

Arch.

MATERIALPRÜFUNG

MATERIALS TESTING

MATÉRIAUX ESSAIS ET
RECHERCHES

HERAUSGEBER: DEUTSCHER VERBAND FÜR MATERIALPRÜFUNG (DVM)

Prüfprotokoll

Verwendete ZWICK-Zugprüfmaschine Baureihe 1400
Firma Stahlwerke ~~Walden~~
Prüftechniker H. Fritsch
Datum Mai 1971

Versuch

Ermittlung der technischen Elastizitätsgrenzen nach DIN 50 143
(0,005 Dehngrenze und 0,01 Dehngrenze)

Diagramm

Kraft-Dehnungs-Diagramm

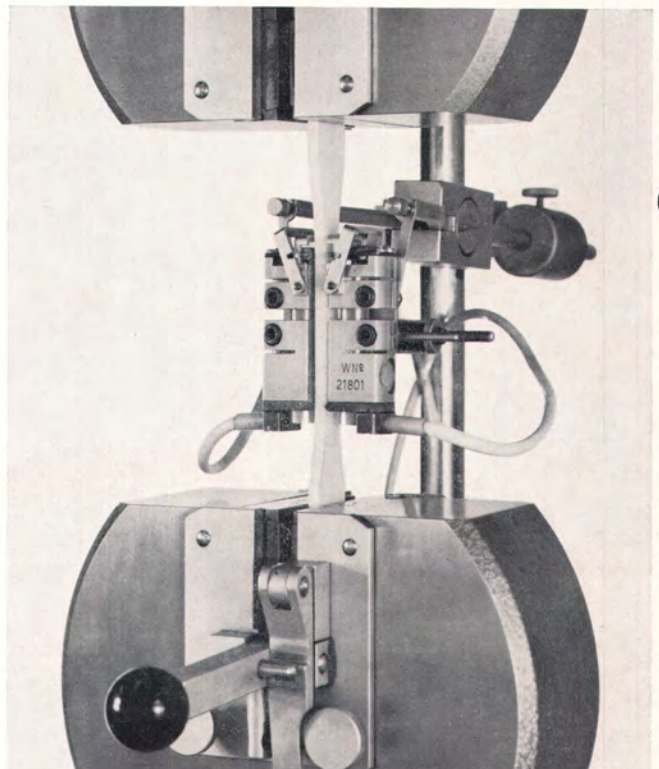
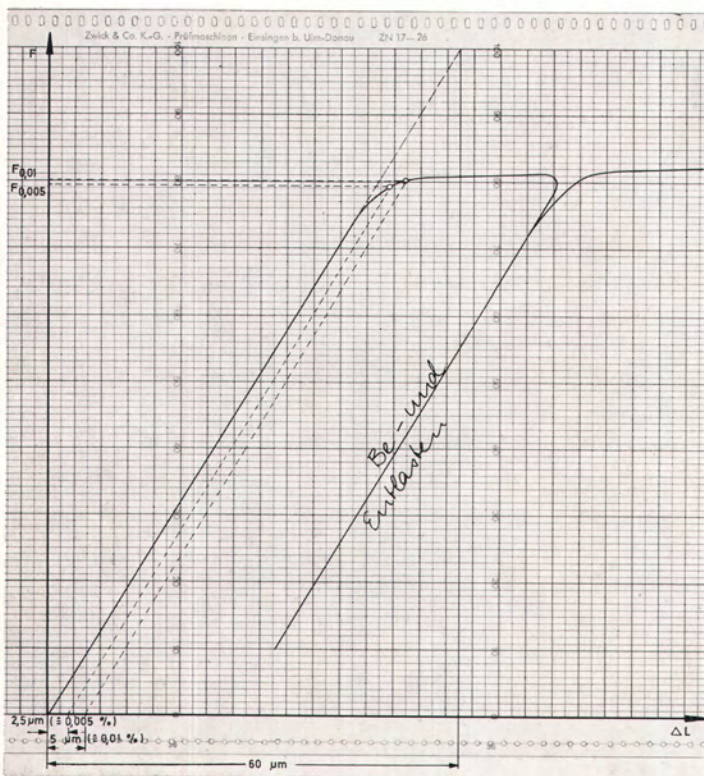
Prüfmaterial Tiefzieblech St 13.04
Probenform Zugprobe E 1 x 20 x 50
Kraftmeßbereich 500 kp \cong 250 mm
Dehnungsmeßbereich 0,2% \cong 250 mm
Meßlänge 50 mm
Prüfgeschwindigkeit 1 mm/min
E-Modul ca. 20 800 kp/mm²
Elastizitätsgrenze _____
0,005-Grenze 19,3 kp/mm²
0,01-Grenze 20 kp/mm²

Bemerkungen

Das Meßsystem arbeitet praktisch hysteresefrei, das beweist der Kurvenabschnitt "Be- und Entlasten" im plastischen Bereich.

Die Dehnung wird vom ZWICK-Ansatz-Dehnungsaufnehmer kontinuierlich gemessen und vom Anzeige- und Schreibgerät registriert.

Vorteil: Stufenweises Be- und Entlasten (wie beim Martens-Aufnehmer) entfällt. Einsparung an Bedienungszeit und Bedienungspersonal.



Für ausführlichere Information genügt eine Karte mit der Kennziffer 1400 an

ZWICK & Co. KG
Werkstoffprüfmaschinen
D-7901 Einsingen ü. Ulm
Telefon: (07305) 101
Telex: 07 12830



Dehnungsmessung im Innern von Körpern



Von Richard Bares, Prag

DK 531.781.2: 621.317.39

Materialprüf. 13 (1971) Nr. 6 S. 193/98 (8 Fig. 2 Tab. 3 Ref.)

Manuskript-Eing. 28. Januar 1971

Strain measurements inside bodies

Détermination des déformations à l'intérieur des solides

Inhaltsangabe

Für die Untersuchung des inneren Spannungszustandes von Körpern ist es oft erforderlich, die Verformungen an maßgebenden Stellen im Innern des Körpers direkt experimentell zu bestimmen. Einige Ergebnisse von Untersuchungen mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen in viskosen sowie festen Stoffen, auch beim Erstarren und Aushärten, werden dargelegt. Es wird aufgeführt, unter welchen Umständen man solche Messungen durchführen kann. Einige Grundsätze des Arbeitsganges werden angedeutet, und eine Möglichkeit zur Bestimmung der Volumenänderungen des Stoffes, die durch den Übergang aus der flüssigen in die feste Phase entstehen, wird gezeigt.

Summary

Research of the internal stress conditions of bodies often requires a direct experimental measurement of the strain conditions at characteristic points inside the body. The author discusses some results of investigations inside materials by means of strain gauges in both solid and viscous materials and moreover during the hardening of these materials. The circumstances making possible these measurements are indicated as well as the principles of the working procedures. The possibility of finding out the volume changes in matter as a result of its transition from liquid to solid phase is also demonstrated.

Résumé

Afin d'étudier l'état de contraintes internes dans des solides, il est souvent désirable de les vérifier aux endroits caractéristiques d'une manière expérimentale directe. L'auteur présente des résultats obtenus lors d'une investigation relative à l'application des jauges de contraintes à l'intérieur des solides, des liquides visqueux et des matières en état prise. On a établi les conditions nécessaires afin que la méthode puisse être employée et on a aussi indiqué le procédé du travail. Il est démontré comment on peut déterminer les variations de volume d'un milieu qui naissent à cause du passage de ce milieu d'une phase liquide à une phase solide.

1. Einleitung

Die Erforschung des inneren Spannungszustandes von Festkörpern erfordert häufig eine experimentelle Überprüfung des Verformungszustandes in mehreren, nicht nur an der Oberfläche liegenden charakteristischen Bereichen. Schwierig ist das Messen der Verformung im Material während des Übergangs aus der flüssigen in die feste Phase, weil hierbei immer thermische Verformungen überlagert sind und der Temperaturgradient vom Rand ins Körperinnere verhältnismäßig groß ist. Ebenso ändert sich während der Erstarrung auch die Adhäsion in der Umgebung des Meßelementes. Dies tritt insbesondere beim Erstarren von makromolekularen Substanzen (Polymerisation, Polykondensation) hervor, die uns besonders interessierten.

Das Messen im Innern von Materialien bringt — entgegen der üblichen Oberflächenmeßtechnik — eine Reihe von Problemen mit sich. Grundsätzlich sind Miniaturmeßelemente zu benutzen, die den inneren Spannungszustand des untersuchten Systems nur vernachlässigbar beeinflussen. Dadurch wird die Anzahl der brauchbaren Methoden stark eingeschränkt. Von diesen ist die Anwendung von Halbleiter-, Folienwiderstands- und Drahtdehnungsmeßstreifen (Draht-DMS) am geläufigsten. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde die Anwendbarkeit von Draht-DMS untersucht; die Mehrzahl der Beobachtungen kann jedoch sofort auch auf andere Typen übertragen werden.

Das Problem der Messung von Verformungen im Innern von Körpern ist unterschiedlich, je nachdem die Verformung innerhalb des Materials nach dem Erstarren oder im nichterstarren Zustand und während des Erstarrens bestimmt werden soll. Es werden einige Ergebnisse der experimentellen Untersuchung von festen, flüssigen und erstarrenden Materialien mit einge-

legten Draht-DMS vorgelegt. Modellstoffe für die Prüfkörper bildeten Epoxidharz und Kopolymerisat-Styrol-Epoxid als Matrix und mechanisch stark unterschiedliche Einschlüsse aus Quarzglas; die DMS kamen in allen Fällen mit der nicht erstarrten Matrix in Berührung.

2. Messung der Verformung in homogenen Festkörpern

Ein innerhalb eines Körpers angebrachter DMS gibt einen vor allem durch seine Lage bezüglich der von außen einwirkenden Materialbeanspruchung beeinflussten Meßwert an. Nichtsdestoweniger können auch die Abmessungen des Körpers bzw. deren Verhältnis zu den DMS-Abmessungen und zum Abstand des DMS von der Körperoberfläche sowie die Auswirkungen der Form (im Zusammenhang mit Volumenänderungen beim Erstarren) die Messung beeinflussen.

Es hat sich gezeigt, daß die Abmessungen des Körpers lediglich bei sehr flachen Elementen als meßbare Werte zur Geltung kommen, wenn die Abmessungen des Körpers voneinander um mehr als 300% abweichen und wenn gleichzeitig die Deckschicht des DMS kleiner als das Zweifache seiner Abmessung in der zuständigen Richtung ist. Hinsichtlich der Wärmeabfuhr während der Erstarrung ist es vorteilhaft, nur die kleinste von den Oberflächen des Prüfkörpers uneingeformt zu lassen (z. B. Fertigung von hochkantgestellten Prüfprismen) und dabei darauf zu achten, daß die Abmessungen des Körpers wenigstens das Zweifache der Abmessung des DMS in der zur freien (uneingeformten) Fläche senkrechten Richtung betragen.

Falls diese Regeln beachtet werden, hat bei im Innern des Prüfkörpers untergebrachten DMS unter Beanspruchung durch eine äußere, zur Länge des DMS senkrechte Kraft, die Richtung der einwirkenden Kraft keinen Einfluß auf das Meßergebnis. Als Beispiel zeigt Fig. 1 — Experiment an Prüfwürfeln $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ — eine nur geringfügige Abweichung (bis 5%) der Meßwerte für den Fall einer senkrecht zur Fläche (Fall A) oder zur Kante (Fall B) des DMS einwirkenden Kraft.

Dr.-Ing. R. Bares, leitender wissenschaftlicher Mitarbeiter des Institutes der theoretischen und angewandten Mechanik der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Prag.

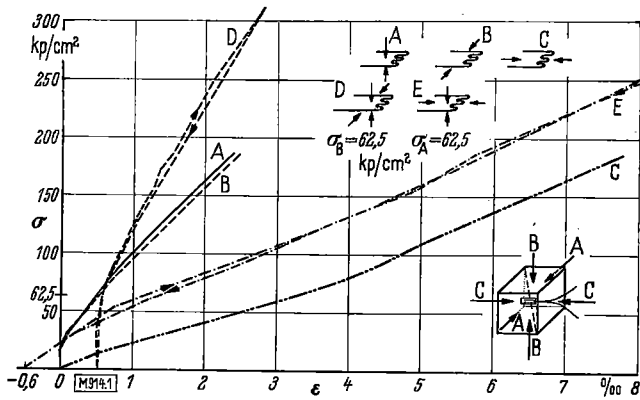


Fig. 1: Meßwerte eines sich innerhalb eines Körpers befindenden DMS in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart
4 cm × 4 cm × 4 cm

Strains as a function of loading type measured by a strain gauge embedded in a cube

Contraintes mesurées sous différents types de charge par une jauge à l'intérieur d'un cube

unabhängig vom Vorzeichen der Dehnungen
regardless of the sign of the strains

sans tenir compte du signe des déformations

Es wurde dabei nachgewiesen, daß die angeführte Differenz auch durch eine bestimmte Anisotropie des Prüfkörpermaterials nach der Gußrichtung (mit Hinsicht auf die Richtung der einwirkenden Kraft) verursacht wird.

Um Kenntnisse über das Verhalten eines räumlich beanspruchten DMS innerhalb eines Körpers zu gewinnen, wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt; einige Ergebnisse

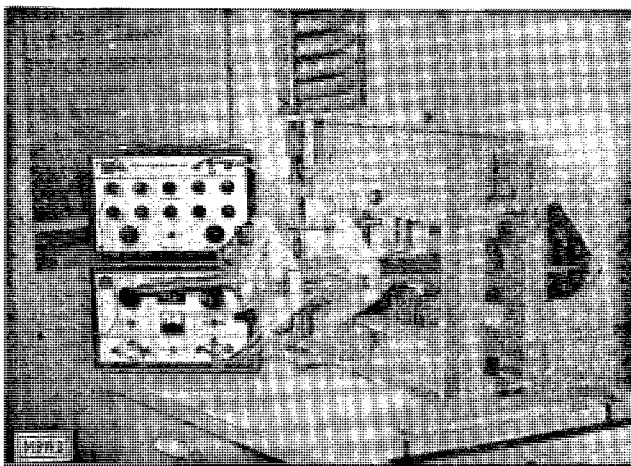


Fig. 2: Federeinrichtung zur Erzeugung eines zweiseitigen Druckes

Loading device producing a biaxial compression

Dispositif de chargement à produire une compression biaxiale

bei zweiseitigem Druck an Würfeln mit der in Fig. 2 dargestellten Prüfeinrichtung enthält Fig. 1. In beiden Fällen zeigte es sich, daß eine konstante Belastung in Querrichtung eine bestimmte Formänderung verursacht, die bei bis auf den gleichen Wert anwachsender Belastung in der zweiten (gleich, ob zum DMS

transversalen oder longitudinalen) Richtung sich nicht oder kaum ändert; weiterhin nimmt dann die Formänderung wieder wie im Fall ohne Zusatzbelastung zu. Offensichtlich wird, wie anhand der vorhergehenden Experimente zu erwarten war, das Material durch die Wirkung der Querkraft stärker beeinflusst (es wird starrer) als der DMS. Umgekehrt kann aus Meßwerten annähernd der Wert des Querdruckes bestimmt werden. Ein „normales“ Anwachsen der Formänderung mit zunehmender Belastung tritt erst bei Kräften ein, die den Querdruck übersteigen. Verständlicherweise macht sich der Querdruck bei Belastung in zwei Querrichtungen bei weitem ausgeprägter bemerkbar als bei Belastung in Richtung der Achse des DMS und senkrecht dazu.

3. Messung der Verformung an der Grenzfläche von zwei Festphasen

Bei Untersuchungen inhomogener Materialien interessiert gewöhnlich der Spannungszustand an der Grenzfläche zwischen zwei Festphasen, und zwar vornehmlich dann, wenn deren physikalische Eigenschaften markante Unterschiede aufweisen. Zu diesem Zweck wird der DMS an der Phasengrenze durch Ankleben an die eine der Phasen noch vor Bildung der anderen angebracht. Bei unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften geht es dann darum, ob der DMS die Verformung der einen oder der anderen Phase oder einen Zwischenwert mißt. Dies hängt selbstverständlich von einer Reihe von Umständen ab, hauptsächlich vom Trägermaterial des benutzten DMS im Vergleich zum Material der beiden Phasen und vom Typ des benutzten Klebstoffes. Die Antwort auf diese Frage illustriert einer der unternommenen Versuche.

Zwei DMS auf Papierträgern¹⁾ wurden an kreisförmigen Glaseinschlüssen mit zwei unterschiedlichen Klebstoffen befestigt: mit gewöhnlichem, vom Hersteller der DMS mitgeliefertem Aceton-Klebstoff²⁾ (Bezeichnung A) und mit Epoxidharz³⁾ (Bezeichnung E), das mit der Hauptkomponente der umgebenden Phase (Matrix) übereinstimmt⁴⁾. Nach dem Erhärten der Matrix wurde eine kreisförmige mit dem Einschuß vereinigte Platte hergestellt, deren Durchmesser das Siebenfache des Durchmessers des Einschlusses betrug; die Dicken von Platte und Einschuß waren die gleichen. Die DMS wurden an gegenüberliegenden Stellen in der Mitte des Einschlusses in Umfangsrichtung angeklebt, Fig. 3. Die Platte wurde sodann

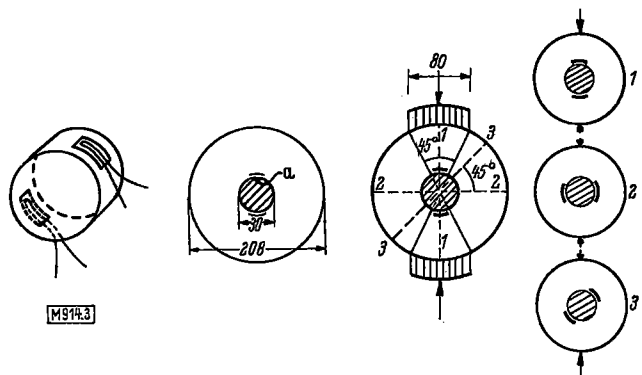


Fig. 3: Anordnung der DMS bei Messung an der Grenze von Festphasen

Arrangement of strain gauges for measurements at the solid phase

Arrangement des jauges pour des mesures à la limite de la phase solide

¹⁾ Mikrotechna — 120.

²⁾ Mikrotechna — Zement K.

³⁾ ChS Epoxy 110 + Härtemittel P1, Verhältnis 10:1.

⁴⁾ ChS Epoxy 110 (100 Gew.-Teile) Styrol und Härtemittel P1 im Verhältnis 44: 66 (20 Gew.-Teile).

nacheinander in drei verschiedenen Richtungen hinsichtlich der Lage des DMS einer Beanspruchung in ihrer Ebene durch zwei Lasten unterworfen, die gegeneinander auf die dem Ausschnitt von 45° entsprechende Fläche wirkten.

Im Fall einer Platte ohne Einschlüß betragen nach [1] die Spannungen im Punkt a (Berührungspunkt mit dem Einschlüß) auf der Verbindungslinie der Lastenmittelpunkte für eine Belastung $P = 1\ 000\text{ kp}$ und bei Abmessungen nach Fig. 3:

Querspannung (senkrecht zur Lastenverbindungsline) 15,4 kp/cm²,
Längsspannung (in Richtung der Lastenverbindungsline) 56,3 kp/cm²,
Längsspannung auf der Berührungsfläche 78,4 kp/cm².

Vom Studium der Spannung in einer Halbebene mit dem Einschlüß bei Belastung an der Oberfläche ist bekannt [2], daß transversale Zugspannungen im Punkt a bei Einschlüssen schnell anwachsen und Werte von etwa 70 bis 85% der Longitudinalspannung annehmen. In unserem Fall würde dies 39,4 bis 47,8 kp/cm² je 1 000 kp Belastung bedeuten.

Bei Belastung in Richtung 1 (senkrecht zu den DMS) wurden Verformungen gemessen, die zusammen mit den berechneten Werten⁵⁾ in Tab. 1 angegeben sind.

Tabelle 1
Verformung ϵ in Punkt a einer kreisförmigen Platte
Deformation ϵ at point a of a circular plate
Déformation ϵ à l'endroit a d'une plaque circulaire

Kraft kp	berechnet ohne Einschlüsse		berechnet bei Einschlüssen in einer Halbebene transversal ‰	gemessen, transversal	
	trans- versal ‰	longitu- dinal ‰		DMS E ‰	DMS A ‰
200	0,127	0,377	0,263 — 0,320	0,032	0,067
2300	1,180	4,329	3,030 — 3,680	0,812	2,700
3000	1,540	5,629	3,940 — 4,786	1,212	4,750

Die Meßdrähte der DMS sind von der Oberfläche des Glaseinschlusses⁶⁾ um eine nur sehr geringfügige Schicht der Größenordnung 0,1 mm entfernt (Klebstoffschicht + zugehöriger Teil der Dicke des DMS-Trägers). Trotzdem werden laut Anzeigen des DMS Formänderungen registriert (DMS E). Dies zeugt davon, daß mit der Entfernung von dem Einschlüß ein sehr jäher Anstieg der Verformung zustandekommt. Nach der Prüfung wurde erwiesen, daß die Verbundschicht zwischen DMS und Einschlüssen nicht gestört wurde. Dieser DMS mißt tatsächlich das gewogene Mittel der Verformung an seinen beiden Seiten: Er mißt z. T. die Einschlüß-, z. T. die Matrixverformung. Dagegen trennt sich der mit Aceton-Klebstoff befestigte DMS A offensichtlich sehr bald von dem Einschlüß und mißt dann überwiegend die Matrixverformung.

Bei Belastung in Richtung 2 stimmen die berechneten Werte der Längsverformung ungefähr mit den Meßwerten des DMS A überein, während die Angaben des DMS E wesentlich (ungefähr dreimal) kleiner sind. Dieser DMS mißt demnach auch in diesem Fall den „durchschnittlichen“ Wert der Verformung des Einschlusses und der Matrix. Bei dieser Belastungsart wurde auch dieser DMS von dem Einschlüß losgerissen⁷⁾. Darauf zeigten dann beide DMS, ähnlich wie bei der Entlastung, vollkommen übereinstimmende Verformungen. Dieses Experiment hat auch gezeigt, daß eine Zerstörung des Verbundes von zwei Festphasen durch Schub in Richtung der einwirkenden äußeren Kraft in mit dieser Kraft parallel verlaufenden Flächen zustande kommt.

Bei Belastung in Richtung 3 schließlich (45° zum vorhergehenden Belastungszustand) zeigen beide DMS geringfügige Verformung, was völlig mit der durch Sandfords Experimente [2] nachgewiesenen Aufteilung der Tangentialspannungen an der Berührungsstelle mit dem Einschlüß übereinstimmt: In der Umgebung einer Richtung von 45° zu der Richtung der einwirkenden Kraft sind sie gleich Null.

Die durchgeführten Experimente haben somit die Möglichkeit bestätigt, an der Phasengrenze mit Widerstands-DMS zu messen. Es hat sich dabei herausgestellt, daß zum Befestigen des DMS an dem Einschlüß ein Klebstoff auf Basis des gleichen

⁵⁾ Elastizitätsmodul der Matrix im Durchschnitt 30 000 kp/cm², Zugfestigkeit 342 kp/cm².

⁶⁾ Der Einschlüß kann in Hinsicht auf die Matrix als unendlich starr angesehen werden.

⁷⁾ Die Schub(Abscher)-Grenzverformung dieser Verbindung beträgt 1,2 bis 1,70/00.

Materials wie das der Matrix am vorteilhaftesten ist, falls die Matrix ohne Zerstörung an der Phasengrenze gemessen werden soll.

4. Einflüsse bei Widerstandsdehnungsmeßstreifen

4.1. Flüssige Medien

In sämtlichen in Erwägung gezogenen Experimenten wird der DMS wenigstens einseitig der Einwirkung einer flüssigen Matrix ausgesetzt. Von diesem Gesichtspunkt aus beurteilt, bewähren sich am besten DMS ohne Träger, die jedoch eine für die geläufige experimentelle Praxis ungemein sorgfältige Vorbereitung erfordern und eher für Anwendung im Innern von Materialien, als an Phasengrenzen in Betracht kommen. Ein mit einem DMS (mit Träger) in Berührung kommendes flüssiges Medium (gewöhnlich ein Monomer) verursacht aus mehreren Gründen eine Beeinflussung des Meßwerts des DMS.

Durch Benetzung des DMS (Veränderung des Kontaktmediums) verändert sich dessen Oberflächenspannung, und dies

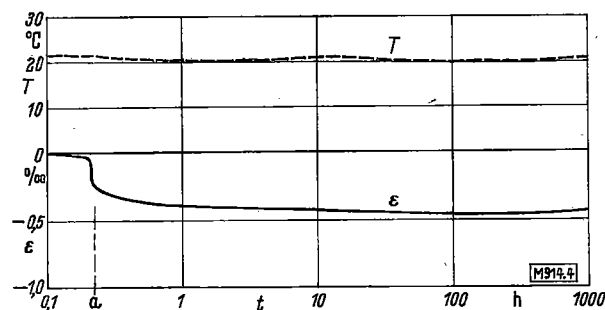


Fig. 4: Änderung der Anzeige des DMS durch Einfluß der Benetzung und der Temperatur T

Variation of the indication of the strain gauge as a consequence of wetting and temperature T

Variation de l'indication d'une jauge de contrainte par le mouillage et par la température T

beeinflusst den angegebenen Meßwert z. B. in der in Fig. 4 dargestellten Weise. Bei Draht-DMS kann ein Kapillareffekt zustande kommen (Eindringen des flüssigen Mediums am Draht entlang in den Träger), der sich jedoch nur unwesentlich und im übrigen praktisch gleichermaßen wie beim Ankleben von DMS an Prüfkörperoberflächen bemerkbar macht.

Der Einfluß chemischer Einwirkungen des Mediums auf den DMS kann je nach Art des Materials, aus dem er gefertigt ist, dem Trägertyp und dem bei seiner Fertigung und Einfassung benutzten Klebstoff vorausgesehen werden. Es hat sich bestätigt, daß es am vorteilhaftesten ist, bei der Anwendung von DMS mit Trägern ein übereinstimmendes (gleiches oder chemisch verwandtes) Material für den Träger, die Matrix und eventuell den Klebstoff zu benutzen. Falls die Matrix den Charakter eines Lösungsmittels hat (in nichterstarrtem Zustand), bewährte sich am besten die Anwendung von DMS mit inertem Träger (z. B. aus Papier), jedoch mit gleichem Klebstoff. Die chemische Einwirkung erlischt sofort nach der Erhärtung der Matrix. Sie tritt somit nur kurzzeitig in Erscheinung; bei geeigneter Kombination der Materialien ist daher meist ihr Einfluß auf das Langzeitverhalten des DMS unwesentlich, siehe z. B. Fig. 4.

4.2. Fixierung der Dehnungsmeßstreifen in der Matrix

Die Befestigung der Dehnungsgeber in der Matrix muß nicht nur eine richtige Platzierung und Orientierung, sondern auch eine unbewegliche Lage der DMS in flüssigen Medien sicherstellen; weiter darf sie den Spannungszustand des Umgebungs-

mediums nicht beeinflussen, und gleichzeitig muß sie eine widerstandslose Verfolgung der Matrixverformung im Meßbereich bei Beanspruchung gewährleisten. Eine Befestigung des DMS am Träger mit dünnen Seidenfäden quer zur Meßrichtung hat sich gut bewährt. Eine andere etwas mühseligere Befestigungsweise besteht in der Anwendung von zwei dünnen, ohne Rücksicht auf die Meßrichtung angebrachten und dicht an dem Träger mit Kerben versehenen Drähten, die nach Erhärtung der Matrix mit einem elektrischen Stromstoß durchgebrannt werden.

4.3. Haftfähigkeit des Mediums

Bei der Anwendung eines DMS an der Oberfläche wird die durch die Verbundwirkung des DMS und des Grundstoffs übertragene Verformung entlang der Länge des DMS integriert. Bei Messungen innerhalb eines Körpers kann der gleiche Vorgang in der erhärteten Matrix vorausgesetzt werden. Es kann jedoch direkt die integrierte durchschnittliche Verformung an der Länge des DMS bestimmt werden. (Die Verformung wird durch Beanspruchung der für diesen Zweck passend gestellten Stirnflächen des DMS übertragen, ein Meßelement in Form I bzw. II wird beispielsweise durch Befestigung von starren Plättchen senkrecht zur Achse des DMS hergestellt.) Die beiden Größen weichen allerdings voneinander insbesondere deshalb ab, weil das Integrationsintervall in beiden Fällen wesentlich verschieden ist. Die zweite Art eignet sich besonders dann, wenn die Verformung noch in der erstarrenden und erhärtenden Matrix bestimmt werden soll. Ein Dehnungsgeber ohne Stirnflächen zeigt in diesem Fall infolge des „Schubs“ der Matrix entlang der Oberfläche des DMS nur einen Bruchteil der tatsächlichen Verformung an. Als Nachteil der Elemente I und II ist deren relativ beträchtlicher Eingriff in den Spannungszustand der Umgebung anzusehen.

4.4. Kompensation

Kompensations-DMS werden am besten in einen anderen Körper eingelegt, der die gleichen Phasen wie der Prüfkörper durchläuft. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich in ihm während der Erstarrung die Matrixkonsistenz verändert. Dieses Verfahren ermöglicht allerdings nicht, die Verformung von Anfang an (im Verlauf der Erstarrung) zu erfassen; bei solchen Anforderungen werden am besten in ein identisches, jedoch bereits erstarrtes Medium eingelegte Kompensations-DMS oder selbstkompensierende DMS benutzt.

4.5. Abmessungen des Dehnungsmeßstreifens

Es zeigt sich, daß die Forderung nach möglichst kleinen DMS im Interesse der Meßgenauigkeit durch die Möglichkeiten der praktischen Vorbereitung (Ankleben bzw. Installierung) eingeschränkt wird. In unseren Experimenten betrug die optimale Größe 5 bis 15 mm; bei kleineren Abmessungen entstand eine größere Streuung durch Vorbereitungsschwierigkeiten, bei größeren Abmessungen wurden lokalisierte Konzentrationen nicht erfaßt. Unbestritten hat ein im Material untergebrachter DMS einen auf den Umgebungsspannungszustand rückwirkenden Einfluß; er wirkt als Inhomogenität bzw. Fremdeinschluß. Infolge der Verschiedenheit der Elastizitätsmoduln des Trägers des DMS und des Mediums können in der unmittelbaren Umgebung des DMS störende Spannungskonzentrationen entstehen. Gewissermaßen mißt der DMS auch einen durch seine eigene Anwesenheit verursachten Spannungszustand. Die Anwendung von trägerlosen DMS bzw. von DMS mit einem Träger aus dem Umgebungsmedium wird hierdurch betont. Bei dieser Voraussetzung sind dann die Fehler, wie die Experimente von Javornický [3] bestätigen, unwesentlich.

4.6. Temperatur

Bei Messungen mit Widerstands-DMS innerhalb von Körpern kann eine Temperaturveränderung den gemessenen Wert stark unvorhergesehen beeinflussen. Der Einfluß der Temperatur auf die Angabe eines DMS hängt von Umständen ab, von denen hauptsächlich in Betracht kommen: Konsistenz des Mediums und der Verbundkraft zwischen Medium und Träger des DMS, Trägertyp in Relation zum Medium und zum Temperaturwert.

Es wurde festgestellt, daß die gemessene Veränderung bei ansteigender Temperatur ausnahmslos nichtlinear verläuft.

Den berechneten Werten entsprach näherungsweise der Wärmeausdehnungskoeffizient lediglich im Bereich der Anfangstemperaturen (also bei etwa 25°C).

Bei einer Temperaturänderung um Δt ändert sich der Widerstand des Drähtchens des Dehnungsmeßstreifens um

$$\frac{\Delta R_t}{R} = \alpha_t \Delta t,$$

α_t Wärmeoeffizient des spezifischen Widerstandes des Meßmetalls des DMS. Zugleich mit der Temperaturänderung wird auch der Körper (das Medium) um den Wert

$$\frac{\Delta l_p}{l} = \alpha_p \Delta t$$

deformiert; α_p ist hier Wärmeausdehnungskoeffizient des Mediums. Somit würde sich also auch der Meßdraht um den Widerstand

$$\frac{\Delta R_p}{R} = K \frac{\Delta l_p}{l} = K \alpha_p \Delta t$$

verändern, wobei K die Geberkonstante ist.

Wird ein fester Verbund zwischen Medium und Träger (Identität der Formänderungen an der Berührungsfäche) und zwischen Meßdraht und Träger vorausgesetzt, wird der Träger gleichermaßen wie das Medium deformiert, so daß

$$\frac{\Delta l_p}{l} = \alpha_p \Delta t = \frac{\Delta l_n}{l} = \alpha_n \Delta t$$

wird, obgleich die temperaturbedingte Eigenformänderung des Trägers unterschiedlich ist; α_n bezeichnet den Wärmeausdehnungskoeffizienten des Trägers.

Der Meßdraht unterliegt selbstverständlich bei einer Temperaturänderung einer Eigenformänderung, und zwar je nach dem Wert seines Wärmeausdehnungsfaktors α_d um

$$\frac{\Delta l_d}{l} = \alpha_d \Delta t,$$

was eine äquivalente Widerstandsänderung um

$$\frac{\Delta R_d}{R} = K \frac{\Delta l_d}{l} = K \alpha_d \Delta t$$

bedeutet, die von der vorhergehenden zu subtrahieren ist; die durch die

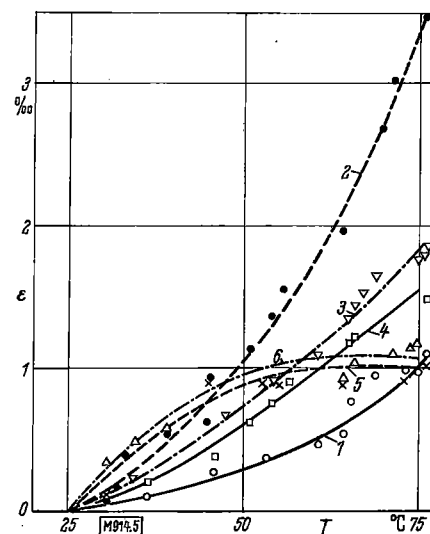


Fig. 5: Temperaturcharakteristiken verschiedener DMS in Epoxidharzmedium

Variation of strain indication with temperature of different strain gauges embedded in epoxy resin

Allure caractéristique de l'indication en fonction de la température de différentes jauges de contrainte dans résines époxy

Temperaturänderung verursachte relative Gesamtänderung des Widerstandes des DMS beträgt somit

$$\frac{\Delta R}{R} = [\alpha_t + K(\alpha_p - \alpha_d)] \Delta t.$$

Bei einem Flüssigkeitsmedium kann nicht von einem Einhalten der Gleichheit der Formänderungen an beiden Seiten der Berührungsfläche mit dem Träger des DMS gesprochen werden; die Rolle des Mediums reduziert sich hier lediglich auf die Vermittlung der Temperaturänderung, und die Eigenformänderung des Trägers kommt zur Geltung.

Die relative Gesamtänderung des DMS-Widerstandes bei Temperaturänderung beträgt analog wie im vorhergehenden Fall

$$\frac{\Delta R}{R} = [\alpha_t + K(\alpha_n - \alpha_d)] \Delta t.$$

Vereinfachungshalber ist es vorteilhaft, den sog. fiktiven Wärmeausdehnungskoeffizienten α_t einzuführen, der vom Mediumtyp, vom Trägertyp und vom Draht des DMS abhängt; seinen Wert erhält man durch Division der Widerstandsgesamtänderung bei Temperaturänderung um 1 grd durch die entsprechende Geberkonstante K .

Für unsere Prüfmateriale ist beispielsweise bei Polyamid-DMS $\alpha_n \approx 10 \cdot 10^{-5} \text{ grd}^{-1}$, $\alpha_d \approx 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ grd}^{-1}$, $K \approx 2,0$; für Epoxidharz ist $\alpha_p \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ grd}^{-1}$. Den angegebenen Beziehungen nach resultiert (für $\alpha_t \approx 10^{-5} \text{ grd}^{-1}$) ein fiktives $\alpha_t = 4,7 \cdot 10^{-1} \text{ grd}^{-1}$ in festen und $\alpha_t = 8,7 \cdot 10^{-5} \text{ grd}^{-1}$ in flüssigen Medien.

Bei der Festsetzung des Temperatureinflusses auf die Angabe des DMS ist es daher empfehlenswert, eher den fiktiven Wärmeausdehnungskoeffizienten (bzw. seinen Verlauf in Abhängigkeit von der Temperatur) des DMS im gegebenen Medium experimentell zu bestimmen als sich mit dem berechneten Wert zu begnügen. Fig. 5 gibt die Verläufe der Änderungen der DMS-Anzeigen bei ansteigender Temperatur des Mediums wieder, in dem sich die DMS befinden. Es ist ersichtlich, daß der Verlauf nicht linear ist und daß die Krümmung und sogar der Sinn der Krümmung je nach Trägertyp des DMS im gegebenen Medium variiert. In Tab. 2 sind die durchschnittlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufgeführt, die experimentell für zwei Temperaturintervalle in einem flüssigen Medium festgestellt wurden. Es ist interessant, daß z. B. die Beschaffenheit der Oberfläche eines Papierträgers den bei einer Temperaturänderung gemessenen Wert stark beeinflusst.

Tabelle 2

Mittlere fiktive Wärmeausdehnungskoeffizienten von Dehnungsmeßstreifen

Mean fictional thermal expansion coefficients of strain gauges
Coefficients fictifs moyens de dilatation thermique de jauges de contraintes

Träger	Medium	mittl. fiktiver Wärmeausdehnungskoeffizient (in grd^{-1})	
		25 bis 50°C	50 bis 75°C
Epoxid (1)	Epoxidharz	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Polyamid (6)		$4,0 \cdot 10^{-5}$	0
Polyamid mit Epoxidanstrich (5)		$4,0 \cdot 10^{-5}$	0
Papier (2)		$4,2 \cdot 10^{-5}$	$9,2 \cdot 10^{-5}$
Papier mit Epoxidanstrich (3)		$3,0 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$
Papier mit Bienenwachsenanstrich (4)	Styrol	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Papier		$6,3 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$
Papier mit Epoxidanstrich		$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Papier mit Bienenwachsenanstrich		$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$

Die Ziffern in Klammern geben die Nr. der Kurve in Fig. 5 an.

5. Messungen beim Übergang flüssig/fest

Infolge der stark exothermen Reaktion entsteht bei der Polymerisation ein schneller Temperaturanstieg, der außer dem direkten Einfluß auf dem DMS auch Volumenänderungen des Mediums (gewöhnlich Aufquellen) mit sich bringt. Sobald die Polymerisation des Mediums beginnt, treten gleichzeitig Volumenänderungen (gewöhnlich Kontraktion) des Mediums

ein. Mit den bisher benutzten Meßmethoden können diese beiden Einflüsse i. allg. nur schwer voneinander getrennt werden. Dadurch liefern diese Methoden sehr unterschiedliche Angaben über die Kontraktion mit Abweichungen von mehreren 100%, und außerdem tritt ein gemeinsamer Fehler auf: Die Kontraktion in der Anfangsphase, d. h. der „Beginn“ der Kontraktion, wird in einen nicht genau definierbaren Zeitpunkt verschoben. Deshalb wurde die Möglichkeit der Anwendung von Widerstands-DMS zu diesem Zweck überprüft. Um den „Schub“ des flüssigen Mediums entlang des DMS auszuschließen, wurden Meßelemente der Form I oder II benutzt (senkrechte Flächen etwa 1 cm^2 , Länge des DMS 30 mm). Vom Beginn der Vermischung des Epoxidmonomers mit dem Härtungsmittel an wurde kontinuierlich die Temperatur und die Angabe des DMS gemessen, und zwar beides innerhalb der Substanz (in der Mitte eines Prismas von $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ in Richtung der größten Abmessung). Die Ergebnisse eines dieser Experimente (DMS auf Polyamidträger und Thermoelement Cu-Konst.) veranschaulicht Fig. 6. Die Temperaturwerte sind infolge der wesentlich größeren Trägheit des Thermoelementes zeitlich verschoben⁸⁾.

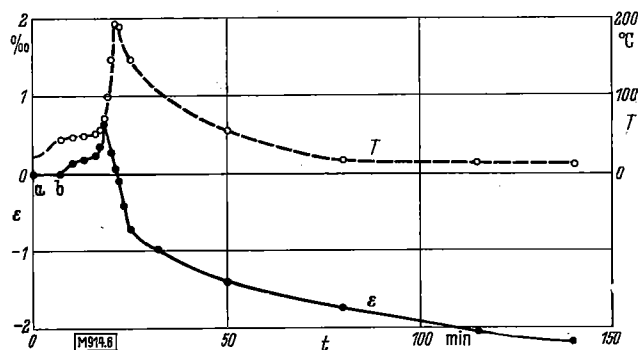


Fig. 6: Änderung des DMS-Anzeige und der Temperatur innerhalb eines Körpers aus Epoxidharz während der Polymerisation

Variation of indicated strain and temperature of a strain gauge embedded in epoxy resin during polymerization

Indication d'une jauge de contrainte et variation de la température à l'intérieur d'une résine époxy pendant la polymérisation

a Vermischung von Harz und Härter
mixing of resin and hardener
mélange de la résine et du durcisseur

b Vergießen — casting — coulée

Mit den Werten der im Abschn. 4.6 definierten fiktiven Wärmeausdehnungskoeffizienten kann aus den gemessenen Temperaturen die entsprechende Umbildung des DMS bestimmt werden. In der Anfangsphase verläuft die Messung in der flüssigen (annähernd bis zum Temperaturmaximum), in der Endphase in der festen Zustandsform des Mediums. Beim Absinken der Temperatur vom Maximalwert, d. h. bei der Erstarrung des Mediums, kann der Verlauf der Umbildung lediglich durch Interpolation zwischen den beiden Extremen des fiktiven Wärmeausdehnungskoeffizienten abgeschätzt werden.

Das Ergebnis dieser Berechnung ist einschließlich der vom DMS angezeigten Verformung in Fig. 7 wiedergegeben.

⁸⁾ Andere Experimente haben erwiesen, daß die benutzten Thermolemente Cu-Konst. gegenüber den DMS-Meßwerten um etwa 3 min verzögerte Temperaturänderungsmesswerte liefern.

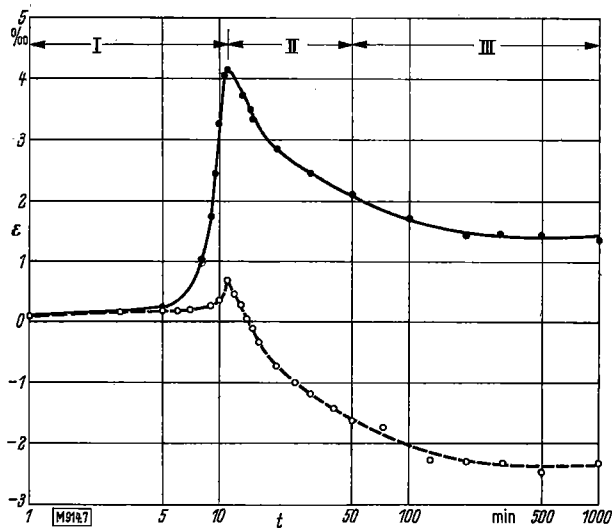


Fig. 7: Vergleich der an Hand von Temperaturänderungen berechneten (●) Verformungen mit den tatsächlich gemessenen (○)

Comparison of calculated strains caused by variation of temperature (●) and measured ones (○)

Comparaison des déformations par variation de la température calculées (●) et mesurées (○)

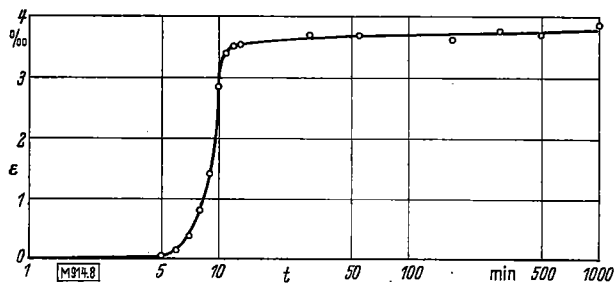


Fig. 8: Reine Polymerisationsverformung

Deformation caused by polymerization only

Déformation causée seulement par polymérisation

Bei der Konstruktion des ansteigenden Teils der Kurve wurde die Grundtemperatur, bei der Konstruktion des abfallenden Teils die Maximaltemperatur als Ausgangswert benutzt. Die berechnete Kurve wurde gemäß Fußnote⁹⁾ in der Zeitachse verschoben, damit die Gipfel der Kurven übereinstimmen. Dies ist natürlich kein sehr genaues Verfahren. Die benutzten Temperaturcharakteristiken wurden im monomeren Medium bzw. in der festen Zustandsform gewonnen, und der Einfluß der Benetzung wird nicht miteinbezogen.

Unklar ist der Wärmeausdehnungskoeffizient während des Erstarrens, bei dem (in gedehntem Zustand) sich dreidimensionale Polymerketten bilden, die es dem Medium nicht erlauben, bei dem Temperaturabfall völlig (und sofort) in den Anfangszustand zurückzukehren. Die Situation wird außerdem noch durch den Kriechmechanismus (durch Einfluß des in der Struktur aus oben angeführten Gründen entstehenden Spannungszustandes) komplizierter gestaltet. Es handelt sich hier jedoch nur um einen Beweis der Anwendbarkeit dieses Verfahrens. Selbstverständlich werden die gemessenen Werte niemals genau und definierbar sein; sie können jedoch wenigstens in der tatsächlichen Größenordnung liegen, was bei den Ergebnissen der Mehrzahl der bisherigen Methoden nicht zutrifft.

Die Differenz der beiden Kurven ergibt — wie Fig. 8 veranschaulicht — bereits die reine Polymerisationsverformung zu jedem Zeitpunkt. Die Kurve zeigt, daß eine starke und jähe Kontraktion in der ersten Phase der Polymerisation bis zum Erreichen der maximalen Temperatur (flüssiger Zustand bis Gelatinierung) erfolgt, während der mit gewöhnlichen Methoden erfaßte Kontraktionsanteil wesentlich langsamer anwächst⁹⁾.

Es läßt sich erwarten, daß das Messen von Volumenänderungen (Kontraktionen) erstarrender Medien mit Widerstands-DMS zu einem bedeutenden Fortschritt beim Studium des Entstehens und des Verhaltens von Materialien und ihres primären inneren Spannungszustandes — der die Festigkeit nicht unbedeutend beeinflusst — führen kann. Diese Problematik würde sicherlich eine gründlichere Durcharbeitung verdienen.

6. Zusammenfassung

Es wurden einige Aspekte der genauen Messung von Verformungen innerhalb von Materialien mit Hilfe von Widerstands-DMS studiert. Die Umstände, unter denen solche Messungen durchgeführt werden können, wurden erläutert, und es wurden einige Grundsätze des Arbeitsvorganges zur Sicherstellung erfolgreicher Ergebnisse angedeutet.

In zwei Gebieten wurde das Problem der Messung von Materieverformungen analysiert: einerseits im Festkörper, andererseits in der Materie im nichterstarten Zustand und während des Erstarrens und Erhärtens. Es hat sich gezeigt, daß Messungen mit Widerstands-DMS erfolgreich auch im Fall räumlicher Beanspruchung des DMS angewandt werden können. Auch das Messen von Verformungen an Berührungsflächen von zwei Festphasen ist durchaus möglich. Für den ersten Fall erwiesen sich trägerlose DMS als die vorteilhaftesten, für den zweiten DMS mit einem Träger aus demselben Material wie die umgebende Matrix.

Besondere Aufmerksamkeit wurde dem Einfluß der Temperatur auf den von DMS angegebenen Meßwert geschenkt, und zu diesem Zweck wurde ein sog. fiktiver, von Fall zu Fall je nach Material, Medium, Träger des DMS, Temperatur usw. verschiedener Wärmeausdehnungskoeffizient definiert. Schließlich wurde ein Verfahren für die Ermittlung von Volumenänderungen, die beim Übergang von der flüssigen in die feste Zustandsform entstehen, aus der DMS-Anzeige vorgeschlagen.

Literatur

- [1] ● *Bechyně, St.*: Betonové stavitelství I/3, str. 139, Praha: SNTL 1959.
- [2] *Sandford, R.-J.*: The validity of three-dimensional photoelastic analysis of non-homogeneous elastic field problems. *Brit.-J. appl. Physics* 17 (1966) Nr. 1 S. 99/108.
- [3] *Javornický, J.*: Photoelastic investigations of cast plates with inclusions. In: Proc. 4th Internat. Conference "Experimental Stress Analysis and its Influence on Design", 6 — 10 April 1970, Cambridge (England), S. 219/26.

M 914

⁹⁾ Dazu ist zu bemerken, daß die Auslösung von reaktiver Wärme während der Reaktion durch eine Kurve derselben Form charakterisiert ist. Die Koizidenz der Volumenkontraktion und der Reaktivwärme überrascht nicht und bildet eine indirekte Bestätigung unserer Ergebnisse.