einen Phenolharzträger und den Kleber X-60 ein mittlerer Löslichkeitskoeffizient $L_R \approx 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{Torr}^{-1}$ bei 21°C. Da die Feuchtigkeitsaufnahme zwischen 20°C und 50°C bei konstanter relativer Feuchte näherungsweise gleich bleibt (vgl. Bild 57), verhält sich

$$(L_R)_{210} : (L_R)_{340} \approx (\text{Sättigungsdampfdruck})_{340} : (\text{Sättigungsdampfdruck})_{210}$$

Es ist daher

$$(L_R)_{340} \approx 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{Torr}^{-1}$$

Damit wird

$$t_s \approx \frac{4,7 \cdot 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}}{P_S^*}$$

Mit dem Permeationskoeffizienten aus Bild 95 folgt somit bei 34°C für die Schutzschicht aus

mikrokristallinem Wachs : $t_s \approx 140$ Tage
 AK-22 : $t_s \approx 9$ Tage
 eigenem Versuchsprodukt: $t_s \approx 140$ Tage

Die so erhaltene Schutzzeit t_s ist noch zu ergänzen durch die Anlaufzeit τ gemäß Gl. (51). Bei den hier vorliegenden Anfangsbedingungen wird mit den dynamisch ermittelten Diffusionskoeffizienten aus Bild 99 für das

mikrokristalline Wachs : $\tau \approx 6-7$ Tage
 AK-22 : $\tau \approx 20-25$ Tage
 eigene Versuchsprodukt: $\tau \approx 20-25$ Tage
 (D_s bei 34°C in Anlehnung an die anderen Kurvenverläufe geschätzt)

Nach der Gesamtzeit $T_s = t_s + \tau$ werden also im geschützten Raum, d. h. im Dehnungsmeßstreifen, etwa 60 % relativer Feuchte sein. Gemäß Bild 66 erfolgt bei einem ganz trocken aufgeklebten Meßstreifen des Typs 3/120 FB 4 bei einem Anstieg der relativen Feuchte von ca. 5 % auf ca. 60 % eine Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^* \approx 40 \cdot 10^{-6}$. Erreicht also bei den hier beschriebenen Versuchen die Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ gegenüber dem Anfangswert etwa $40 \cdot 10^{-6}$, so ist die Gesamtschutzzeit T_s abgelaufen.

4.2.2 Gemessene Änderungen

Zur experimentellen Erprobung der verschiedenen Schutzmittel wurden als zu schützende Dehnungsmeßstreifen solche ausgewählt, die sich bei den im Kapitel 1.3 beschriebenen Versuchen als besonders empfindlich gegen Feuchtigkeit erwiesen hatten, nämlich Hottinger-Meßstreifen des Typs 3/120 FB 4, die vor dem Aufkleben auf ca. 2 % relativer

Feuchte getrocknet worden waren. Diese Wahl wurde getroffen, um die Ergebnisse der Versuche mit verschiedenen Schutzmitteln möglichst gut miteinander vergleichen zu können.

Die Schutzmaterialien AK-22 und eigenes Versuchsprodukt waren länger als drei Monate in einer ca. 3–4 mm dicken Schicht über Silica-Gel getrocknet worden und hatten daher einen etwa 2 % relativer Feuchte entsprechenden Gleichgewichtszustand erreicht. Das mikrokristalline Wachs war durch etwa 72-stündiges Erwärmen auf ca. 100°C ebenfalls auf etwa 2 % relativer Feuchte getrocknet worden. Das Aufbringen des eigenen Versuchsproduktes erwies sich in der Praxis wegen seiner starken Klebrigkeit als etwas schwierig, doch war ja andererseits diese Klebrigkeit eine notwendige und daher angestrebte Voraussetzung für die Brauchbarkeit des Materials; es wurde daher nichts unternommen, um diese Klebrigkeit zu vermindern.

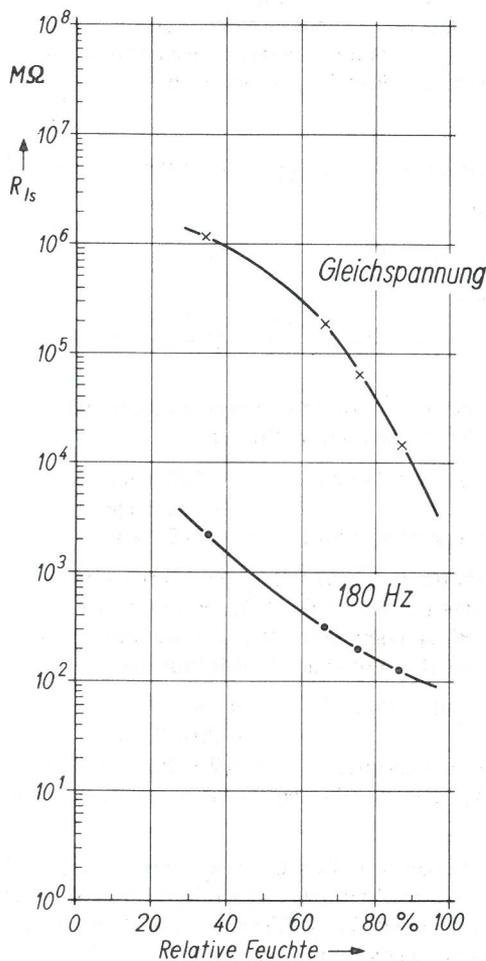


Bild 113
Isolationswiderstand eines Meßstreifens 3/120 FB 4, mit X-60 auf Stahl geklebt, bei einer Meßfrequenz von 180 Hz und bei Gleichspannung

Die auf ca. 6 mm dicke Stahlplatten aufgeklebten Meßstreifen wurden gemäß der im Abschnitt 3.6 beschriebenen Technik mit etwa 3 mm dicken Schutzschichten abgedeckt. Nachdem die Abdeckung aufgebracht und bis auf einen kleinen Spalt geschlossen worden war, wurden sie nochmals 24 Stunden über Silica-Gel getrocknet, um einen möglichst definierten Anfangszustand zu erhalten; anschließend wurde die Abdeckung geschlossen. Bei einigen Meßstreifen wurde

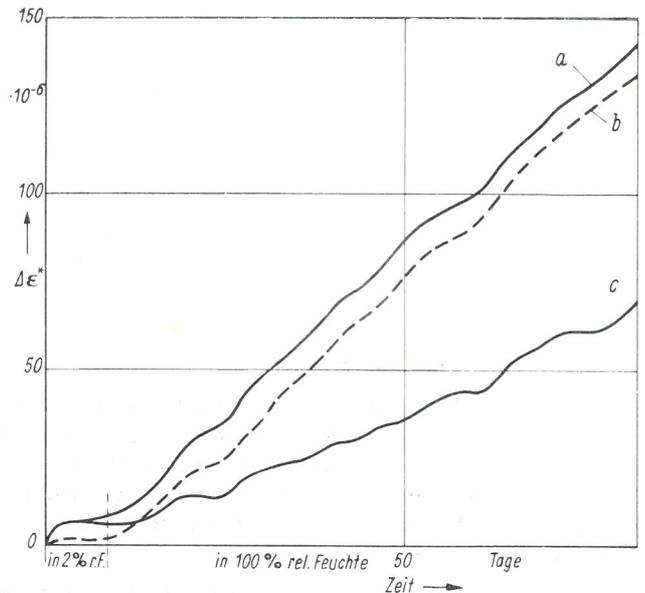


Bild 114
Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ dreier mit einer ca. 3 mm dicken Schicht aus mikrokristallinem Wachs abgedeckter Dehnungsmeßstreifen des Typs 3/120 FB 4 bei Lagerung in 100 % rel. Feuchte und 34°C

- a, b nur Wachs
- c zusätzlich mit einer 0,01 dicken Al-Folie abgedeckt

dann noch zusätzlich eine 0,01 mm dicke Aluminiumfolie aufgeklebt. Als Anschlußleitungen wurden polyäthylenisolierte Schaltdrähte verwendet. Die Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ der Meßstreifen wurde mit dem manuellen Kompensator MK von Hottinger gemessen, dessen Trägerfrequenz nur ca. 180 Hz beträgt; in dem interessierenden Feuchtebereich unterhalb 75 % relativer Feuchte war daher kein störender Einfluß des Isolationswiderstandes auf die Nullpunktdrift zu befürchten, wie aus Bild 113 hervorgeht ($R_{1s} \geq 100 \text{ M}\Omega$).

Die somit gegen Feuchtigkeit technisch geschützten Meßstreifen wurden in Exsikkatoren in einem Thermostaten bei 34°C gelagert; die etwas erhöhte Temperatur wurde gewählt, um die Versuchsdauer zu verkürzen. Auch der in einem Metallgehäuse hermetisch gekapselte Vergleichswiderstand (für alle Proben derselbe) wurde im Thermostaten gelagert.

In den Exsikkatoren befand sich zunächst (einige Tage) Silica-Gel, bis die Nullpunktdrift etwa Null war. Dann wurde in ihnen mit etwas Wasser 100 % relative Feuchte erzeugt bzw. die geschützten Meßstreifen wurden direkt unter Wasser gesetzt. Gemessen und auch in den Diagrammen aufgetragen wurde die Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$, die der Änderung $\Delta Z_{+0}^+ / Z_{+0}^+$ des Eingangswiderstandes Z_{+0}^+ proportional ist, da $\Delta\epsilon^*$ auch die in der Praxis direkt interessierende Größe ist. Das Ergebnis der Versuche ist aus den Bildern 114 bis 120 zu entnehmen.

Die Bilder 114 und 115 zeigen das Ergebnis der mit mikrokristallinem Wachs (Wachsprodukt 192 a der Mobil-Oil) durchgeführten Versuche. Zur Zeit 0 wurden die über Silica-Gel bei etwa 2 % relativer Feuchte gelagerten Proben in den 34°C warmen Thermostaten gebracht. Durch die Temperaturerhöhung wird die Zwängungsspannung im Meßstreifen ähnlich wie bei einer Feuchtigkeitsabsorption so stark erhöht, daß ein geringfügiges Entlastungskriechen auftritt; nach 1 bis 2 Wochen ist dieser Vorgang praktisch abgeschlossen. Erst dann wurden die Proben der Feuchtigkeit ausgesetzt. Der Nullpunkt der Dehnungsmeßbrücke wurde

mit einer temperaturkompensierten und gekapselten Dehnungsmeßstreifenhalbbrücke laufend kontrolliert. Die Versuche störende Driften wurden dabei nicht beobachtet.

Das Ergebnis dieser Versuche ist in mehrfacher Hinsicht überraschend:

- In 100 % relativer Feuchte (Bild 114) wird eine Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ von $40 \cdot 10^{-6}$ bereits nach ungefähr drei Wochen erreicht, während nach der Rechnung gemäß Abschnitt 4.21 eine Zeit von 21 Wochen zu erwarten war.
- Die zusätzlich aufgeklebte Aluminiumfolie bewirkt nur eine Verbesserung um den Faktor 2 anstatt des abgeschätzten Faktors 10–20.

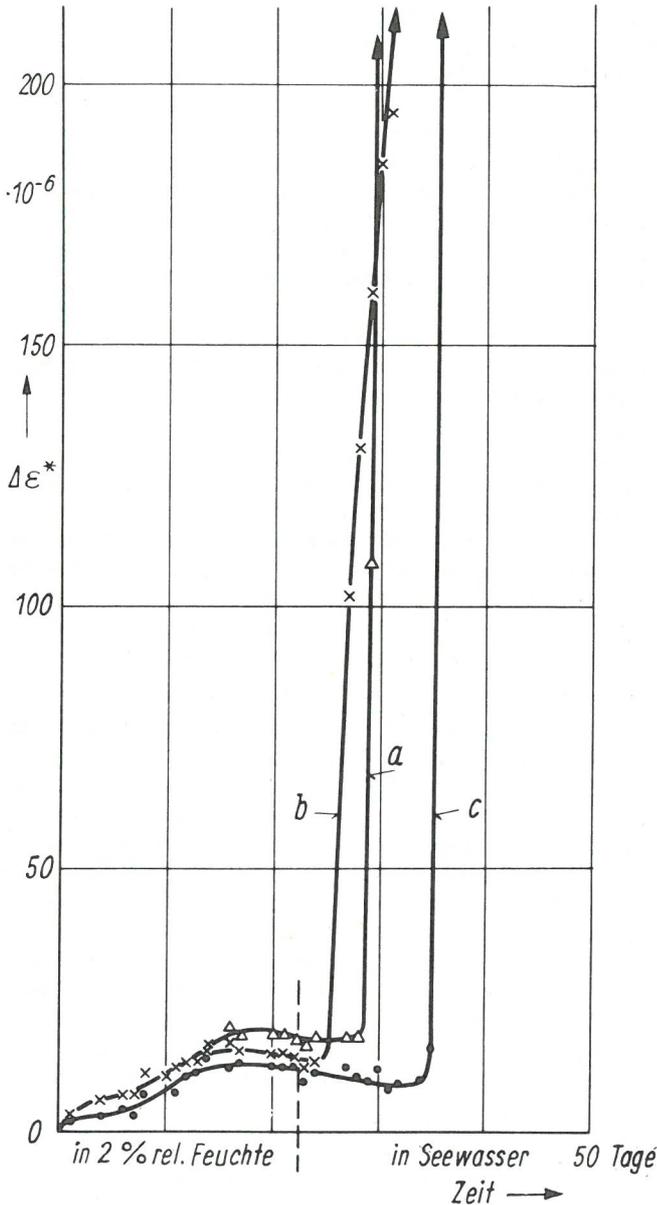


Bild 115
Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ dreier mit einer ca. 3 mm dicken Schicht aus mikrokristallinem Wachs abgedeckter Dehnungsmeßstreifen des Typs 3/120 FB 4 bei Lagerung in Seewasser von 34°C

- nur Wachs
- Wachs + Al-Folie
- Wachs + Al-Folie + ca. 1 mm Schicht aus Formflex WS 60

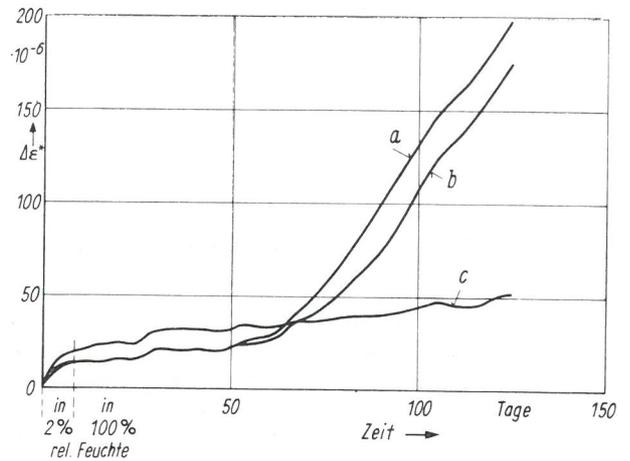


Bild 116
Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ dreier mit einer ca. 3 mm dicken Schicht aus AK 22 abgedeckter Dehnungsmeßstreifen des Typs 3/120 FB 4 bei Lagerung in 100 % rel. Feuchte von 34°C

- nur AK 22
- AK 22 + Al-Folie

- Bei Lagerung unter Wasser wirkt der Schutz nur wenige Tage und ist dann sehr plötzlich wirkungslos.

Den ersten Hinweis auf die Ursache dieses Versagens liefert der Effekt b): Wenn die Aluminiumfolie trotz ihrer Feuchteundurchlässigkeit nur eine relativ geringe Verbesserung des Schutzes bewirkt hat (Bild 114), so muß die Feuchte vorwiegend längs der Grenzschicht Wachs-Bauteiloberfläche eingedrungen sein. Tatsächlich zeigte sich nach Beendigung dieser Versuche, daß die ursprünglich hervorragende Haftung des Wachses auf dem Bauteil nur noch gering war und ferner die anfangs blanke Metalloberfläche unter dem Wachs vom geschützten Raum her nach außen zunehmend Korrosion aufwies. Die Feuchtigkeit hebt also, von außen nach innen vordringend, nach und nach die Haftung der Grenzschicht auf. Bei dem Unterwasserversuch (Bild 115) wurde deshalb bei einer Probe die Wachsschicht zusätzlich mit einer zwar sehr feuchtedurchlässigen, aber dafür auch unter Wasser hervorragend haftenden Schicht aus Formflex WS 60

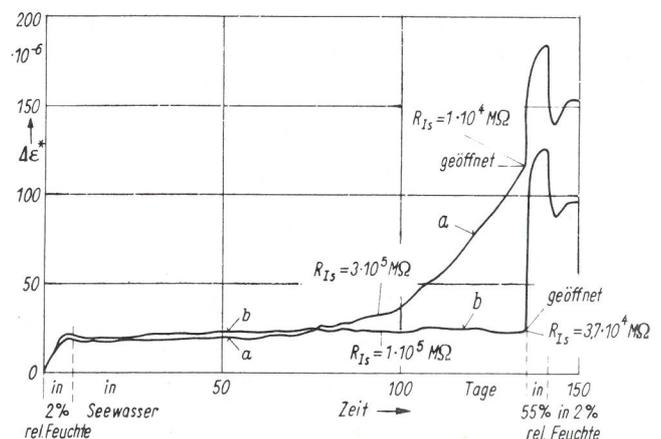


Bild 117
Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ zweier mit einer ca. 3 mm dicken Schicht aus AK 22 abgedeckter Dehnungsmeßstreifen des Typs 3/120 FB 4 bei Lagerung in Seewasser von 34°C

- nur AK 22
- unter der Schutzschicht noch 0,25 g Silica-Gel

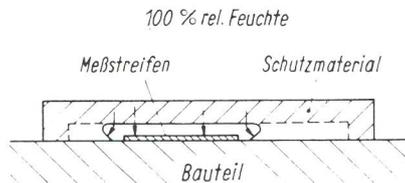


Bild 118
Schematische Darstellung eines realen Feuchteschutzes, vereinfacht

an das Bauteil geklammert. Tatsächlich wurde der Schutz hierdurch doppelt so lange wirksam, um dann jedoch ebenso abrupt aufzuhören wie bei den anderen Proben. Weitere Versuche mit dem Wachs zeigten, daß das in den Bildern 114 und 115 wiedergegebene Verhalten auch bei extremer Sauberkeit und Sorgfalt auftritt. Das mikrokristalline Wachs ist deshalb trotz seines kleinen Permeationskoeffizienten und seiner leichten Handhabung zum Feuchteschutz unter extremen Feuchtebedingungen nicht geeignet. Versuche mit anderen Wachsen ergaben noch schlechteres Haftungsverhalten.

Die mit dem Abdeck-Kitt AK-22 von Hottinger erhaltenen Ergebnisse sind in den Bildern 116 und 117 wiedergegeben. Gemäß der im Abschnitt 4.21 durchgeführten Rechnung war hier mit einer Gesamtschutzzeit $T_s = t_s + \tau$ von etwa 4 bis 5 Wochen zu rechnen, innerhalb derer eine Drift $\Delta\epsilon^*$ von ungefähr 40×10^{-6} auftreten sollte (gerechnet vom Tage des Einbringens in die feuchte Atmosphäre). Hier ist jedoch T_s wesentlich größer als erwartet. Als Ursache hierfür ist unter anderem eine Vergrößerung des Löslichkeitskoeffizienten L_R durch Anteile von L_S anzunehmen, vgl. Bild 118: Innerhalb der Anlaufzeit τ dringt die Feuchtigkeit von außen her bis an die Grenzen des schraffierten Bereiches der Schutzschicht vor und gelangt dann in den geschützten Raum. Dort wird sie nicht nur vom Meßstreifen — wie in der Rechnung angenommen —, sondern auch von den Seitenwänden absorbiert. Da AK-22 — im Gegensatz zum eigenen Versuchsprodukt und zum Wachs — einen relativ großen Löslichkeitskoeffizienten L_S besitzt — ca. 10 % von L_R bei gleichzeitig mehr als zehnfach größerem Absorptionsvolumen und größerem Diffusionskoeffizienten —, ist der reale Löslichkeitskoeffizient L_R in diesem Fall anfangs mehr als doppelt so groß wie der in der Rechnung angenommene. T_s müßte daher etwa 35 bis 40 Tage betragen, liegt aber tatsächlich bei ca. 65 bis 70 Tagen. Die Ursache für diese verbliebende Differenz dürfte in der Unsicherheit bei der Bestimmung der in die Rechnung eingehenden Parameter (δ , d , L_R , P_S^*) und in den vereinfachenden Annahmen liegen, die zur Durchführung der Berechnung gemacht wurden (unter anderem durch Streuung bedingte Unsicherheit bei der Annahme, daß zwischen 5 % und 60 % r. F. eine Nullpunktdrift von 40×10^{-6} auftritt).

Ein wesentliches Ergebnis des in Bild 116 dargestellten Versuches besteht darin, daß die Nullpunktdrift $\Delta\epsilon^*$ der zusätzlich mit einer Aluminiumfolie abgedeckten Probe erheblich kleiner ist als jene der beiden anderen Proben. Wegen des großen Anteils der Anlaufzeit τ an der Gesamtschutzzeit T_s und wegen des nicht überschaubaren Einflusses der Al-Folie auf τ läßt sich jedoch der wirksame Verbesserungsfaktor nach drei Monaten Versuchsdauer noch nicht angeben. Es ist jedoch erkennbar, daß die für die Beurteilung der Schutzwirkung allein interessanten Quelledriften — Gesamtdriften abzüglich Anfangsdrift infolge Temperaturerhöhung — nach drei Monaten im Verhältnis etwa 1 : 5 stehen.

Bild 117 zeigt das Verhalten bei Lagerung unter Seewasser (Seewasser gemäß DIN 50 900). Der Meßstreifen ohne Silica-Gel (entsprechend den Meßstreifen in Bild 116) zeigt ein merkliches Ansteigen der Nullpunktdriftgeschwindigkeit erst nach ca. 70 Tagen Lagerung unter Seewasser (etwa 15 Tage später als die Meßstreifen in Bild 116). Der zur Vergrößerung von L_R zusätzlich mit 0,25 g feinkörnigem Silica-Gel geschützte Meßstreifen zeigte auch nach 127 Tagen unter Seewasser noch keine merkliche Nullpunktdrift; bei diesem Silica-Gel ($L_R \approx 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3} \text{ Torr}^{-1}$ bei 34°C) ist hierbei auch eine Vergrößerung von t_s etwa um den Faktor 20 zu erwarten. Nach 127 Tagen Lagerung unter Wasser wurde das Seewasser durch eine Atmosphäre mit ca. 55 % relativer Feuchte ersetzt und anschließend die Schutzschicht vorsichtig geöffnet. Wie ersichtlich, tritt sofort eine starke Nullpunktdrift im Sinne weiterer Quellung auf; die relative Feuchte unter der Schutzschicht war also noch kleiner als 55 %. Auffallend ist die starke Nullpunktdrift beider Meßstreifen in einer Atmosphäre mit 55 % relativer Feuchte. Offensichtlich standen sie z. Zt. des Aushärtens des Klebers während des Aufklebens unter einer höheren Zwängungsspannung als jener gemäß Bild 66 bzw. jener gemäß Bild 119. Die Ursache hierfür dürfte unter anderem darin liegen, daß die Meßstreifen gemäß Bild 117 im Winter geklebt wurden — d. h. in einem sehr trockenen Labor, so daß zwischen Herausnehmen aus dem Exsikkator und dem Aushärten des Klebers kaum Feuchtigkeit absorbiert wurde —, während die anderen im Sommer bei sehr viel höherer relativer Feuchte aufgeklebt wurden und vermutlich vor dem Härten des Klebers schon etwas gequollen waren.

Nach Abbruch des Versuches ergab eine sorgfältige Untersuchung, daß zwar die Schutzschichten noch gut auf dem Metall hafteten, andererseits aber, von außen nach innen vordringend, eine leichte Korrosion der ursprünglich blanken Metalloberfläche erfolgt war. Das zeigt erneut — die weiteren Versuche bestätigen diese Annahme ebenfalls —, daß bei wenig durchlässigen Schutzmaterialien die Hauptgefahr in einer Unterwanderung der Schutzschicht besteht.

In den Bildern 119 und 120 sind die mit dem eigenen Versuchsprodukt erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Erwartungsgemäß ist die Schutzzeit T_s hier wesentlich größer als beim AK-22. Die Anfangsdrift der Probe c ist erheblich größer als jene von a und b, da das Entlastungskriechen bei ihr nicht nur durch die Temperaturerhöhung ΔT beim Einbringen in den Thermostaten, sondern zusätzlich durch Feuchtigkeit verursacht wurde, die aus dem Feuchtevorrat der nicht vortrockneten Schutzschicht in den Meßstreifen diffundiert ist. Wegen $L_S \approx 1 \%$ von L_R ist aber die insgesamt aus diesem Feuchtevorrat in den Meßstreifen diffundierte Menge nicht sehr groß, so daß in diesem Fall die Schutzzeit T_s nicht wesentlich schlechter ist als die von a und b, wie der Öffnungsversuch zeigt; die vergrößerte Anfangsdrift ist jedoch störend.

Nach 185 bzw. 187 Tagen Lagerung bei 100 % rel. Feuchte und 34°C wurden die Proben c bzw. b geöffnet und zunächst 55 % r. F., dann 75 % r. F. ausgesetzt. Das durch Trocknung verursachte Rückdriften in 55 % r. F. zeigt, daß im geschützten Raum R schon mehr als 55 % r. F. gewesen sein müssen; das starke Quelledriften in 75 % r. F. läßt andererseits erkennen, daß in R sicher erheblich weniger als 75 % r. F. waren. Der Feuchtigkeitsgehalt im geschützten Raum muß also etwa bei 60 bis 65 % r. F. gelegen haben. Diese Feuchtigkeit entspricht etwa der erwarteten. Der Versuch

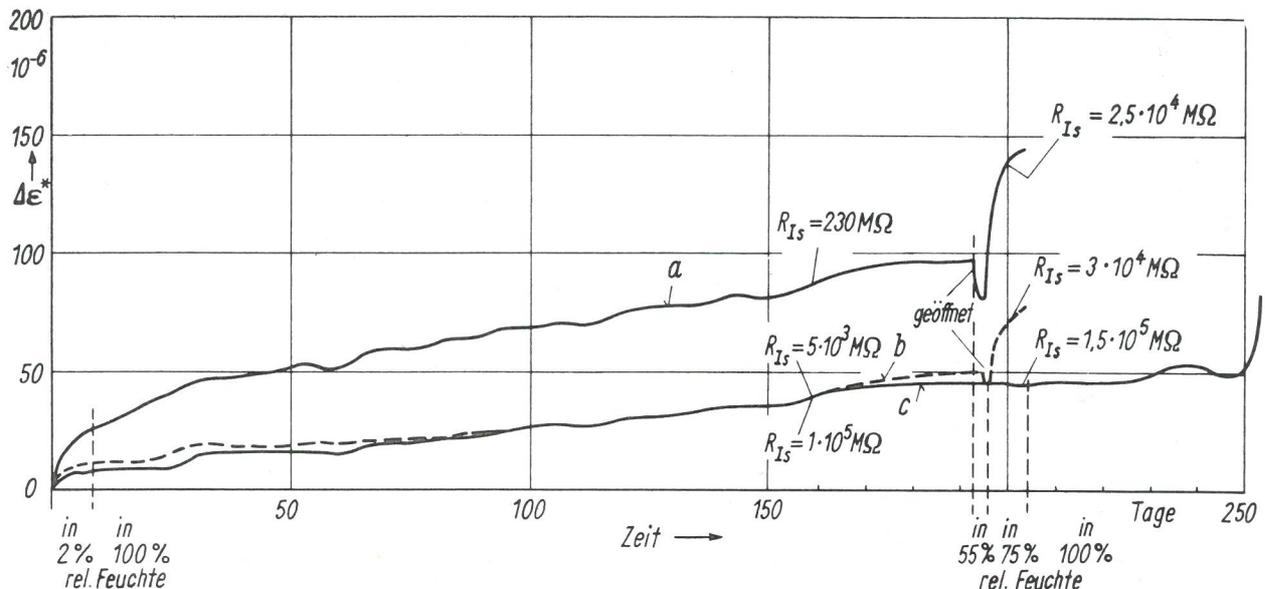


Bild 119

Nullpunkt drift $\Delta\epsilon^*$ dreier mit einer ca. 3 mm dicken Schicht aus dem eigenen Versuchsprodukt abgedeckter Dehnungsmeßstreifen des Typs 3/120 FB 4 bei Lagerung in 100 % rel. Feuchte von 34°C

- a nur eigenes Versuchsprodukt, nicht vorgetrocknet
- b nur eigenes Versuchsprodukt, vorgetrocknet
- c eigenes vorgetrocknetes Versuchsprodukt + Al-Folie

mit der Probe a, die zusätzlich mit einer ca. 0,01 mm dicken Al-Folie abgedeckt war, wurde bis zum 256. Versuchstag fortgeführt.

Nach Abbruch des Versuches wegen des plötzlichen Versagens der Schutzschicht ergab eine sorgfältige Untersuchung folgendes: Die Schutzschicht ließ sich unter Bildung eines Kohäsionsbruches unmittelbar über der Grenzschicht Eisen-Schutzmaterial leicht geschlossen abheben, wobei die Grenzschicht schmierig wirkte. Unter dem Mikroskop zeigte sich, daß das Schutzmaterial in der Grenzschicht nahezu keine Al-Flitter mehr enthielt, während die Eisenoberfläche tupferförmig kleine Roststellen aufwies. Das Schutzmaterial in der Grenzschicht bestand aus einem weich-schmierigen und einem körnigen Anteil, während der Rest des Materials sowie Proben desselben, die gleich lange in Leitungs- bzw. Seewasser gelagert worden waren, praktisch keine Veränderung aufwies. Die Ursache der Veränderung ist deshalb wohl zunächst eine Lokalelementbildung zwischen Al und Fe, die dann eine bisher nicht geklärte Reaktion mit dem Ergebnis eines Abbaus des verwendeten Oppanols zu kleineren Molekülen hin einleitet.

Bemerkenswert an dem in Bild 119 dargestellten Versuch ist noch, daß der nach 160 Versuchstagen mit Gleichspannung gemessene Isolationswiderstand R_{1s} der geschützten Proben sehr viel niedriger war als der nach dem Öffnen der Schutzschicht bei 75 % r. F. gemessene, obwohl im geschützten Raum nach 160 Tagen sicher weniger als 60 % r. F. waren; die Ursache muß daher im Bereich der Zuleitungen liegen. Tatsächlich ließ sich dieser Effekt auch vermeiden, wenn die Abdichtung im Bereich der Zuleitungen mit extremer Sorgfalt ausgeführt wurde. Dieser Umstand läßt nicht nur erkennen, daß ein langdauernder Schutz außerordentlich große Sorgfalt bei der Installation erfordert, sondern zeigt auch erneut, wie wenig aussagefähig die Messung des Isolationswiderstandes ist.

Das Verhalten bei Lagerung unter Seewasser geht aus Bild 120 hervor. Hier wurde eine Meßstelle schon nach 24 Tagen defekt. Wie eine spätere Untersuchung ergab, war die Schutzschicht offensichtlich von einer Seite her unterwandert worden (starke Korrosion in einem kleinen Bereich); eventuell haftete die Schutzschicht hier infolge ungenügender Sauberkeit nicht einwandfrei. Andererseits waren hier auch z. T. die gleichen Zersetzungen zu beobachten, wie sie beim Versuch gemäß Bild 119 aufgetreten waren.

Die zweite Meßstelle war zusätzlich zum eigenen Versuchsprodukt mit einer ca. 1 mm starken Schicht aus Formflex WS 60 überzogen worden; diese Schicht gibt dem klebrig-plastischen Versuchsprodukt einen guten mechanischen

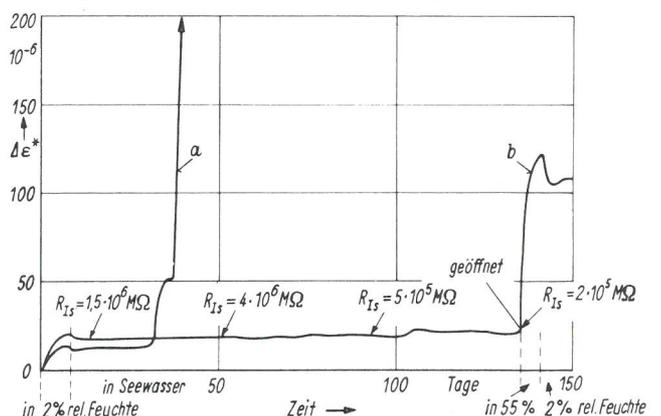


Bild 120

Nullpunkt drift $\Delta\epsilon^*$ zweier mit einer ca. 3 mm dicken Schicht aus dem eigenen Versuchsprodukt abgedeckter Dehnungsmeßstreifen des Typs 3/120 FB 4 bei Lagerung in Seewasser von 34°C

- a nur eigenes Versuchsprodukt
- b eigenes Versuchsprodukt + 1 mm Schicht aus Formflex WS 60

Schutz, ohne die Feuchteschutzwirkung direkt zu beeinflussen (P_S^* von WS 60 ist mehr als 2 Größenordnungen größer als P_S^* vom eigenen Versuchsprodukt). Diese Meßstelle zeigte nach 127 Tagen unter Wasser noch keine merkliche Nullpunktdrift. Nach dem Abbruch des Versuches waren weder Spuren einer Unterwanderung noch einer Zersetzung zu erkennen. Offenbar enthält das WS 60 eine Substanz (evtl. der bleihaltige Vernetzer), die den Zersetzungsprozeß verhindert.

4.23 Diskussion des Vergleichs von Messung und Rechnung

Die experimentelle Erprobung der in der Voruntersuchung als am besten herausgefundenen Feuchteschutzmaterialien hat gezeigt, daß einerseits das mikrokristalline Wachs infolge Ablösung völlig versagt, andererseits aber die Materialien AK-22 und eigenes Versuchsprodukt die auf Grund der vorangegangenen Überlegungen in sie gesetzten Erwartungen erfüllen. Die gemessenen Schutzzeiten erwiesen sich zwar als durchweg größer als die berechneten, doch liegt die Differenz durchaus noch im Bereich der durch die vereinfachenden Annahmen und durch die Schwierigkeit bei der Bestimmung der maßgebenden Parameter bedingten Unsicherheit.

4.3 Zusammenfassung

Das Ergebnis der praktischen Erprobung von Feuchteschutzmaterialien unter technisch realen Bedingungen läßt sich wie folgt beschreiben:

Von den in Kapitel 3 ausgewählten Schutzmaterialien erwiesen sich nur die extrem zäh-plastischen Substanzen AK-22 und eigenes Versuchsprodukt als brauchbar; das mi-

krokristalline Wachs — Wachsprodukt 192 a der Mobil-Oil; ähnliches gilt auch für andere Wachse — verliert in 100 % r. F. bzw. unter Wasser so stark an Haftfähigkeit, daß längs der Grenzfläche Wachs—Bauteiloberfläche eine Unterwanderung erfolgt.

Ein über viele Monate hin wirksamer Schutz erfordert ausreichende Trocknung von Meßstreifen und Schutzmaterial sowie extrem sorgfältige Installation der Schutzschicht. Unter dieser Voraussetzung läßt sich dann allerdings auch erreichen, daß der Anstieg der relativen Feuchte im geschützten Raum von 5 % auf 60 % z. B. unter einer nur 3 mm dicken Schutzschicht aus dem eigenen Versuchsprodukt selbst bei 34°C und 100 % r. F. im Außenraum länger als ein halbes Jahr dauert; bei 20°C würde der Anstieg etwa 1 1/2 Jahre dauern.

Wird auf die Schutzschicht zusätzlich eine nur 10 μ dicke Metallfolie aufgeklebt, so wird der Schutz voraussichtlich etwa um den Faktor 10 verbessert; wegen der guten Schutzwirkung und der dadurch bedingten langen Versuchsdauer konnte der Verbesserungsfaktor jedoch bis zum Abschluß dieses Manuskriptes noch nicht genau experimentell bestimmt werden.

Durch Einbringen eines gut vorgetrockneten physikalischen Trockenmittels in den geschützten Raum \bar{R} (z. B. 0,4–0,5 g tiefblaues, feinkörniges Silica-Gel pro cm^2 Grundfläche von \bar{R}) wird die Schutzzeit voraussichtlich etwa um den Faktor 20 verbessert.

Unter der Voraussetzung größter Sorgfalt bei der Installation läßt sich die Schutzzeit T_s eines Feuchteschutzes nach der im Kapitel 3 beschriebenen Methode angenähert voraus berechnen.

Die Messung des Isolationswiderstandes hat sich — über die im Kapitel 1 beschriebenen Ursachen hinaus — auch hier erneut als nicht hinreichend aussagefähig bezüglich der Güte und des Zustandes eines Feuchtigkeitsschutzes erwiesen.

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, das Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen (DMS) und Halbleitern systematisch zu untersuchen und eine technisch praktikable Schutzmethode zu finden, die eine Störung durch Feuchtigkeit wenigstens innerhalb einer begrenzten Zeit verhindert.

Zunächst wurde untersucht, in welcher Weise Feuchtigkeit DMS und Halbleitern störend beeinflußt. Es wurde gefunden, daß nicht nur, wie bisher angenommen, störende Isolationsdefekte im Träger und in der Kleberschicht auftreten, sondern daß vor allem eine feuchtebedingte Quellung des Trägers zu erheblichen Meßfehlern führen kann (Kapitel 1.34, Bilder 66 bis 73). Als Isolationsdefekt ist nicht nur der wirksame Isolationswiderstand zwischen Leiter und metallischem Bauteil, sondern auch der wirksame Isolationsquerwiderstand innerhalb der isolierenden Schicht, besonders des Trägers, anzusehen (Kapitel 1.2, Bilder 48 bis 50); beide Isolationswiderstände sind komplex. Bei Verwendung von Trägerfrequenzmeßbrücken ist deshalb nicht der üblicherweise gemessene Gleichspannungsisolationswiderstand wirksam, sondern der ohmsche Widerstand im Parallelschaltbild des komplexen Isolationswiderstandes; diese beiden Widerstände aber sind stark frequenzabhängig und bei hohen Frequenzen — üblich sind Trägerfrequenzen bis zu 50 kHz — z. T. um viele Zehnerpotenzen kleiner als bei Gleichspannung (Kapitel 1.2, Bilder 34 bis 40 bzw. 50). Darüber hinaus wurde festgestellt, daß zwischen der Größe der Isolationswiderstände und der durch sie verursachten Störung kein allgemein gültiger, überschaubarer Zusammen-

hang besteht (Kapitel 1.22 und 1.26). Ursache und Wirkungsweise der verschiedenen Isolationsdefekte werden diskutiert.

Die durch Feuchtigkeit verursachte Quellung des Trägers bewirkt zum Teil erhebliche Nullpunktwanderungen, deren Größe von der Vorgeschichte des DMS bzw. Halbleiters abhängig ist (z. B. Bild 66). Diese Wanderungen treten auch in Bereichen der relativen Feuchte auf, in denen Isolationsdefekte mit Sicherheit auszuschließen sind. Die Trägerquellung beeinflußt geringfügig auch den k-Faktor und den Temperaturkoeffizienten (Kapitel 1.34, Bilder 77 und 78); wahrscheinlich hängt auch die Querempfindlichkeit von der Quellung ab. Die Ursachen der Quelleffekte wurden systematisch untersucht und beschrieben.

Es war somit gezeigt, daß ein wirksamer Feuchteschutz nur durch einen möglichst hermetischen Abschluß des DMS erreicht werden kann. Da auf die Verwendung von Kunststoffen nicht verzichtet werden kann, diese andererseits stets feuchtedurchlässig sind, wurden zunächst die Bedingungen für einen optimalen Schutz abgeleitet (Kapitel 3.1 und 3.2). Anschließend wurden die handelsüblichen Schutzmittel untersucht (Kapitel 3.3) und als unbrauchbar oder nicht ausreichend erkannt. Auf Grund von systematischen Überlegungen und Versuchen wurde daher ein neues, etwa optimales Schutzmittel und weiter auch eine geeignete, technisch praktikable Schutzmethode entwickelt. Die Erprobung im Langzeitversuch ergab eine befriedigende Übereinstimmung zwischen berechneter und tatsächlich erreichter Schutzzeit (Kapitel 4, Bilder 119 und 120).

Zur Entwicklung der Gl. (62):

Aus Gl. (57) folgt:

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{E_2 J_2}{E_1 J_1} \quad (a)$$

Aus Gl. (58) folgt unter Verwendung von Gl. (52):

$$M_3 = M_1 \cdot \frac{E_3 J_3}{E_1 J_1} \quad (b)$$

Aus Gl. (60) folgt:

$$N_3 = N_2 \cdot \frac{E_3 F_3}{E_2 F_2} - M_2 \cdot e_{2,3} \cdot \frac{E_3 F_3}{E_2 J_2} - M_3 \cdot e_{3,2} \cdot \frac{F_3}{J_3} \quad (c)$$

Durch Einsetzen von (a) und (b) in (c) wird

$$N_3 = N_2 \cdot \frac{E_3 F_3}{E_2 F_2} - M_1 \frac{E_3 J_3}{E_1 J_1} (\epsilon_{3,2} + \epsilon_{2,3}) \quad (d)$$

Damit lässt sich Gl. (56) umformen in

$$\begin{aligned} M &= M_1 + M_1 \frac{E_2 J_2}{E_1 J_1} + M_1 \frac{E_3 J_3}{E_1 J_1} - N_2 \cdot a_{1,2} - [N_2 \cdot \frac{E_3 F_3}{E_2 F_2} - M_1 \cdot \frac{E_3 F_3}{E_1 J_1} \cdot e_{2,3} \\ &\quad - M_1 \cdot \frac{E_3 F_3}{E_1 J_1} \cdot e_{3,2}] a_{1,3} \\ &= M_1 \cdot \left[\frac{\sum EJ + a_{1,3} \cdot \frac{E_3 F_3}{E_1 J_1} (e_{2,3} + e_{3,2})}{E_1 J_1} \right] - N_2 [a_{1,2} + \frac{E_3 F_3}{E_2 F_2} \cdot a_{1,3}] \end{aligned} \quad (e)$$

Aus Gl. (55) folgt:

$$N_1 = - (N_2 + N_3)$$

Damit lässt sich Gl. (59) umformen in

$$N_2 = - N_2 \cdot \frac{E_2 F_2}{E_1 F_1} - N_3 \cdot \frac{E_2 F_2}{E_1 F_1} - M_1 \cdot \frac{E_2 F_2}{E_1 J_1} (e_{2,1} + e_{1,2})$$

Mit (d) wird daraus unter Verwendung von

$$\begin{aligned} (e_{2,1} + e_{1,2}) &= a_{1,2} \quad \text{und} \quad (e_{3,2} + e_{2,3}) = (a_{1,3} - a_{1,2}): \\ N_2 &= - M_1 \left[a_{1,2} - \frac{E_3 F_3}{E_1 F_1} (a_{1,3} - a_{1,2}) \right] \cdot \frac{E_2 F_2}{E_1 J_1} \cdot \frac{E_1 F_1}{\sum EF} \end{aligned} \quad (f)$$

Durch Einsatz von (f) in (e) folgt

$$\begin{aligned} M &= M_1 \left[\frac{\sum EJ + a_{1,3} (a_{1,3} - a_{1,2}) \frac{E_3 F_3}{E_1 J_1}}{E_1 J_1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(E_2 F_2 \cdot a_{1,2} + E_3 F_3 \cdot a_{1,3}) \cdot [E_1 F_1 \cdot a_{1,2} - E_3 F_3 (a_{1,3} - a_{1,2})]}{E_1 J_1 \cdot \sum EF} \right] \end{aligned}$$

Durch Auflösung nach M_1 wird daraus

$$\begin{aligned} M_1 &= M \cdot E_1 J_1 \cdot \left[\frac{\sum EF}{A} \right] \\ \text{mit } A &= \sum EF \left[\sum EJ + E_3 F_3 a_{1,3} (a_{1,3} - a_{1,2}) \right] \\ &\quad + [E_2 F_2 a_{1,2} + E_3 F_3 a_{1,3}] \cdot [E_1 F_1 a_{1,2} - E_3 F_3 (a_{1,3} - a_{1,2})] \end{aligned} \quad (g)$$

Entsprechend folgt auch M_2 und M_3

Durch Einsatz von Gl. (58) in Gl. (f) folgt:

$$N_2 = - M \cdot E_2 F_2 \cdot \left[\frac{E_1 F_1 a_{1,2} - E_3 F_3 (a_{1,3} - a_{1,2})}{A} \right]$$

Entsprechend folgt auch N_1 und N_3

- L 1 Meyer, H. O. A Method of Waterproofing Electrical Strain Gages
Proc. Soc. Exp. Str. An. X₁ (1952) S. 243 – 245
- L 2 Palermo, P. M. Methods of Waterproofing SR-4 Strain Gages
Proc. Soc. Exp. Str. An. XIII₂ (1956) S. 79 – 83
- L 3 Barker, R. S. Protection of Underwater SR-4 Strain Gages Installations
on Tunnel Liner of a Hydroelectric Development
Proc. Soc. Exp. Str. An. XIV₂ (1957) S. 131 – 138
- L 4 Wells, F. W. A Rapid Method of Waterproofing Bonded Wire Strain Gages
Proc. Soc. Exp. Str. An. XV₂ (1958) S. 107 – 110
- L 5 Dean, M. David Taylor Model Basin Report 797 (1957)
- L 6 Westhäußer, R.
Wittmann, G. Ein Verfahren zur Abdichtung von elektrischen Dehnungs-
meßstreifen und Zuleitungen gegen Wasser unter hohem Druck
Referat auf der 2. Conference d'Analyse des Contraintes,
Paris 1962
- L 7 Boiten, R. G. Referat in „Characteristics and Application of Resistance
Strain Gages“
U. S. Department of Commerce, N. B. S. Curcular 528
- L 8 Dryburgh, R. B.
Peter, B. G. W.
Plewes, W. G. Waterproofing Strain Gages on Reinforcing Bars in Concrete
Exposed to the Sea Materials Research and Standards 7
(1965) S. 350 – 351
- L 9 Askegaard, V. Description and Evaluation Tests of Polyethylen Straingages
Referat auf der 2. Conference d'Analyse des Contraintes,
Paris 1962
- L 10 Murray, W. M. Strain Gage Techniques
Massachusetts Institute of Technology Cambridge,
Massachusetts 1960
- L 11 Fink, K.
Rohrbach, Chr. Handbuch der Spannungs- und Dehnungsmessung,
VDI-Verlag, Düsseldorf 1958
- L 12 Dean, M.
Douglas, R. D. Semiconductor and Conventional Strain Gages,
Academic Press, London–New York 1962
- L 13 Jones, E.
Maslen, R. The Physical Characteristics of Wire Resistance Strain Gauges
Her Majesty's Stationery Office, London 1952
- L 14 Kallweit, J. H. Gleichstrommessungen an technischen und reinen Polymeren
Kunststoffe 47 (1957) S. 651 – 655
- L 15 Küpfmüller, K. Einführung in die theoretische Elektrotechnik
Springer-Verlag 1962
- L 16 Eucken, A. Grundriß der physikalischen Chemie
Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig,
Leipzig 1951

- L 17 Wagner, K. W. Erklärung der dielektrischen Nachwirkungsvorgänge auf Grund Maxwellscher Vorstellungen
Arch. f. Elektrot. Bd. II (1914) S. 371 – 387
- L 18 Müller, F. K. In: Werkstoffkunde der elektrotechnischen Isolierstoffe
Verlag Borntraeger, Berlin 1955
- L 19 Lichtenecker, K. Die Dielektrizitätskonstante natürlicher und künstlicher Mischkörper
Phys. Zeitschrift 27 (1926) S. 115 – 158
- L 20 Veith, H. Die Abhängigkeit des Gleichstromwiderstandes und des Verlustwinkels von Papier von dessen Trocknungszustand und Temperatur
Frequenz 3 (1949) S. 217 – 219
- L 21 Hütte Bd. IV B
Verlag Ernst u. Sohn, Berlin und München 1962
- L 22 Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker, Verlag für Radio–Foto–Kinotechnik G. m. b. H Berlin 1957
- L 23 Kohlrausch, F. Praktische Physik, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1960
- L 24 Rohrbach, Chr.
Czaika, N. Deutung des Mechanismus des Dehnungsmeßstreifens und seiner wichtigsten Eigenschaften an Hand eines Modells
Materialprüfung 1 (1959) S. 121 – 131
- L 25 Rohrbach, Chr. Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen
VDI-Verlag, Düsseldorf 1967
- L 26 Wieringa, H. (Methode zur Bestimmung der Querempfindlichkeit von Dehnungsmeßstreifen)
De Ingenieur 22 (1961) S. 103 – 109
- L 27 Wu, Ch. T. Transverse Sensitivity Rig Calibration Study,
Strain Gage Readings VI₆ (1964) S. 21 – 25
- L 28 Buchner, N. Theorie der Gasdurchlässigkeit von Kunststoff-Folien
Kunststoffe 49 (1959) S. 401 – 406
- L 29 Müller, F. H. Permeation, Diffusion, Adsorption und Quellung an Hochpolymeren
Kolloid-Z. 144 (1956) S. 125 – 148
- L 30 Taylor, R. L.
Herrmann, O. B.
Kemp, A. R. Diffusion of Water through Insulating Materials
Ind. and Eng. Chem. 28 (1936) S. 1255 – 1263
- L 31 Jost, W. Diffusion
Verlag D. Steinkopf, Darmstadt 1957
- L 32 Barrer, R. M. Trans. Faraday Soc. 35 (1939) S. 628
- L 33 Moll, W. L. H. Durchlässigkeit von Kunststoff-Folien für Gase und Dämpfe
Kolloid-Z. 167 (1959) S. 55 – 62
- L 34 Volmer, W. Transport von Gasen und Dämpfen in Papier
Chem.-Ing. Tech. 26 (1954) S. 90 – 94
- L 35 Heering, H.
Puell, H.
Drewitz, J. Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Kabelmantelwerkstoffen
Kunststoffe 38 (1948) S. 49 – 51
- L 36 Lebovits, A. Permeability of Polymers to Gases, Vapors and Liquids
Modern Plastics (1966) H. 3 S. 139 – 146 und 194 – 213

- L 37 Steinhaus, R. Bestimmung der Wasserdampfdiffusionskoeffizienten von Elektroisolierstoffen auf Basis ungesättigter Polyesterharze und Epoxydharze sowie von Tränklacken
Kunststoffe 55 (1965) S. 768 – 771
- L 38 Bardeleben, J. Über die Diffusion von Wasser durch Epoxydharz
Kunststoffe 53 (1963) S. 162 – 163
- L 39 Nikuradse, A.
Ulbricht, W. Das Zweistoffsystem Glas–Metall
Verlag Oldenburg, München 1950
- L 40 Seith, W. Diffusion in Metallen
Verlag Springer, Berlin 1955
- L 41 Hiller, J.-E. Grundriß der Kristallchemie
Verlag Walter de Gruyter u. Co., Berlin 1952
- L 42 Jouwersma, G. Die Diffusion von Wasser in Kunststoffe
Chem.-Ing. Techn. 31 (1959) S. 652 – 658
- L 43 Barrer, R. M. Diffusion in and trough solids
Cambridge 1941
- L 44 Rohrbach, Chr.
Czaika, N. Über das Dauerschwingverhalten von Dehnungsmeßstreifen
Materialprüfung 3 (1961) S. 125 – 136
- L 45 Sattler, K. Theorie der Verbundkonstruktionen
Verlag W. Ernst, Berlin 1953
- L 46 Oberst, H. Das elastische Spektrum von Hochpolymeren
Phys. Verhandlungen 4 (1964) S. 13 – 26
- L 47 Stuart, H. A. Physik der Hochpolymeren
Verlag Springer, Berlin 1952 – 1956