

Ein Beitrag zur Dehnungsmessung an Kunstharzmodellen

Habilitationsschrift zur Erlangung der
Lehrberechtigung (venia legendi)

für

Modellstatik

an der Technischen Hochschule Stuttgart

von



Dr.-Ing. Robert K. Müller

14.03.2008

Z

Tag der Habilitation: 16. Dezember 1964



V o r w o r t

Wie an vielen anderen Instituten, so werden auch am Institut für Spannungsoptik und Modellmessungen der Technischen Hochschule Stuttgart zur experimentellen Lösung baustatischer und elastizitätstheoretischer Aufgaben mit Vorteil Modelle aus Kunstharzen verwendet. Während meiner Arbeit an diesem Institut entstand schon vor längerer Zeit der Wunsch, die vorhandenen nur unzureichenden Zahlenangaben über das Verhalten dieser Modellwerkstoffe durch eigene Untersuchungen zu ergänzen. Gleichzeitig waren Überlegungen anzustellen, wie man die in der Modellstatik üblichen Meßmethoden speziell bei Dehnungsmessungen an Kunstharzmodellen rationalisieren kann, um die wissenschaftlichen Mitarbeiter von den immer gleichbleibenden Vorgängen beim Messen und Auswerten weitgehend zu entlasten.

Die vorliegende Arbeit ist das vorläufige Ergebnis dieser Untersuchungen und Überlegungen.

Den Herren Professoren Dr.-Ing. F. W. Bornscheuer und Dr.-Ing. F. Leonhardt, die freundlicherweise den Bericht übernommen haben, danke ich für die damit verbundene Mühe und die Unterstützung bei der Abfassung dieser Arbeit.

Herrn cand.ing. H. P. Stoeckel, der den mechanischen Aufbau der beschriebenen Meßanlage besorgte und der auch an der Entwicklung des zentralen Steuergerätes beteiligt war, sei für seine wertvolle Mitarbeit besonders gedankt, ebenso allen, die bei der Durchführung und Auswertung der Messungen geholfen oder auf andere Art zum Abschluß dieser Arbeit beigetragen haben

Robert K. Müller

I n h a l t

	Seite
Literaturverzeichnis	8
Verzeichnis der Zeichen	10
<u>0 Einleitung</u>	13
0.1 Vor- und Nachteile der Kunstharze als Modellmaterial	14
0.11 Vorteile	14
0.12 Nachteile	16
<u>1 Das "Kriechen" der Kunstharze</u>	18
1.1 Allgemeines	18
1.2 Elimination des Einflusses des Kriechens auf Meßergebnisse	20
1.21 Die Methoden mit zeitunabhängiger Dehnung	20
1.22 Die Methoden mit zeitunabhängiger Spannung	22
1.221 Kompensation des Zeiteinflusses durch periodische Belastung	22
1.222 Elektrische Kompensation des Zeiteinflusses	24
1.3 Elimination einer linearen Nullpunktsdrift	26
1.4 Das Verhalten einiger Kunstharze unter konstanter Beanspruchung	28
1.41 Kriechkurven	29
1.42 Der Elastizitätsmodul bei periodi- scher Be- und Entlastung	29
1.421 Abhängigkeit des Elastizitäts- moduls von der Belastungszeit	29
1.422 Kriechmaß	29
1.423 Spannungsdehnungslinien	30
1.424 Entlastungszeit \leq Belastungszeit	31
1.425 Einfluß der Vorgeschichte auf den effektiven Elastizitätsmodul	31
1.426 Einfluß einer Vorlast auf den effektiven Elastizitätsmodul	32
1.43 Änderung des Elastizitätsmoduls von Gießharzen nach dem Erstarren	32
1.5 Zusammenfassung	33

	Seite
<u>2 Automatische Meßanlage für 200 DMS</u>	34
2.1 Allgemeines	34
2.2 Aufbau der Anlage	36
2.3 Meßprogramme	37
2.31 Programm I	37
2.32 Programm II	38
2.33 Zeitbedarf für die Messungen	38
2.4 Beschreibung der einzelnen Geräte	39
2.41 Gruppenumschalter	39
2.42 Automatischer Meßstellenumschalter	40
2.421 Steuergerät	41
2.422 Abgleichgeräte	42
2.43 Trägerfrequenz-Meßbrücke	43
2.44 Filter und Abschwächer	45
2.45 Digitalvoltmeter	46
2.46 Drucker und Lochstreifenstanzer	48
2.47 Relaisspeicher	49
2.48 Zentrales Steuergerät	49
2.49 Vorheizung	50
2.5 Erprobung der Meßanlage	51
2.51 Linearität und Einfluß des Meßbereichs	51
2.52 Einfluß der Relaiskontakte	52
2.53 Einfluß einer Abtastperiode	
$t_1 < 1$ Sekunde	53
2.54 Einfluß von Vorheizung und Meßprogramm	53
2.6 Elektronische Auswertung der Meßwerte	55
2.7 Zusammenfassung	56
<u>3 Einfluß von Meßstrom und Vorheizung auf Messungen mit DMS an Kunstharzen</u>	57
3.1 Allgemeines	57
3.2 Umfang der Untersuchungen	59
3.21 Hauptmessungen	59
3.22 Ergänzungsmessungen	60
3.221 σ - ϵ -Linien bei Erwärmung der Meßstellen	60
3.222 Erwärmung einer auf Metall geklebten Rosette	61

	Seite
3.3 Ausführung der Messungen und ihre Auswertung	61
3.31 Temperaturmessungen	61
3.32 Dehnungsmessungen	62
3.33 Auswertung der Messungen	64
3.331 Hauptmessungen	64
3.332 Ergänzungsmessungen	65
3.332,1 Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Temperatur	65
3.332,2 Linearität der σ - ϵ -Linie	65
3.332,3 Erwärmung einer auf Aluminium geklebten DMS-Rosette	66
3.4 Meßergebnisse	67
3.41 DMS-Rosetten	67
3.411 Erwärmung der Meßstelle	67
3.412 Dehnungsänderung	68
3.42 Einzel-DMS	70
3.43 Zusammenfassung der Meßergebnisse	70
3.5 Rechnerische Ermittlung der Dehnungsänderung infolge Erwärmung der Meßstelle	71
3.51 Temperaturverteilung im Balken	71
3.52 Dehnungsänderung des Balkens	72
3.53 Elastizitätsmodul des Probek balkens	75
3.6 Schlußfolgerungen	75
Verzeichnis der Anlagen	78

Literaturverzeichnis

- [1] Houwink, R.: Elastizität, Plastizität und Struktur der Materie, S. 5 ff., Verlag Steinkopff, Dresden und Leipzig 1957
- [2] Norris, Ch. H.: Model Analysis of Structures, Proc. of the S.E.S.A., Vol. I, No 2 (1944), S. 18/34
- [3] Carpenter, J. E.: Structural Model Testing-Compensation for Time Effect in Plastics, J. of the PCA Research and Development Laboratories, Januar 1963, S. 47/61
- [4] Wilbur, J. B., und Ch. H. Norris: Structural Model Analysis, Chap. 15, S. 682 in Handbook of Experimental Stress Analysis, herausgegeben von M. Hetényi, New York 1950
- [5] Frocht, M. M.: Photoelasticity, Band I, S. 365, New York 1941
- [6] Hiltcher, R.: Ein praktisches Lateralextensometer zur Bestimmung der Spannungssumme, Stockholm, Kungl. Tekniska Högskolans Handlingar Nr. 42, Stockholm 1950
- [7] Hiltcher, R.: Spannungsmessung mit optischen Mitteln (Spannungsoptik). In: Handbuch der Spannungs- und Dehnungsmessung, S. 37, herausgegeben von E. Fink und Chr. Rohrbach, Düsseldorf, VDI-Verlag 1958
- [8] Institut T.N.O. voor Werktuigkundige Constructies: Mededeling Nr. 55: Registratie van meetresultaten in getalvorm. T.N.O.-Nieuws Nr. 140 (November 1957), Blz. 572-574

- [9] Homilius, K.: Digitales Messen. ATM, Lieferung 334
(November 1963) S. 263-264
- [10] Brandt, W.: Fortschritte in der Vielstellen-Meßtech-
nik mit Dehnmeßstreifen. Industrie-Elek-
tronik 3 (1955), H. 6
- [11] Rohrbach, Chr., und N. Czaika: Über das Kriechen von
Dehnmeßstreifen unter statischer Zugbe-
lastung. ATM-Blätter J. 135-16 bis 18,
Lieferung 287 (Dezember 1959), S. 255/258,
Lieferung 289 (Februar 1960), S. 35/38,
Lieferung 290 (März 1960), S. 55/56
- [12] Groeber, H., S. Erk, U. Grigull: Die Grundgesetze der
Wärmeübertragung, Berlin, Springer 1956,
S. 111
- [13] Leaderman, H.: Creep, Elastik Hysteresis, and Damping
in Bakelite Under Torsion. A. S. M. E.
Transactions, Vol. 61 (1939), S. A-79/
A-85 (J. Appl. Mech. 6, 1939)

Verzeichnis der Zeichen

cal	Einheit der Wärmemenge
e	Basis der Exponentialfunktion
f	Fehlergrenze
i	Meßstrom
mA	Milliampere
n	Bruchteil der Dehnung ϵ_0 , um den die Dehnung infolge Kriechens zunimmt (Kapitel 1)
n	Anzahl der Belastungszyklen (Kapitel 2, Anlage 10)
t	Zeit
t_a	zeitlicher Abstand des Kriechbeginns
t_b	Belastungszeit
t_e	Entlastungszeit
t_R	Relaxationszeit, Zeitabschnitt
t^*	Zeitabschnitt
t_1	Weiterschaltperiode im Programm I
t_2	Be- und Entlastungszeit
D	Eichkonstante
DMS	Dehnmeßstreifen
E	Elastizitätsmodul
E_o	Elastizitätsmodul an der Oberseite
E_u	Elastizitätsmodul an der Unterseite
N	Anzahl der Meßstellen
P	Kraft
Q	Wärmemenge
R	elektrischer Widerstand
R_V	Vorwiderstand
T	Temperatur der Meßstelle

T_u	Umgebungstemperatur
V	Volt
VH	Vorheizung
ϵ	Dehnung
ϵ_h	Dehnung der Hilfskonstruktion
ϵ_o	gemessene Dehnung bei Oberlast
ϵ_u	gemessene Dehnung bei Unterlast
ϵ_{um}	Mittelwert ϵ_u
ϵ_R	Restdehnung nach dem Zurückkriechen
ϵ_O	Dehnung unmittelbar nach der Belastung
η	Änderung des Elastizitätsmoduls pro $^{\circ}\text{C}$
λ	Verhältnis zweier Elastizitätsmoduli
μD	Mikrodehnung $\epsilon = 10^{-6}$ mm/mm
ν	Faktor
σ	Spannung
σ_O	Spannung unmittelbar nach der Belastung
ΔE	Differenz zweier Elastizitätsmoduli
ΔT	Erwärmung der Meßstelle
ΔT_o	Erwärmung der Oberseite
ΔT_u	Erwärmung der Unterseite
$\Delta \epsilon$	Unterschied zwischen zwei Dehnungen

Ein Beitrag zur Dehnungsmessung an Kunstharzmodellen

0 Einleitung

Die Entwicklung im Bauwesen wird bestimmt durch das Streben nach leichteren Konstruktionen und nach der Verwirklichung kühner moderner Formen. Das bringt mit sich, daß es immer schwieriger wird, ein Bauwerk zur Festigkeitsberechnung in einfach geformte Teile zu gliedern, die mit Hilfe der technischen Elastizitätstheorie berechnet werden können. Oft muß man aber alle Teile als Kontinuum betrachten, um ihr Tragverhalten richtig zu erfassen. Eine analytische Bestimmung des Kräfteverlaufs und der Beanspruchung solcher Bauwerke ist in vielen Fällen sehr schwierig, oftmals sogar unmöglich. Man geht dann dazu über, das Tragverhalten der Bauwerke oder sinnvoll ausgewählter Teile derselben durch Messungen an Modellen zu überprüfen. So hat sich die Modellstatik, angeregt durch die Entwicklung im Bauwesen und gestützt auf das Vorhandensein immer besserer Meßgeräte, zu einer selbständigen Disziplin entwickelt, die aus dem Bauwesen und insbesondere aus dem Massivbau nicht mehr wegzudenken ist. Zu ihrer Entwicklung haben aber auch die heute verfügbaren Kunstharze entscheidend beigetragen, die als Werkstoff für die Modellherstellung weitgehend die Eigenschaften besitzen, die von der Ähnlichkeitsmechanik her und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten von einem Modellmaterial gefordert werden müssen. Die überwiegende Zahl von Modelluntersuchungen für das Bauwesen wird an Kunstharzmodellen ausgeführt; ein Teilgebiet der Modellstatik, die Spannungsoptik, ist ganz auf sie angewiesen.

Voraussetzung für zuverlässige Untersuchungen an Modellen ist die Kenntnis der Eigenschaften des Modellmaterials und seiner Stoffkonstanten. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit einigen Eigenschaften der heute in der Modellstatik am meisten verwendeten Kunstharze, die sich bei Dehnungsmessungen zur Bestimmung des Spannungszustandes nachteilig bemerkbar machen.

Das erste Kapitel behandelt das zeitabhängige elastische Nachge-

ben der Kunstharze bei mechanischer Beanspruchung, das sogenannte Kriechen. Messungen an mehreren Kunstharzen geben Aufschluß über die Größe seines Einflusses auf Dehnungsmessungen. Gleichzeitig wird eine Methode zur Elimination des Kriechens zahlenmäßig überprüft. Im Anschluß daran wird im zweiten Kapitel eine automatische Meßanlage beschrieben, die speziell für Messungen mit elektrischen Widerstands-Dehnmeßstreifen an Kunstharzmodellen entwickelt wurde. Eine Programmsteuerung des gesamten Ablaufs der Messungen gestattet, den Einfluß des Kriechens völlig auszuschalten. Bei der Erprobung der Meßanlage zeigte sich, daß durch die Wärmewirkung des elektrischen Stromes in den Dehnmeßstreifen infolge der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls der Kunstharze Abweichungen in den Meßergebnissen entstehen. Diese bei Messungen an Kunstharzen seither noch nicht beachtete Tatsache wird im dritten Kapitel eingehend untersucht, und die sich ergebenden Folgerungen für die Modellmeßtechnik werden gezogen.

0.1 Vor- und Nachteile der Kunstharze als Modellmaterial

In vielen Fällen ermittelt man in der Modellstatik die Schnittkräfte oder die Spannungsverteilung unter denselben Voraussetzungen, von denen auch die mathematische Elastizitätstheorie ausgeht. Der Modellwerkstoff muß dann homogen und isotrop sein und das Hookesche Gesetz erfüllen. Neben diese von der Ähnlichkeitsmechanik geforderten Bedingungen treten wirtschaftliche Gesichtspunkte bei der Modellherstellung, die eine einfache Bearbeitung und Verbindung der Teile betreffen, die sich aber auch auf die erforderliche Größe und Stärke der Belastungsvorrichtungen erstrecken. Von diesen beiden grundsätzlichen Standpunkten her gesehen, ergeben sich folgende Vor- und Nachteile bei der Verwendung von Kunstharzen als Modellwerkstoff:

0.11 Vorteile

0.111 Die Kunstharze können im allgemeinen als völlig homogen und isotrop angesehen werden.

- O.112 Die Kunstharze lassen sich mit geeigneten Hartmetallwerkzeugen leicht bearbeiten.
- O.113 Von der Industrie wird ein Teil der Kunstharze (insbesondere Plexiglas) in Tafeln, Blöcken, Stangen und Rohren geliefert, die als Halbfabrikate bei der Modellherstellung benutzt werden können.
- O.114 Andere Kunstharze (insbesondere Araldit, Lekutherm) sind in monomerer Form als Gießharze erhältlich und können leicht in beliebige Formen gegossen werden.
- O.115 Die in der Modellstatik verwendeten Kunstharze lassen sich mit lösungsmittelfreien Klebstoffen verbinden. Bei Gießharzen kann man das mit Härter versehene monomere Harz als Bindemittel verwenden und erhält nach entsprechender Aushärtezeit eine monolithische Verbindung.
- O.116 Der Elastizitätsmodul der Kunstharze ist niedrig und ermöglicht so die Messung an Modellen unter kleinen Lasten, wodurch die Belastungsvorrichtungen leichter und billiger sind. Mit relativ geringem Aufwand lassen sich Auflager verwirklichen, die im Verhältnis zum Modell unverschieblich und steif sind. Bei Werkstoffgleichheit zwischen Modell und Hauptausführung müssen im Modell eines Stahlbetonbauwerkes bei sonst gleichen Verhältnissen etwa 10fach größere Kräfte als bei einem Kunstharzmodell angewendet werden. Besteht die Hauptausführung aus Stahl, dann sind die Kräfte bei Werkstoffgleichheit etwa 70mal größer als bei einem Kunstharzmodell. Hier liegt wohl ein entscheidender Gesichtspunkt für die Wahl von Kunstharzen als Modellwerkstoffe.

Im Vergleich zu ihrem spezifischen Gewicht ist ihr Elastizitätsmodul jedoch noch groß genug, damit das Eigengewicht bei Modellmaßstäben von etwa 1:50 keine meßbaren Verformungen des Modells erzeugt und die Eigengewichtsspannungen klein sind gegenüber den zu messenden Spannungen. Dies

kann aber auch als Nachteil gewertet werden, wenn Eigengewichtsspannungen im Modell gemessen werden sollen. Jedoch haben die Kunstharze diesen Nachteil mit fast allen anderen Modellwerkstoffen gemeinsam, so daß zur modellstatistischen Ermittlung von Eigengewichtsspannungen allgemein andere Verfahren angewendet werden müssen.

O.12 Nachteile

O.121 Werden Kunstharze belastet, so bleibt nach dem Aufbringen der Last die entstehende Dehnung nicht konstant, sondern wird mit der Zeit größer. Dieses elastische Nachgeben, das sogenannte "Kriechen" der Kunstharze, hat eine Zeitabhängigkeit des Elastizitätsmoduls zur Folge und kann zu falschen Meßergebnissen führen.

Das Kriechen ist bei den einzelnen Arten der Kunstharze verschieden groß und ist der Hauptnachteil bei ihrer Verwendung als Modellwerkstoff, weil die Proportionalität zwischen Belastung und Dehnung, wie sie vom Hookeschen Gesetz verlangt wird, durch den Zeiteinfluß nicht ohne weiteres vorhanden ist.

O.122 Alle Stoffkonstanten, insbesondere der Elastizitätsmodul, sind stark von der Temperatur abhängig. Dies macht es erforderlich, die Raumtemperatur während der Messungen möglichst konstant zu halten, wozu unter Umständen eine Klimaanlage benötigt wird.

O.123 Die Kunstharze haben einen großen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Kleine Temperaturänderungen während der Messungen können deshalb die Meßergebnisse verfälschen. Im allgemeinen ist aber die Wärmeträgheit der Modelle so groß, daß ein Schutz vor Luftzug durch einen Kasten aus Kunststoffolien eine ausreichende Temperaturkonstanz an der Oberfläche gewährleistet, wenn der Versuchsraum über längere Zeit seine Temperatur nicht wesentlich

ändert (klimatisierter Versuchsraum).

- O.124 Das geringe Wärmeleitvermögen der Kunstharze macht sich bei Messungen mit Dehnmeßstreifen unangenehm bemerkbar, da die entstehende Stromwärme nur schlecht abgeführt wird und die Meßstelle sich stark erwärmt. Bis zum Eintreten des stationären Zustandes entsteht durch die Wärmedehnung eine Nullpunktswanderung. Außerdem nimmt durch die Erwärmung an der Meßstelle der Elastizitätsmodul ab, wodurch eine Inhomogenität im Material entsteht.

1 Das "Kriechen" der Kunstharze

1.1 Allgemeines

In einem festen e l a s t i s c h e n Körper wird durch eine äußere Beanspruchung eine innere Gegenspannung hervorgerufen, die durch eine elastische Verschiebung der Moleküle aus ihrer Gleichgewichtslage entsteht. Verschwindet die äußere Beanspruchung, so bewirkt auch nach sehr langer Belastungszeit die Gegenspannung ein Zurückfedern der entstandenen Verformung.

In einem p l a s t i s c h e n Körper ist im ersten Augenblick nach der Belastung auch die Gegenspannung σ_0 vorhanden. Sie wird aber bei konstant gehaltener Verformung mit der Zeit ständig kleiner. Diese Relaxation der Spannung erfolgt exponentiell:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{t_R}}$$

t_R ist die Zeit, in der die Spannung auf den e-ten Teil zurückgegangen ist; sie heißt Relaxationszeit und dient zur Kennzeichnung des Vorganges bei verschiedenen Stoffen.

Der Abbau der inneren Spannungen entsteht durch einen Platzwechsel der Moleküle, der nicht reversibel ist, da er gegen den energieverzehrenden Reibungswiderstand ihrer Umgebung stattfindet. Dieser ist der Viskosität proportional und von der Temperatur abhängig.

Bleibt die äußere Beanspruchung konstant, muß entsprechend dem Zurückgehen der inneren molekularen Spannungen die Verformung zunehmen, damit die Gesamtheit der inneren Spannungen der äußeren Beanspruchung das Gleichgewicht hält. Dies wird in der einschlägigen Literatur [1] mit "Fließen" bezeichnet, während man in den Ingenieurwissenschaften bei diesem Vorgang von "Kriechen" spricht. Plastische Verformungen können auch entstehen, wenn einzelne Moleküle durch zufällig wirkende hohe thermische Energiestöße einen Platzwechsel ausführen. Theoretisch gibt es des-

halb eine Fließgrenze nur beim absoluten Nullpunkt. Jedoch sind die Platzwechsel infolge thermischer Schwingungen bei festen Körpern so selten, daß man bei "schnellen" Untersuchungen für praktische Zwecke eine Fließgrenze definieren kann.

Bei der Beanspruchung von K u n s t h a r z e n durch äußere Kräfte ist ein eigentümliches Verhalten zu beobachten. Zunächst entsteht wie bei allen festen Körpern eine momentane elastische Verformung ϵ_0 , die aber anschließend bei gleichbleibender Belastung mit der Zeit zunimmt, was im landläufigen Sprachgebrauch Kriechen genannt wird (s. Anlage 1). Bei kurzzeitiger Belastung ist die mit der Zeit zunehmende Verformung "elastisch", wenn man damit auch Verformungen bezeichnet, die nach der Entlastung erst allmählich, aber wieder vollkommen zurückgehen. In der Literatur (z.B. [1]) findet man hierfür häufig den Ausdruck "elastische Nachwirkung". Wie aus dem oben über das Fließen Gesagten hervorgeht, kann bei langen Belastungszeiten in der zweiten Phase der Verformung zu einem gewissen Grad ein plastischer Anteil enthalten sein.

Hochmolekulare Substanzen, wie die zu betrachtenden Kunstharze, besitzen unterhalb einer für den Stoff charakteristischen Temperatur, der sogenannten "Einfriertemperatur", eine so hohe Viskosität, daß Platzwechselvorgänge nur sehr selten vorkommen. Dieser Zustand wird als "Glaszustand" bezeichnet. Fließerscheinungen sind in ihm nur in sehr langen Zeiträumen zu beobachten. Bei höherer Temperatur allerdings wird es im Laufe der Zeit öfter vorkommen, daß einzelne Moleküle genügend thermische Energie erhalten, um Platzwechsel ausführen zu können. Es sind dann bereits innerhalb kürzerer Zeiten plastische Verformungen meßbar.

Entlastet man Kunstharze, die während nicht zu langer Zeiten bei Zimmertemperatur mechanisch beansprucht wurden, so federt das Material sofort um den gleichen Betrag ϵ_0 zurück, der auch bei der Belastung als augenblickliche Verformung entstand. Anschließend findet die elastische Nachwirkung statt, und das Material kriecht in seinen Anfangszustand zurück.

Für die Modellstatik ist wichtig, daß das Kriechen der verwendeten Kunstharze spannungsproportional ist. Das heißt, zu jedem Zeitpunkt nach der Belastung sind die Dehnungen und Verformungen den Spannungen oder den wirkenden äußeren Kräften proportional (s. Anlage 1). Der Elastizitätsmodul ist zwar zeitabhängig, jedoch konstant bei Messungen, die immer zur selben Zeit nach dem Aufbringen der Last vorgenommen werden. Diese schon lange bekannte Eigenschaft der Kunstharze und das nach kurzen Belastungszeiten vollkommene Zurückkriechen ermöglichen es überhaupt, Kunstharze trotz ihrer zeitabhängigen Verformungen in der Modellstatik für exakte Messungen zu verwenden, denn es ergeben sich hieraus mehrere Möglichkeiten, den Zeiteinfluß auf die Verformungen mechanisch beanspruchter Kunstharze auszuschalten.

1.2 Elimination des Einflusses des Kriechens auf Meßergebnisse

1.2.1 Die Methoden mit zeitunabhängiger Dehnung

Bringt man an einem beliebigen Punkt eines Modells aus Kunstharz eine Verformung an - z.B. indem man eine Verschiebung einleitet und es in diesem Zustand an einem steifen Rahmen befestigt -, dann sind die hieraus resultierenden Verformungen und Dehnungen überall am Modell zeitunabhängig. Die Dehnungsverteilung, die zu der eingeleiteten Verformung gehört, kann in bekannter Weise ohne weiteres gemessen werden. Die Schwierigkeit entsteht bei der Umrechnung der Dehnungen in Spannungen, denn diese werden ebenso wie die zugehörigen Kräfte mit der Zeit kleiner, d.h., der zur Umrechnung benötigte Elastizitätsmodul ist eine Funktion der Zeit und nicht bekannt.

Leitet man die Verschiebung in das Modell über eine Hilfskonstruktion ein, die aus dem gleichen Material wie das Modell besteht, so sind auch in ihr die Dehnungen zeitunabhängig (s. Anlage 2). Man wählt sie so aus, daß eine Beziehung zwischen Dehnung und angreifender Kraft entweder durch Rechnung oder in einem Eichversuch in einfacher Weise bestimmt werden kann. Sie ist grundsätzlich von der Art

$$\epsilon_h = \frac{P}{E} \cdot D = \text{const}$$

D ist eine Konstante, die sich entweder aus Rechnung oder Eichversuch ergibt. Sowohl im Modell als auch in der Hilfskonstruktion ist das Verhältnis der zeitabhängigen Größen Kraft und Spannung konstant:

$$\frac{\sigma}{P} = \epsilon \cdot \frac{E}{P}$$

Hiermit ergibt sich für die auf die Einheitslast bezogene Spannung am Modell:

$$\frac{\sigma}{P} = \frac{\epsilon}{\epsilon_h} D$$

Man kann also, ohne die während des Modellversuchs wirkende Kraft zu kennen, aus den gemessenen Dehnungen die Spannungen für eine Kraft beliebiger Größe berechnen.

Diese Methode wurde 1938 von E. O. S c h m i d t vorgeschlagen und erstmals von N o r r i s [2] beschrieben, der sie in entsprechender Form in der ebenen Spannungsoptik als "Spring Balance" benützte und sie sogar bei der Messung der Querdehnung mit Hilfe eines Lateralextensometers anwandte. Hierbei muß die Verformung des Modells für jede Messung zwischen zwei Größen verändert werden, was sich jedoch nur schwer mit der erforderlichen Genauigkeit durchführen läßt.

In letzter Zeit wurde die Methode von C a r p e n t e r [3] wieder aufgegriffen, der als Hilfskonstruktion einen mit Dehnmeßstreifen (DMS) geklebten Hohlzylinder aus dem Modellmaterial verwendet, den er als "Strain Cell" bezeichnet.

Die Verwendung konstanter Verformungen zum Ausschalten des Zeiteinflusses bei Messungen an Kunstharzen hat den großen Vorteil, daß man die Dehnungen ohne großen Zeitaufwand in gewohnter Weise

während einer einzigen Belastung des Modells messen kann. Bei Modelluntersuchungen hat diese Methode den großen Nachteil, daß sie nur bei einer Einzellast einfach anwendbar ist (s. [3] S.55). Zur Erzeugung von Gleichflächenlasten schlägt Carpenter vor, in das Modell eine konstante Verformung über ein hydraulisches System einzuleiten. Jedoch darf das Gewicht der Flüssigkeit keinen Einfluß auf das Modell ausüben, und die Flüssigkeit darf keine Energie aufnehmen, d.h., sie muß inkompressibel sein. Die Wandungen des hydraulischen Systems müssen im Vergleich zum Modell steif sein. Bei konstanter Deformation des Modells ist dann der Druck in der Flüssigkeit zeitabhängig. Als Hilfskonstruktion wird eine Membran benutzt, die aus dem gleichen Material wie das Modell besteht und demselben Druck wie dieses ausgesetzt wird (s. Anlage 2).

In vielen Fällen wird die praktische Durchführung des Verfahrens an der Schwierigkeit scheitern, gleichzeitig eine einwandfreie Dichtung zwischen Modell und hydraulischem System, das nicht deformierbar sein darf, zu erzielen und die vorgeschriebenen Randbedingungen zu erfüllen.

Zeitunabhängige Verformungen zur Ausschaltung des Kriechens von Kunstharzmodellen werden am vorteilhaftesten bei den indirekten Modellmeßverfahren angewendet [4]. Hier haben die am Modell angebrachten Belastungen sowieso keine direkte Beziehung zu der Belastung der Hauptausführung. Es wird deshalb auch nicht als Mangel empfunden, daß man die am Modell tatsächlich wirkenden Kräfte und Spannungen nicht kennt.

1.22 Die Methoden mit zeitunabhängiger Spannung

1.221 Kompensation des Zeiteinflusses durch periodische Belastung

Belastet man ein Modell mit einer gleichbleibenden Kraft, sind die hervorgerufenen Spannungen zeitunabhängig, während die Dehnungen und Verformungen mit der Zeit größer werden. Die jetzt bei der Dehnungsmessung auftretenden Schwierigkeiten umgeht man, in-

dem jeweils im gleichen Zeitabstand nach dem Aufbringen der Last gemessen wird. Hierdurch bleibt der zugehörige effektive Elastizitätsmodul unabhängig von der Zeit. Er kann an einem Probekörper ermittelt werden, wobei man dieselben Bedingungen wie bei den Messungen am Modell einhält. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, daß man die gemessenen Dehnungen direkt in Spannungen umrechnen kann. Nachteilig ist der wesentlich größere Zeitaufwand, da beim Anstreben hoher Genauigkeit das Modell für jede Messung be- und entlastet werden muß. Die Belastungsvorrichtungen müssen deshalb auch so konstruiert sein, daß das Be- und Entlasten ohne große Mühe vorgenommen werden kann. Ist die Belastungszeit sehr kurz, muß sie genau eingehalten werden, da unmittelbar nach dem Belasten das Kriechen am größten ist. Bei längeren Belastungszyklen ist es so klein, daß man unter Umständen ohne sehr große Genauigkeitseinbuße mehrere Messungen in einem Zyklus durchführen kann.

In der ebenen Spannungsoptik, in der das Kriechen erstmals berücksichtigt wurde, hat man Belastungszeiten von 10 bis 15 Minuten angewandt [5]. Nach einer so langen Zeitspanne ist die Zunahme der Dehnung bereits so gering, daß es auf das genaue Einhalten der Belastungszeit nicht ankommt. Außerdem wurden meist alle Messungen an Hand von photographischen Aufnahmen ausgeführt, so daß man mit je einem Belastungszyklus für Messung und Eichversuch auskommen konnte.

Die Entwicklung eines für die praktische Anwendung geeigneten Lateralextensometers zur Messung der Hauptspannungssumme in der ebenen Spannungsoptik durch H i l t s c h e r [6] machte es notwendig, am Modell selbst punktwise zu messen und für jede einzelne Messung das Modell zu be- und entlasten. Hierdurch ergab sich gleichzeitig die Gelegenheit, durch mehrfaches Messen immer zum selben Zeitpunkt nach der Be- und Entlastung nicht nur das Kriechen zu eliminieren, sondern auch lineare Nullpunktsverschiebungen durch Mittelbildung unwirksam zu machen. Wählt man als Belastungszeit 20 Sekunden, so ist auch bei mehreren Meßstellen der Zeitaufwand noch erträglich [7]. Es ist zweckmäßig, die Be- und

Entlastung automatisch zu steuern, damit sowohl beim Eichversuch zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls als auch bei den eigentlichen Messungen die Zeiten genau eingehalten werden. Außerdem wird der Beobachter hierdurch entlastet und kann dem Ablesen der Meßwerte seine ganze Aufmerksamkeit widmen.

Bei Dehnungsmessungen an Kunstharzmodellen sind oft sehr viele Meßstellen vorhanden (200 bis 300). Würde man nach der Belastung bis zum Beginn der Messungen 15 Minuten warten, so wären wegen der erforderlichen langen Ablesezeit die zeitlich weit auseinanderliegenden Messungen trotzdem nicht mehr miteinander vergleichbar. Man wendet deshalb heute auch in der Modellstatik die Methode der kurzzeitigen Be- und Entlastung nach dem Vorschlag von Hiltcher [6] fast allgemein an.

1.222 Elektrische Kompensation des Zeiteinflusses

Eine andere Methode, den Einfluß des Kriechens bei Messungen mit elektrischen DMS auszuschalten, wird von H o s s d o r f angewandt (Demonstration des von ihm entwickelten Gerätes während eines Vortrages am 21.3.1963 in Darmstadt). Er mißt die Dehnungen nach der sogenannten Nullmethode, führt aber den Nullabgleich der Dehnmeßbrücke nach der Belastung des Modells nicht elektrisch mit einem Potentiometer aus, sondern durch Dehnung des Kompensations-DMS (s. Anlage 3). Dieser ist auf einen Balken geklebt, der aus demselben Material wie das Modell besteht und mit Hilfe eines Schiebegewichtes mit einem bekannten Moment beansprucht wird. Das Schiebegewicht wird nach dem Belasten des Modells so lange verschoben, bis der Nullabgleich hergestellt ist. Man erreicht hierdurch, daß der Kompensations-DMS der gleichen Dehnung wie derjenigen an der Meßstelle unterworfen wird. Durch das Kriechen des Kunstharzes nimmt nun die Dehnung in beiden DMS gleichsinnig und in gleichem Maße zu, was aber bekanntlich wegen der gewählten Anordnung der DMS in der Wheatestoneschen Brückenschaltung nicht angezeigt wird. Auf diese Weise ist der Zeiteinfluß auf die Dehnungsanzeige ausgeschaltet, und die sich unmittelbar nach der Belastung ergebende Dehnung kann aus der Stellung des Laufgewichtes am Kom-

pensionsbalken ermittelt werden.

Zu der von Hossdorf praktisch vorgeführten Methode ist folgendes zu sagen: Das Verfahren funktioniert streng genommen nur dann einwandfrei, wenn Modell und Kompensationsbalken gleichzeitig belastet werden. Da dies jedoch in der Praxis nicht möglich ist, wird sich zwischen dem Beginn des Kriechens von Modell und Kompensationsbalken ein geringer Zeitunterschied ergeben (s. Anlage 3). Die Kriechkurven lassen sich näherungsweise als Exponentialfunktionen darstellen.

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0}{n} (n + 1 - e^{-\frac{t}{t_R}})$$

Der Unterschied $\Delta\epsilon$ zwischen den um die Zeitspanne t_a verschobenen Kurven

$$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_0} = e^{-\frac{t}{t_R}} \frac{e^{\frac{t_a}{t_R}} - 1}{\frac{1}{n}} \cdot 100 \%$$

wird mit zunehmender Zeit sehr schnell vernachlässigbar klein. Bezeichnet man mit f die Fehlergrenze in Prozent, dann ist die Zeit, nach der $\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_0} \leq f$ wird

$$t^* = t_R \ln \frac{100 (e^{\frac{t_a}{t_R}} - 1)}{f \cdot n}$$

Aus einer Kriechkurve, die an einem Probestab aus Araldit E gemessen wurde, ergaben sich für $n = 8,97$ und $t_R = 2,0$ Minuten. Hiermit folgt aus obenstehender Gleichung, daß bereits 0,79 Minuten nach der Belastung des Modells der Unterschied zwischen den beiden Kriechkurven kleiner als 1 % wird, wenn der zeitliche Abstand zwischen dem Beginn der beiden Kriechkurven $t_a = 0,25$ Minuten ist.

Man erhält also auch mit diesem Verfahren praktisch brauchbare Werte, die sich unmittelbar in Spannungen umrechnen lassen. Den hierzu notwendigen Elastizitätsmodul ermittelt man auf die gleiche Weise an einem Probekörper, oder aber man berechnet die zu der Stellung des Laufgewichtes gehörende Spannung des Kompensationsbalkens und kann dann ohne Umweg über die Dehnungen sofort die Spannung an der Meßstelle angeben.

Der Nachteil des Verfahrens ist, daß man für jede Meßstelle erneut be- und entlasten muß, da sonst das Kriechverhalten von Modell und Kompensationsbalken nicht genügend genau übereinstimmt. Hierdurch und durch den von Hand vorzunehmenden Abgleich dürfte der Zeitaufwand größer sein als bei der unter 3.221 beschriebenen Methode. Hinzu kommt, daß sich dieses Verfahren wegen des mechanischen Nullabgleichs am Kompensationsbalken nicht ohne weiteres mit handelsüblichen Geräten automatisieren läßt.

1.3 Elimination einer linearen Nullpunktsdrift

Sind bei periodischer Be- und Entlastung alle Bedingungen konstant, so daß sich der Anfangszustand des Modells und der Meßgeräte nach jeder Belastung wieder einstellt, dann bleibt der abgelesene Wert für ϵ_u gleich, der im allgemeinen nicht Null zu sein braucht. Die gesuchte Dehnung ergibt sich als Differenz zwischen ϵ_o und ϵ_u und ist unabhängig von der Zeit.

Da solche idealen Bedingungen nur sehr selten anzutreffen sind, wird sich sowohl ϵ_u als auch ϵ_o mit der Zeit ändern. Zur Vereinfachung wird vorausgesetzt, daß entweder durch eine Temperaturdehnung des Modells oder durch eine Nullpunktsdrift der Meßgeräte ϵ_u mit der Zeit linear anwächst (s. Anlage 4). Das zu dem jeweils gemessenen ϵ_o gehörige ϵ_{um} ist der Mittelwert der beiden vorher und nachher gemessenen ϵ_u . Die zu ermittelnde Dehnung ist dann die Differenz

$$\Delta \epsilon_i = \epsilon_{oi} - \frac{\epsilon_{ui} + \epsilon_{ui+1}}{2}$$

und wird durch die lineare Nullpunktswanderung nicht beeinflusst. In der Praxis sind fast alle langsam vor sich gehenden Temperaturdehnungen und Nullpunktswanderungen während der Dauer einer Be- und Entlastung mit der Zeit näherungsweise l i n e a r veränderlich, wodurch ihr Einfluß auf das Meßergebnis in der geschilderten Weise fast vollkommen unterdrückt werden kann.

Führt man an einer Meßstelle eine Messung nur einmal aus, so kann keine Aussage über die Zuverlässigkeit der Beobachtung gemacht werden, da bekanntlich alle Meßwerte in einem gewissen Bereich um den wahren Wert streuen. Die Statistik lehrt, daß erst aus mindestens drei Messungen eine Aussage über die Größe des Streubereiches gewonnen werden kann. Es ist deshalb sinnvoll, an jeder Meßstelle die Messungen über drei bis vier Belastungszyklen auszudehnen und das Mittel aus den Dehnungswerten zu bilden. Hierdurch wird der Einfluß zufälliger Meßfehler stark herabgesetzt. Ist die Streuung von drei Werten größer als 1 bis 2 %, so geht man sicherheitshalber auf 4 bis 5 Belastungszyklen über.

Um den Einfluß des Kriechens auf Dehnungsmessungen zu eliminieren, genügt es, lediglich die Belastungszeit konstant zu halten. Die Entlastungszeit kann hierfür beliebig, sie muß nur größer als die Belastungszeit sein, wie später noch gezeigt wird. Sollen aber lineare Nullpunktswanderungen, wie oben beschrieben, ausgeschaltet werden, dann müssen die Be- und Entlastungszeiten gleich sein. Damit sie genügend genau eingehalten werden, empfiehlt sich eine automatische Steuerung der Belastungsvorrichtung. Bei Kunstharzmodellen kommt man im allgemeinen mit einer Belastung durch Gewichte aus. Sie haben den Vorteil, mit großer Genauigkeit gewogen werden zu können, und gewährleisten eine gleichbleibende Kraft, wenn nicht durch zu große Reibung in der Belastungsvorrichtung Störungen verursacht werden. Gewichte kann man leicht mit Hilfe von Preßluftzylindern von der Belastungsvorrichtung abheben und dies durch elektronische Zeitschalter über Magnetventile selbsttätig steuern. Auf Bild 1 der Anlage 5 ist ein im Institut für Spannungsoptik und Modellmessungen der Technischen Hochschule Stuttgart gebautes Gerät dieser Art zu sehen.

1.4 Das Verhalten einiger Kunstharze unter konstanter Beanspruchung

Da in der Literatur zahlenmäßige Angaben über das Kriechen der heute in der Modellstatik verwendeten Kunstharze kaum zu finden sind, wurden einige Messungen ausgeführt, vor allem auch um festzustellen, bis zu welchen Spannungen bzw. Dehnungen der Proportionalitätsbereich dieser Modellwerkstoffe reicht und wie groß der Einfluß des Kriechens auf den Elastizitätsmodul ist.

Die Untersuchungen wurden an folgenden Kunstharzen vorgenommen:

1. Plexiglas, Firma Röhm & Haas, Darmstadt
2. Araldit E (kalthärtend) + 10 % Härter 938, Firma Ciba, Basel
3. Araldit B (heißhärtend) + 30 % Härter 901, Firma Ciba, Basel
4. Lekutherm (heißhärtend) + 30 % Härter P, Firma Bayer, Leverkusen
5. Makrolon, Firma Bayer, Leverkusen

Aus den Kunstharzen wurden Probekörper mit den Abmessungen 10 x 20 x 150 mm hergestellt, die in einer Biegeeichvorrichtung mit einem konstanten Moment belastet werden konnten. Sie ist so eingerichtet, daß das mit Hilfe von Gewichten erzeugte Moment auch dann konstant bleibt, wenn die Verformung des Probekörpers sich durch das Kriechen ändert (s. Anlage 5, Bild 2).

Die Gewichte konnten mit Hilfe eines Preßluftzylinders abgehoben werden, so daß sich die Beanspruchung zügig und stoßfrei aufbringen ließ. Das Be- und Entlasten wurde elektrisch entweder von Hand oder selbsttätig durch einen elektronischen Zeitschalter gesteuert (s. Anlage 5, Bild 1).

Die Randdehnung der Balken wurde mit DMS und einer Dehnmeßbrücke ermittelt, an die zum Aufzeichnen des zeitlichen Verlaufes der Dehnung ein Kompensograph angeschlossen war.

Die im folgenden mitgeteilten Meßwerte können nur als Richtwerte

dienen, da die Stoffkonstanten eines Kunstharzes unterschiedlich sein können, auch wenn es aus dem gleichen Monomer hergestellt, aber unter etwas anderen Bedingungen ausgehärtet wurde.

1.41 Kriechkurven

Auf Anlage 6 ist die Kriechkurve von Araldit E während 135 Minuten wiedergegeben. Die Dehnungszunahme betrug nach dieser Zeit 16 % der sofort bei der Belastung entstehenden Dehnung ϵ_0 . Beim Entlasten wurde nach der gleichen Zeit eine bleibende Dehnung von 0,88 % festgestellt. In einer weiter zurückliegenden Untersuchung wurde an einem Probestab aus Araldit M nach 24 Stunden eine Zunahme der Dehnung von 56,8 % gemessen; nach 2 Stunden betrug bei diesem Material das Kriechen 30,7 %. Es kriecht so stark, daß es für Modellmessungen kaum mehr verwendet wird. Der Versuch zeigt aber, daß auch nach sehr langen Zeiten die Dehnung immer noch weiter zunimmt.

1.42 Der Elastizitätsmodul bei periodischer Be- und Entlastung

1.421 Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Belastungszeit

Verschiedene hier nicht wiedergegebene Messungen bestätigen, daß das Kriechen spannungsproportional verläuft. Der Elastizitätsmodul ist deshalb bei periodischer Be- und Entlastung nur von der Belastungszeit abhängig. Auf Anlage 7 sind die Elastizitätsmoduli der untersuchten Kunstharze für drei verschiedene Belastungszeiten angegeben. Die Änderung des Elastizitätsmoduls mit der Belastungszeit wurde auf den bei 20 Sekunden ermittelten Elastizitätsmodul bezogen und graphisch dargestellt.

1.422 Kriechmaß

Es wird vorgeschlagen, als Kriechmaß die bezogene Änderung des Elastizitätsmoduls anzugeben, wenn die Belastungszeit von 20 auf 60 Sekunden vergrößert wird:

$$\frac{\Delta E}{E_{20}} = \frac{E_{20} - E_{60}}{E_{20}} \cdot 100 \%$$

Demnach kriecht von den untersuchten Kunstharzen Plexiglas mit 3,62 % am stärksten, während bei Makrolon^{x)} mit 0,96 % die Zeitabhängigkeit des Elastizitätsmoduls am kleinsten ist.

Aus dem Kriechmaß eines Kunstharzes kann man sofort ersehen, ob man während eines Belastungszyklus eventuell mehrere Messungen ausführen kann. Wird die erste Messung z.B. nach einer Belastungszeit von 20 Sekunden ausgeführt, und man benötigt bis zum Ablesen der letzten Meßstelle 40 Sekunden, dann ist der Unterschied zwischen beiden Messungen

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_{20}} = \frac{\epsilon_{20} - \epsilon_{60}}{\epsilon_{20}} = \frac{\Delta E}{E_{20}}$$

Mit der im zweiten Kapitel beschriebenen automatischen Meßanlage können z.B. 50 Meßstellen in 40 Sekunden abgetastet werden, so daß bei einem Modell aus Araldit B zwischen der ersten und letzten Messung eine Zunahme der Dehnung von 2 % entsteht. Bei Untersuchungen, die für die praktische Bemessung eines Bauwerkes ausgeführt werden, kann man diesen Fehler unter Umständen in Kauf nehmen (sogenannte Messungen mit technischer Genauigkeit), da der Zeitgewinn bei diesem Vorgehen wichtiger sein kann als eine übertriebene Genauigkeit.

1.423 Spannungsdehnungslinien

Die Spannungsdehnungslinien der untersuchten Kunstharze sind auf Anlage 8 dargestellt. Sie lassen erkennen, daß bei periodischer Be- und Entlastung der Zusammenhang zwischen Spannungen und Deh-

x) Makrolon ist für Zwecke der Modellstatik wenig geeignet, da es nur unter hohem Druck härtet und im Handel lediglich dünne Tafeln erhältlich sind, deren Dicke sehr unregelmäßig ist.

nungen bis 9000 μD linear ist. Eine Ausnahme bildet Makrolon, dessen Spannungsdehnungslinie ab 6000 μD leicht gekrümmt ist. Der Probestab aus Plexiglas brach unmittelbar nach der Messung bei 8920 μD , ohne daß sich Fließerscheinungen bemerkbar gemacht hätten. Alle anderen Probestäbe hätten wahrscheinlich eine noch größere Beanspruchung ertragen; der Versuch wurde jedoch abgebrochen, weil die Probekörper sich so stark krümmten, daß die Voraussetzungen der technischen Biegelehre nicht mehr erfüllt waren.

1.424 Entlastungszeit \leq Belastungszeit

Ist die Entlastungszeit kleiner als die Belastungszeit, dann ist das Zurückkriechen noch nicht beendet, wenn bereits die neue Belastung einsetzt. Es überlagern sich jetzt zwei gegenläufige Kriechvorgänge, so daß das Kriechen bei der neuen Belastung scheinbar kleiner ist [13]. Bei mehrmaliger Be- und Entlastung wird der sich dann einstellende effektive Elastizitätsmodul größer. Auf Anlage 9 sind die Elastizitätsmoduli von Plexiglas und Araldit E angegeben, die jeweils als Mittelwert aus drei Laststufen ermittelt wurden. Die Änderung des Elastizitätsmoduls ist in Abhängigkeit von dem Verhältnis aus Entlastungs- zur Belastungszeit aufgetragen. Bei Plexiglas tritt eine Vergrößerung des Elastizitätsmoduls von 3,4 % gegenüber dem Elastizitätsmodul bei Gleichheit von Be- und Entlastungszeit ein, wenn die Entlastungszeit nur 1/6 der Belastungszeit beträgt. Ist die Entlastungszeit größer als die Belastungszeit, dann ist keine Änderung des Elastizitätsmoduls festzustellen.

1.425 Einfluß der Vorgeschichte auf den effektiven Elastizitätsmodul

Bei Modellversuchen ist man oft gezwungen, das Modell vor Beginn der Messungen mehrmals längere Zeit zu belasten, um die Belastungsvorrichtung zu überprüfen und gegebenenfalls zu justieren. Es sollte beobachtet werden, ob diese Vorbelastungen Einfluß auf die anschließenden Messungen mit periodischer Be- und Entlastung

haben, wenn zwischen der Vorbelastung und den Messungen nur eine kurze Zeitspanne liegt. Auf Anlage 10 sind Meßergebnisse wiedergegeben, die deutlich erkennen lassen, daß die Vorgeschichte keinen Einfluß auf Messungen mit periodischer Be- und Entlastung hat.

1.426 Einfluß einer Vorlast auf den effektiven Elastizitätsmodul

Um Belastungsvorrichtungen spielfrei zu halten oder Auflager zur Aufnahme von Zugkräften vorzuspannen, bringt man häufig am Modell eine konstante Vorlast an, die dann eine mit der Zeit größer werdende Dehnung ϵ_u erzeugt. Die Darstellung auf Anlage 11 zeigt, daß Vorlasten, die Dehnungen von 1000 und 2000 μD erzeugen, praktisch ohne Einfluß auf die Messungen bei periodischer Be- und Entlastung sind.

Kurze Zeit nach dem Aufbringen der Vorlast ist die Zunahme der Dehnung ϵ_u während eines Belastungszyklus näherungsweise linear, so daß der Einfluß des durch die Vorlast erzeugten Kriechens, wie in 1.3 dargelegt, durch die Differenzbildung ausgeschaltet wird.

1.43 Änderung des Elastizitätsmoduls von Gießharzen nach dem Erstarren

Heißhärtende Gießharze, wie z.B. Araldit B, haben nach dem bei hohen Temperaturen vor sich gehenden Erstarren einen Elastizitätsmodul, der im Laufe von 20 Tagen ca. 5 % größer wird. Bei kalthärtenden Gießharzen, wie Araldit E, nimmt der Elastizitätsmodul jedoch in 42 Tagen um 41,3 % zu; erst nach so langer Zeit ist das Aushärten des Kunstharzes so weit vorgeschritten, daß man während der Dauer eines Modellversuches einen gleichbleibenden Elastizitätsmodul voraussetzen kann (s. Anlage 12). Durch eine Wärmebehandlung kann man auch bei kalthärtenden Gießharzen das Aushärten beschleunigen, so daß bereits nach wenigen Tagen der Elastizitätsmodul seinen endgültigen Wert erreicht.

1.5 Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigten die schon lange bekannte Tatsache, daß die in der Modellstatik hauptsächlich verwendeten Kunstharze, wie Araldit B, Lekutherm X 30, Araldit E und Plexiglas, als Modellwerkstoffe gut geeignet sind. Der Einfluß ihrer bei Modellmessungen am meisten störenden Eigenschaft, das elastische Nachgeben oder Kriechen, läßt sich durch periodische Be- und Entlastung vollkommen ausschalten. Der hierdurch in Kauf zu nehmende größere Zeitaufwand bei den Messungen wird durch eine größere Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Meßwerte ausgeglichen, da durch wiederholtes periodisches Messen an einer Meßstelle nicht nur die Meßwertstreuung vermindert, sondern auch lineare Nullpunktverschiebungen unterdrückt werden. Die periodische Be- und Entlastung ist von den besprochenen und schon seit längerem bekannten Verfahren zur Elimination des Kriecheinflusses für die Modellstatik am geeignetsten, da sie universell anwendbar ist und die genannten Vorteile mit sich bringt.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, daß die Spannungsdehnungslinien dieser Kunstharze bei periodischer Be- und Entlastung mindestens bis 8000 μD gerade sind, ein Bereich, der bei Modelluntersuchungen, die in Anlehnung an die sogenannte Spannungstheorie 1. Ordnung ausgeführt werden, im allgemeinen nur bis zur Hälfte ausgenutzt wird. Andere Untersuchungen ließen erkennen, daß bei periodischer Be- und Entlastung die Vorgeschichte und eine Vorlast keinen Einfluß auf die Meßergebnisse haben.

Weiterhin wurde ein Kriechmaß definiert, das es gestattet, das Kriechen der einzelnen Kunstharze zu beurteilen. Dies ist im Hinblick auf die zu erwartende Genauigkeit wichtig, wenn man mehrere Messungen während eines Belastungszyklus ausführen will.

2 Automatische Meßanlage für 200 DMS

2.1 Allgemeines

In der Modellstatik muß häufig an einem Modell an sehr vielen Stellen die Dehnung mit elektrischen DMS für mehrere Lastfälle gemessen werden. Um den Zeitaufwand für diese Arbeit zu verringern und um Ablesefehler zu vermeiden, wurde eine automatische Meßanlage geschaffen, die die Meßwerte in Ziffern auf einem Papierstreifen registriert und gleichzeitig im internationalen Fernschreibcode auf einen Lochstreifen stanzt. Dieser kann zur Auswertung der Messungen mit einem speziell hierfür entwickelten Rechenprogramm direkt in eine elektronische Datenverarbeitungsanlage gegeben werden. An die automatische Meßanlage kann man bis zu 200 DMS in Viertelbrückenschaltung anschließen. Um alle Meßstellen genau auf Null abzugleichen, müßte man beim automatischen Messen mit DMS sehr viel Zeit aufwenden, da das Abgleichen der DMS vor der eigentlichen Messung von Hand vorgenommen werden muß. Die neue Anlage, die speziell für Messungen an Kunstharzmodellen entworfen wurde, wird deshalb nur sehr grob abgeglichen, bis der zu erwartende Meßwert - die Differenz je einer Messung bei Unter- und Oberlast - im Meßbereich des Meßverstärkers liegt. Die Be- und Entlastung der Modelle wird ebenfalls von der Meßanlage automatisch gesteuert, so daß bei Kunstharzmodellen durch Messungen an einer Meßstelle in periodischem Wechsel zwischen Ober- und Unterlast auch der Einfluß des Kriechens eliminiert werden kann. Um bei Verwendung nicht-kriechender Modellwerkstoffe Zeit einzusparen, werden in einem anderen Meßprogramm jeweils bei Entlastung und nach erfolgter Belastung alle Meßstellen abgefragt. Die Messungen können mehrmals wiederholt werden, wodurch sich der Einfluß der unvermeidlichen Streuung der Meßwerte durch Mittelbildung verringern läßt.

Die Entwicklung der Gleichstromverstärker ist heute so weit vorangeschritten, daß bei der Planung dieser Anlage ausführliche Überlegungen angestellt wurden, ob für die Messungen mit DMS Gleichstrom oder Wechselstrom verwendet werden sollte. Messungen mit Gleichstrom haben zwar den unbestreitbaren Vorteil, daß

kapazitive Unsymmetrien in der Meßanlage und insbesondere in den Zuleitungen zu den DMS unbeachtet bleiben können, während sie bei Messungen mit Wechselstrom neben dem Ohmschen Abgleich jeder DMS-Meßstelle noch zusätzlich einen kapazitiven Abgleich bedingen. Thermospannungen, die an den Lötstellen zwischen DMS und Anschlußdrähten und auch an den Umschaltkontakten entstehen, verursachen jedoch bei Gleichstrommessungen unter Umständen erhebliche Fehler, da sie als scheinbare Dehnungen angezeigt werden. Dies läßt sich nur durch eine zweite Messung mit umgepolter Brückenspeisespannung vermeiden. Am Ausgang der DMS-Meßbrücke erhält man so einmal eine positive und einmal eine negative Spannung, der jeweils die nicht umgepolte Thermospannung überlagert ist, die durch Mittelwertbildung aus dem Meßergebnis eliminiert werden kann [8].

Außerdem stören die fast überall vorhandenen Streufelder der elektrischen Licht- und Kraftanlagen die Messungen durch Einstrahlungen, die nur durch brummfreies Aufbauen der Gleichstromverstärker gegen Erde wirkungsvoll unterdrückt werden können.

Einige Vorversuche zeigten deutlich die geschilderten Schwierigkeiten. Es wurde deshalb die im allgemeinen bei DMS übliche Messung mit Wechselstrom unter Verwendung von Trägerfrequenz-Meßverstärkern beibehalten, so daß die Anlage in ihren Hauptteilen aus serienmäßig von der Industrie hergestellten bewährten Geräten aufgebaut werden konnte. Lediglich das zentrale Steuergerät, das den Ablauf des Meßvorganges und das Zusammenwirken aller Geräte steuert, und der Gruppenumschalter wurden im Institut für Spannungsoptik und Modellmessungen entwickelt und gebaut.

Alle in der automatischen Meßanlage verwendeten Geräte stehen in einem fahrbaren Gestell, das auch die gesamte Stromversorgung enthält, so daß die Anlage nur über ein Kabel mit dem Lichtnetz verbunden zu werden braucht und mit einem einzigen Schalter eingeschaltet werden kann. Die Anordnung der Geräte ist aus dem Bild auf Anlage 13 zu ersehen.

2.2 Aufbau der Anlage

In dem Blockschaltbild, Anlage 14, ist das Zusammenwirken aller Geräte im Prinzip dargestellt. Die 200 DMS sind in Gruppen zu je 50 zusammengefaßt und können über den von Hand zu bedienenden Gruppenumschalter an die 50 Abgleicheinheiten eines automatischen Meßstellenumschalters angeschlossen werden. Nach Abgleich von Hand erfolgt die Messung der angeschalteten 50 Meßstellen automatisch. Dabei wird eine Meßstelle nach der anderen auf die nachfolgende Dehnmeßbrücke durchgeschaltet.

Die Ausgangsgleichspannung der Dehnmeßbrücke stellt ein Maß für die Dehnung des gerade angeschalteten DMS dar und wird nicht, wie sonst üblich, an einem Drehspul-Meßgerät abgelesen, sondern von einem Digitalvoltmeter in digitaler Form angezeigt und gleichzeitig von einem Drucker und einem Streifenlocher auf Papierstreifen registriert.

In einem zwischen Meßbrücke und Digitalvoltmeter eingeschalteten Filter werden die in der Ausgangsspannung enthaltenen Reste der Trägerfrequenz ausgesiebt und andere durch Einstreuungen in den Meßleitungen entstehende Welligkeiten der Ausgangsspannung geglättet. Dies ist erforderlich, da sonst das empfindliche Gleichspannungs-Digitalvoltmeter keine einwandfreie Anzeige liefert und seine Genauigkeit und Empfindlichkeit nicht ausgenutzt werden kann. Der mit dem Filter vereinigte Abschwächer ermöglicht es, Dehnungsanzeige der Meßbrücke und Anzeige des Digitalvoltmeters in ein bestimmtes, zweckmäßigerweise ganzzahliges Verhältnis zu setzen (z.B. $1000 \mu D = 0,1000 V$).

Damit auch die Nummer der Meßstelle registriert werden kann, ist ein Relaisumsetzer vorhanden. Er speichert die vom Gruppenumschalter und vom Meßstellenumschalter kommenden Signale und setzt sie in die jeweils für Drucker und Lochstreifen-Steuergerät geeignete Form um.

Das selbsttätige Zusammenarbeiten aller Geräte wird durch das zentrale Steuergerät bewirkt. Es besteht im wesentlichen aus einem

elektronischen Taktgeber, der die automatische Umschaltung der Meßstellen und die Be- und Entlastung des Modells nach zwei Programmen steuert, die später beschrieben werden. Außerdem löst das Steuergerät durch elektrische Impulse die Messungen des Digitalvoltmeters aus. Dieses gibt nach jeder Messung ein Signal an den Drucker, der den Meßwert abfragt und ausdruckt. Gleichzeitig werden durch das Lochstreifen-Steuergerät der Meßwert und die Meßstellennummer zusammen mit den für die elektronische Datenverarbeitung notwendigen Festsymbolen im Lochstreifenstanzer in einen Papierstreifen gestanzt.

Die Auslösung des Druckvorganges bewirkt nach einer einstellbaren Verzögerungszeit gleichzeitig das Weiterschalten der Meßstelle. Je nach Programm leitet dann das zentrale Steuergerät den nächsten Meß- oder Belastungszyklus ein, bis alle Meßstellen durchgemessen sind und der Meßstellenumschalter durch ein Signal den Zyklus im Steuergerät stoppt. Die Anzahl n der auszuführenden Be- und Entlastungen bei Messung einer Meßstelle wird am Steuergerät vorgegeben; es können eine bis vier Belastungen gewählt werden. Die Zeitdauer t_2 der Be- und Entlastung läßt sich zwischen 4 und 45 Sekunden verändern.

2.3 Meßprogramme

Von der Meßanlage werden je nach Programm folgende Schritte automatisch ausgeführt (s. auch Anlage 15):

2.31 Programm I

Es werden zunächst im entlasteten Zustand alle Meßstellen nacheinander gemessen. Die Anzahl N der abzutastenden Meßstellen kann am Meßstellenumschalter zwischen 1 und 50 vorgegeben werden. Dann wird das Modell belastet, und nach Ablauf der eingestellten Belastungszeit t_2 werden wieder sämtliche Meßstellen abgetastet. Anschließend wird das Modell entlastet. Darauf folgt die Entlastungszeit, und der Zyklus beginnt von neuem, bis die gewählte Zahl n der Be- und Entlastungen erreicht ist und die Anlage abschaltet.

Die Periode t_1 des Weiterschaltens von Meßstelle zu Meßstelle kann zwischen 0,8 und 15 Sekunden eingestellt werden.

2.32 Programm II

Die gerade angeschaltete Meßstelle wird mehrmals nach Ablauf von Be- und Entlastungszeit bei Ober- und Unterlast gemessen. Erst dann wird die nächste Meßstelle angeschaltet, und es werden wiederum mehrere Messungen bei Ober- und Unterlast ausgeführt, bevor auf die nächste Meßstelle weitergeschaltet wird. Ist die letzte Meßstelle mehrmals gemessen worden, schaltet sich die Anlage selbsttätig ab.

2.33 Zeitbedarf für die Messungen

Mit den oben bereits eingeführten Bezeichnungen

N = Anzahl der Meßstellen (1 bis 50)

n = Anzahl der Belastungszyklen (1 bis 4)

t_1 = Weiterschaltperiode im Programm I (0,8 bis 15 Sekunden)

t_2 = Be- und Entlastungszeit (4 bis 45 Sekunden)

findet man für den Zeitbedarf zur Durchführung der Messungen in den beiden Programmen:

$$\text{Programm I : } t_{\text{ges}} = (2n + 1)(t_2 + N \cdot t_1)$$

$$\text{Programm II: } t_{\text{ges}} = (2n + 1) \cdot t_2 \cdot N$$

Für 50 Meßstellen ergibt sich bei 4 Belastungszyklen und $t_1 = 0,8$ Sekunden und $t_2 = 20$ Sekunden im Programm I ein Zeitbedarf von 9 Minuten; im Programm II beträgt er hingegen fast 2 Stunden. In beiden Fällen werden jeweils 450 vierstellige Meßwerte zusammen mit Komma und Vorzeichen und einer dreiziffrigen Meßstellennummer ausgedruckt. Auf dem Lochstreifen besteht jeder Meßwert mit den Festsymbolen aus 14 Zeichen.

Für das Abgleichen der 50 Meßstellen benötigt man im allgemeinen nicht mehr als 15 Minuten. Zunächst werden alle Meßstellen ganz grob eingestellt; in einem zweiten Durchgang werden etwa notwendige Verbesserungen vorgenommen. Ein Feinabgleich sowie ein kapazitiver Abgleich ist meist nicht notwendig, wie später noch dargelegt wird.

Nebenbei sei erwähnt, daß man jede Meßstelle auch einzeln von Hand anwählen und messen kann. Dabei ist es möglich, Drucker und Stanzer auszuschalten und die Meßergebnisse am Digitalvoltmeter abzulesen. Beim Aufbau eines Modellversuchs ist es von Vorteil, daß man Be- und Entlastung über eine durch ein 5 m langes Kabel angeschlossene Fernbedienung von Hand vornehmen kann.

2.4 Beschreibung der einzelnen Geräte

2.41 Gruppenumschalter

Die zur Messung der Widerstandsänderung der DMS verwendete Wheatstonesche Brückenschaltung ist an einem Punkt der Meßdiagonale geerdet (s. Anlage 16). Hier liegen sowohl alle aktiven DMS als auch der gemeinsame Kompensations-DMS, und man benötigt nur eine getrennte Zuleitung zu den verschiedenen Meßstellen. Für den anderen Anschluß wird ein gemeinsamer Nulleiter verwendet. Da in der Praxis jedoch jedem DMS eine Abglicheinheit zugeordnet werden muß, sind für jede Meßstelle drei Umschaltkontakte notwendig.

Ein automatischer Meßstellenumschalter mit Abglicheinheiten für 200 DMS würde sehr viel Platz beanspruchen und wäre sehr teuer. Deshalb wurde der automatische Umschalter nur für 50 Meßstellen ausgelegt. Eine Erweiterung der Meßstellenzahl auf 200 ist durch den Gruppenumschalter möglich; mit ihm können von Hand vier Gruppen zu je 50 DMS an den automatischen Umschalter angeschlossen werden. Der Anschluß der 200 DMS an die Meßanlage erfolgt nach einer schon seit längerer Zeit bestehenden Institutsnorm über rechteckige 25polige Tuchelsteckdosen, so daß die Verbindung zwischen den Meßstellen am Modell und der Meßanlage schnell und sicher gelöst und wieder hergestellt werden kann. Die Beschränkung

auf nur 50 Abgleicheinheiten erleichtert den Überblick bei dem von Hand vorzunehmenden Abgleich der Meßstellen und bei der Beurteilung der Meßergebnisse. Außerdem lassen sich in den Gruppen Meßstellen verschiedenen Charakters zusammenfassen und gegebenenfalls mit anderen Bedingungen (Meßempfindlichkeit, Meßstellenvorheizung) durchmessen.

Der Gruppenumschalter besteht aus 13 Schaltebenen, auf denen jeweils vier unabhängige Schaltfinger über vier Kontakte einrasten können. Es sind also 52 Schalter vorhanden, die simultan je eine ankommende Leitung auf vier abgehende Leitungen umschalten. Die beiden nicht für die Umschaltung von DMS benötigten Schalter dienen zur elektrischen Anzeige der Schalterstellung mit Signallämpchen und zum Signalisieren der Gruppennummer über den Relaispeicher an den Drucker und Stanzer.

Der Gruppenumschalter ist zur Raumersparnis im Gehäuse des zentralen Steuergerätes untergebracht. Da er während der Messungen nicht umgeschaltet wird, braucht man an die Konstanz der Übergangswiderstände seiner Kontakte keine allzu hohen Anforderungen zu stellen. Es ist lediglich eine sichere Kontaktgabe erforderlich, so daß man mit einfachen Silberkontakten mit Selbstreinigung auskommen kann.

2.42 Automatischer Meßstellenumschalter

Zur automatischen Umschaltung der Meßstellen dient ein Meßstellenumschalter, der wegen seiner vielseitigen Verwendungsmöglichkeit industriell in einzelnen Baugruppen hergestellt wird. Er wurde eigentlich als selbständiger universeller Meßstellenumschalter zur analogen Registrierung entwickelt, auf dessen allgemeine Verwendungsmöglichkeiten hier nicht näher eingegangen werden kann. In der geschilderten Meßanlage werden ein Steuergerät und fünf Abgleichgeräte verwendet.

2.421 Steuergerät

Mit Hilfe des Steuergerätes können die Abgleicheinheiten mit den daran angeschlossenen Meßstellen auf zwei Arten einzeln an die nachgeschaltete Trägerfrequenz-Meßbrücke angeschlossen werden.

1. Mit den Tastenstreifen für die Meßstellenwahl von Hand: Hierbei wird auf dem linken Tastenstreifen die Nummer des Abgleichgerätes gedrückt, das die Abgleicheinheit der gewünschten Meßstelle enthält. Dadurch erfolgt der Anschluß dieses Abgleichgerätes an das Steuergerät. Durch Drücken der Nummer der Abgleicheinheit im rechten Tastenstreifen wird diese im vorgewählten Abgleichgerät an den Meßverstärker angeschlossen.
2. Mit Hilfe der Schaltautomatik können die Meßstellen nacheinander mit einstellbarer Schaltfrequenz selbsttätig umgeschaltet werden: An Stelle der beiden Tastenstreifen treten jetzt zwei Zählmagnete, deren Weiterschalten durch Impulse eines elektronischen Taktgebers geschieht, der aber nicht benutzt wird, da die Schaltautomatik bei Verwendung in der automatischen Meßanlage nur in der Betriebsart "Einzelschritt" arbeitet. Hierbei schaltet sie beim Drücken der Starttaste jedesmal nur um eine Meßstelle weiter.

Die Funktion der Starttaste übernimmt bei der automatischen Messung ein Relais im zentralen Steuergerät, dessen Kontakte parallel zu den Kontakten der Starttaste geschaltet sind. Über dieses Relais wird das Weiterschalten der Zählmagnete vom zentralen Steuergerät bewirkt, die nacheinander alle Abgleicheinheiten mit den zugeordneten DMS an den Trägerfrequenz-Meßverstärker anschließen. Das Überspringen einer Meßstelle oder das Beginnen mit einer anderen als der ersten ist nicht möglich.

Wenn eine am Tastenstreifen des Steuergerätes vorgewählte Meßstellennummer erreicht wird, werden beide Zählmagnete in ihre Nullstellung abgeworfen. Hierdurch kann der Zyklus der automatischen Messungen an der vorgewählten Meßstelle beendet werden. Um am Ende eines Abtastzyklus im zentralen Steuergerät die dann notwendi-

gen Funktionen auszulösen, wird ein Impuls über eine nachträglich eingebaute Steckverbindung an das zentrale Steuergerät gegeben.

Ein Schutzrelais verhindert, daß während des Umschaltens von einer Meßstelle zur folgenden der Meßverstärker übersteuert wird, indem es seinen Eingang kurzschließt und ihn nur dann freigibt, wenn eine Meßstelle angeschlossen ist.

Die im Steuergerät eingebaute Vorheizung kann nicht benutzt werden, da sie mit Wechselstrom arbeitet. Bei der Erprobung der Anlage hat sich nämlich herausgestellt, daß hierdurch sehr starke Einstreuungen in die Meßleitungen entstehen, die sich nur schwer wieder völlig unterdrücken lassen und die Anzeige des Digitalvoltmeters stören. Deshalb wird die Vorheizung extern aus einer Akkumulatorenbatterie gespeist (s. Abschnitt 2.49). Ursprünglich war bei Verwendung eines gemeinsamen Kompensationsstreifens im Meßstellenumschalter keine externe Vorheizung vorgesehen. Die Schaltung wurde aber entsprechend geändert, denn es zeigte sich, daß auch beim Anschluß von DMS in 1/4-Brückenschaltung eine Konstanz der Meßwerte zu erreichen ist, wenn man in einem klimatisierten Versuchsraum arbeitet und den Vorheizstrom genau einreguliert (s. Abschnitt 2.54).

2.422 Abgleichgeräte

In einem Abgleichgerät sind 10 Abgleicheinheiten mit den dazugehörigen Relais, Steckdosen und Polklemmen zum Anschluß der Meß- und Steuerleitungen zusammengefaßt.

Jede Abgleicheinheit ist, wie in der DMS-Meßtechnik üblich, mit Widerstands- und Kondensatorketten zum Grob- und Feinabgleich sowohl des Betrages als auch der Phase der Brückenausgangsspannung ausgestattet. Eine Signallampe leuchtet auf, wenn die betreffende Meßstelle an die Meßleitung angeschaltet ist.

2.43 Trägerfrequenz-Meßbrücke

Zur eigentlichen Messung der Widerstandsänderung, die infolge einer Dehnung in den DMS entsteht, wird eine Trägerfrequenz-Meßbrücke verwendet. Diese Bezeichnung des Gerätes deutet darauf hin, daß zur Widerstandsmessung die bekannte Wheatstonesche Brückenschaltung (Anlage 16) benutzt wird. Mit Wechselstrom gespeist, liefert sie an der Brückendiagonale das Meßsignal in Form einer amplituden-modulierten Trägerfrequenz.

Ein großer Vorteil hierbei ist, daß man durch Umsetzen der Frequenz des Meßsignals in den Bereich höherer Frequenzen Wechselspannungsverstärker benutzen kann. Ihre große Nullpunktstabilität und die hohe Konstanz ihres Verstärkungsgrades auch über lange Zeiten sind gerade bei modellstatistischen Untersuchungen besonders wichtig, da hier das Meßsignal quasistatisch verläuft. Mit Hilfe des Trägerfrequenzverfahrens kann eben auch die Frequenz Null einwandfrei verstärkt werden.

Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, daß wegen der hohen Trägerfrequenz die Brückenschaltung auch einen kapazitiven Abgleich erfordert, denn bei Wechselspannungen stören die parallel zu den DMS liegenden Kapazitäten der Zuleitungen unter Umständen das Brückengleichgewicht, und es müssen für den Ausgleich von Unsymmetrien veränderliche Kondensatoren vorgesehen werden.

Die in der automatischen Meßanlage verwendete statisch-dynamische Meßbrücke hat eine Trägerfrequenz von 1000 Hz und eine Speisespannung von 5 V, so daß in einer Wheatstoneschen Brücke aus 4 DMS von 120 Ohm Widerstand ein Strom von 21 Milliampere fließt. Die relativ niedrige Trägerfrequenz gestattet den Anschluß der DMS über nichtabgeschirmte Leitungen, was bei Modellen mit 200 Meßstellen sehr wichtig ist, da sonst der Kabelbaum recht unhandliche Dimensionen annehmen würde. Auch spielen bei dieser Frequenz Änderungen der Zuleitungskapazität, die schon beim Bewegen nichtabgeschirmter Leitungen entstehen, keine so große Rolle wie bei der in anderen Geräten meist verwendeten Frequenz von 5000 Hz.

Die Dehnungen, die mit 200 Dehnmeßstreifen an einem Modell gemessen werden, sind meist sehr unterschiedlich und liegen in einem Bereich von null bis ca. 1000 μD ($1 \mu D = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm} = 1 \text{ Mikrodehnung}$). Die Meßbrücke besitzt mehrere Meßbereiche, um auch kleinere Dehnungen noch genügend genau ablesen zu können. Im feinsten Meßbereich entspricht Vollausschlag des Zeigerinstrumentes 30 μD . Die große Skala mit einer Länge von 150 mm hat 30 Skalenteile, so daß 1 μD noch sicher abgelesen werden kann. Bei Messungen von Hand kann der Meßbereich immer so eingestellt werden, daß ein möglichst großer Zeigerausschlag und damit eine große Ablesegenauigkeit entsteht.

Wenn beim automatischen Messen Meßstellen mit sehr unterschiedlichen Dehnungen in einer Serie nacheinander gemessen werden sollen, so müßte hier, um eine gleichbleibende Meßgenauigkeit zu erzielen, der Meßbereich der Dehnmeßbrücke automatisch umgeschaltet werden. Dies ist jedoch nur mit großem technischem Aufwand möglich; eine derart komplizierte Automatik ist fehleranfällig und stellt u.U. das Funktionieren der gesamten Anlage in Frage.

Das Problem der Meßbereichumschaltung konnte mit Hilfe der verwendeten statisch-dynamischen Dehnmeßbrücke in einfacher Weise umgangen werden. Bei einer genauen Untersuchung der technischen Eigenschaften dieses Gerätes wurde auch die Linearität seiner Meßbereiche überprüft. Zu diesem Zweck wurde mit dem Digitalvoltmeter, das in der automatischen Meßanlage als Analog-Digitalwandler benutzt wird, die Ausgangsspannung gemessen. Sie beträgt bei Vollausschlag des eingebauten Drehspul-Meßgerätes in jedem Meßbereich 0,5 V. Es zeigte sich nun, daß die Ausgangsspannung nicht nur innerhalb des eingestellten Meßbereiches streng proportional der Dehnung der angeschlossenen DMS war, sondern auch dann noch, als die Dehnung größer wurde, als es dem eingestellten Meßbereich entspricht. Zur Erzeugung genau bekannter Dehnungen wurde an die Dehnmeßbrücke ein Dehnnormal angeschlossen. Auf Anlage 17 ist die Ausgangsspannung der Dehnmeßbrücke als Funktion der Belastung des Dehnnormals dargestellt. Die Meßwerte sind in Tabelle 1, Anlage 18, eingetragen. Es ist zu erkennen, daß bis zum 2,5fachen Wert des eingestellten Meßbereichs die Ausgangsspannung der Meßbrücke

linear mit dem Meßwert ansteigt.

Im 1000- μ D-Meßbereich der Dehnmeßbrücke können also bei ausgeschaltetem Drehspul-Meßgerät Dehnungen im Bereich von - 2500 μ D bis + 2500 μ D gemessen werden. Da das Digitalvoltmeter infolge seiner hohen Empfindlichkeit und Genauigkeit ein genügend großes Auflösungsvermögen besitzt, kann man auch die Messung von sehr kleinen Dehnungen im 1000- μ D-Bereich der Meßbrücke vornehmen. Mit Hilfe des Abschwächers (s. Abschnitt 2.44) kann die Ausgangsspannung der Meßbrücke so weit vermindert werden, daß 1000 μ D einer Spannung von 0,1000 V entsprechen, wobei 4 Stellen nach dem Komma angezeigt werden. Da das Digitalvoltmeter in seinem empfindlichsten Meßbereich noch auf Spannungsänderungen von 0,1 mV anspricht und sie anzeigt, können im 1000- μ D-Bereich der Meßbrücke Dehnungen von 1 μ D gemessen werden. Der Meßbereich des Digitalvoltmeters reicht in dieser Empfindlichkeitsstufe von - 0,1599 bis + 0,1599 V. Das bedeutet, daß bei dieser Einstellung der Geräte Dehnungen im Bereich von - 1500 μ D bis + 1500 μ D ohne Meßbereichsumschaltung auf 1 μ D genau angezeigt werden, wobei der lineare Bereich der Dehnmeßbrücke bei weitem nicht ausgenutzt wird. Dieser Meßbereich und diese Empfindlichkeit reichen aber bei den üblichen modellstatischen Untersuchungen im allgemeinen aus. Der sehr große Bereich von insgesamt 3000 μ D wurde gewählt, um bei einem nur grob vorgenommenen Abgleich der Meßstellen genügend Spielraum für den Meßwert zu haben.

Aus dem Diagramm auf Anlage 17 ist außerdem zu ersehen, daß die Linearität und die Empfindlichkeit der Meßbrücke durch kapazitive Verstimmung des Brückengleichgewichts nicht beeinflusst werden. Beim Abgleich der Meßstellen vor Beginn einer Messung braucht also auch der Abgleich der Phase nur relativ grob vorgenommen zu werden, wodurch bei den Messungen Zeit eingespart wird.

2.44 Filter und Abschwächer

Der Ausgangsspannung der Dehnmeßbrücke sind Reste der nicht völlig ausgesiebten Trägerfrequenz überlagert. Außerdem werden Ein-

streuungen aus dem Lichtnetz durch die eingebauten Filter nicht vollständig unterdrückt. Die hierdurch vorhandene geringe Welligkeit der Gleichspannung reicht aus, um im empfindlichsten Bereich des Digitalvoltmeters trotz des eingebauten Filters ein dauerndes Springen der Ziffern in den letzten beiden Stellen zu verursachen. Dadurch ist keine einwandfreie Messung möglich, denn je nach dem Zeitpunkt der Auslösung der Messung ändert sich der angezeigte Meßwert mindestens in der letzten Stelle.

Als bestes Mittel zur Glättung der Ausgangsspannung erwies sich ein Kondensator, der parallel zum Eingang des Digitalvoltmeters geschaltet wird. Die Größe des Kondensators hat Einfluß darauf, wie schnell das Digitalvoltmeter den Änderungen der Ausgangsspannung folgt, da er immer erst auf die neue Spannung umgeladen werden muß. Es können deshalb Kondensatoren verschiedener Größe mit Hilfe eines Stufenschalters eingeschaltet werden.

In den empfindlichen Bereichen der Dehnmeßbrücke ist die Welligkeit der Ausgangsspannung größer, da naturgemäß die Einstreuungen mehr verstärkt werden. Zur Glättung der Spannung sind dann größere Kapazitäten erforderlich als z.B. im 1000- μ D-Bereich, in dem man mit 100 μ F auskommt.

Außer dem Glättungskondensator ist in die Zuleitung zum Digitalvoltmeter noch ein Potentiometer als Abschwächer eingebaut. Da hiermit die Anzeige des Digitalvoltmeters mit Hilfe der Eicheinrichtung an der Dehnmeßbrücke sehr genau eingeregelt werden muß, wurde ein Wendepotentiometer benutzt. Sein Widerstand kann durch 10 Umdrehungen eines Drehknopfes linear von null bis 100 K Ω verändert werden, wodurch die notwendige feinfühlige Einstellung möglich wird.

2.45 Digitalvoltmeter

Ein digitaler Meßwert kann nicht nur leichter abgelesen werden, er ist auch besser als ein Analogwert zur weiteren automatischen

Auswertung geeignet. Der Meßfehler eines digitalen Wertes kann durch das Registriergerät und eine spätere Auswertung nicht weiter vergrößert werden. Außerdem ist zur elektronischen Datenverarbeitung eine digitale Verschlüsselung der Meßwerte Voraussetzung. Durch die Darstellung der Meßwerte in Ziffernform läßt sich eine Ablesegenauigkeit von 10^{-3} erreichen, wodurch eine Meßbereichsumschaltung am Trägerfrequenz-Meßverstärker unnötig wird. Unter 2.43 wurde bereits geschildert, daß dies zu einer Vereinfachung der Meßanlage geführt hat.

Um die analoge Ausgangsspannung der Trägerfrequenz-Meßbrücke in digitale Form umzusetzen, wird als Analog-Digitalwandler ein Digitalvoltmeter benutzt. Es ist das genaueste Glied der Meßkette. Seine Anzeige kann jederzeit mit Hilfe eines eingebauten Quecksilber-Normalelementes geeicht werden, so daß in allen Meßbereichen eine Genauigkeit von 0,1 % erzielt wird. Das Gerät ist für zwei Betriebsarten eingerichtet. Bei automatischem Betrieb erfolgt immer dann eine Messung, wenn sich die angelegte Spannung um einen Wert ändert, der dem 0,8fachen einer Einheit der letzten angezeigten Stelle entspricht. Einzelmessungen werden nur dann vorgenommen, wenn ein hierfür vorgesehener Druckknopf betätigt wird. Über einen Steckeranschluß kann die Meßauslösung auch ferngesteuert werden, indem ein einpoliger Umschalter angeschlossen wird.

Das Meßergebnis wird von dem Digitalvoltmeter nicht nur in Ziffernform angezeigt, sondern es steht auch in elektrisch codierter Form an einer 25poligen Steckdose zum Anschluß von Druckern oder Stanzgeräten zur Verfügung. Für den hier verwendeten Drucker ist eine Umcodierung notwendig, die in einem kleinen Zusatzgerät vorgenommen wird, das mit dem Digitalvoltmeter geliefert wurde.

Einzelheiten der digitalen Spannungsmessung wurden im einschlägigen Schrifttum [9] bereits mehrfach beschrieben und sollen hier nicht wiederholt werden.

2.46 Drucker und Lochstreifenstanzer

Zur Registrierung der digitalen Meßwerte dient ein Streifendrukker. Er kann drei Meßwerte in der Sekunde ausdrucken, wobei jeweils außer den vier Stellen des Meßwertes das Komma, das Vorzeichen und noch die im Relaispeicher gespeicherte Meßstellennummer gedruckt werden. Die Funktion des Gerätes ist im einzelnen für das Zusammenwirken aller Teile der Meßanlage nicht wichtig. Hier interessiert nur, daß der Drucker die Beendigung des Druckvorganges meldet, indem kurzzeitig ein Kontakt geschlossen wird, der einen elektrischen Impuls erzeugt.

Im Meßprogramm I sollten ursprünglich alle 50 Meßstellen hintereinander so schnell wie möglich abgetastet werden. Deshalb wurde das Weiterschalten der Meßstellen zuerst durch den erwähnten Freigabekontakt des Druckers gesteuert. Es zeigte sich jedoch, daß bei einer Umschaltfrequenz von drei Meßstellen pro Sekunde keine einwandfreien Messungen möglich sind. Durch Kontaktprelungen in den Schaltrelais der Abglicheinheiten entstehen im Trägerfrequenz-Meßverstärker Einschwingvorgänge, die erst nach einer längeren Zeit abgeklungen sind. Zur Unterdrückung dieser Schwingungen müßte das Filter im Digitalvoltmeter auf "long" geschaltet werden, wodurch sich die Meßzeit auf das 3- bis 4fache erhöht. Deshalb wird das Weiterschalten der Meßstellen von dem zentralen Steuergerät durch den Meßimpuls ausgelöst, der über einen Verzögerer 0,3 Sekunden nach dem Messen die Meßstelle umschaltet. Innerhalb dieser Zeit sind sowohl der Druck- als auch der Stanzvorgang beendet.

Wenn Dehnungsmessungen an Kunstharzmodellen in der unter 1.3 beschriebenen Weise ausgeführt werden, so fällt eine große Zahl einzelner Meßwerte an, deren Auswertung nur mit erträglichem Aufwand möglich ist, wenn hierzu eine elektronische Datenverarbeitungsanlage benutzt werden kann. Nur dann kommen die mit einer automatischen Meßanlage zu erzielenden Vorteile voll zur Geltung. Und zwar müssen die Meßwerte ohne Zwischenschalten menschlicher Arbeitsgänge gleich bei der Messung in Datenstreifen gestanzt werden, die bei der elektronischen Auswertung zur Eingabe der

Werte in den Elektronenrechner dienen.

Aus diesem Grunde ist parallel zum Drucker ein Lochstreifen-Steuergerät geschaltet. Es steuert einen Streifenlocher, der bei jeder Messung die Meßstellennummer, das Vorzeichen und den Meßwert mit Kommastelle zusammen mit den zur elektronischen Datenverarbeitung notwendigen Festsymbolen stanzt. Jeder Meßwert besteht so aus insgesamt 14 Zeichen im internationalen Fernschreibcode.

2.47 Relaispeicher

Der Relaispeicher wurde zusammen mit dem Drucker nach Angaben des Instituts geliefert. Er ist im eigentlichen Sinne kein Speicher, sondern ein Umsetzer. Er "speichert" die an ihn gegebenen Signale zur Kennzeichnung der Meßstellen nämlich nur so lange, wie sie auch an ihrem Ursprungsort vorhanden sind. Seine Hauptaufgabe ist es, die an 15 Kontakten in Form einer 12 V Spannung auftretenden elektrischen Signale zur Kennzeichnung der 50 Meßstellen des automatischen Meßstellenumschalters in potentialfreie Schalterstellungen umzuwandeln, damit diese während des Druckvorganges vom Drucker abgefragt werden können.

Gleichzeitig liefern zusätzliche Kontakte seiner Relais die Meßstellennummer in einer für die Weiterverarbeitung im Lochstreifen-Steuergerät geeigneten Codierung. Daneben dient der Relaispeicher zum Umwandeln der weniger gebräuchlichen Numerierung der 50 Meßstellen im Meßstellenumschalter von 1.1 bis 5.10 in die übliche Numerierung von 1 bis 50. Dies geschieht durch entsprechende Schaltung der insgesamt 15 Relais.

2.48 Zentrales Steuergerät

Das zentrale Steuergerät koordiniert die Funktion aller Geräte. Sein Kernstück ist ein elektronischer Taktgeber, der zusammen mit einer Relaischaltung den automatischen Ablauf der beiden unter 2.3 beschriebenen Meßprogramme bewirkt. Dazu werden 16 Kammrelais benutzt, die je nach ihrer Aufgabe mit verschiedenen

Kontaktfedersätzen ausgestattet sind. Ein Zählmagnet dient zum Zählen und Anzeigen der ausgeführten Be- und Entlastungen, damit nach der vorgewählten Anzahl von Belastungszyklen entweder im Programm I die Anlage selbsttätig abschaltet oder im Programm II das Weiterschalten zur nächsten Meßstelle veranlaßt wird. In beiden Meßprogrammen wird die Be- und Entlastungszeit durch die eine der beiden am Taktgeber einstellbaren Taktfrequenzen vorgegeben. Im Programm I schaltet er sich jeweils nach Ablauf der Be- und Entlastungszeit automatisch auf die zweite Taktfrequenz um, die dann Impulse zum Weiterschalten von Meßstelle zu Meßstelle an den Meßstellenumschalter gibt. Eine ausführliche Beschreibung des Funktionsablaufs der einzelnen Teile des zentralen Steuergerätes und seines Zusammenwirkens mit den anderen Geräten geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus. Sie ist jedoch mit allen erforderlichen Schaltplänen in einem internen Bericht des Instituts für Spannungsoptik und Modellmessungen enthalten.

An das zentrale Steuergerät können zum Be- und Entlasten des Modells insgesamt vier durch Magnetventile gesteuerte Preßluftzylinder angeschlossen werden, wie sie auf Abb. 1 der Anlage 5 zu sehen sind. Jeweils zwei Zylinder sind zu einer Gruppe zusammengefaßt, die durch Schalter von Hand getrennt ab- oder umgeschaltet werden können, so daß wahlweise die Zylinder im Gleich- oder Gegentakt arbeiten, was z.B. bei Torsionsuntersuchungen notwendig ist. Dies erlaubt auch, zwei kleinere Modelle mit nur wenigen Meßstellen gleichzeitig an die Anlage anzuschließen, so daß man lediglich durch Umschalten der DMS-Gruppen und der Preßluftzylinder einmal das eine und dann das andere Modell messen kann. Hierdurch lassen sich die beim Umbau der Belastungsvorrichtung entstehenden Pausen ausnützen, falls mehrere Lastfälle zu untersuchen sind.

2.49 Vorheizung

Die im automatischen Meßstellenumschalter eingebaute Meßstellenvorheizung konnte aus zwei Gründen nicht benutzt werden: Einmal arbeitet sie mit Wechselstrom, was, wie unter 2.421 erwähnt, zu

Störungen durch Einstreuungen führte. Zum andern ist die Speisespannung nur stufenweise einstellbar, und der Vorheizstrom kann deswegen nicht so einreguliert werden, daß die Meßstellen beim Umschalten nicht mehr weglaufen (s. Abschnitt 2.54).

Der Vorheizstrom wird einer ortsfesten Akkumulatorenbatterie entnommen. Ihre Spannung kann mit einem vorgeschalteten Spannungsteiler von 0 bis 6 V kontinuierlich geregelt werden. Zur Feineinstellung des Stromes ist außerdem ein regelbarer Vorwiderstand vorhanden. Da die empfindlichen DMS bei Überlastung leicht durchbrennen, sind zur Kontrolle ein Strom- und Spannungsmesser eingebaut. Bei ca. 20 mA Vorheizstrom für einen einzelnen DMS schwankt der erforderliche Strom je nach Anzahl der angeschlossenen Meßstellen zwischen 20 mA und 1 A. Das eingebaute Amperemeter hat einen Meßbereich bis 3 A, deshalb kann zur Messung kleinerer Ströme an seiner Stelle über Schaltbuchsen ein Milliamperemeter angeschlossen werden.

2.5 Erprobung der Meßanlage

Um die Eigenschaften der automatischen Meßanlage kennenzulernen, wurden einige prinzipielle Untersuchungen durchgeführt, von denen die wesentlichen hier kurz angeführt werden.

2.51 Linearität und Einfluß des Meßbereichs

Unter 2.43 wurde bereits über die ausgezeichnete Linearität der verwendeten Meßbrücke berichtet, die es zusammen mit dem Digitalvoltmeter ermöglicht, auf eine Meßbereichumschaltung während der automatischen Messungen zu verzichten.

Durch die hohe Empfindlichkeit und Genauigkeit des Digitalvoltmeters können bei entsprechender Einstellung des Abschwächers im 1000- μ D-Bereich der Meßbrücke noch sehr kleine Dehnungen gemessen werden. Die sehr viel schlechtere Ablesegenauigkeit des Drehspulgalvanometers gestattet dies bei der sonst üblichen Verwendung der Meßbrücke nicht. Um zu überprüfen, welchen Einfluß die Größe

des an der Meßbrücke eingestellten Meßbereiches hat, wurde ein Dehnnormal angeschlossen. Sein Belastungsgewicht erzeugte eine Dehnung von ca. 88 μD , die mit Hilfe des Meßprogramms II in verschiedenen Meßbereichen mehrmals ermittelt wurde.

Im Bereich 100 μD war der Abschwächer so eingestellt, daß eine Einheit der letzten Stelle des Digitalvoltmeters einer Dehnung von 0,1 μD entsprach. Der mittlere Wert aus fünf Messungen war hier $\epsilon_m = 88,1 \pm 0,7 \mu\text{D}$. Im Bereich 300 μD wurden wegen der ausgezeichneten Konstanz der Werte der Einzelmessungen nur zwei Meßreihen mit je vier Belastungszyklen ausgeführt. Hier entsprach eine Einheit am Digitalvoltmeter einer Dehnung von 0,3 μD . Es ergab sich $\epsilon_m = 88,3 \pm 0,1 \mu\text{D}$. Auf ähnliche Weise wurde im Bereich 1000 μD ein $\epsilon_m = 88,0 \pm 0,1 \mu\text{D}$ ermittelt, woraus zu ersehen ist, daß es keine Einbuße an Genauigkeit bedeutet, wenn man diese Messung statt im Bereich 100 μD im Bereich 1000 μD vornimmt.

2.52 Einfluß der Relaiskontakte

Im Meßprogramm I werden zwischen den an einer Meßstelle bei Ober- und Unterlast durchgeführten Messungen die Meßstellen umgeschaltet. Sind an die Abgleicheinheiten DMS in 1/4 oder 1/2-Brückenschaltung angeschlossen, so werden die Meßwerte verfälscht, wenn sich beim Umschalten die Übergangswiderstände zwischen den Relaiskontakten ändern, da sie im gleichen Brückenweig in Serie mit den DMS liegen. Ist an eine Abgleicheinheit dagegen eine Vollbrücke angeschaltet, so ist der Übergangswiderstand der Relaiskontakte praktisch ohne Bedeutung.

Bei der geplanten Verwendung der Meßanlage für modellstatische Untersuchungen sollen jedoch vorwiegend DMS in 1/4-Brückenschaltung angeschlossen werden. Man mußte deshalb überprüfen, welchen Einfluß das Umschalten der Relaiskontakte auf das Meßergebnis hat. Es wurde ähnlich wie später bei einer Modellmessung ein auf Kunstharz geklebter DMS mit einer Abgleicheinheit verbunden und die Anlage so eingestellt, daß im Abstand von 4 Sekunden immer wieder

dieselbe Meßstelle gemessen, aber zwischen jeder Messung das Relais der verwendeten Abgleicheinheit kurze Zeit geöffnet wurde. Das Ergebnis der Messungen ist auf Anlage 19 graphisch dargestellt. Auf der Abszisse ist der Zeitpunkt der Messungen eingetragen und darüber auf der Ordinate die jeweils erhaltenen Meßwerte. Ihre gleichmäßige Änderung im Großen ist auf eine Dehnung infolge einer Temperaturänderung zurückzuführen, während das Streuen der Einzelmessungen im wesentlichen durch die Relaiskontakte verursacht wird. Aus allen auf diese Weise durchgeführten Untersuchungen kann man schließen, daß die Meßwerte durch den Einfluß der Umschaltkontakte weniger als $\pm 1 \mu D$ streuen. Da im Programm II zwischen den Messungen an einer Meßstelle nicht umgeschaltet wird, entfällt hier dieser Einfluß, so daß man für sehr kleine Dehnungen das Meßprogramm II verwenden sollte, wenn größtmögliche Genauigkeit angestrebt wird.

Das Schutzrelais, das im Steuergerät in den Umschaltpausen den Eingang des Meßverstärkers kurzschließt, hat keinen Einfluß auf die Messungen, da durch dieses Relais die Meßleitungen nicht getrennt, sondern nur kurzgeschlossen werden. Nach dem Öffnen der Relaiskontakte ist der ursprüngliche Zustand unverändert wieder hergestellt.

2.53 Einfluß einer Abtastperiode $t_1 < 1$ Sekunde

Es sollte untersucht werden, ob bei Verwendung des Meßprogramms I die Meßstellen mit einem Zeitabstand kleiner als 1 Sekunde abgetastet werden können. Zu diesem Zweck wurden 4 DMS angeschlossen, die auf einen Kunstharzbalken längs und quer geklebt waren. Der Balken wurde in einer Eichvorrichtung mit einem konstanten Biegemoment belastet. Die Meßergebnisse zeigten, daß man bei einer Abtastperiode $t_1 < 0,8''$ keine zuverlässigen Meßwerte mehr erhält.

2.54 Einfluß von Vorheizung und Meßprogramm

Mißt man in periodischen Zeitabständen bei Ober- und Unterlast, dann läßt sich nicht nur das Kriechen der Kunstharze eliminieren,

sondern auch langsam und stetig verlaufende Temperaturänderungen bleiben ohne Einfluß auf die Dehnungsmessungen (s. Abschnitt 1.3). Hierfür wurde eigens das Meßprogramm II geschaffen. Aber auch im Programm I erfolgen die Messungen für jede Meßstelle immer wieder zu derselben Zeit nach dem Belasten und dem Einschalten des Meßstromes. Diese beiden Zeiten sind zwar untereinander und auch von Meßstelle zu Meßstelle verschieden, aber für die einzelne Meßstelle konstant. So werden auch hier Kriech- und Temperatureinflüsse weitgehend eliminiert. Dies zeigte sich sehr deutlich bei der Erprobung der Meßanlage, wozu wieder der bereits unter 2.53 erwähnte Biegebalken mit 4 DMS-Meßstellen benutzt wurde. In Tabelle 3, Anlage 20, sind die Meßergebnisse eingetragen, die in zwei Meßbereichen mit und ohne Vorheizung der Meßstellen im I. und II. Programm erhalten wurden. Sowohl der Meßbereich wie auch die Vorheizung haben keinen Einfluß auf die Messungen. Die Streuung der Meßwerte von ca. $\pm 0,43 \%$ liegt in einem durchaus zulässigen Bereich.

Zur Erläuterung des oben über die Elimination des Einflusses der Wärmedehnungen im Programm II Gesagten sind in Tabelle 4, Anlage 21, die Einzelwerte der Messungen bei Unter- und Oberlast und ihre Auswertung eingetragen. Man sieht z.B., daß bei Meßstelle 4 ohne Vorheizung der Nullpunkt von 310 bis auf 447 μD , also um ca. 44 % infolge der Erwärmung der Meßstellen nach dem Umschalten weggelaufen ist. Trotzdem liegen die $\Delta \epsilon$ in einem Bereich von $\pm 0,5 \%$ um ihren Mittelwert. Bei eingeschalteter Vorheizung ist die Nullpunktsdrift nur noch 7 % vom Meßwert und die Streuung der $\Delta \epsilon$ kaum nennenswert. Vorheizung ist also dann notwendig, wenn man nicht periodisch mißt und nach dem Umschalten der Meßstellen nicht warten will, bis an der Meßstelle ein stationärer Temperaturzustand eingetreten ist.

Über den Einfluß, den die Erwärmung der DMS-Meßstellen durch Meßstrom und Vorheizung auf den Elastizitätsmodul von Kunstharzen ausübt, wird in Kapitel 3 berichtet. Entsprechend den dort geschilderten Erfahrungen wurde bei der automatischen Meßanlage die Möglichkeit vorgesehen, durch Einschalten von Vorwiderständen den Meßstrom auf ein Drittel herabzusetzen. Damit ist auch

die Empfindlichkeit nur noch ein Drittel, was aber wegen der Genauigkeit der Anlage meist in Kauf genommen werden kann.

2.6 Elektronische Auswertung der Meßwerte

Dehnungsmessungen, die mit der geschilderten Anlage an baustatischen Modellen aus Kunstharz durchgeführt wurden, lassen sich mit einem speziell hierfür aufgestellten Rechenprogramm^{x)} in einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage folgendermaßen auswerten:

Zunächst werden die Dehnungen aus den Messungen bei Ober- und Unterlast berechnet und die Mittelwerte aus zusammengehörigen Messungen gebildet. Ist die Abweichung eines Einzelwertes vom Mittelwert größer als eine vorgegebene Fehlerschranke, dann druckt die Maschine dies aus, so daß hierdurch eine gewisse Kontrolle über die Zuverlässigkeit der Meßwerte gegeben ist.

Die Datenverarbeitungsanlage kann in beliebiger Reihenfolge Einzelstreifen, 90°-Rosetten oder Dreier-Rosetten (45°) bearbeiten. Dabei werden Punkt für Punkt aus den Mittelwerten der an einem Meßpunkt bestimmten Dehnungen, die Koordinatenspannungen und bei den 45°-Rosetten auch die Hauptspannungen und ihre Richtungen berechnet. Zur Koordinierung der zu den einzelnen Meßpunkten gehörenden Anschlüsse dient ein Steuerstreifen, der ein Verzeichnis der Punktnummern und zugehörigen Meßstellennummern enthält. Die Reihenfolge der Meßstellen ist dabei beliebig, da die Maschine aus den abgespeicherten Mittelwerten jeweils die zu einem Meßpunkt gehörigen herausucht.

Aus Messungen, die mit DMS-Rosetten an gegenüberliegenden Punkten von Platten und Schalen ausgeführt werden, können Biege- und Normalspannungen ermittelt und in Biegemomente und Normalkräfte umgerechnet werden. Auch die Hauptmomente, Hauptkräfte und ihre

x) Das Programm wurde von D. Feder, M.S., aufgestellt, der Wiss. Assistent am Institut für Spannungsoptik und Modellmessungen ist.

Richtungen können bestimmt werden. Die Momente und Kräfte werden in der Regel auf die Hauptausführung und auf vorgegebene Einheitslasten bezogen. Die Eingabe der notwendigen festen Rechenwerte, wie Elastizitätsmodul, Querdehnzahl, Einheitslasten, Eichkonstanten usw., wird durch einen zusätzlichen Datenstreifen vorgenommen. Das Ausdrucken der fertig ausgewerteten Meßergebnisse geschieht in Tabellen im Format DIN A 4 auf Transparentpapierrollen in pausfähiger Form. Sie können direkt in den Versuchsbericht übernommen werden, so daß auch hier keine Abschreibefehler entstehen.

2.7 Zusammenfassung

Im Vorstehenden wurde eine automatische Meßanlage geschildert, die speziell für modellstatische Untersuchungen mit DMS an Kunstharzmodellen entwickelt wurde. Das Zusammenwirken der verwendeten Geräte und ihre für den beabsichtigten Zweck wichtigen Eigenschaften wurden kurz erläutert. Die inzwischen im praktischen Betrieb mit der Meßanlage gesammelten Erfahrungen übertrafen die gestellten Erwartungen. Die zu erzielenden Vorteile kommen jedoch nur dann voll zur Geltung, wenn die Auswertung der Meßwerte mit einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage vorgenommen wird.

Der für eine solche Anlage erforderliche Aufwand ist naturgemäß hoch, jedoch macht er sich durch Zeit- und Personalersparnis bezahlt, ganz abgesehen vom Gewinn an Genauigkeit und Zuverlässigkeit der ausgewerteten Meßergebnisse.

3 Einfluß von Meßstrom und Vorheizung auf Messungen mit DMS an Kunstharzen

3.1 Allgemeines

Benutzt man zur Dehnungsmessung mit elektrischen Widerstands-DMS die Wheatstonesche Brückenschaltung, dann ist bekanntlich das der Dehnung proportionale elektrische Signal (die Spannung in der Meßdiagonale) um so größer, je höher die an die Brückenschaltung angelegte Speisespannung ist. Man wählt diese deshalb einerseits möglichst hoch, um den Aufwand bei der Verstärkung des Meßsignals gering zu halten, ist aber andererseits in der Höhe der Speisespannung durch die Strombelastbarkeit der DMS begrenzt. Im allgemeinen soll der Strom, der durch einen DMS fließt, nicht mehr als 20 mA betragen; deswegen darf bei einer Brückenschaltung aus vier Widerständen von 120 Ω die Speisespannung nicht höher sein als 5 V. Die meisten der industriell hergestellten Dehnmeßbrücken sind daher für diese Speisespannung eingerichtet.

Fließt durch einen DMS von 120 Ω Widerstand ein Strom von 20 mA, dann entsteht in ihm nach dem Jouleschen Gesetz in der Sekunde die Wärmemenge

$$Q/\text{sec} = 0,239 \cdot i^2 \cdot R = 1,245 \cdot 10^{-2} \text{ cal.}$$

Ist der DMS auf eine größere Metallfläche geklebt, so wird diese Wärme schnell abgeleitet, und die Meßstelle erwärmt sich nur wenig, denn Metalle haben eine gute Wärmeleitfähigkeit. An einem auf Aluminium geklebten DMS wurde bei einem Meßstrom von 20 mA eine Erwärmung von ca. 0,8 $^{\circ}\text{C}$ gemessen (s. 3.332.3). Durch diese Erwärmung dehnt sich der DMS und seine Umgebung nach Einschalten des Meßstromes so lange, bis ein stationärer Temperaturzustand erreicht ist. Dieses sogenannte "Weglaufen des Nullpunktes" infolge der Eigenerwärmung des DMS wird dann nicht bemerkt, wenn der Temperatur-Kompensationsstreifen auf das gleiche Material wie das Meßobjekt geklebt wird und man ihn gleichzeitig mit dem aktiven DMS einschaltet. Die jetzt in beiden DMS gleich verlaufende Wärmedehnung wird in der Wheatstoneschen Brückenschaltung elektrisch kompensiert und nicht angezeigt. Dies ist bekanntlich

einer der Hauptgründe, weshalb die Brückenschaltung in der DMS-Meßtechnik bevorzugt angewendet wird.

Bei Vielstellen-Meßanlagen werden jedoch häufig nur die aktiven DMS umgeschaltet und für alle ein gemeinsamer dauernd angeschlossener Kompensations-DMS verwendet (s. Anlage 16). Hier wird nach jedem Umschalten das Weglaufen infolge Eigenerwärmung des DMS deutlich sichtbar und ist meist sehr störend. Diese in der DMS-Meßtechnik schon lange bekannte Tatsache führte bei der Entwicklung von Vielstellen-Meßanlagen [10] zur sogenannten Vorheizung aller nicht gerade an die Dehnmeßbrücke angeschlossener DMS. Aus einer vom Meßgerät unabhängigen Stromquelle läßt man durch diese DMS einen Strom fließen, der gleich dem Meßstrom ist, so daß alle DMS gleichmäßig erwärmt werden. Dies verhindert beim Umschalten der DMS eine Änderung ihres Temperaturzustandes.

Will man die Dehnung von Kunstharzen mit Hilfe von DMS ermitteln, wie dies in der Modellstatik heute vielfach üblich ist, dann treten diese durch die Wärmewirkung des Meßstromes entstehenden störenden Nebenerscheinungen in verstärktem Maße auf. Denn die entsprechenden Eigenschaften der Kunstharze unterscheiden sich von denen der Metalle, wie die Tabelle auf Anlage 22 zeigt, in der Weise, daß die unerwünschte Erwärmung der Meßstelle und die Wärmedehnung um ein Vielfaches größer sind als bei Metallen. Nach dem Einschalten des Meßstromes heizt sich die Meßstelle sehr stark auf, und das Weglaufen des Nullpunktes geht wegen der großen Wärmedehnzahl der Kunstharze anfangs sehr schnell vor sich. Ein stationärer Temperaturzustand tritt erst nach ca. 12 bis 15 Minuten ein. Während dieser Zeit entsteht eine Wärmedehnung von ca. 200 bis 300 μD . Bei kleinen Dehnungswerten ist deshalb in den ersten Minuten nach dem Einschalten der Meßstelle eine einwandfreie Messung fast unmöglich. Sind Messungen an vielen Meßstellen hintereinander durchzuführen, so muß man, um den Zeitaufwand in Grenzen zu halten, entweder durch Vorheizen der Meßstellen das Weglaufen des Nullpunktes verhindern oder durch mehrfaches periodisches Messen und anschließende Mittelbildung, wie unter 1.3 beschrieben, den linearen Anteil der Nullpunktwanderung eliminieren. Eine andere Möglichkeit wäre, jeder Meßstelle einen

eigenen Kompensationsstreifen zuzuordnen, der zusammen mit dem aktiven DMS eingeschaltet wird. Diese Möglichkeit scheitert jedoch bei vielen Meßstellen an dem erforderlichen Aufwand an DMS, da auch die Kompensations-DMS bei jedem neuen Modellversuch neu geklebt werden müssen; denn eine einwandfreie Temperaturkompensation setzt voraus, daß aktiver und passiver DMS die gleichen Wärmedehnzahlen und Widerstandswerte haben und auf den gleichen Werkstoff geklebt werden.

Neben der Nullpunktwanderung beim Einschalten eines DMS entsteht bei Messungen an Kunstharzen ein weiterer Effekt, der durch die starke Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls von Kunststoffen bedingt ist. Infolge der Erwärmung durch den Meßstrom oder die Vorheizung nimmt in der Umgebung eines DMS der Elastizitätsmodul ab, und es wird im allgemeinen eine zu große Dehnung gemessen. Um über die Größe dieses Einflusses, der seither bei Messungen an Kunstharzmodellen vernachlässigt wurde, Anhaltspunkte zu gewinnen, wurden einige Untersuchungen durchgeführt, über die im folgenden berichtet wird.

3.2 Umfang der Untersuchungen

3.2.1 Hauptmessungen

In der Modellstatik werden vorwiegend DMS-Rosetten verwendet. Die Untersuchungen wurden deshalb in der Hauptsache an vier Rosettenarten ausgeführt, die auf Plexiglas, Araldit E und Araldit B geklebt waren. Bei ihnen liegen drei DMS in verschiedenen Richtungen entweder über- oder dicht nebeneinander. Werden diese drei DMS gleichzeitig vorgeheizt, so ist die Erwärmung der Meßstelle besonders groß und ebenso die hierdurch entstehende Änderung der Dehnung. Um beurteilen zu können, ob sich Einzel-DMS anders verhalten, wurden auch zwei Arten von Einzel-DMS untersucht, die in ihrem Aufbau den Rosettenarten 1 und 2 entsprechen. In der Tabelle auf Anlage 23 sind alle verwendeten DMS und die zum Befestigen auf den verschiedenen Kunstharzen benutzten Kleber mit genauer Typenbezeichnung aufgeführt. Die unterschiedliche Größe und Bauart der DMS sind aus Anlage 24 zu ersehen.

Es sollte festgestellt werden, wie die Erwärmung ΔT einer Rosette und die relative Änderung $\Delta \epsilon$ der angezeigten Dehnung von folgenden Punkten abhängt:

1. Bauart und Größe der Rosetten,
2. Art des verwendeten Kunstharzes,
3. Größe des Meßstromes und der Vorheizung,
4. Dicke des Probekörpers.

Hottinger-Impa-Rosetten und Hottinger-Folien-Rosetten finden im allgemeinen wegen ihrer Größe bei Modellmessungen keine Verwendung. Sie wurden jedoch wegen ihres grundsätzlich anderen Aufbaus zur Untersuchung herangezogen, aber nur auf Plexiglas geklebt, um den Aufwand an Messungen zu verringern. Es war zu erwarten, daß die zu ermittelnde Dehnungsänderung bei Plexiglas groß ist und sich deshalb der andersartige Aufbau dieser DMS hier besonders deutlich bemerkbar machen würde. Vorversuche ließen vermuten, daß bei dünnen Kunstharzteilen die Dehnungsänderung am größten ist. Deshalb wurde die Mehrzahl der Messungen an Probekörpern von ca. 3 mm Dicke vorgenommen. Der Einfluß der Dicke sollte an einem 9,5 mm dicken Probekörper aus Plexiglas gezeigt werden. Da zufälligerweise während der Versuchsdurchführung der Elastizitätsmodul eines Probekörpers aus Araldit B von 19,8 mm Dicke ermittelt werden mußte, wurde auch er für die hier beabsichtigten Messungen mit herangezogen.

3.22 Ergänzungsmessungen

3.221 σ - ϵ -Linien bei Erwärmung der Meßstellen

Um zu prüfen, ob auch bei starker Erwärmung der Meßstelle die Dehnungen noch proportional zur Beanspruchung sind, wurden für einige Fälle die σ - ϵ -Linien ermittelt. Bei gleichen Bedingungen im Zug- und Druckbereich der Probekörper gemessene σ - ϵ -Linien sollten erkennen lassen, ob die Änderung des Elastizitätsmoduls infolge Erwärmung für Zug- und Druckbeanspruchung die gleiche ist.

3.222 Erwärmung einer auf Metall geklebten DMS-Rosette

An einer auf einem 4 mm dicken Aluminiumstreifen aufgeklebten Rosette wurde durch Vorheizen der beiden nicht benutzten DMS eine ähnliche Temperaturänderung erzeugt wie bei auf Kunstharz geklebten DMS. Es sollte festgestellt werden, ob durch Erweichen der Klebstoffschicht aus Acrylharz oder des Trägerwerkstoffes bei Erwärmung bereits eine Dehnungsänderung eintritt.

3.3 Ausführung der Messungen und ihre Auswertung

3.31 Temperaturmessungen

Um die Erwärmung des Meßobjektes möglichst wenig zu beeinflussen, mußte zur Temperaturmessung ein Wärmefühler benutzt werden, der nur eine kleine Wärmekapazität besitzt und außerdem kleinen Temperaturänderungen mit hoher Genauigkeit unmittelbar folgen kann. Diese Bedingungen erfüllte weitgehend eine in Glas eingeschmolzene Heißleiterperle. Sie ist ein Halbleiterelement, dessen Widerstand sehr stark von der Temperatur abhängig ist. Sie wird ähnlich wie ein DMS in einer Wheatstoneschen Brückenschaltung verwendet, die mit Gleichstrom gespeist wird. Ihre Diagonalspannung ist proportional der Temperatur des Heißleiters, wenn alle anderen Parameter der Brückenschaltung konstant gehalten werden. Zur Anzeige der Diagonalspannung diente ein Kompensograph mit zwei Meßbereichen von ± 10 mV und ± 50 mV. Mit Hilfe eines amtlich geeichten Normalthermometers wurde die selbstgebaute Temperaturmeßanlage zusammen mit dem Anzeige- und Registriergerät direkt in $^{\circ}\text{C}$ kalibriert. Sie gestattete das Ablesen von $\frac{1}{10}^{\circ}\text{C}$ und das Registrieren des zeitlichen Temperaturverlaufs auf einem 25 cm breiten Papierstreifen (s. Bild 1, Anlage 25). Durch Aufzeichnen der Aufheiz- oder Abkühlkurven konnte so einwandfrei festgestellt werden, ob an der Meßstelle ein konstanter Temperaturzustand erreicht war und ob sich dieser während der anschließenden Dehnungsmessungen verändert hatte.

Da die Temperaturmessungen an der Oberfläche der DMS von einem einwandfreien und immer gleichbleibenden Anliegen des Meßfüh-

lers am Meßobjekt abhängen, wurde durch frei pendelndes Aufsetzen des Fühlers an der Meßstelle dafür Sorge getragen, daß auch bei der Durchbiegung der Probek balken infolge der Belastung der Temperaturfühler an derselben Stelle mit demselben Anpreßdruck aufsaß (s. Bild 2, Anlage 25).

3.32 Dehnungsmessungen

Die zu untersuchenden DMS waren alle auf 25 mm breite Probek balken geklebt worden, die in der auf Anlage 26 dargestellten Weise belastet werden konnten, so daß der mittlere Teil mit den DMS durch ein konstantes Moment beansprucht wurde (s. Bild 2, Anlage 25). Die DMS waren über ein Vorschaltgerät direkt mit der Dehnmeßbrücke der automatischen Meßanlage verbunden, ohne den automatischen Umschalter zu benutzen. Letzteres war eine Sicherheitsmaßnahme, um Störeinflüsse auf das Meßsignal möglichst gering zu halten. Bei den beabsichtigten Messungen kam es nämlich darauf an, Änderungen der Dehnung des Probek balkens von 1 bis 2 % feststellen zu können.

Das Vorschaltgerät gestattete, in die beiden Speiseleitungen je einen Widerstand von 120 Ω in Form eines aufgeklebten aber unbelasteten DMS einzuschalten. Hierdurch konnte der Meßstrom wahlweise von 20 mA auf 10 mA herabgesetzt werden. In dem Vorschaltgerät war auch der für alle Messungen benutzte Kompensations-DMS vorhanden. Um möglichst gleichbleibende Bedingungen zu schaffen, war er nicht auf Kunstharz, sondern auf Aluminium geklebt.

Die Dehnungen der Probek balken wurden bei Unter- und Oberlast mit der automatischen Meßanlage im Programm II (s. Abschnitt 2.32) ermittelt und mit dem Drucker digital registriert. Die Be- und Entlastungszeit betrug immer 15 Sekunden. Es wurden jeweils 4 Belastungszyklen durchlaufen, d.h. 5 Messungen bei Unter- und 4 Messungen bei Oberlast. Die Differenz- und Mittelbildung geschah in Tabellen, in die alle Meßwerte aus den Datenstreifen des Druckers übertragen wurden. Sie gelten als Original-Meßprotokolle; die Datenstreifen wurden nicht aufgehoben.

Die Anlage war so eingestellt, daß dem Vollausschlag der Meßbrücke bei 1000 μ D Dehnung eine Anzeige des Digitalvoltmeters von ungefähr 0,1000 V entsprach. An der Dehnmeßbrücke kann ein Eichwert von 1000 μ D elektrisch vorgegeben werden. Dieser Wert wurde vor und nach jeder Messung mehrmals ausgedruckt und bei der tabellarischen Auswertung berücksichtigt, so daß alle Messungen auf den Eichwert der Meßbrücke bezogen sind. Hierbei wurde auch der Meßwert auf den vom Hersteller angegebenen K-Faktor des DMS umgerechnet, so daß die bei derselben Belastung am selben Probekörper mit verschiedenen DMS ermittelten Dehnungswerte unmittelbar verglichen werden können.

Die Rosetten waren so geklebt worden, daß einer der beiden rechtwinklig zueinander angeordneten Streifen in Längsrichtung (x-Richtung) des Balkens verlief. Nur mit diesem DMS wurde die Dehnung gemessen; die beiden anderen (y- und 45°-Richtung) wurden zur Vorheizung der Meßstellen verwendet. Auf der Rückseite des Probekörpers war eine zweite Rosette (oder ein Einzel-DMS) angeordnet, um auch den Einfluß messen zu können, den das Vorheizen dieser Rosette auf die Messungen an der Oberseite ausübt. Die Dehnungen und Temperaturen wurden nach Erreichen des stationären Temperaturzustandes in folgenden Fällen gemessen:

Bezeichnung	Meßstrom mA	Vorheizung mA				
		Vorderseite Richtung		Rückseite Richtung		
		y	45°	x	y	45°
mit Meßstrom + R_V	10					
mit Meßstrom	20					
mit Meßstrom + V_H	20	20				
mit Meßstrom + $2 \times V_H$	20	20	20			
mit Meßstrom + $5 \times V_H$	20	20	20	20	20	20

Bei jeweils zwei Laststufen wurden Dehnungen ermittelt, die etwa 280 und 560 μ D entsprachen. Die Proportionalität zwischen Bela-

stung und Dehnung wurde als Kontrolle der Einzelmessungen benutzt. Außerdem wurden fast alle Messungen wiederholt, wobei der Probekörper in der Belastungsvorrichtung umgedreht wurde, so daß der zu messende DMS im Druckbereich lag. Es sollte so untersucht werden, ob der Einfluß der Erwärmung im Zug- und Druckbereich gleich ist. Bei den Messungen im Druckbereich lag der zu messende DMS in der Belastungsvorrichtung unten; die Temperaturmessungen wurden aber auf der jetzt oben liegenden Rückseite des Probekörpers durchgeführt. Zusammen mit den auf der Vorderseite vorgenommenen Messungen, die zwar nicht zur gleichen Zeit, aber unter möglichst gleichen Bedingungen stattfanden, ergibt sich ein Anhaltspunkt über das Temperaturgefälle im Balken.

3.33 Auswertung der Messungen

3.331 Hauptmessungen

Aus den Meßprotokollen wurden die ermittelten Dehnungen und Temperaturen in Tabellen übernommen und die Zunahme von Temperatur und Dehnung als Differenz entsprechender Meßwerte berechnet, woraus sich die Dehnungszunahme pro $^{\circ}\text{C}$ bestimmen ließ. Unter der Annahme einer linearen Änderung der Dehnung mit der Temperatur konnte hiermit die Dehnung ϵ_0 berechnet werden, die sich ergeben würde, wenn sich der Elastizitätsmodul des Balkens nicht durch Erwärmung verändern würde. Jetzt wurde zu der bei verschiedenen Bedingungen gemessenen Erwärmung der Meßstelle $\Delta T_i = T_i - T_0$ die zugehörige Dehnungsänderung $\Delta \epsilon_i = \epsilon_i - \epsilon_0$ bestimmt. Diese wurde auf das jeweilige ϵ_0 bezogen und in Prozenten angegeben.

Die Werte

$\Delta T_1 \epsilon_1$ infolge Meßstrom von 10 mA

$\Delta T_6 \epsilon_6$ infolge Meßstrom von 20 mA

$\Delta T_7 \Delta \epsilon_7$ infolge Meßstrom von 20 mA und
Vorheizung von 2mal 20 mA

$\Delta T_8 \Delta \epsilon_8$ infolge Meßstrom von 20 mA und
Vorheizung von 2mal 20 mA und
3mal 20 mA auf der Rückseite

sind für die Messungen an den Rosetten in Tafel Anlage 27 und für die Einzel-DMS in Tafel Anlage 28 zusammengestellt. Aus den im Zug- und Druckbereich ausgeführten 4 Messungen wurden für die $\Delta \epsilon_i$ die Mittelwerte gebildet. Bei den ΔT_i wurden die Mittelwerte aus den beiden Messungen auf der Vorderseite (Zugbereich) und auf der Rückseite (Druckbereich) des Probebalkens angegeben. Um einen besseren Überblick zu ermöglichen, sind die bei den DMS Rosetten gefundenen Mittelwerte nochmals in Tabelle Anlage 29 zusammengefaßt und in Anlage 30 als Schaubild dargestellt. Hier wurde nur die Erwärmung ΔT der Meßstelle auf der Oberseite des Balkens eingetragen.

3.332 Ergänzungsmessungen

3.332.1 Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Temperatur

Aus Messungen an einem Plexiglasbalken von 3 mm Dicke bei verschiedenen Umgebungstemperaturen T_0 wurde in Tafel Anlage 31 die Änderung von P/ϵ mit der Umgebungstemperatur ermittelt und gleichzeitig auch die Änderung durch Erhöhung des Meßstromes von 10 auf 20 mA. Da der Elastizitätsmodul proportional dem Wert P/ϵ ist, ergibt sich, daß er pro Grad Temperaturzunahme um 0,93 % abnimmt. Eine Erhöhung der Oberflächentemperatur durch den Meßstrom bewirkt eine Vergrößerung der Dehnung um 0,21 % je $^{\circ}\text{C}$. Auf Anlage 32 sind die gleichen Messungen zusammengestellt, die an einem Balken aus Araldit B durchgeführt wurden. Sie ergaben eine Abnahme des Elastizitätsmoduls von 0,22 %/ $^{\circ}\text{C}$ und eine Zunahme der Dehnung um 0,06 %/ $^{\circ}\text{C}$, wenn die Oberfläche erwärmt wird.

3.332.2 Linearität der σ - ϵ -Linie

An den Plexiglasbalken von 3 mm und 9,5 mm Dicke wurden die Dehnungen für 7 Laststufen unter verschiedenen Bedingungen ermittelt, um festzustellen, ob Proportionalität zwischen Belastung und De-

nung besteht. Die Meßergebnisse sind auf den Anlagen 33 bis 37 angegeben und auch graphisch dargestellt. Da es nicht der Zweck dieser Messungen war, den Elastizitätsmodul von Plexiglas zu bestimmen, wurde darauf verzichtet, die Belastung in Spannungen umzurechnen. Die Abweichung von der Linearität ist aus der zeichnerischen Darstellung nicht erkennbar; sie wurde deshalb auf folgende Art berechnet: Mit dem aus allen Laststufen gebildeten Mittelwert (P/ϵ) wurde das zu der jeweiligen Last gehörende ϵ_m berechnet. Die Differenz $\Delta\epsilon$ zum gemessenen Wert der Dehnung wurde in Prozent, bezogen auf den zugehörigen Wert ϵ_m , angegeben. Die festgestellten Abweichungen vom mittleren Wert der Dehnung sind durch die Streuungen der Meßwerte bedingt und nicht systematischer Natur. Der effektive Elastizitätsmodul ist also auch dann, wenn die Meßstelle durch Vorheizen stärker erwärmt ist, im untersuchten Bereich bis ca. 6 ‰ Dehnung konstant.

3.332.3 Erwärmung einer auf Aluminium geklebten DMS-Rosette

Auf einen Streifen aus Al, Cu, Mg von 4 mm x 50 mm Querschnitt wurde eine Huggenberger Rosette mit X 60 aufgeklebt. Bei einem Meßstrom von 20 mA wurde eine Erwärmung von 0,8 °C gemessen.

Die Rosette wurde dann in y- und 45°-Richtung mit ca. 40 mA vorgeheizt, damit an der Meßstelle eine Erwärmung von $\Delta T = 9,6$ °C entstand, die etwa gleich der sonst bei Meßstellen auf Kunstharzen entstehenden Erwärmung bei einem Meßstrom von 20 mA war. Die gemessenen Dehnungen stimmen innerhalb der Meßgenauigkeit mit den Werten überein, die mit der nicht vorgeheizten Rosette ermittelt worden waren.

Dieser Versuch zeigt, daß das ebenfalls aus Kunstharzen bestehende Trägermaterial und die Klebstoffschicht, die durch die Erwärmung auch ihren Elastizitätsmodul verändern, keinen Einfluß auf die zu messende Dehnung ausüben. Die Steifigkeit des DMS wird durch die Erwärmung zwar kleiner, was aber gegenüber der im allgemeinen sehr viel größeren Steifigkeit von Meßobjekten aus Metallen nicht ins Gewicht fällt. Bei auf Kunstharzen geklebten DMS

kommt hinzu, daß die durch Erwärmung hervorgerufene Änderung des Elastizitätsmoduls im DMS und im Meßobjekt etwa gleich ist, so daß das Verhältnis der Steifigkeiten, das allein für die gegenseitige Beeinflussung ausschlaggebend ist, unverändert bleibt.

Außerdem ist auch aus den von Rohrbach [11] aufgestellten ZTK-Diagrammen zu entnehmen, daß bei Temperaturen bis 60 °C und Belastungszeiten von 6 Minuten das Kriechen der DMS kleiner als 0,1 % ist.

3.4 Meßergebnisse

3.41 DMS-Rosetten

3.411 Erwärmung der Meßstelle

Die Erwärmung in einer auf Kunstharz geklebten DMS-Rosette erreicht nach ca. 12 bis 15 Minuten einen stationären Zustand. Erst dann wurden die Erwärmung und die daraus resultierende Dehnungsänderung gemessen. Fließt nur in einem der drei DMS einer Rosette ein Meßstrom, so entsteht eine Erwärmung an der Meßstelle, die bei allen untersuchten Rosetten und allen verwendeten Kunstharzen etwa gleich ist, wie aus dem Schaubild auf Anlage 30 hervorgeht. Sie nimmt ungefähr mit dem Quadrat der Stromstärke zu, weil auch die vom Strom erzeugte Wärmemenge mit dem Quadrat seiner Stärke wächst. In dem Diagramm auf Anlage 38 sind die gemessenen Erwärmungen über der Stromstärke aufgetragen. Die eingezeichnete Ausgleichskurve gehorcht der Gleichung

$$\Delta T = 0,042 i^2 - 0,000467 i^3 - 0,108 i \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Bei der sehr häufig zur Erzielung einer möglichst hohen Empfindlichkeit benutzten Stromstärke von 20 mA ist die mittlere Erwärmung 10,7 °C.

Die Temperaturverteilung in der Oberfläche einer Rosette ist auf Anlage 39 dargestellt. Sie zeigt, daß insbesondere in y-Richtung der Bereich großer Erwärmung nur klein ist. Der Sprung in der

Verteilungskurve in x-Richtung ist durch eine Änderung der Umgebungstemperatur während der Messungen entstanden.

Werden die beiden anderen nicht zur Messung benutzten DMS einer Rosette vorgeheizt, so wird insgesamt die 3fache Wärmemenge erzeugt. Liegen die drei DMS übereinander, so entsteht eine Erwärmung, die auch ungefähr 3mal so groß ist wie sich bei der Huggenberger und der japanischen Rosette tatsächlich zeigte. Der Strom, der bei Benutzung nur eines DMS dieselbe Wärmemenge liefert, müßte den $\sqrt{3}$ fachen Betrag haben. Die hierbei gemessenen Erwärmungen sind in dem Diagramm auf Anlage 38 deshalb über der Stromstärke $\sqrt{3} \cdot 20 = 34,6$ mA eingezeichnet.

Bei der Folien- und Impa-Rosette von Hottinger liegen die drei DMS nebeneinander, wodurch die entstehende Wärme auf eine größere Fläche verteilt wird und die örtliche Erwärmung nur etwa 1,5-mal so groß, jedoch fast über die gesamte Fläche der Rosette gleich ist.

Wird eine zweite auf der Unterseite des Balkens angebrachte Rosette ebenfalls mit dem Meßstrom in allen drei DMS vorgeheizt, dann wird auf der Oberseite die Temperatur je nach der Höhe des Balkens verschieden stark ansteigen. Bei einem 3 mm hohen Balken ist die Zunahme ungefähr 30 % der Erwärmung, die durch die Rosette auf der Oberseite entsteht, während sie bei einem 9,5 mm dicken Balken nur rund 10 % beträgt. Wichtig für die weiteren Betrachtungen ist jedoch, daß die Temperaturverteilung über die Balkenhöhe in diesem Fall annähernd konstant ist.

3.412 Dehnungsänderung

Vom Standpunkt der Modellstatik aus ist die Erwärmung der Meßstelle weniger interessant als die durch sie verursachte Änderung der Dehnung als Folge der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls. Wie in Kapitel 1 dargestellt ist, kann man bei Kunstharzen wegen ihres elastischen Nachgebens nur von einem effektiven Elastizitätsmodul sprechen, der von der Belastungs-

dauer abhängig ist. Wenn nun hier von der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls die Rede ist, so beinhaltet dieser Begriff auch die Zunahme des Kriechens bei höheren Temperaturen, d.h., es wird die Dehnung eines Probestabes, wie früher beschrieben, für konstante Be- und Entlastungszeit gemessen und hieraus mit der äußeren Beanspruchung und den geometrischen Abmessungen der Elastizitätsmodul berechnet.

Da jedoch die Zunahme der Dehnung am Probebalken durch die Temperaturerhöhung an der Meßstelle nicht der tatsächlichen Änderung des Elastizitätsmoduls entspricht, werden zunächst nur die gemessenen relativen Dehnungsänderungen betrachtet, die gemäß Abschnitt 3.331 auf ϵ_0 bezogen sind.

Die Dehnungsänderungen $\Delta\epsilon$ hängen etwa linear von der von einem einzelnen DMS einer Rosette erzeugten Temperaturerhöhung ab (s. Anlage 38).

Wie aus dem Schaubild auf Anlage 30 hervorgeht, sind die $\Delta\epsilon$ sowohl für die einzelnen Kunstharze als auch für die verschiedenen Rosettenarten unterschiedlich groß. Außerdem werden sie von der Höhe des Probebalkens beeinflusst (s. Abschnitt 3.52). Bei einem Meßstrom von 20 mA wurde an einem 3 mm hohen Balken aus Plexiglas die kleinste gemessene Dehnungsänderung an einer Huggenberger Rosette mit 2,5 % festgestellt, während die größte Änderung von 5,2 % an einer Hottinger-Impa-Rosette entstand.

Im allgemeinen jedoch traten die größten Dehnungsänderungen bei den untersuchten japanischen Rosetten auf, die wegen ihres äußerst kleinen Meßgitters die größte Wärmekonzentration erzeugen.

Den geringsten Einfluß übt die Erwärmung der Meßstelle auf Dehnungsmessungen an Araldit B aus, da sich bei diesem heißhärtenden Kunstharz der effektive Elastizitätsmodul am wenigsten mit der Temperatur ändert, was wohl auch damit zusammenhängt, daß bei diesem Kunstharz die elastischen Nachwirkungen kleiner sind (s. Abschnitt 3.332.1).

3.42 Einzel-DMS

Die an zwei verschiedenen Einzel-DMS gemessenen Erwärmungen und Dehnungsänderungen sind auf Anlage 28 zusammengestellt. Es ist zu erkennen, daß sie sich ähnlich verhalten wie die Rosetten, so daß hier nicht noch einmal im einzelnen auf die Meßergebnisse eingegangen werden soll. Lediglich sei erwähnt, daß der japanische Einzel-DMS das kleinste Meßgitter von 3 x 2 mm hat und demzufolge auch in Streifenmitte die größte Erwärmung zeigt.

3.43 Zusammenfassung der Meßergebnisse

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei Messungen mit DMS-Rosetten oder Einzelstreifen an Probekörpern aus Kunstharz, die durch ein konstantes Moment beansprucht werden, bei einem Meßstrom von 20 mA eine Erwärmung von ca. 10,7 °C entsteht. Die hierdurch hervorgerufene Abnahme des effektiven Elastizitätsmoduls der Kunstharze ergibt an einem Probekörper von 25 mm Breite eine Zunahme der Dehnungen von ca. 2 bis 5 % je nach Art des verwendeten DMS und des Kunstharzes. Am kleinsten ist die Dehnungszunahme bei Verwendung von Araldit B und Huggenberger Rosetten. Die meßtechnischen Schwierigkeiten bei den durchgeführten Untersuchungen haben eine starke Streuung der Meßwerte zur Folge, so daß augenfällige Unterschiede zwischen den einzelnen Rosettenarten nicht mit Sicherheit festgestellt werden konnten.

Größere Unterschiede zwischen den Dehnungsänderungen zeigen sich erst, wenn die nicht zur Messung benutzten DMS der Rosette vorgeheizt werden und insbesondere wenn auf der gegenüberliegenden Seite des Balkens eine zweite Rosette vorgeheizt wird. Die Dehnungsänderungen betragen hierbei teilweise 30 bis 35 %. Am günstigsten verhält sich Araldit B, wo sich jedoch immer noch die gemessene Dehnung um 6 bis 10 % durch die Erwärmung vergrößert.

3.5 Rechnerische Ermittlung der Dehnungsänderung infolge Erwärmung der Meßstelle

3.51 Temperaturverteilung im Balken

Die exakte Berechnung der Temperaturverteilung in einem Balken, dem auf der Oberfläche in einem begrenzten Gebiet eine gleichbleibende Wärmemenge zugeführt wird, ist sehr schwierig [12], wenn nicht gar unmöglich, da die Wärmeübergangszahlen an der Oberfläche nicht konstant sind. Durch Einführen vereinfachender Annahmen (z.B. konzentrischer Verlauf der Isothermen in der Balkenoberfläche etc.) ließe sich vielleicht eine Lösung finden, die den Temperaturverlauf näherungsweise beschreibt. Da jedoch aus einer solchen Lösung für die hier interessierende Frage der Dehnungsänderung bei Messungen mit DMS auf Kunstharzen keine neuen Erkenntnisse zu gewinnen sind, lohnt sich der erforderliche mathematische Aufwand nicht. Um von der Temperaturverteilung auf die zu erwartende Dehnungsänderung schließen zu können, muß als zweiter Schritt die Dehnung in einem Körper berechnet werden, dessen Elastizitätsmodul räumlich veränderlich ist. Auch die Lösung dieses Problems dürfte mathematisch kaum möglich sein.

Unter Verwendung der gemessenen Erwärmungen an der Ober- und Unterseite des Balkens läßt sich jedoch die Aufgabe so weit vereinfachen, daß man sie als eindimensionales Problem betrachten kann. Hiermit ist es möglich, für einige Fälle, für die keine Meßwerte vorliegen, die Größe der zu erwartenden Dehnungsänderung abzuschätzen.

Aus der Darstellung auf Anlage 38 kann die Erwärmung an der Oberseite des Balkens in der Mitte der Rosette als Funktion der Stromstärke entnommen werden. Es wird nun vorausgesetzt, daß die Temperatur quer zur Balkenlängsachse gleichmäßig verteilt ist. Verwandelt man die in y-Richtung gemessene Temperaturverteilung (s. Anlage 39) in ein flächengleiches Rechteck, dann ist seine Ordinate rund ein Drittel des in der Mitte gemessenen Wer-

tes ΔT_0 . In die folgenden Berechnungen wird deshalb $\Delta T_0/3$ als Temperatur der Balkenoberseite eingeführt. Sie sei im Bereich des DMS sowohl in x- als auch in y-Richtung konstant. Weiter wird angenommen, daß die Temperatur in z-Richtung über die Balkenhöhe linear bis zu einem Wert ΔT_u abnimmt. Für diesen liegen ebenfalls Meßwerte vor. In der Tabelle auf Anlage 40 sind die Mittelwerte der Erwärmungen zusammengestellt, die an der japanischen und an der Huggenberger Rosette gemessen wurden. Daraus ist zu erkennen, daß man das Verhältnis $\Delta T_u/\Delta T_0$ sowohl bei einer Balkenhöhe von 3 mm als auch bei einer Höhe von 9,5 mm als konstant annehmen kann. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Balkenhöhe und dem Verhältnis $\Delta T_u/\Delta T_0$ muß folgende Bedingungen erfüllen:

$$\begin{array}{ll} \text{Für } h \rightarrow 0 & \text{muß } \Delta T_u/\Delta T_0 \rightarrow 1 \\ \text{" } h = 3 & \text{" } \Delta T_u/\Delta T_0 = 0,56 \\ \text{" } h = 9,5 & \text{" } \Delta T_u/\Delta T_0 = 0,15 \\ \text{" } h \rightarrow \infty & \text{" } \Delta T_u/\Delta T_0 \rightarrow 0 \end{array}$$

Wie die Darstellung auf Anlage 41 zeigt, erfüllt die Funktion

$$\Delta T_u/\Delta T_0 = e^{-0,193 \cdot h}$$

die gestellten Bedingungen. Hiermit und mit der Gleichung

$$\Delta T_0 = 0,042 i^2 - 0,000467 i^3 - 0,108 i$$

kann mit den getroffenen grob vereinfachenden Annahmen der Temperaturverlauf im Balken in Abhängigkeit von Meßstrom und Balkenhöhe angegeben werden.

3.52 Dehnungsänderung des Balkens

Da sich der Elastizitätsmodul von Kunstharzen im betrachteten Bereich näherungsweise linear mit der Temperatur ändert, hat eine über die Balkenhöhe lineare Temperaturverteilung auch eine lineare Änderung des Elastizitätsmoduls längs der Balkenhöhe zur Folge. Für einen solchen Balken ist auf den Anlagen 42 und 43 die

Dehnung ϵ_0 als Folge eines konstanten Biegemomentes angegeben. ϵ_0 wird auf die Dehnung ϵ eines Balkens mit konstantem Elastizitätsmodul bezogen. Dieser sei

$$E = \frac{E_0}{1 - \Delta T_0 \cdot \eta}$$

Hierin bedeutet η die relative Änderung des Elastizitätsmoduls pro $^{\circ}\text{C}$. Für Plexiglas wurde sie in Abschnitt 3.332.1 zu $0,0093/^{\circ}\text{C}$ bestimmt. Es ergibt sich für

$$\frac{\epsilon_0}{\epsilon} = \frac{\nu}{1 - \Delta T_0 \cdot \eta}$$

mit

$$\nu = \frac{2(1 + 2\lambda)}{1 + 4\lambda + \lambda^2}$$

und

$$\lambda = \frac{E_u}{E_0} = \frac{1 - \Delta T_u \cdot \eta}{1 - \Delta T_0 \cdot \eta}$$

Für die praktisch interessierenden Fälle liegt λ im Bereich $0,8 \leq \lambda \leq 1,0$. In ihm kann ν als Funktion von λ mit ausreichender Genauigkeit durch folgende Gerade ersetzt werden:

$$\nu = 1,372 - 0,372 \lambda$$

womit sich die einfachere Gleichung

$$\frac{\epsilon_0}{\epsilon} = \frac{1,372 - 0,372 \lambda}{1 - \Delta T_0 \cdot \eta}$$

ergibt. Da nach den Feststellungen in Abschnitt 3.51 für die gemessenen ΔT nur $1/3$ ihrer Werte eingesetzt werden darf, erhält man endgültig

$$\lambda = \frac{3 - \Delta T_u \cdot \eta}{3 - \Delta T_0 \cdot \eta}$$

und

$$\frac{\epsilon_0}{\epsilon} = \frac{1,372 - 0,372 \lambda}{1 - \frac{1}{3} \Delta T_0 \cdot \eta}$$

Die Dehnungsänderung $\Delta \epsilon$ in Prozent, bezogen auf die Dehnung des Balkens mit konstantem Elastizitätsmodul, ist dann

$$\Delta \epsilon = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon} - 1 \right) \cdot 100 \%$$

Die ΔT_0 und die zugehörigen ΔT_u können für eine gegebene Stromstärke aus den im vorigen Abschnitt angegebenen Gleichungen entnommen werden.

In dem Diagramm auf Anlage 44 sind die mit obigen Gleichungen berechneten Dehnungsänderungen für verschiedene Balkenhöhen in Abhängigkeit von der Stromstärke angegeben. Die eingetragenen Meßpunkte lassen eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung erkennen. Der Einfluß der Balkenhöhe auf die Dehnungsänderung ist gering. Sie ist bei einem 30 mm hohen Balken um ca. 1/10 größer als bei einem 5 mm hohen Balken. Bei der Verwendung der aus dem Diagramm entnommenen Dehnungsänderungen ist stets zu bedenken, daß sie unter stark vereinfachenden Annahmen berechnet wurden und zum Teil auf empirisch gefundenen Gleichungen beruhen. Die hierfür benutzten Meßwerte wurden an Balken aus Plexiglas von 25 mm Breite ermittelt, so daß die berechneten Dehnungsänderungen auch nur für solche Balken gelten. Je größer ihre Breite ist, um so weniger werden die in Randnähe liegenden Teile erwärmt, die ihre Steifigkeit dann fast unverändert beibehalten und eine stärkere Zunahme der Dehnung im mittleren erwärmten Teil verhindern. Es findet eine Umlagerung des Kraftflusses von dem Teil mit vermindertem Elastizitätsmodul in die steiferen Teile statt. Je breiter diese sind, desto weniger wird durch die Kraftumlagerung die gesamte Dehnung verändert. Wird die Breite des "Balkens" ($\mu = 0$) sehr groß ($b \rightarrow \infty$), so geht $\Delta \epsilon \rightarrow 0$.

Diese einfache Überlegung zeigt, daß man für den allgemeinen Fall kaum zahlenmäßige Angaben über die zu erwartende Dehnungszunahme infolge Erwärmung der Meßstelle machen kann. Dies wäre eine elastizitätstheoretische Untersuchung an einem inhomogenen Stoff, die außerordentlich schwierig ist und die nur in sehr einfachen Fällen mit vertretbarem Aufwand gelöst werden kann.

3.53 Elastizitätsmodul des Probebalkens

Bei modellstatischen Untersuchungen an Modellen aus Kunstharzen wird der Elastizitätsmodul des verwendeten Materials üblicherweise an kleinen Probebalken bestimmt, die durch querkraftfreie Biegung beansprucht werden. Ihre Spannung läßt sich für diesen Lastfall einfach berechnen, wodurch der Elastizitätsmodul aus dem gemessenen Dehnungswert ermittelt werden kann. Zur Messung verwendet man die gleichen DMS und dieselbe Meßanlage, wie sie auch für die Messungen am Modell benutzt werden. Auf diese Weise gehen systematische Fehler der Meßanlage und der DMS nicht in die Spannungen ein, die aus den am Modell gemessenen Dehnungen und dem am Probebalken bestimmten Elastizitätsmodul berechnet werden.

Durch die Erwärmung der Meßstelle wird aber am Probebalken eine zu große Dehnung gemessen. Der hieraus berechnete Elastizitätsmodul E^* verhält sich zu dem des nichterwärmten Materials wie

$$\frac{E^*}{E} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{(1 - \Delta T_0 - \eta)}{\nu}$$

wofür die Werte dem in Abschnitt 3.52 angegebenen Diagramm entnommen werden können (s. Anlage 44).

Wenn am Modell die Dehnungen im gleichen Verhältnis zu groß gemessen würden wie am Probebalken, dann würde sich dieser Fehler bei der Spannungsberechnung aufheben. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie sich aus den Erläuterungen in Abschnitt 3.52 ergibt, so daß sich Fehler bei den am Modell ermittelten Spannungen ergeben, die besonders bei Vorheizung der DMS-Rosetten die Größenordnung von 10 % und mehr erreichen können.

3.6 Schlußfolgerungen

Die geschilderten Untersuchungen zeigen, daß auf Kunstharz geklebte DMS-Rosetten und Einzel-DMS durch die Wärmewirkung des Meßstromes ihre Umgebung so stark erwärmen, daß sich die Temperaturabhängigkeit des effektiven Elastizitätsmoduls von Kunststoffen in

einer Änderung der durch äußere Beanspruchung entstehenden Dehnungen bemerkbar macht. Sie ist am kleinsten bei Verwendung von Araldit B und Huggenberger Rosetten. Allgemein gültige Angaben über die Größe der Dehnungsänderung können aus zwei Gründen nicht gemacht werden:

1. Die Erwärmung und die Temperaturverteilung in der Umgebung der Meßstelle hängen bekanntlich einmal von den geometrischen Abmessungen des untersuchten Teiles ab, zum andern auch vom Wärmeübergang in die umgebende Luft, der von deren Strömungsverhältnissen stark beeinflusst wird. Dies erschwert das Reproduzieren der eintretenden Dehnungsänderungen, was sich auch in einer großen Streuung der Meßwerte zeigt.
2. Die Dehnungsänderung ist abhängig vom Verhältnis des erwärmten Gebietes zu den nichterwärmten aber gleich beanspruchten Teilen in der Umgebung dieses Gebietes. Sie wird also von Fall zu Fall verschieden sein.

Um die Dehnungsänderungen klein zu halten, muß man eine Erwärmung der Meßstelle möglichst vermeiden, am einfachsten durch Verringern des Meßstromes. Zwar ist dann auch eine Verringerung der Meßempfindlichkeit in Kauf zu nehmen, was aber wegen der Genauigkeit der Meßanlage in vielen Fällen nicht allzu sehr ins Gewicht fällt. Eine Verringerung des Meßstromes auf die Hälfte ergibt auch nur die halbe Meßempfindlichkeit, aber bereits eine Verminderung der Erwärmung auf den vierten Teil.

Außerdem kann durch kurzzeitiges Messen ein Aufheizen der Umgebung verhindert werden. Dies ist z.B. bei der automatischen Meßanlage im Programm I der Fall, wo die Zeit für die Messung einer Meßstelle bis auf 0,8 Sekunden herabgesetzt werden kann. Aus hier nicht wiedergegebenen Meßergebnissen geht hervor, daß bei einer Weiterschaltperiode von $t_1 = 0,8$ bis 1,0 Sekunden durch die Wärmewirkung des Meßstromes keine feststellbaren Änderungen der Meßwerte entstehen.

Ganz besonders deutlich zeigen die Untersuchungen, daß bei Mes-

sungen an Kunstharzen keinesfalls vorgeheizt werden darf. Zur Vermeidung von Nullpunktsdrift infolge der Temperaturdehnung müssen andere Verfahren angewendet werden. Entweder muß mit der Dehnungsmessung gewartet werden, bis der stationäre Zustand eintritt, oder das Weglaufen des Nullpunktes ist durch periodische Be- und Entlastung und Mittelbildung zu eliminieren.

Verzeichnis der Anlagen

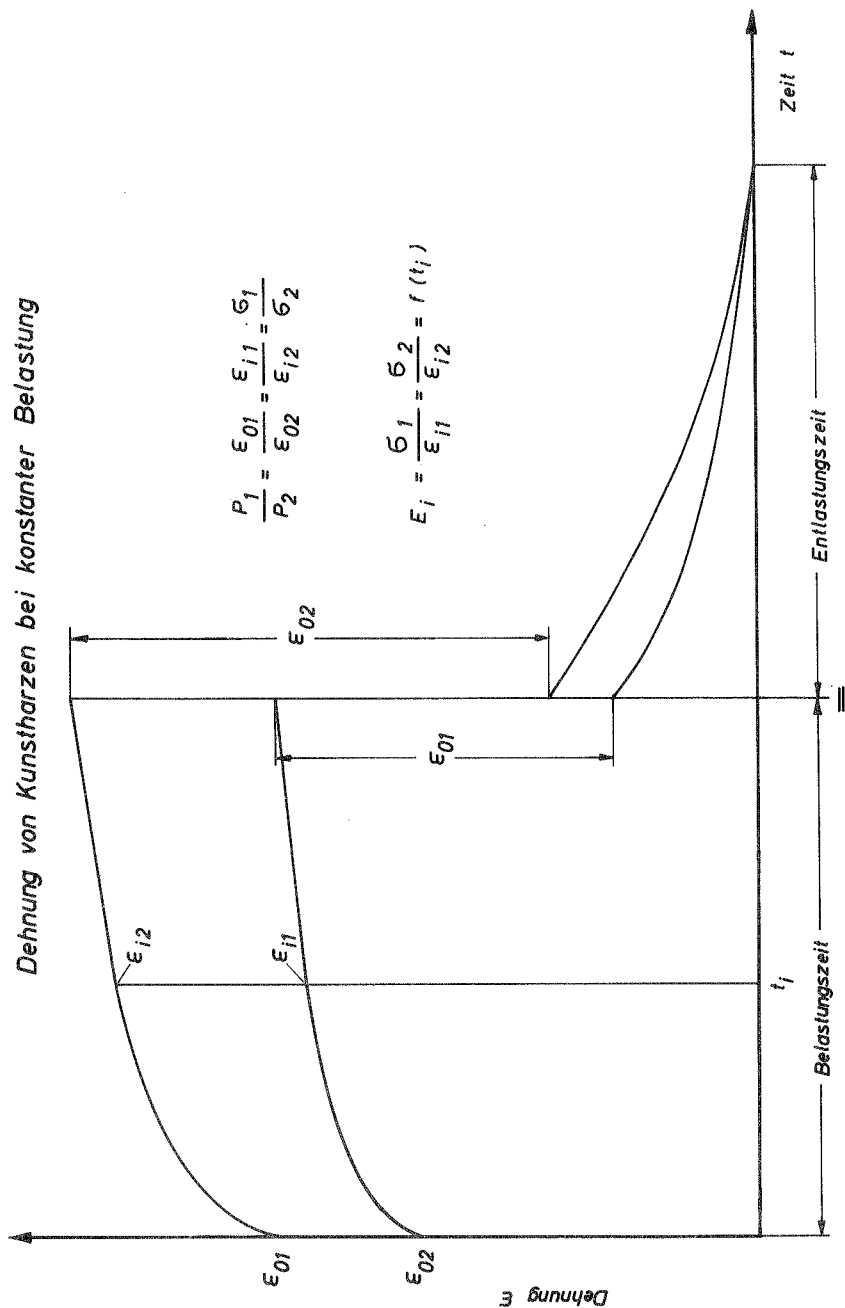
- 1 Dehnung von Kunstharzen bei konstanter Belastung
- 2 Kompensation des Zeiteinflusses auf Spannungen in Kunstharzmodellen durch eine Hilfskonstruktion (Spring Balance)
- 3 Elektrische Kompensation des Zeiteinflusses bei Dehnungsmessungen an Kunstharzmodellen
- 4 Dehnungsverlauf bei periodischer Be- und Entlastung von Modellen aus Kunstharz
- 5 Abbildungen: Steuergerät und Preßluftzylinder, Biegeeichvorrichtung
- 6 Kriechkurve von Araldit E über 135 Minuten
- 7 Elastizitätsmodul von Kunstharzen bei verschiedenen Belastungszeiten
- 8 Spannungsdehnungslinien, gemessen am Biegebalken
- 9 Änderung des Elastizitätsmoduls von Plexiglas und Araldit E, wenn Entlastungszeit \leq Belastungszeit
- 10 Mittelwerte der Dehnung ϵ_m bei n Belastungszyklen mit $t = 20$ Sekunden und verschiedener Vorgeschichte
- 11 Einfluß einer Vorlast auf Dehnmessungen an Plexiglas
- 12 Änderung des Elastizitätsmoduls von Gießharzen nach dem Erstarren
- 13 Abbildung: Automatische Meßanlage
- 14 Blockschaltbild der automatischen Meßanlage für 200 DMS

- 15 Schematische Darstellung der Messungen in Programm I und II
- 16 Prinzipschaltung der Wheatstoneschen Brücke
- 17 Linearität der Peekel-Dehnmeßbrücke im Bereich 100 μD
- 18 Tabelle 1: Linearität der Peekel-Dehnmeßbrücke im Bereich 100 μD , ermittelt mit Hilfe eines Dehnnormals
- 19 Einfluß der Umschaltkontakte
- 20 Tabelle 3: Einfluß des Meßbereichs und der Vorheizung
- 21 Tabelle 4: Einfluß der Vorheizung auf die Einzelmessungen an Meßstelle 1 und 4 (Meßbereich 300 μD ; Programm II)
- 22 Tabelle thermischer Stoffwerte
- 23 Tabelle der untersuchten DMS und Kleber
- 24 Die untersuchten DMS-Rosetten und Einzel-DMS
- 25 Abbildungen: Temperaturmeßgerät, Temperaturmessung am Probekörper
- 26 Skizze der Belastungsvorrichtung für Probekörper
- 27 Einfluß von Meßstrom und Vorheizung auf Messungen mit DMS-Rosetten
- 28 Einfluß des Meßstromes auf Messungen mit Einzel-DMS
- 29 Mittelwerte ΔT und $\Delta \epsilon$ infolge Meßstrom und Vorheizung an DMS-Rosetten
- 30 Schaubild der Meßergebnisse - Rosetten

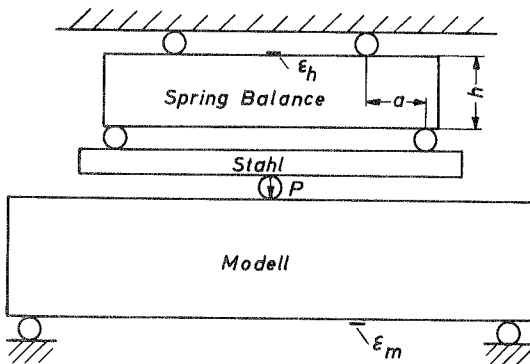
- 31 Plexiglas $d = 3$ mm, Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Temperatur
- 32 Araldit B $d = 3$ mm, Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Temperatur
- 33 σ - ϵ -Linie Plexiglasbalken $d = 3,01$ mm, Meßstrom $+ R_V$,
 $T = 26,8$ °C, Huggenberger Rosette im Zugbereich
- 34 σ - ϵ -Linie Plexiglasbalken $d = 3,01$ mm, Meßstrom $+ R_V$,
 $T = 24,2$ °C, Huggenberger Rosette im Druckbereich
- 35 σ - ϵ -Linie, Plexiglasbalken $d = 3,01$ mm, Meßstrom $+ 2 \times V_H$,
 $T = 34,4$ °C, Huggenberger Rosette im Zugbereich
- 36 σ - ϵ -Linie, Plexiglasbalken $d = 9,5$ mm, mit vollem Meßstrom,
 $T = 24,2$ °C, japanische Rosette, Zugbereich
- 37 σ - ϵ -Linie, Plexiglasbalken $d = 9,5$ mm mit Meßstrom
 $+ 2 \times V_H$, $T = 55,2$ °C, japanische Rosette, Zugbereich
- 38 Erwärmung in Abhängigkeit vom Meßstrom
- 39 Temperaturverteilung in der Oberfläche einer Huggenberger Rosette
- 40 Mittelwerte der Erwärmung und Dehnungsänderung
- 41 $\Delta T_u / \Delta T_o$ in Abhängigkeit von der Balkenhöhe h für Balken
von 25 mm Breite
- 42/43 Balken mit über die Höhe linear veränderlichem Elastizitätsmodul
- 44 Dehnungsänderung $\Delta \epsilon$ in Abhängigkeit vom Meßstrom i und der Balkenhöhe h für einen Balken von 25 mm Breite (berechnet)

Dehnung von Kunstharzen bei konstanter Belastung

Anlage 1



Kompensation des Zeiteinflusses auf die Spannungen in
Kunstharzmodellen durch eine Hilfskonstruktion
(Spring Balance)

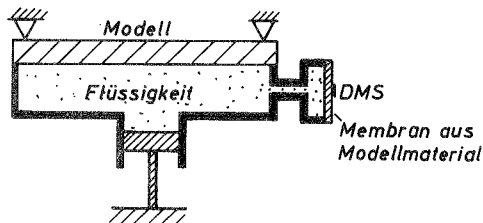


Hilfskonstruktion:
$$\epsilon_h = \frac{P}{E} \frac{3a}{bh^2} = \text{const.}$$

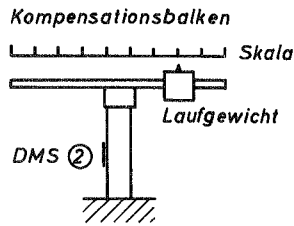
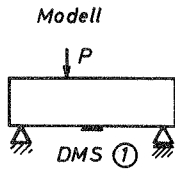
Modell:
$$\frac{\sigma}{P} = \epsilon_m \frac{E}{P}$$

$$\frac{\sigma}{P} = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_s} \frac{3a}{bh^2}$$

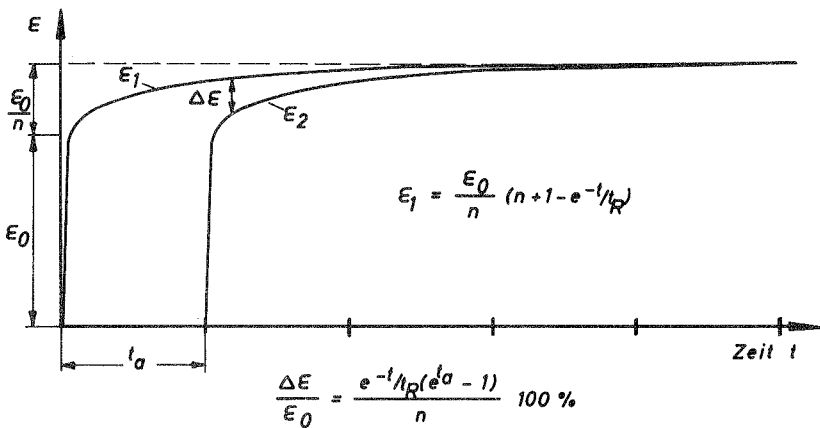
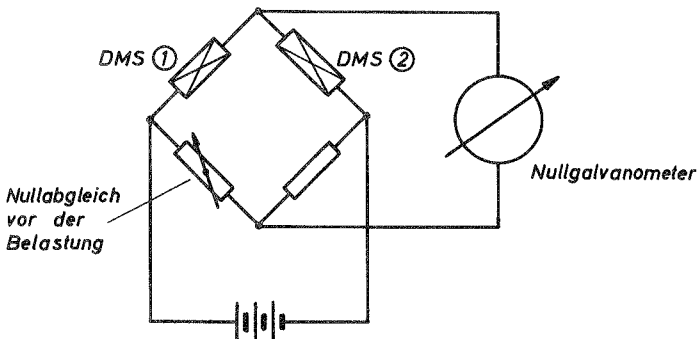
Vorschlag für Gleichflächenlast:



Elektrische Kompensation des Zeiteinflusses bei Dehnungsmessungen an Kunstharzmodellen

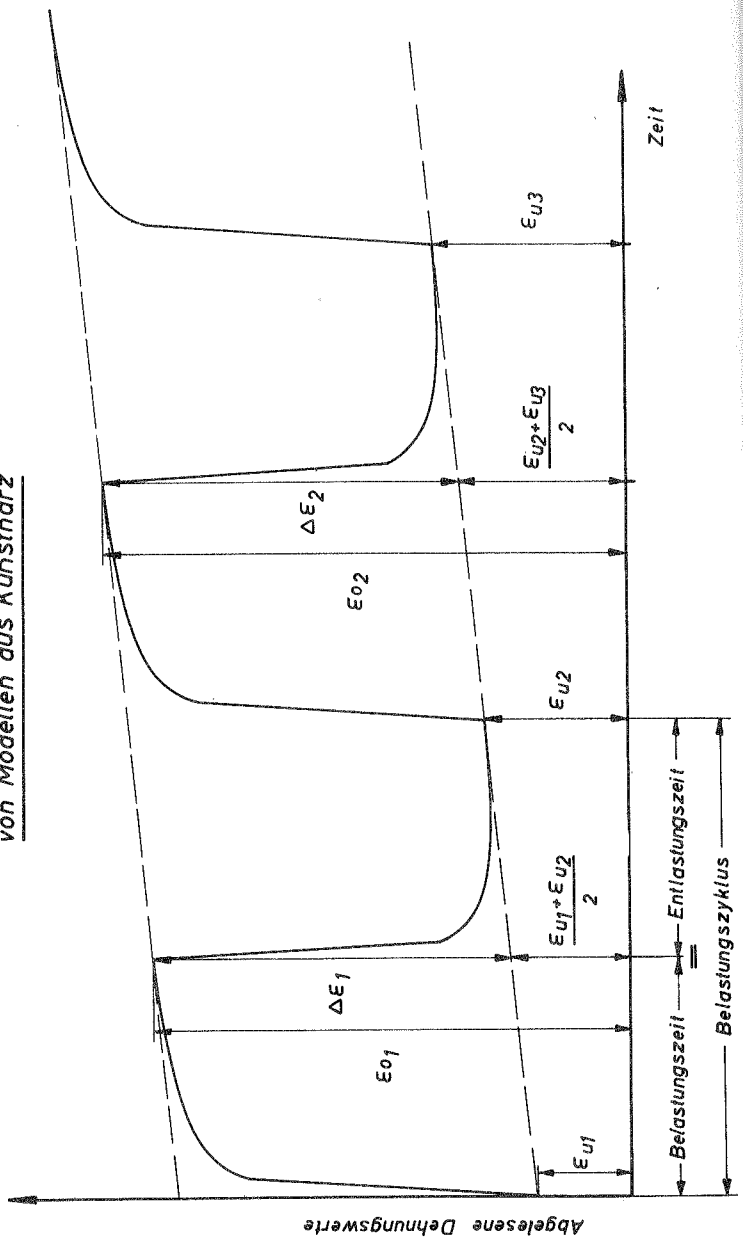


Nullabgleich nach der Belastung



Dehnungsverlauf bei periodischer Be- und Entlastung

von Modellen aus Kunstharz



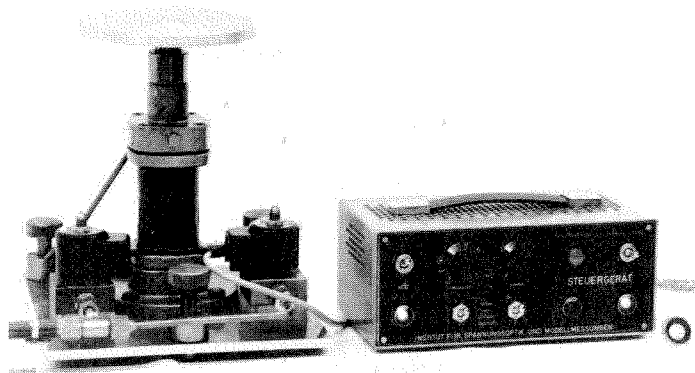


Bild 1: Steuergerät und Preßluftzylinder

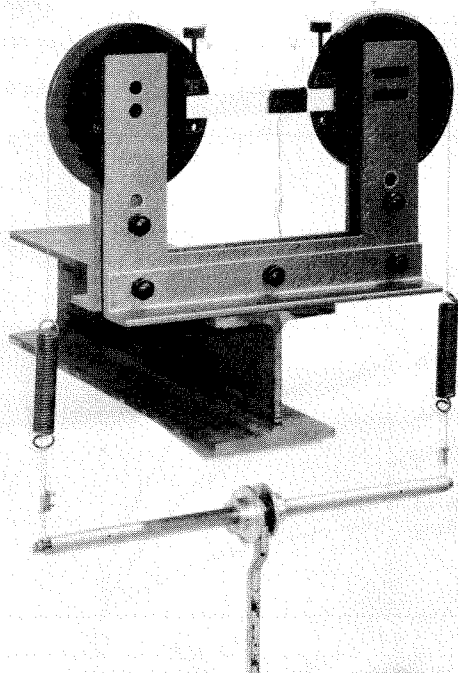


Bild 2: Biegeeichvorrichtung

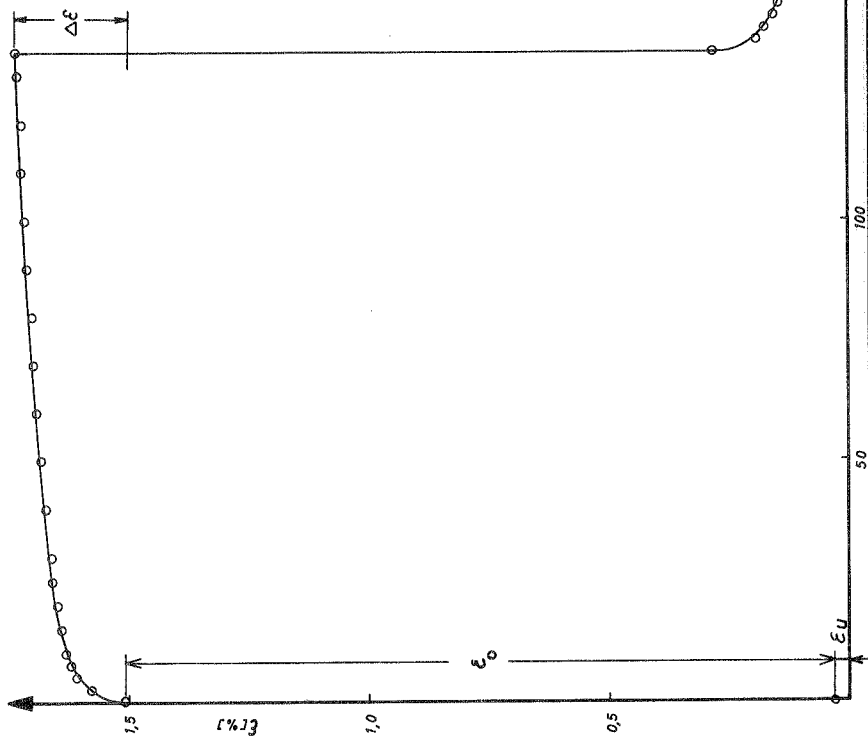
Kriechkurve von Araldit E über 135 Minuten.

Dehnungszunahme $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_0} = 16\%$

bleibende Dehnung $\frac{\epsilon_R}{\epsilon_0} = 0,88\%$

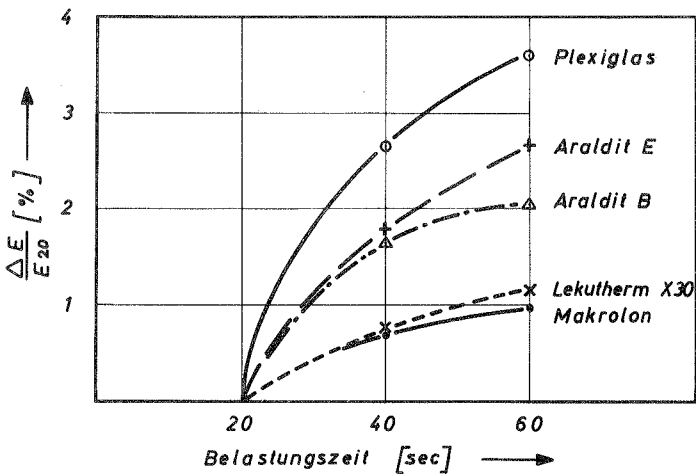
$G = 55,6 \text{ kp/cm}^2$

$T_U = 24^\circ\text{C}$ 30% rel. Feuchte

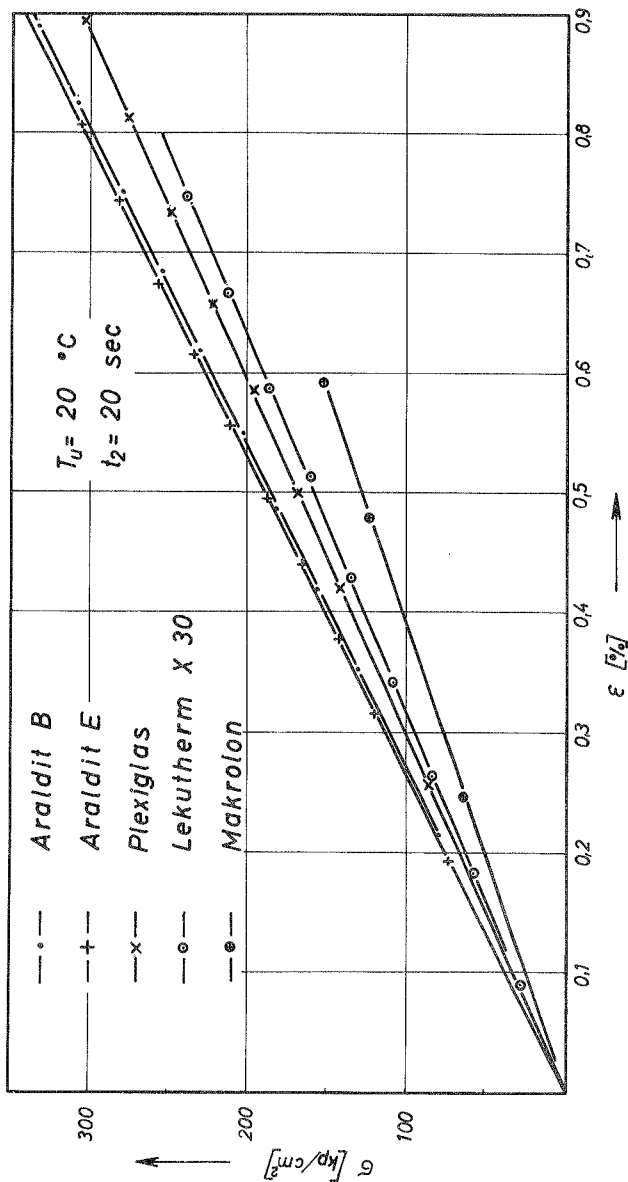


*E-Modul $[kp/cm^2]$ von Kunstharzen
bei verschiedenen Belastungszeiten*

Werkstoff		Belastungszeit [sec]		
		20	40	60
Plexiglas	E	34 070	33 170	32 830
	$\frac{\Delta E}{E_{20}}$	0,0	2,64	3,62
Araldit E	E	37 560	36 890	36 560
	$\frac{\Delta E}{E_{20}}$	0,0	1,78	2,66
Araldit B	E	36 300	35 700	35 560
	$\frac{\Delta E}{E_{20}}$	0,0	1,65	2,04
Lekutherm X 30	E	31 440	31 200	31 080
	$\frac{\Delta E}{E_{20}}$	0,0	0,76	1,15
Makrolon	E	26 070	25 880	25 820
	$\frac{\Delta E}{E_{20}}$	0,0	0,71	0,96

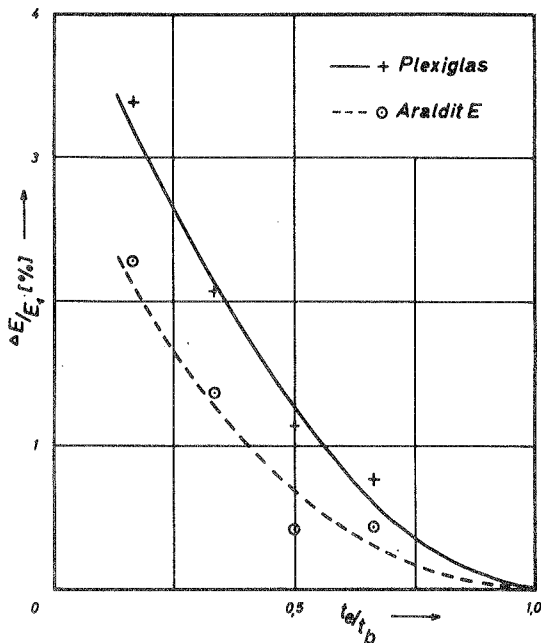


Spannungsdehnungslinien gemessen am Biegebalken 10 x 20 x 150 mm



Änderung des E -Moduls von Plexiglas und Araldit E,
wenn Entlastungszeit \neq Belastungszeit.

Zeit [sec]	Belastung t_b	20		60			
	Entlastung t_e	10	20	10	20	40	60
	t_e/t_b	0,5	1,0	0,167	0,333	0,667	1,0
Plexiglas	E [kp/cm ²]	36 600	36 190	36 430	35 960	35 510	35 230
	$\Delta E/E_1 \cdot 100$	1,3	0,0	3,41	2,07	0,79	0,0
Araldit E	E [kp/cm ²]	36 730	36 570	36 700	36 360	36 030	35 870
	$\Delta E/E_1 \cdot 100$	0,44	0,0	2,31	1,37	0,45	0,0



Mittelwerte der Dehnung $\bar{\epsilon}_m$ bei n Belastungszyklen
mit $t=20[\text{s}]$ und verschiedener Vorgeschichte.

Araldit E $G=556 [\text{kp/cm}^2]$

Vorgeschichte	n	ϵ_m [μD]	$\frac{s}{\epsilon_m} \cdot 100$ [%]	$\frac{\epsilon_m - \bar{\epsilon}_m}{\bar{\epsilon}_m} \cdot 100$
1,5 Min belastet	6	1 513	$\pm 0,34$	-0,16
1,5 Min entlastet	5	1 514	$\pm 0,26$	-0,10
5,5 Min belastet	8	1 516	$\pm 0,11$	+0,03
5,5 Min entlastet	7	1 519	$\pm 0,24$	+0,23
$\bar{\epsilon}_m = 1\,516 \quad S = \sqrt{\frac{\sum (\epsilon - \bar{\epsilon}_m)^2}{n-1}}$				

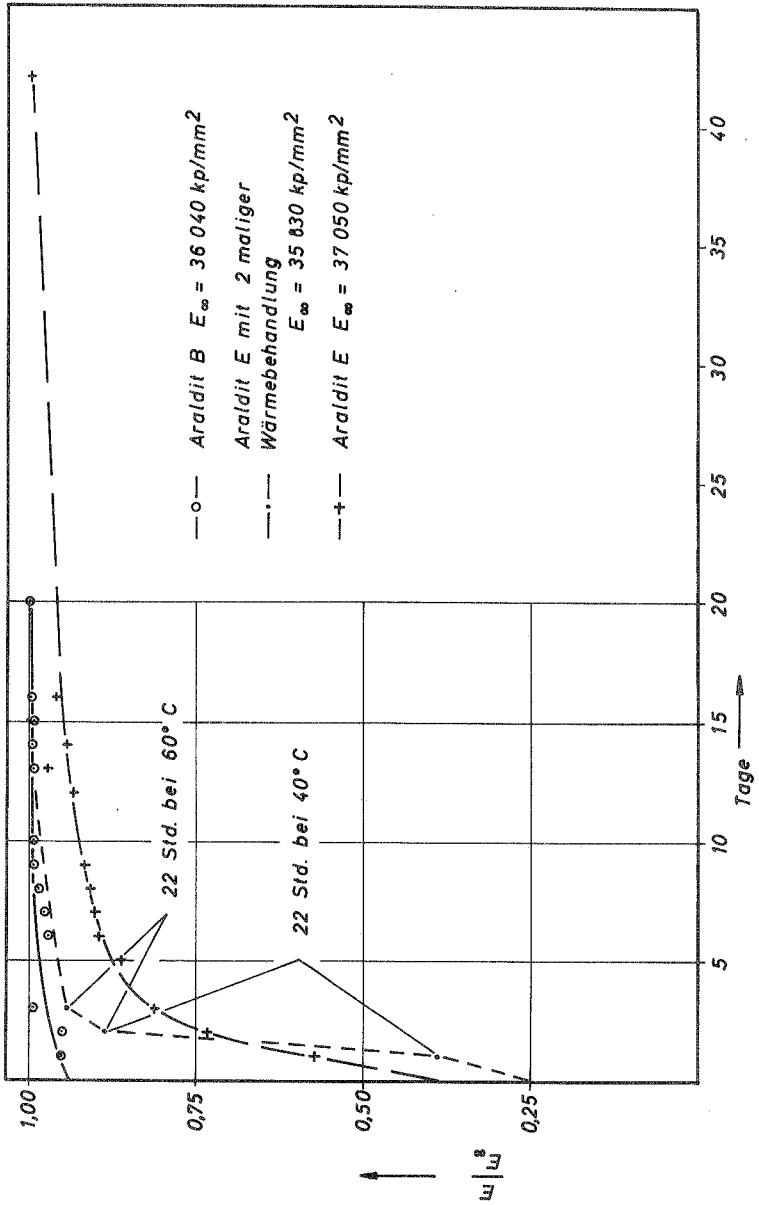
**Einfluß einer Vorlast auf Dehnmessungen
an Plexiglas.**

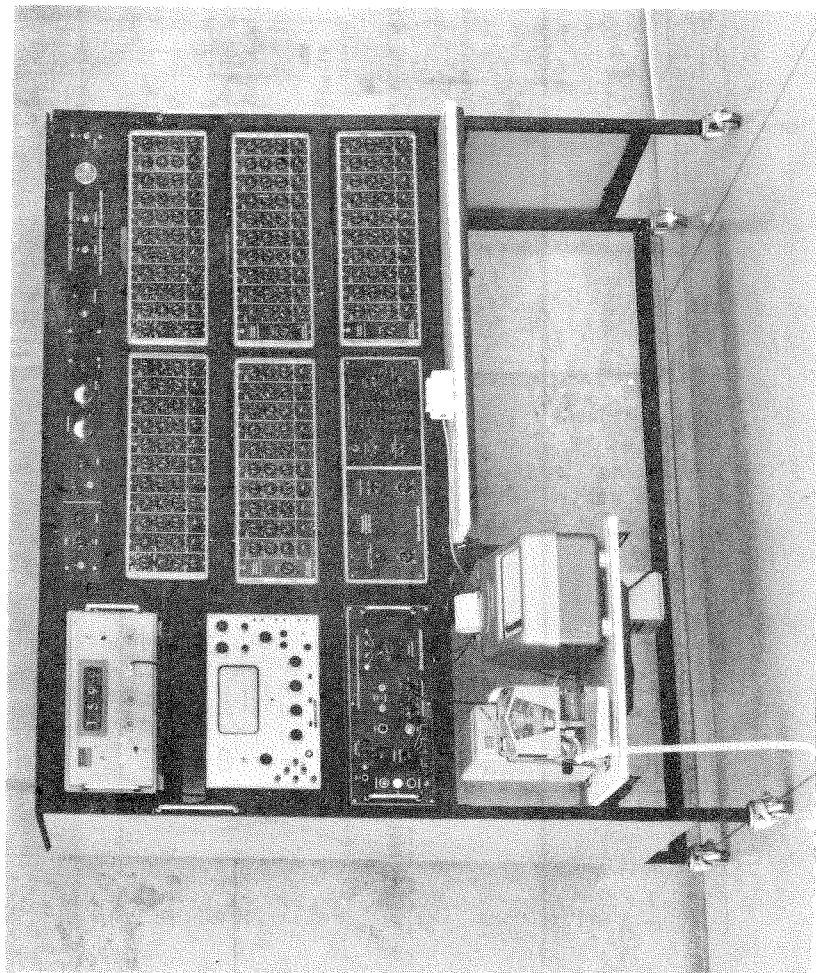
ϵ_u infolge Vorlast		1000		0	
P [kp]	G [kp/cm ²]	ϵ [μD]	E [kp/cm ²]	ϵ [μD]	E [kp/cm ²]
4,93	27,7	963	28 797	962	28 827
9,91	55,7	1 942	28 704	1 956	28 470
19,29	108,5	3 817	28 427	3 830	28 331
		$E_m = 28\ 643$		$E_m = 28\ 543$	
		$\Delta E = 0,35[\%]$			

ϵ_u infolge Vorlast		2000		0	
P [kp]	G [kp/cm ²]	ϵ [μD]	E [kp/cm ²]	ϵ [μD]	E [kp/cm ²]
4,93	27,7	965	28 737	968	28 648
9,91	55,7	1 972	28 268	1 927	28 928
14,42	81,1	2 853	28 431	2 845	28 511
		$E_m = 28\ 479$		$E_m = 28\ 696$	
		$\Delta E = 0,76 [\%]$			

Beginn der Messungen 2 bis 3 Minuten nach dem
Aufbringen der Vorlast.

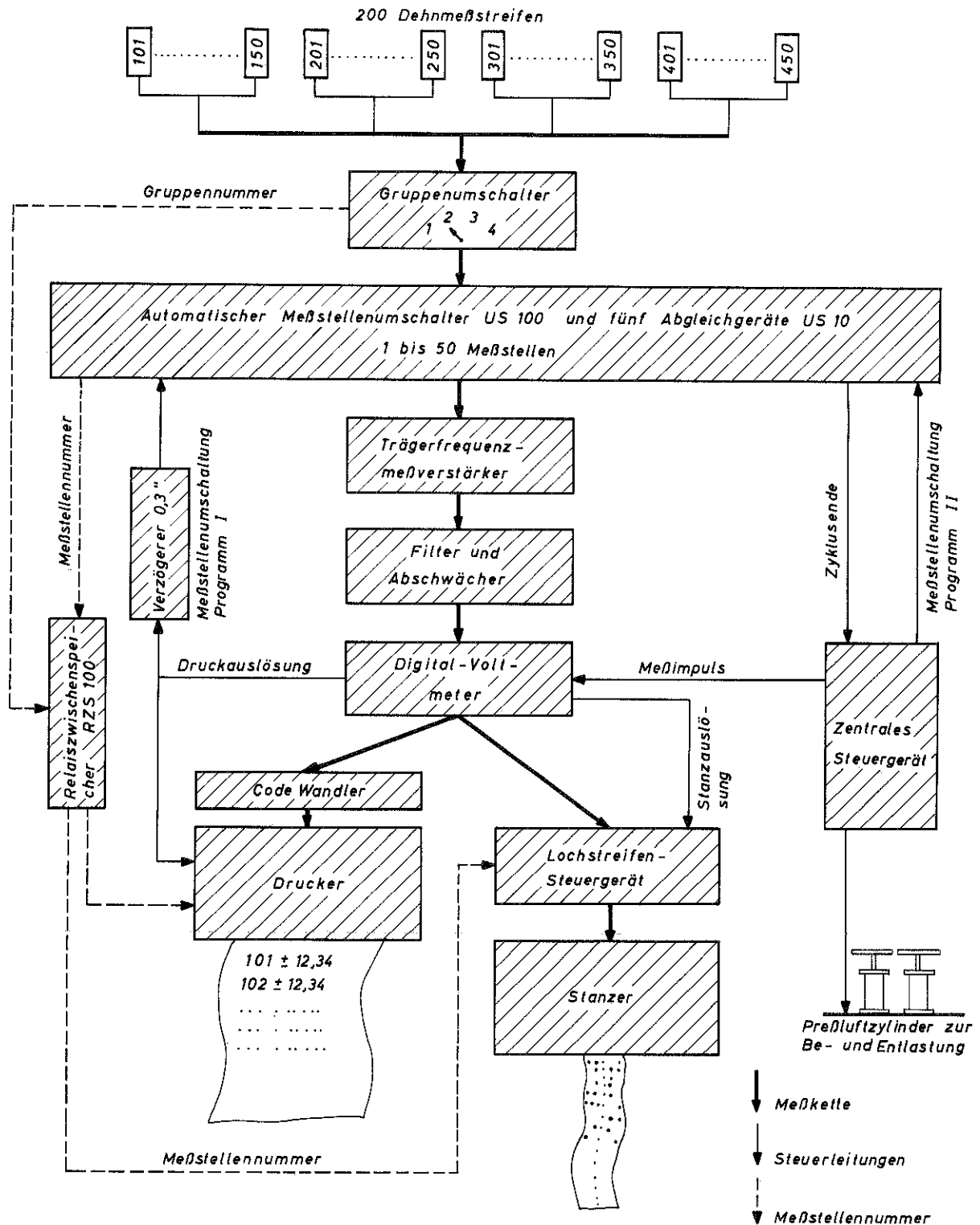
Änderung des E-Moduls von Gießharzen nach dem Erstarren



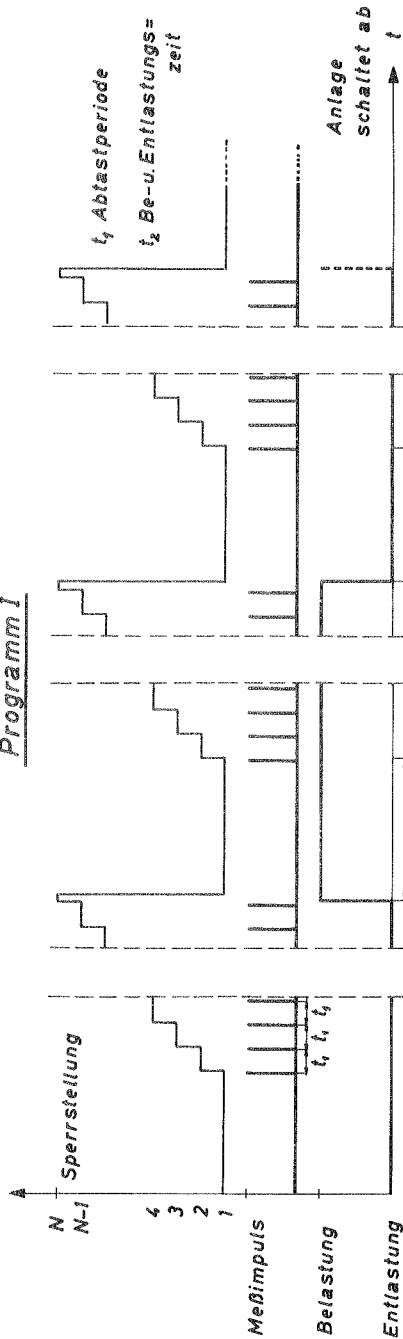


Automatische Meßanlage

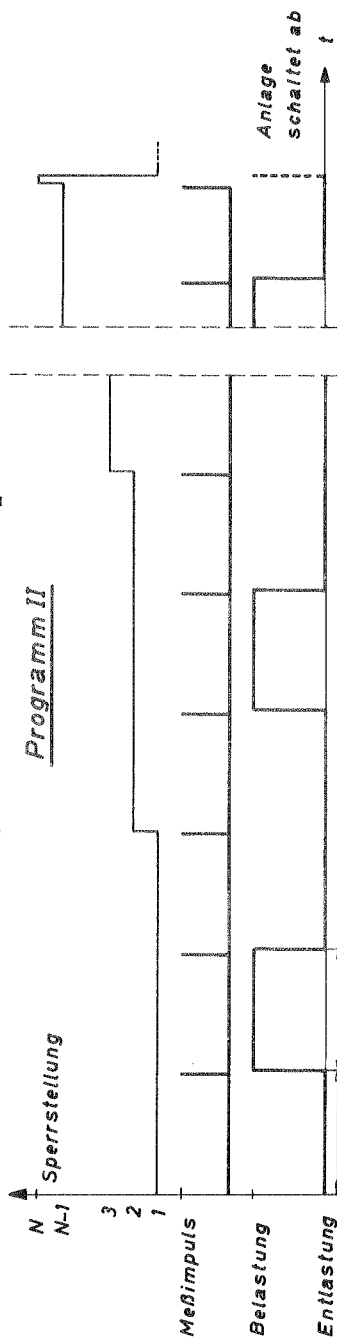
Blockschaltbild der automatischen Meßanlage für 200 DMS



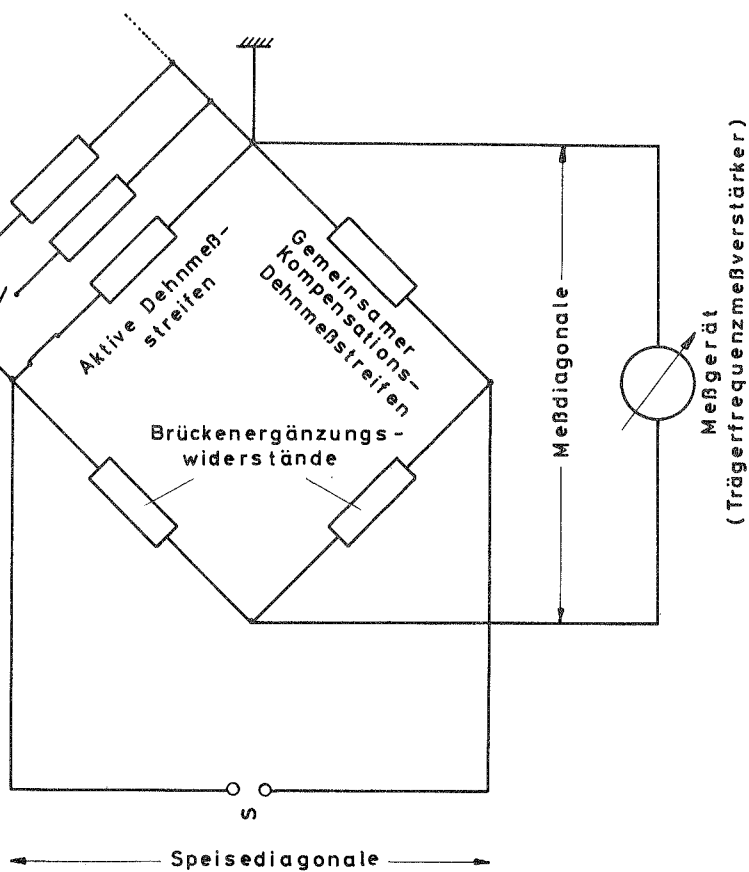
Programm I



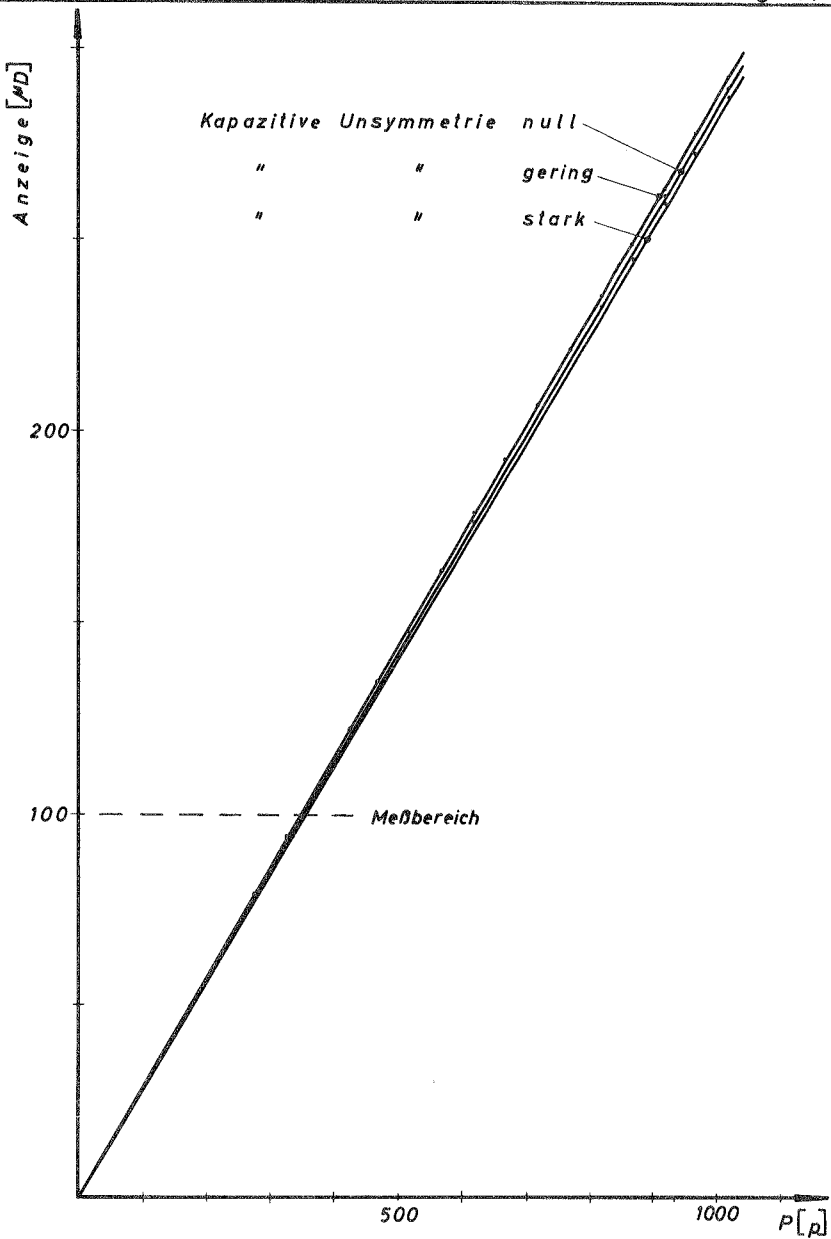
Programm II



Schematische Darstellung des Ablaufs der Messungen in Programm I und II.



Prinzipschaltung der Wheatstoneschen Brücke

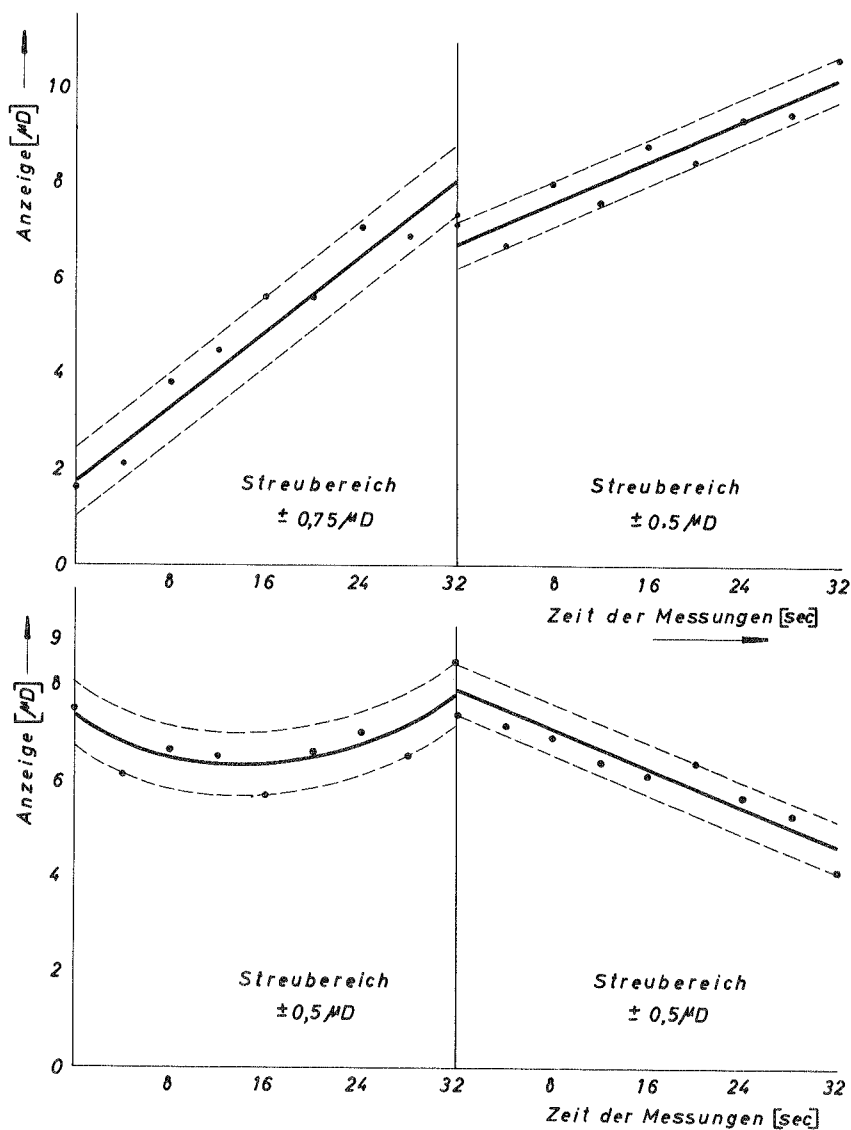


Linearität der Peekel-Dehnmeßbrücke
im Bereich 100 μD

**Tabelle 1, Linearität der Peekel-Dehnmeß-
brücke im Bereich 100 μD ermittelt
mit Hilfe eines Dehnnormals.**

Nr.	P [p]	Ablesungen ϵ bei kapazitiver Unsymmetrie								
		null			gering			stark		
		ϵ [μD]	P/ϵ [p/ μD]	$\Delta P/\epsilon$ [%]	ϵ [μD]	P/ϵ [p/ μD]	$\Delta P/\epsilon$ [%]	ϵ [μD]	P/ϵ [p/ μD]	$\Delta P/\epsilon$ [%]
1	124,25	358	347067	-0,2	35,9	346100	+0,2	35,7	346039	-0,4
2	174,25	50,2	347112	-0,2	50,5	345050	-0,1	50,0	346500	-0,2
3	224,25	64,3	346756	+0,3	65,1	344470	-0,3	64,4	346214	-0,3
4	274,25	78,8	346033	+0,1	79,5	344969	-0,1	78,3	350255	+0,3
5	324,25	93,5	346791	-0,3	93,9	345314	-0,02	92,9	349031	-0,1
6	374,25	107,7	347493	-0,1	108,5	344931	-0,1	107,1	349440	+0,04
7	424,25	122,2	347177	-0,2	122,4	346609	+0,4	121,3	349753	+0,1
8	467,05	134,6	346991	-0,2	135,3	345196	-0,06	133,5	349850	+0,1
9	517,05	148,6	346182	+0,1	149,5	345853	+0,1	147,8	349831	+0,2
10	567,05	162,9	346097	+0,1	164,4	344921	-0,1	162,5	348954	-0,1
11	617,05	177,2	346222	+0,1	179,0	344721	-0,2	176,3	350000	+0,2
12	667,05	191,8	347784	+0,02	193,0	345622	-0,07	190,8	349607	+0,1
13	717,05	205,7	346590	+0,3	207,0	346401	+0,3	205,3	349269	0
14	767,05	220,1	346500	+0,2	221,6	346142	+0,2	219,1	350091	+0,2
15	817,05	233,5	349914	+0,6	235,6	346795	+0,4	232,2	351873	+0,7
16	867,05	247,3	350607	+0,8	249,5	347515	+0,6	246,1	352316	+0,9
17	917,05	261,8	350286	+0,7	263,8	347631	+0,7	259,9	352847	+1,0
18	967,05	267,2	350127	+0,7	270,7	346986	+0,5	273,7	353325	+1,2
19	1017,05	290,3	350344	+0,8	293,3	346761	+0,4	288,2	352897	+1,0
$(P/\epsilon)_m$ aus 1-13			347715	$\pm 0,2\%$		345397	$\pm 0,2\%$		349288	$\pm 0,2\%$
$\Delta(P/\epsilon)_m$			+0,07 %			-0,62 %			+0,52 %	

Mittelwert aus 3 Meßreihen: $P/\epsilon = 347467 \pm 0,58 \%$



Einfluß der Umschaltkontakte

(nach jeder Messung werden die Relaiskontakte kurz-
zeitig geöffnet)

Meßbereich [μD]	Vorheizung [mA]	Programm	Dehnung E [μD] an der Meßstelle			
			①	②	③	④
1000	160 mA	I	508,9	202,6	195,3	508,4
		II	507,0	201,8	196,3	508,3
300	0	I	—	200,1	194,4	503,9
		II	507,7	198,9	—	505,0
	160 mA	I	508,4	201,5	195,9	508,8
		II	507,5	200,9	196,5	509,0
	Mittel		507,9	201,0	195,7	507,2
	Streuung		$\pm 0,15 \%$	$\pm 0,65 \%$	$\pm 0,43 \%$	$\pm 0,43 \%$

Tabelle 3, Einfluß des Meßbereichs
und der Vorheizung

	Meßstelle 1				Meßstelle 4			
	ϵ_u	ϵ_{um}	ϵ_o	$\Delta \epsilon$	ϵ_u	ϵ_{um}	ϵ_o	$\Delta \epsilon$
ohne Vorheizung	-278				310			
		-263	+248	+510		345	-157	-502
	-248				380			
		-239	+268	+507		341	-106	-506
	-231				420			
		-225	+281	+506		434	-73	-507
	-220				447			
	$\Delta \epsilon_m = 507,7 \pm 2,1$				$\Delta \epsilon_m = -505,0 \pm 2,6$			
	Nullpunktsdrift: 58 Skt = 21 %				Nullpunktsdrift: 137 Skt = 44 %			
mit Vorheizung	-204				259			
		-201	307	508		263	-246	509
	-198				266			
		197	311	507		269	-240	509
	-195				271			
		194	313	508		272	-237	509
	-194				274			
		193	314	507		275	-234	509
	-191				276			
	$\Delta \epsilon_m = 507,5 \pm 0,6$				$\Delta \epsilon_m = -509,0 \pm 0$			
Nullpunktsdrift: 13 Skt = 6 %				Nullpunktsdrift: 17 Skt = 7 %				

*Tabelle 4, Einfluß der Vorheizung auf
die Einzelmessungen an
Meßstelle 1 und 4*

(Meßbereich 300 MD ; Programm II)

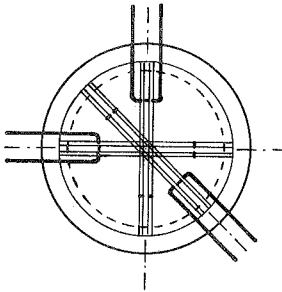
Wärmetechnische Stoffkonstanten

	Plexiglas	Araldit B	Lekutherm x 30	Stahl	Aluminium	Messing
Wärmeleitfähigkeit λ $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{°C}} \right]$	0.16	0.18	0.12	30	137	100
Spez. Wärme $\left[\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{°C}} \right]$	0.35	0.33	0.40	0.114	0.240	0.091
Temperaturleitzahl $a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{h}} \right]$	$0.39 \cdot 10^{-3}$	$0.43 \cdot 10^{-3}$	$0.24 \cdot 10^{-3}$	0.038	(0.34) Alu.rein	0.11
Spez. Gewicht $\gamma \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$	1.18	1.25	1.23	7.8	2.7	8.5
Lin. Wärmeausdehnung $\alpha \left[\frac{\text{mm}}{\text{m} \cdot \text{°C}} \right]$	0.07	0.06	0.07	0.0120	0.0235	0.0184
Wärmestandfestigkeit $\left[\text{°C} \right]$	100-150	110-120	110-125			

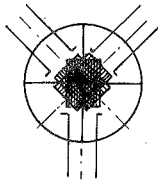
Tabelle der untersuchten DMS und Kleber

	DMS	Meßgitter [mm]	Verwendeter Klebstoff zum Kleben auf	
			Plexiglas	Araldit E
1	Huggenberger Rosette R 45-BP 1/120	10 X 1,5	Hottinger X60	Huggenberger Kleber KM
2	Japanische Rosette Tokyo Sokki Kenkyujo Co T. M. L. - PR 5	5 X 3	Bindemittel P-2	
3	Hottinger Impa-Rosette 6/120 FA 1 R	6 X 2	Hottinger X60	—
4	Hottinger Folien-Rosette 15/120 MBR 45/90	ca. 6 X 6	Hottinger X60	—
5	Huggenberger Einzelstreifen BP-1/120 B	10 X 1,5	Hottinger X60	—
6	Japanischer Einzelstreifen Tokyo Sokki Kenkyujo Co T. M. L. - PL 3	3 X 2	Tokyo Sokki Bindemittel P-2	—

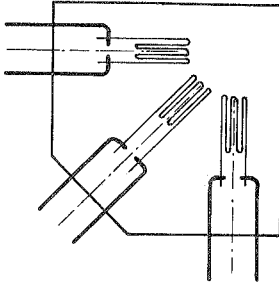
Die untersuchten DMS-Rosetten und Einzel-DMS



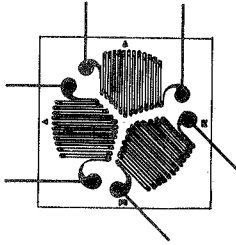
Huggenberger Rosette
R 45-BP1/120



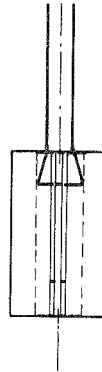
Japanische Rosette
Tokyo Sokki Kenkyujo Co
TML- PR 5



Hottinger Impa-Rosette
6/120 FA 1 R



Hottinger Folien-Rosette
15/120 MBR 45/90



Huggenberger Einzelstreifen
BP-1/120 B



Japanischer Einzelstreifen
Tokyo Sokki Kenkyujo Co
TML- PL 3

1 cm

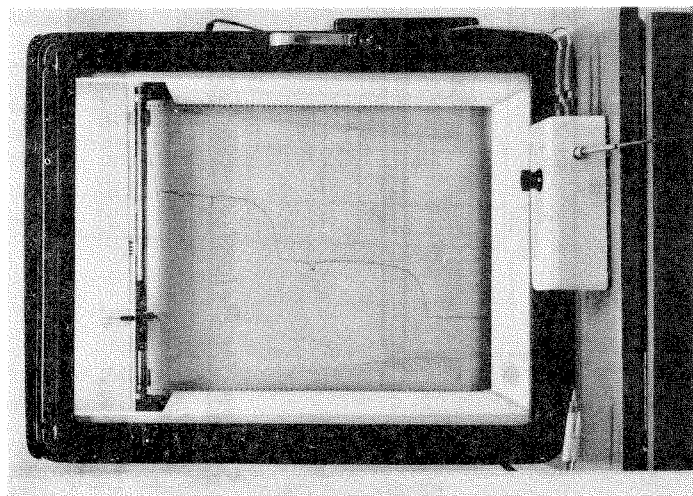
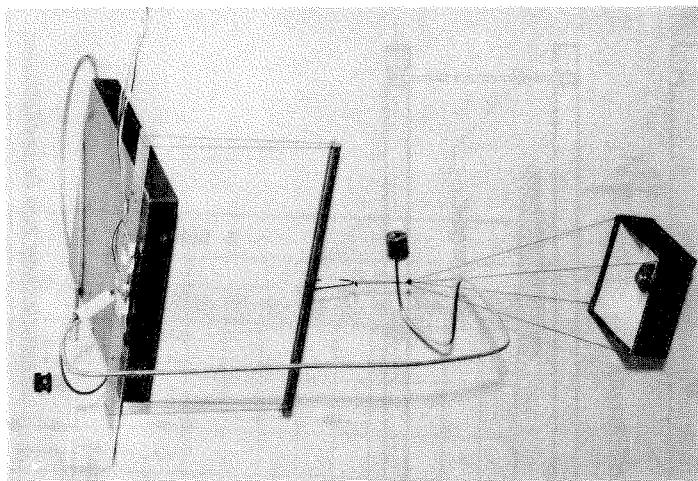
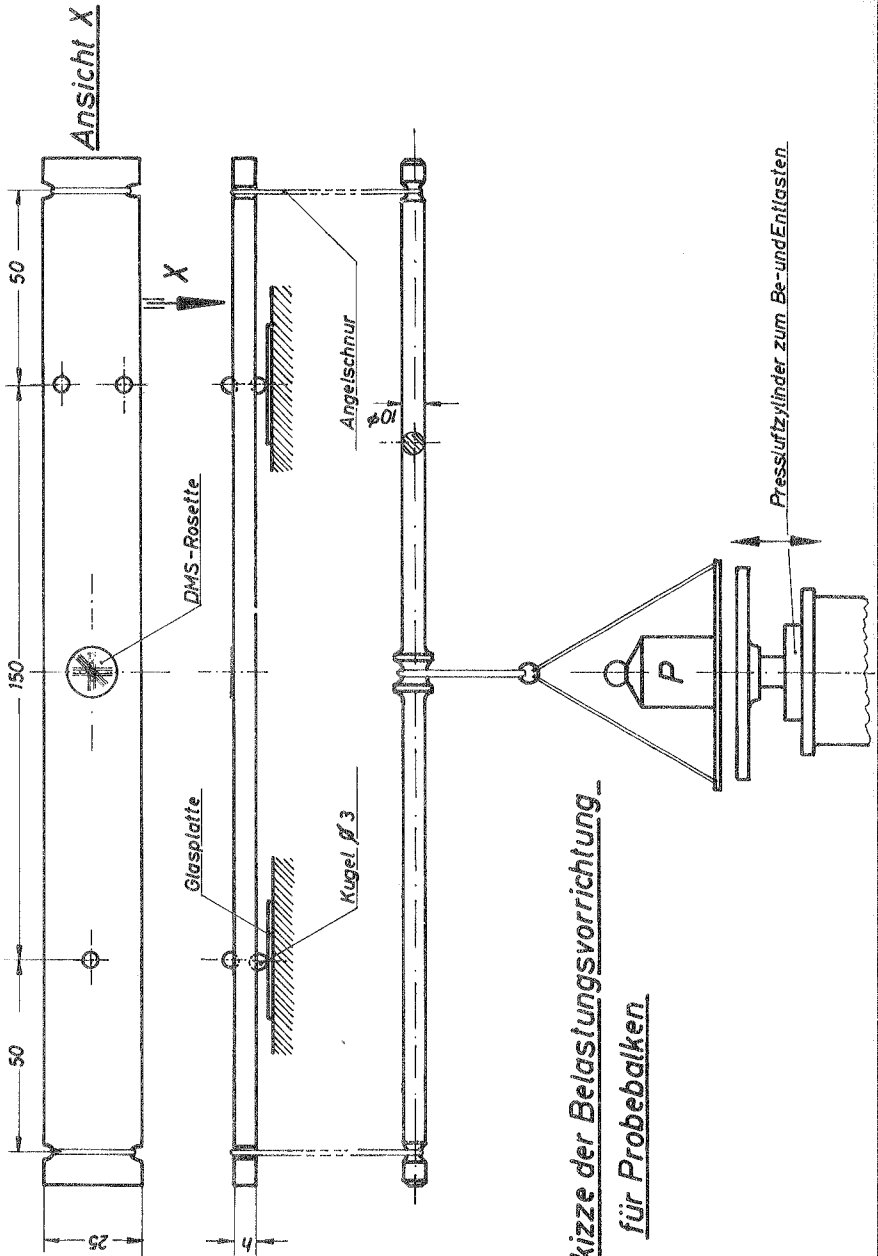


Bild 1: Temperaturmeßgerät



**Bild 2: Temperaturmessung am
Probekasten**



Skizze der Belastungsvorrichtung
für Probekörper

Einfluß von Meßstrom und Vorheizung auf Messungen mit Dehnmeßstreifen-Rosetten

[illegible]

Einfluß des Meßstromes auf Messungen mit Einzel- dehnmeßstreifen

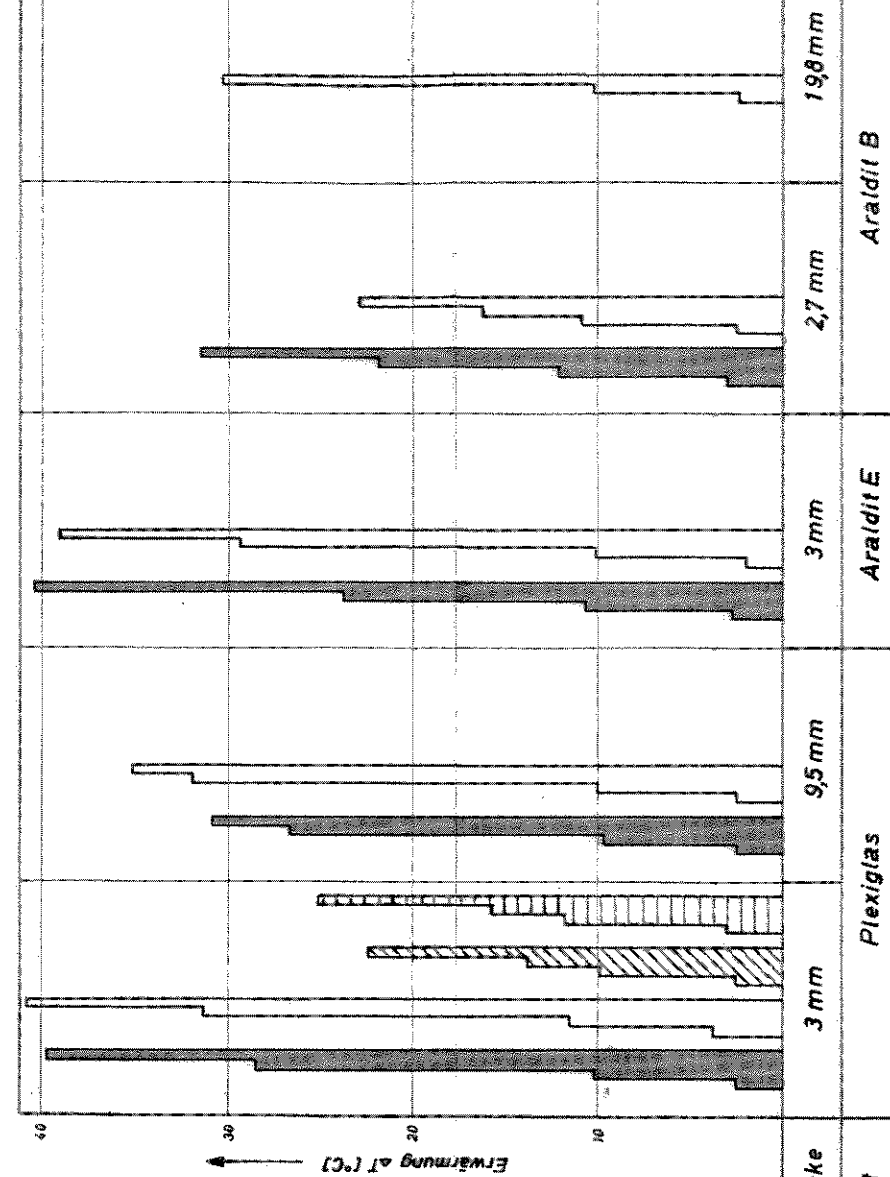
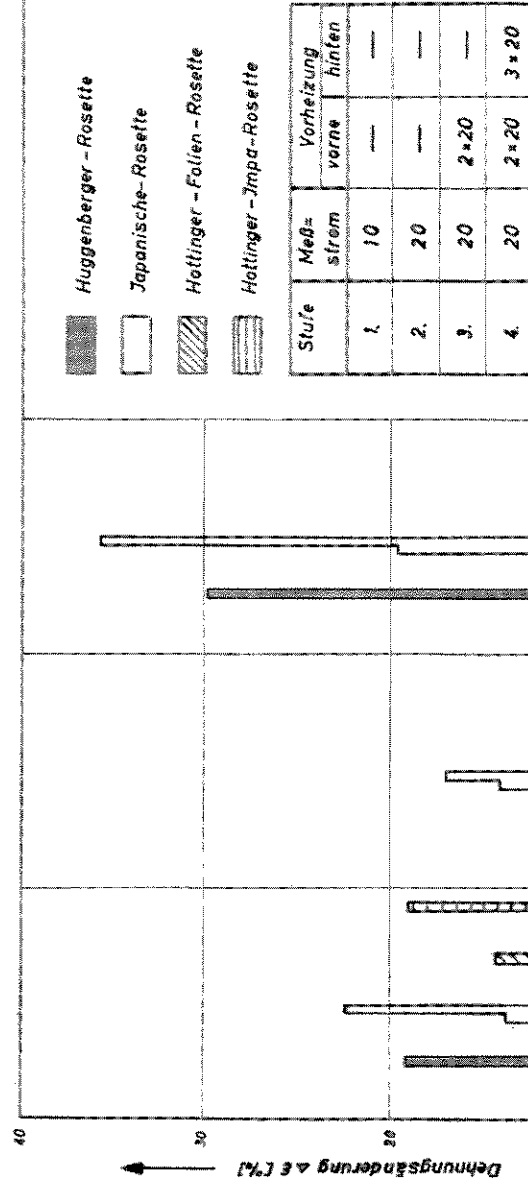
Anlage 28

DMS	Beanspruchung		Plexiglas d=3mm							
	Art	P	ΔT_1	$\Delta \epsilon_1$	ΔT_6	$\Delta \epsilon_6$	ΔT_8	$\Delta \epsilon_8$	$\Delta \epsilon_8 / \Delta T_8$	
BP-1/120 B Huggenberger	Zug	1xP	2,8 °C	0,43 %	10,6 °C	1,1 %	12,7 °C	2,0 %	0,16	
		2xP	2,8 °C	0,49 %	10,3 °C	1,7 %	12,7 °C	2,2 %	0,17	
DMS	Druck	1xP	1,3 °C	0,09 %	6,0 °C	0,48 %			0,08	
		2xP	1,4 °C	0,40 %	6,0 °C	1,75 %			0,29	
Mittelwert			2,8 °C	0,44 %	10,7 °C	1,5 %	12,7 °C	2,1 %	0,17	
			1,4 °C		6,0 °C					
Japanischer DMS PL-3	Zug	1xP	5,6 °C	1,6 %	20,0 °C	5,9 %	25,7 °C	7,5 %	0,29	
		2xP	5,9 °C	1,5 %	20,2 °C	5,9 %	25,8 °C	6,7 %	0,26	
Mittelwert	Druck									
			5,8 °C	1,6 %	20,1 °C	5,9 %	25,8 °C	7,1 %	0,28	

Mittelwerte ΔT und $\Delta \varepsilon$ infolge Meßstrom und Vorheizung an DMS-Rosetten

Meßstrom mA		10 mA			20 mA			20 mA			20 mA		
Vorheizung mA		-			-			2 x 20 mA			2 x 20 + 3 x 20 (Rückseite)		
DMS-Rosette	Material	$\Delta T [^{\circ}C]$	$\Delta \varepsilon [\%]$	$\frac{\Delta T}{\Delta \varepsilon} \left[\frac{^{\circ}C}{\%} \right]$	$\Delta T [^{\circ}C]$	$\Delta \varepsilon [\%]$	$\frac{\Delta T}{\Delta \varepsilon} \left[\frac{^{\circ}C}{\%} \right]$	$\Delta T [^{\circ}C]$	$\Delta \varepsilon [\%]$	$\frac{\Delta T}{\Delta \varepsilon} \left[\frac{^{\circ}C}{\%} \right]$	$\Delta T [^{\circ}C]$	$\Delta \varepsilon [\%]$	$\frac{\Delta T}{\Delta \varepsilon} \left[\frac{^{\circ}C}{\%} \right]$
Huggenberger	Plexiglas 3mm	2,5	0,83	0,33	10,1	2,5	0,25	28,5	9,7	0,34	39,8	19,2	0,48
	Plexiglas 9,5mm	2,5	0,67	0,27	9,7	1,7	0,18	26,8	7,7	0,29	30,9	11,8	0,38
	Araldit E 3mm	2,7	0,69	0,26	10,7	2,1	0,20	23,8	9,3	0,39	40,4	29,9	0,74
	Araldit B 2,7mm	3,0	0,71	0,24	12,1	2,2	0,18	21,9	6,5	0,24	31,5	7,5	0,30
	Mittelwert	2,7	0,73	0,27	10,7	2,1	0,20	25,3	8,3	0,31	35,7	17,1	0,48
Japanische	Plexiglas 3mm	2,8	1,48	0,53	11,6	5,0	0,43	31,4	13,7	0,43	40,4	22,4	0,55
	Plexiglas 9,5mm	2,5	1,2	0,48	10,0	4,9	0,49	31,9	14,1	0,44	35,2	16,9	0,48
	Araldit E 3mm	2,0	0,83	0,42	10,2	4,4	0,43	29,4	19,6	0,67	39,1	35,6	0,91
	Araldit B 2,7mm	2,5	0,68	0,27	10,9	2,1	0,19	16,2	3,8	0,23	22,9	6,5	0,28
	Araldit B 19,8 mm	2,3	0,79	0,34	10,2	4,1	0,40	30,3	9,6	0,32	-	-	-
	Mittelwert	2,4	1,0	0,41	10,6	4,1	0,39	27,8	12,2	0,42	34,4	20,4	0,56
Huggenberger	Plexiglas 3mm	2,5	0,83	0,33	10,1	2,5	0,25	28,5	9,7	0,34	39,8	19,2	0,48
Japanische		2,8	1,48	0,53	11,6	5,0	0,43	31,4	13,7	0,44	40,4	22,4	0,55
Hottinger Folie		2,6	1,3	0,51	9,9	3,7	0,37	13,8	7,2	0,52	22,5	14,3	0,63
Hottinger Jmpa		3,1	1,7	0,53	11,8	5,2	0,44	15,7	8,8	0,56	25,1	19,0	0,76
Mittelwert		2,8	1,3	0,48	10,9	4,1	0,38	29,95 14,75	11,7 8,0	0,39 0,54	40,1 23,8	20,8 16,7	0,52 0,70

Erwärmung ΔT und Dehnungsänderung $\Delta \epsilon$ infolge Meßstrom und Vorheizung
von DMS-Rosetten auf Kunstharzen



Material

Dicke

Plexiglas

9,5 mm

3 mm

Araldit E

2,7 mm

Araldit B

19,8 mm

Plexiglas $d=3\text{ mm}$, Huggenberger Rosette im Zugbereich

Anlage 31

Meßstrom mA											
10						20					
P	ε	P/ε	(P/ε) _m	T ₀	T ₁₀	P	ε	P/ε	(P/ε) _m	T ₀	T ₂₀
[P]	[μD]	[ρ/μD]	[ρ/μD]	[°C]	[°C]	[P]	[μD]	[ρ/μD]	[ρ/μD]	[°C]	[°C]
84	110,1	0,763				84	112,4	0,747			
182	2520	0,722	0,730	17,7	21,6	182	2562	0,710	0,719	17,7	28,5
364	5163	0,705				364	5233	0,696			
182	2643	0,689				182	2677	0,680			
364	5399	0,674	0,681	253	283	364	5490	0,663	0,671	253	354
Änderung infolge T ₀						Änderung infolge T ₀					
										0,048 = 6,7 %	6,9
										0,0105 1,5 %	
										7,0	
										Mittelwert 7,25	
Änderung infolge Meßstrom						(P/ε) - (P/ε) _m					
T ₂₀ - T ₁₀						10					
						1,5 %					
						0,011 1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					
						1,5 %					

Araldit B, d=3 mm, Huggenberger Rosette im Zugbereich

Meßstrom mA												Änderung infolge Meßstrom	
10						20						$T_{20}-T_{10}$	$\frac{(P/E)_{10}-(P/E)_{20}}{(P/E)_{20}}$
P	E	P/E	(P/E) _m	T ₀	T ₁₀	P	E	P/E	(P/E) _m	T ₀	T ₂₀		
[p]	[µD]	[p/µD]	[p/µD]	[°C]	[°C]	[p]	[µD]	[p/µD]	[p/µD]	[°C]	[°C]		
219	386,8	0,566				219	387,7	0,565					
269	475,1	0,566	0,566	17,8	20,7	269	476,2	0,565	0,565	17,8	29,4	8,7	0,0015 0,273%
319	562,6	0,567				319	564,6	0,565					
219	390,9	0,560				219	393,1	0,557					
269	480,8	0,559	0,559	24,5	27,3	269	485,4	0,554	0,555	24,8	35,8	8,5	0,0042 0,757%
319	571,4	0,558				319	575,8	0,554					
Änderung infolge T ₀			0,007 = 1,258 %	6,7	6,6	Änderung infolge T ₀			0,010 = 1,738 %	7,0	6,4	8,6	0,0029 0,515%
				6,65						6,7			

Temperaturänderung der Umgebung $\Delta T_0 = 6,7^\circ\text{C} \rightarrow \Delta P/E = 1,5\% \rightarrow 0,22\% / ^\circ\text{C}$
 Temperaturänderung durch Meßstrom $\Delta T = 8,6^\circ\text{C} \rightarrow \Delta P/E = 0,515\% \rightarrow 0,060\% / ^\circ\text{C}$

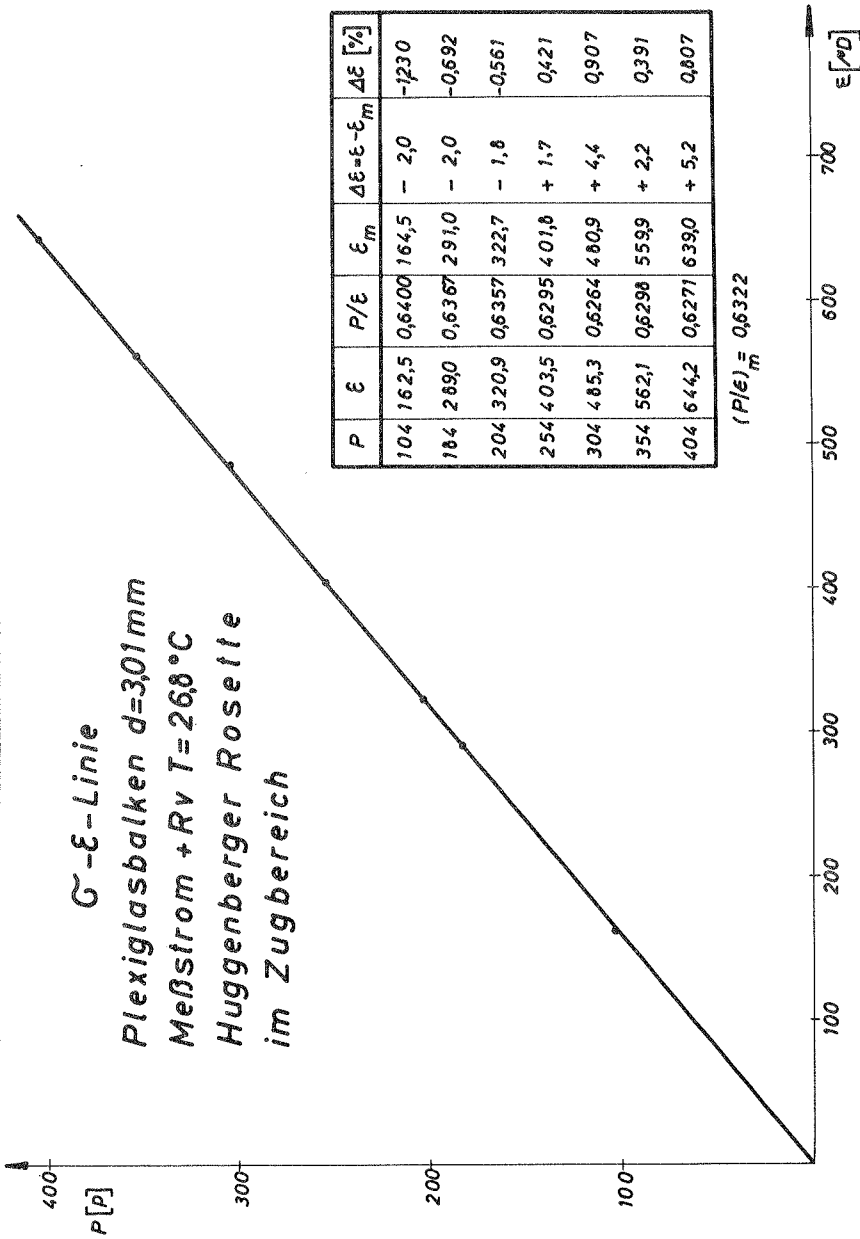
σ - ϵ -Linie

Plexiglasbalken $d=301\text{mm}$

Meßstrom + Rv $T=26,8^\circ\text{C}$

Huggenberger Rosette

im Zugbereich



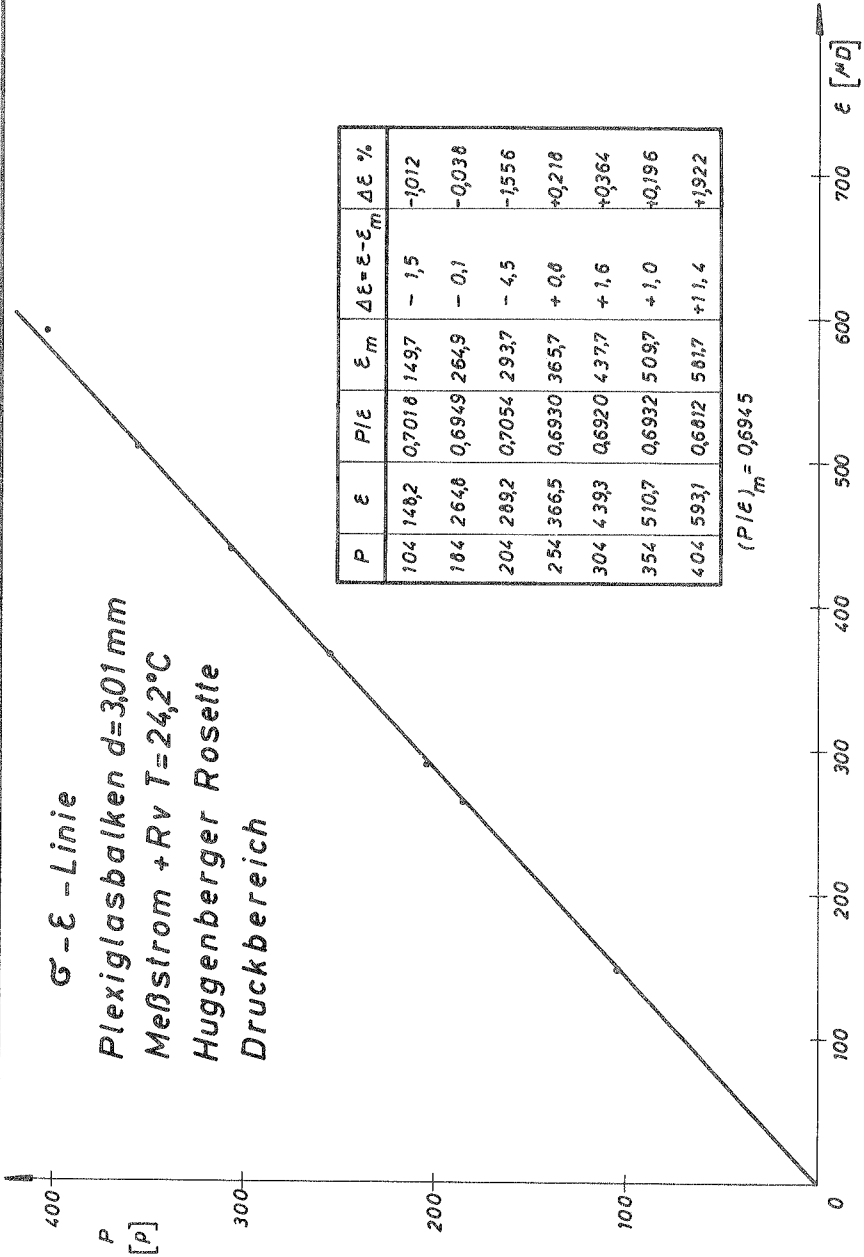
$\sigma - \epsilon$ - Linie

Plexiglasbalken $d=301\text{ mm}$

Meßstrom + Rv $T=24,2^\circ\text{C}$

Huggenberger Rosette

Druckbereich



σ - ϵ -Linie

Plexiglasbalken $d=301\text{mm}$

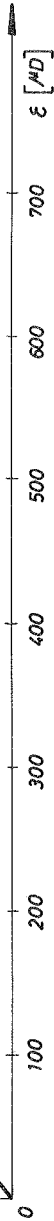
Meßstrom + 2xVH $T=344^\circ\text{C}$

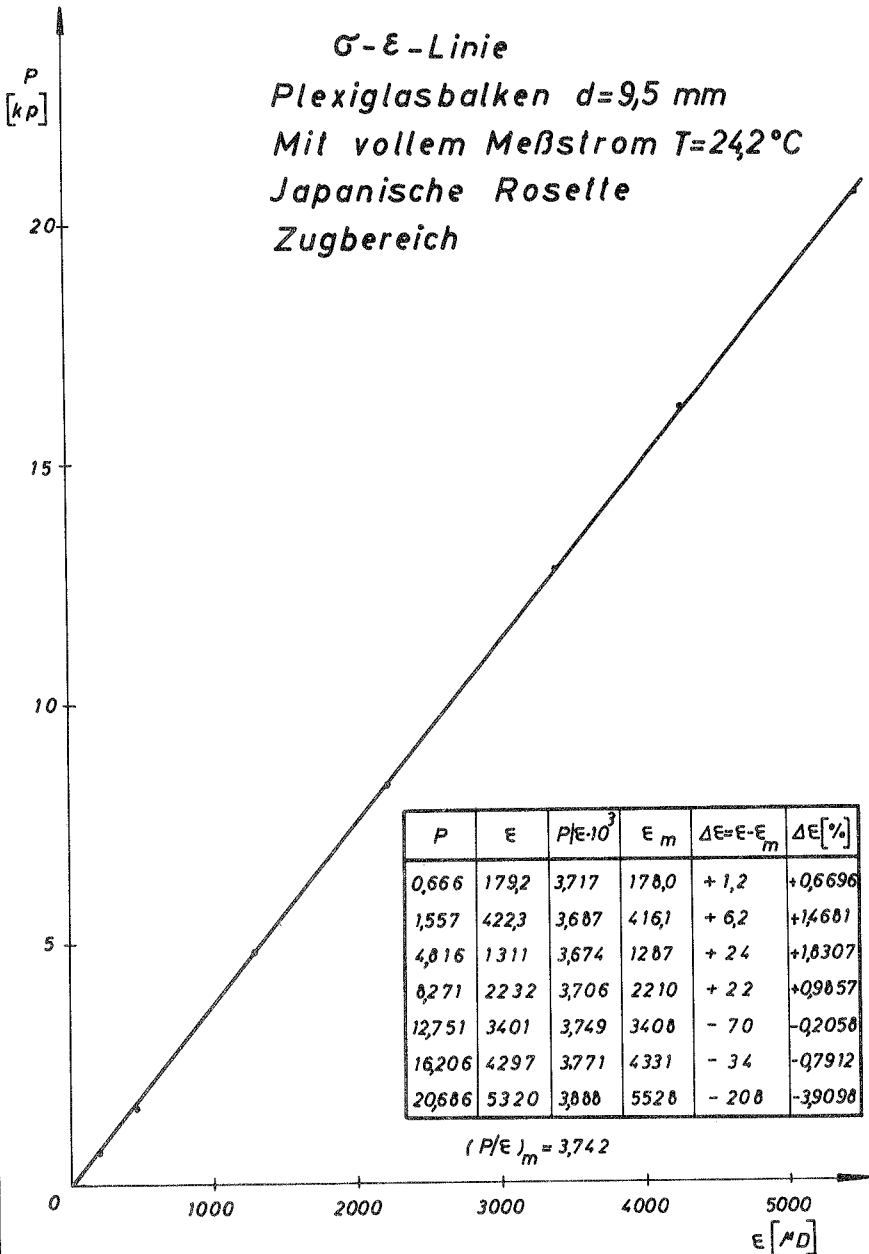
Huggenberger Rosette

im Zugbereich

P	ϵ	P/ϵ	ϵ_m	$\Delta\epsilon = \epsilon - \epsilon_m$	$\Delta\epsilon [\%]$
104	179,6	0,5796	180,2	- 0,6	- 0,3330
184	316,8	0,5808	318,9	- 2,1	- 0,6585
254	440,6	0,5765	440,2	+ 0,4	+ 0,0909
304	529,3	0,5743	526,8	+ 2,5	+ 0,4746
354	615,3	0,5753	613,5	+ 1,8	+ 0,2934
404	701,6	0,5758	700,1	+ 1,5	+ 0,2143

$$(P/\epsilon) = 0,5771_m$$





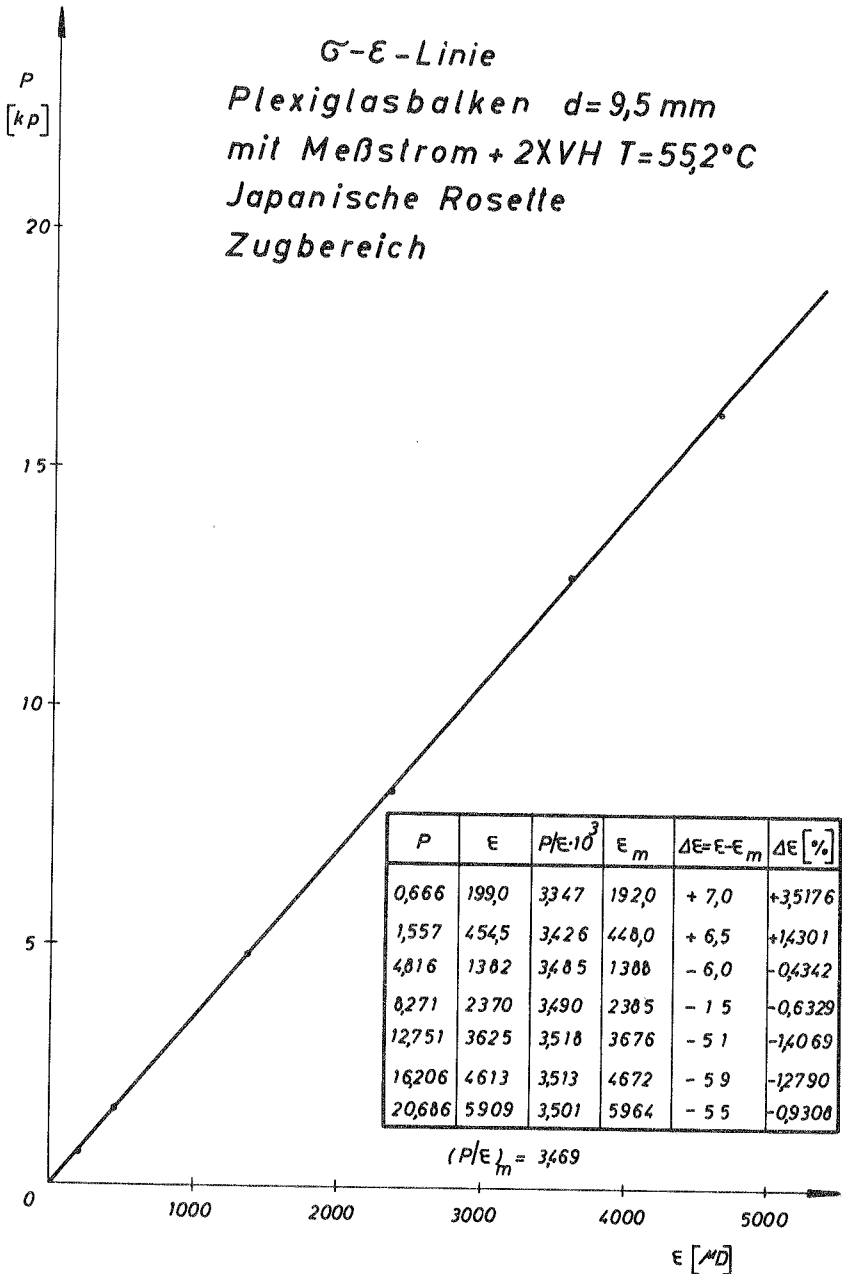
σ - ϵ -Linie

Plexiglasbalken $d=9,5\text{ mm}$

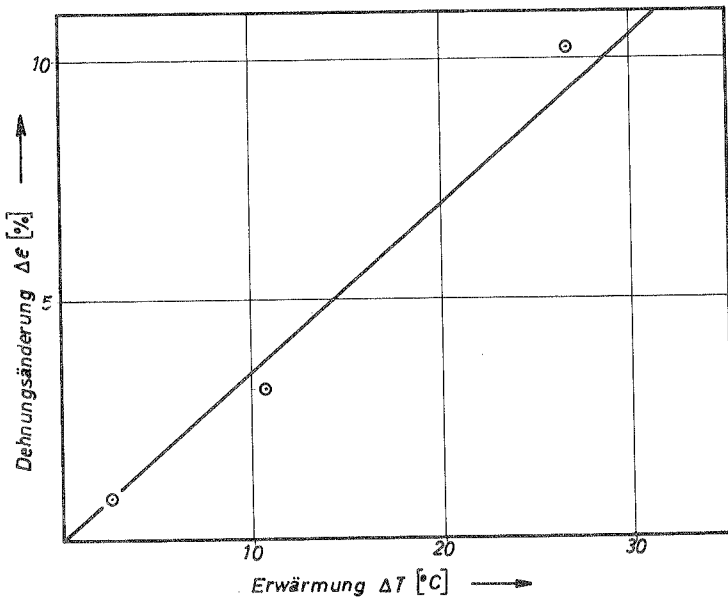
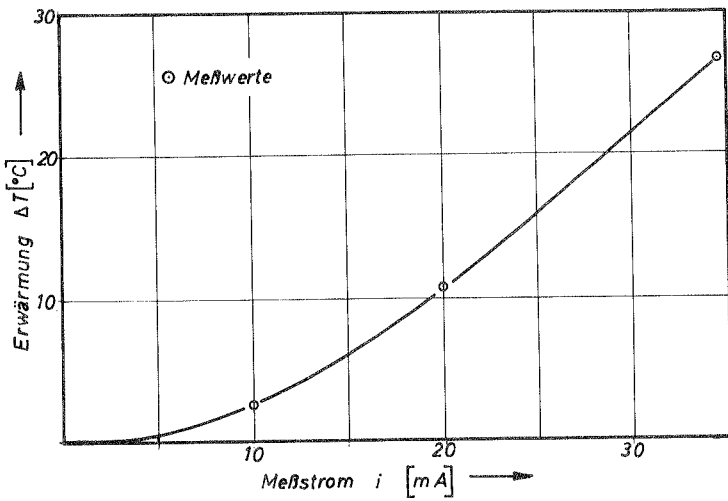
mit Meßstrom + 2XVH $T=55,2^\circ\text{C}$

Japanische Rosette

Zugbereich

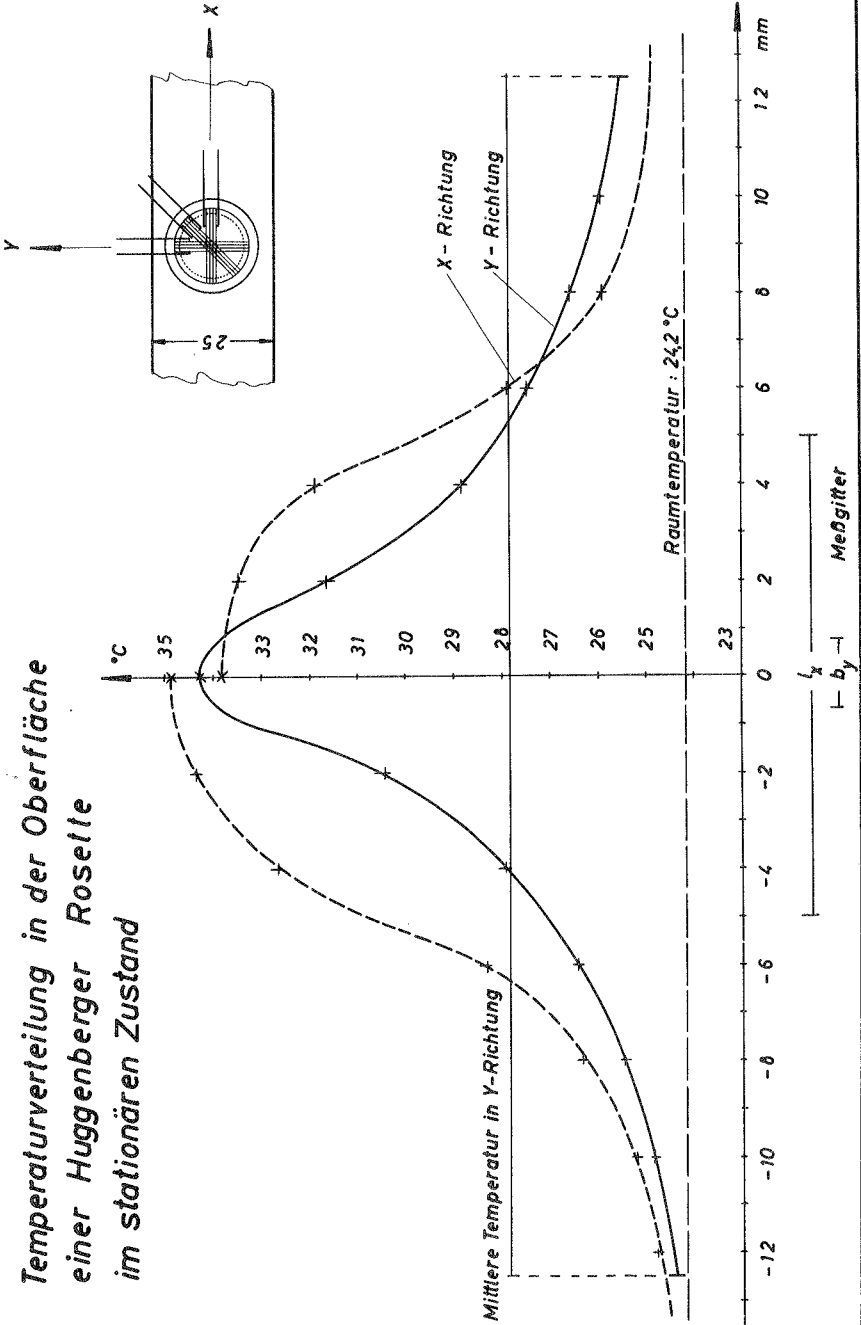


Erwärmung in Abhängigkeit vom Meßstrom



Dehnungsänderung in Abhängigkeit
von der Erwärmung

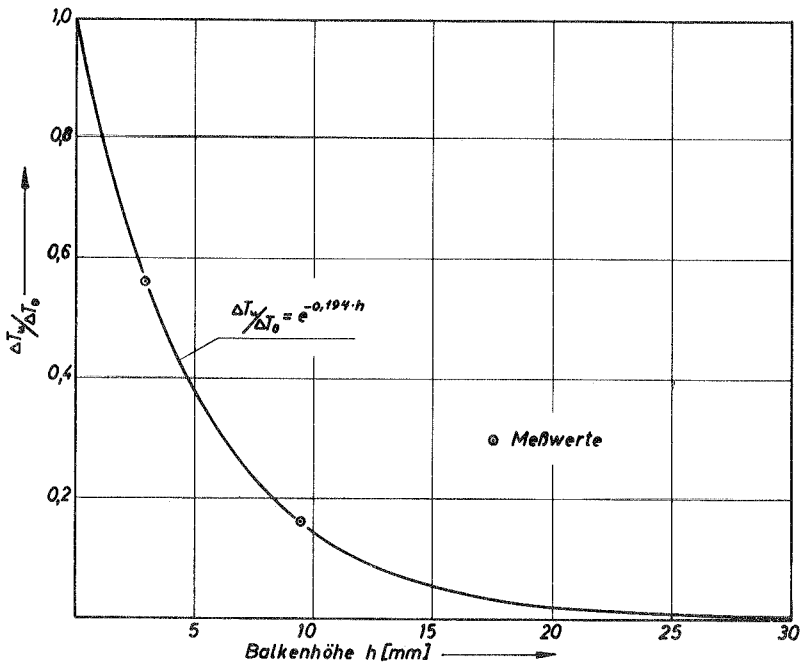
Temperaturverteilung in der Oberfläche einer Huggenberger Rosette im stationären Zustand

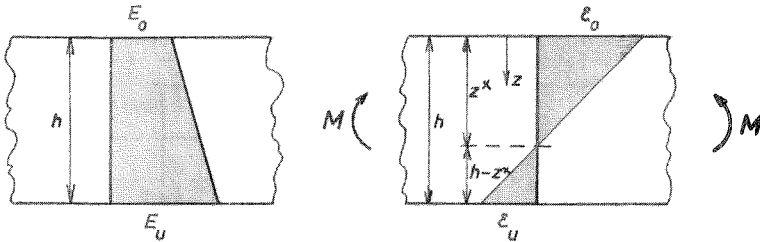


Mittelwerte der Erwärmung und Dehnungsänderung

Erwärmung ΔT [°C]															
h	3 mm						9,5 mm						Dehnungsänderung $\Delta \varepsilon$ [%]		
ΔT	oben			unten			oben			unten					$\frac{\Delta T_u}{\Delta T_o}$
Rosette	Hugg.	Jap.	Mittel	Hugg.	Jap.	Mittel	Hugg.	Jap.	Mittel	Hugg.	Jap.	Mittel	Hugg.	Jap.	Mittel
10	2,7	2,4	2,6	1,52	1,58	1,6	2,5	2,5	2,5	0,3	0,4	0,4	0,73	1,00	0,87
Messstrom															
20	10,7	10,6	10,7	5,9	5,6	5,8	9,7	10,0	9,9	1,2	1,8	1,5	2,1	4,1	3,1
34,6	25,3	27,8	26,6	15,7	14,3	15,0	26	31,9	29,4	3,8	4,6	4,2	8,3	12,2	10,25
Mittelwert $\frac{\Delta T_u}{\Delta T_o} = 0,57$							Mittelwert $\frac{\Delta T_u}{\Delta T_o} = 0,15$								

$\Delta T_w / \Delta T_0$ in Abhängigkeit von der Balkenhöhe h für
Balken von 25mm Breite



Balken mit über die Höhe linear veränderlichem E-Modul

$$E_0 = (1 - \Delta T_0 \cdot \eta) \cdot E;$$

$$E_u = (1 - \Delta T_u \cdot \eta) \cdot E$$

$$\lambda = \frac{E_0}{E_u} = \frac{1 - \Delta T_0 \cdot \eta}{1 - \Delta T_u \cdot \eta}$$

$$\text{Höhe: } h; \quad \text{Breite: } b = 1$$

$$1. \quad E(z) = E_0 + \frac{z}{h} (E_u - E_0)$$

$$2. \quad \varepsilon(z) = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{z}{h}\right)$$

$$3. \quad z^x = \frac{h}{3} \frac{1 + 2\lambda}{1 + \lambda}$$

$$4. \quad \sigma(z) = \varepsilon_0 E_0 \left[1 - \frac{z}{h} (1 + \lambda + \frac{3(1 + \lambda)}{1 + 2\lambda}) + \frac{z^2}{h^2} \frac{3(1 + \lambda^2)}{1 + 2\lambda} \right]$$

$$5. \quad \varepsilon_0 = \frac{M_6}{E_0 h^2} \nu = \frac{M_6}{E_0 h^2} \frac{2(1 + 2\lambda)}{1 + 4\lambda + \lambda^2} \quad \nu = \frac{2(1 + 2\lambda)}{1 + 4\lambda + \lambda^2}$$

$$6. \quad \text{Balken mit konstantem } E: \varepsilon = \frac{M_6}{E h^2}$$

$$7. \quad \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} = \frac{\nu}{(1 - \Delta T_0 \cdot \eta)} = \frac{2(1 + 2\lambda)}{1 + 4\lambda + \lambda^2} \cdot \frac{1}{(1 - \Delta T_0 \cdot \eta)}$$

Grenzfälle:

$$1. \quad \lambda = 1 \quad E_u = E_o \quad z^* = h/2$$

$$\sigma(z) = \epsilon_o E_o \left(1 - \frac{2z}{h}\right)$$

$$\sigma(z = h) = -\epsilon_o E_o \rightarrow \epsilon_1 = -\epsilon_2$$

$$\epsilon_o = \frac{M_6}{E_o h^2}$$

$$2. \quad \lambda = 0 \quad E_u = 0 \quad E_u \ll E_o$$

$$z^* = \frac{h}{3}$$

$$\sigma(z) = \epsilon_o E_o \left(1 - 4 \frac{z}{h} + 3 \frac{z^2}{h^2}\right)$$

$$\sigma(z = h) = 0 \quad \epsilon_u = -2\epsilon_o$$

$$\epsilon_o = \frac{M_6}{E_o h^2} \cdot 2$$

$$3. \quad \lambda = \infty \quad E_o = 0 \quad E_o \ll E_u$$

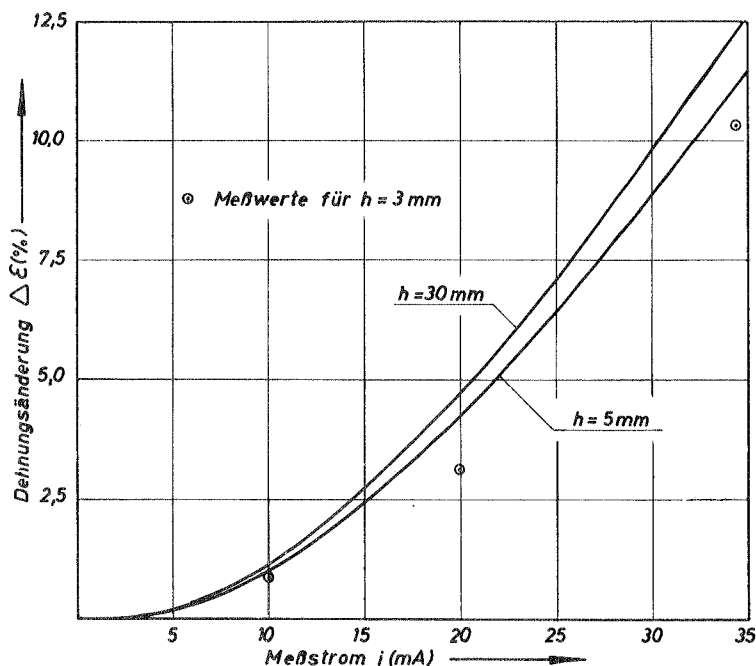
$$z^* = \frac{2}{3} h$$

$$\sigma(z) = E_u \epsilon_o \left(\frac{z}{h} - \frac{3}{2} \frac{z^2}{h^2}\right)$$

$$\sigma(z = h) = -\frac{1}{2} \epsilon_o E_u \quad \epsilon_u = -\frac{1}{2} \epsilon_o$$

$$\epsilon_o = \frac{M_6}{h^2 E_u} \cdot 4$$

Dehnungsänderung $\Delta \varepsilon(\%)$ in Abhängigkeit vom Meßstrom $i(\text{mA})$ und der Balkenhöhe $h(\text{mm})$ für einen Balken von 25mm Breite (berechnet).



$h \backslash i$	5	10	15	20	25	30	35
0	0,136	0,813	1,940	3,431	5,197	7,141	9,148
5	0,167	1,034	2,390	4,232	6,286	8,830	11,326
10	0,179	1,072	2,559	4,529	6,733	9,437	12,096
15	0,183	1,098	2,622	4,639	6,898	9,660	12,378
20	0,185	1,109	2,646	4,681	6,962	9,745	12,485
25	0,186	1,112	2,656	4,697	6,985	9,777	12,525
30	0,186	1,114	2,659	4,703	6,995	9,790	12,541

L e b e n s l a u f

- 6.11.1925 geboren in Darmstadt als Sohn des Kaufmannes
Otto Karl Müller
- 1932 - 1936 Besuch der Volksschule in Darmstadt
- 1936 - 1943 Besuch des Alten Realgymnasiums in Darmstadt
- 1943 - 1947 Militärdienst bei der Deutschen Luftwaffe und
russische Kriegsgefangenschaft
- 1947 - 1948 Altes Realgymnasium Darmstadt, Abitur
- 1948 - 1954 Studium der Mathematik und Physik an der Tech-
nischen Hochschule Darmstadt
Diplom-Hauptprüfung am 16.2.1954
- 1954 - 1955 Statiker bei der Firma Grün & Bilfinger AG.,
Mannheim
- 1955 - 1960 Assistent am Institut für Massivbau der Tech-
nischen Hochschule Darmstadt
Promotion am 23.2.1960
- Seit 1960 Leiter des Instituts für Spannungsoptik und
Modellmessungen der Technischen Hochschule
Stuttgart