

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 17 (1944)
Heft: VII

Artikel: Innere Spannungen in Aluminium-Legierungen
Autor: Fichter, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-111519>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 05.02.2026

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

Innere Spannungen in Aluminium-Legierungen.

Von R. Fichter.

(25. IX. 1944).

Eine Veröffentlichung über diesen Gegenstand stammt von A. v. ZEERLEDER¹⁾. Sie entstand auf Grund von Untersuchungen, die er in den Jahren 1935—1938 zusammen mit M. BOSSHARD und E. HÄNSLER durchgeführt hatte. Damals wurde hauptsächlich über den Einfluss der Aushärtungsbedingungen auf die inneren Spannungen in der Aluminiumlegierung Avional²⁾ berichtet. Es wurde die Abkühlzeit nach dem Glühen, die Art und die Temperatur des Abschreckmittels variiert. In der vorliegenden Arbeit wurden diese Versuche weitergeführt und ausgebaut und bei der Auswertung als Mass des Spannungszustands die Formänderungsarbeit eingeführt. Zur Berechnung der Spannungen werden Abänderungen der bekannten Verfahren angegeben³⁾.

1. Wesen der inneren Spannungen.

Innere Spannungen — auch Eigenspannungen genannt — treten insbesondere nach inhomogener Verformung eines festen Körpers auf. Die Verformung kann dabei mechanisch (z. B. Biegung) oder auf andere Weise (z. B. verschieden starke Abkühlung der einzelnen Partien eines Körpers) erfolgt sein.

Wird ein Werkstück durch eine Spannung ungleichmässig belastet, so dass das Material nicht nur elastisch, sondern darüber hinaus plastisch beansprucht wird, so erscheint nach der Entlastung derjenige Teil der Spannung, der durch die plastische Verformung kompensiert wurde, mit umgekehrten Vorzeichen als Eigenspannung. Die Belastung und die Verformung müssen also *inhomogen* sein, damit die gewöhnlichen Eigenspannungen „erster Art“ (s. u.) auftreten können. Bei *homogener* Beanspruchung würden sich alle Spannungen ausgleichen, sofern der betrachtete Körper eine homogene Struktur besitzt.

¹⁾ Journ. Inst. Metals **67**, 87 (1941).

²⁾ Geschützte Wortmarke.

³⁾ Vorbericht s. FICHTER, Helv. Phys. Acta **16**, 422 (1943).

Da bei einem vielkristallinen Stück auch bei homogener äusserer Beanspruchung im Innern ungleichmässige Spannungen auftreten können und da ein solches Stück u. U. nicht überall gleich gut verformbar ist (s. Reckspannungen), gibt es praktisch stets innere Spannungen.

Nach der Grösse der Bereiche, in welchen sie sich nicht merklich ändern, kann man die Eigenspannungen einteilen¹⁾:

Spannungen erster Art oder grobelastische Spannungen sind über Gebiete von der Grössenordnung 1 mm oder darüber konstant. Als Ursachen sind Volumenänderungen beim Abschrecken (Abschreckspannungen), Verspannung beim Strecken („Voreilen“) (Reckspannungen) und Schwindung beim Giessen (Gussspannungen) zu nennen. Als Folge der (homogenen) Reckung erwartet man eigentlich keine Eigenspannungen. Dass solche auftreten, ist bekannt, und wir konnten dies auch in unseren Versuchen bestätigen (s. Abschnitt 4f.).

Spannungen zweiter Art besitzen in makroskopischen Gebieten den Mittelwert Null und sind nur noch in mikroskopisch nicht mehr auflösbaren Bereichen konstant. Sie gehen hauptsächlich auf Biegeleitung des Werkstoffs zurück.

Spannungen dritter Art sind bereits in submikroskopischen Gebieten stark veränderlich. Nach DEHLINGER¹⁾ ist ihre Ursache hauptsächlich in der Korngrenzenbehinderung zu suchen.

Die Eigenspannungen zweiter und dritter Art fasst man zusammen unter dem Namen „Verborgene elastische Spannungen“, da sie mit den mechanischen Bestimmungsmethoden (s. unten) nicht, sondern nur in Röntgen-Strukturaufnahmen nachgewiesen werden können. Während die grobelastischen Eigenspannungen eine Verschiebung der Röntgenlinien (resp. -Reflexe) bewirken infolge Gitteraufweitung oder -Kontraktion, zeigen sich die verborgenen elastischen Spannungen durch eine Verbreiterung der Röntgenlinien an. DEHLINGER¹⁾ vermutet, dass sich die Spannungen dritter Art von der zweiten Art durch eine Intensitätsänderung der Röntgenlinien auszeichnen. Es ist jedoch u. W. bis heute nicht gelungen, diese beiden Arten von Eigenspannungen experimentell voneinander zu unterscheiden.

Als vierte Art von inneren Spannungen sind hier eigentlich diejenigen zu erwähnen, die infolge der *Versetzungen* entstehen. Darunter versteht man die Erscheinung, dass im Gitter z. B. den

¹⁾ DEHLINGER, Z. Metallk. **34**, 197 (1942). — MASING, Z. Metallk. **35**, 56 (1943). — KOCHENDÖRFER, „Plast. Eigenschaften von Kristallen etc.“, Berlin 1941.

n Atomen einer Gittergeraden $n \pm 1$ Atome der benachbarten Gittergeraden entsprechen. Dementsprechend sind die daraus resultierenden inneren Spannungen nur in sehr kleinen submikroskopischen Bereichen vorhanden, aber trotzdem relativ hoch.

Die Eigenspannungen erster und dritter Art erscheinen nach DEHLINGER (l.c.) nur bei polykristallinem Material, solange die Beanspruchung makroskopisch homogen ist, während Eigenspannungen zweiter Art auch beim homogenen Ziehen eines Einkristalls auftreten. Im Gegensatz dazu werden Versetzungsspannungen bei jeder Art von Verformung auch in Einkristallen erzeugt, da in diesem Fall die Beanspruchung nicht inhomogen zu sein braucht.

Wenn die Eigenspannungen zu gross werden, können sie zu Rissen im Material (s. z. B. v. ZEERLEDER, l. c.) oder zu Verkrümmungen usw. führen. Sie sind deshalb nicht erwünscht und man ist bestrebt, sie durch eine geeignete Glüh- oder Reckbehandlung wieder aus dem Material herauszubringen, wenn sie einmal entstanden sind. Eine weitere unangenehme Eigenschaft ist die, dass sie unter Umständen auch korrosionsfördernd wirken können.

Es ist ferner bekannt, dass die inneren Spannungen auf die Verfestigung des Materials einen grossen Einfluss haben. Hier spielen die Spannungen dritter Art und die Versetzungsspannungen die Hauptrolle. Auch mit der Rekristallisation stehen sie im Zusammenhang, denn diese gleicht die durch die Verformung entstandenen Eigenspannungen aus.

2. Messung der inneren Spannungen.

a) Die verschiedenen Möglichkeiten.

Die wichtigsten sind die rein mechanischen *Abdreh-* und *Ausbohrverfahren*. Sie sind mit einfacheren Hilfsmitteln durchzuführen und werden deshalb vorwiegend angewendet. Sie liefern Kenntnis von den Eigenspannungen erster Art. Die beiden wichtigsten von HEYN und BAUER und von SACHS werden in den folgenden Abschnitten kurz erläutert und die uns daran zweckmässig erscheinenden Abänderungen und das von uns benutzte Mess- und Rechenverfahren beschrieben.

Wie schon erwähnt, können die Eigenspannungen zweiter und dritter Art nur mit *Röntgenstrukturaufnahmen* ermittelt werden. Auch die Spannungen erster Art äussern sich in diesen Aufnahmen, und zwar als Linienverschiebung. Der grosse Nachteil dieser Untersuchungsmethode ist der, dass nur die Spannungen in der Oberflächenschicht bestimmt werden können, da bei den zur Messung

der Gitterkonstantenänderung benützten Rückstrahlverfahren die Röntgenstrahlen nur sehr wenig in das Material eindringen¹⁾.

Bei ferromagnetischen Werkstoffen können die Spannungen im Innern mit Hilfe von Induktionsmessungen auf indirektem Weg gemessen werden²⁾.

Grundsätzlich besteht ausserdem die Möglichkeit, aus Widerstandsänderungen auf die Anwesenheit von inneren Spannungen zu schliessen. Da sich jedoch dieser Effekt den Wirkungen der Aushärtung überlagert, ist es schwierig, die beiden Anteile voneinander zu trennen³⁾.

Eine relativ einfache — mehr nur qualitative — Methode, um sich ein Bild über die inneren Spannungen in gewissen Fällen zu machen, besteht ferner darin, dass ein Stab auf einem Gestell zwischen 3 Zapfen in gebogener Lage eingespannt wird. Damit ist er inhomogen verformt und das Auftreten von Eigenspannungen ermöglicht. Wird er nun bei verschiedenen Temperaturen gegläht und der verbleibende Krümmungsradius gemessen, so gewinnt man eine Vorstellung vom innern Spannungszustand⁴⁾.

Um die beim Giessen entstehenden Spannungen zu messen, kann man ein sogenanntes Spannungsgitter giessen. Das Spannungsgitter besteht aus 2 dünneren und einem dickeren (mittleren) Stab, die an jedem Ende durch ein Joch starr verbunden sind. Beim Aufsägen des mittleren Stabes klaffen die Ränder voneinander und dieses Auseinandergehen wird als Mass für die Gussspannungen benützt^{4) 5) 6)}.

b) Verfahren von Heyn und Bauer⁷⁾.

Diese Methode ist schon lange bekannt. *Rundstangen* werden abgedreht und die Längenänderungen gemessen. Die Rechnung geht

¹⁾ Lit. s. z. B. HENGSTENBERG und MARK, Z. Physik **61**, 435 (1930). — WASSERMANN, Mitt. Kaiser Wilhelm Inst. Eisenforsch. Düsseldorf **17**, 167 (1935). — MÖLLER, Mitt. Kaiser Wilhelm Inst. Eisenforsch. Düsseldorf **21**, 295 (1935).

²⁾ FÖRSTER & STAMBKE, Z. Metallk. **33**, 97 und 104 (1941). — KERSTEN, Z. Physik **71**, 553 (1931); **76**, 505 (1932); **82**, 723 (1933); **85**, 708 (1933).

³⁾ HARTNAGEL, Z. Metallk. **30**, 81 (1938); AUER & SIEMENS, Z. Metallk. **30**, 86 (1938).

⁴⁾ S. z. B. COLLAUD, Mitt. v. ROLL **3**, (1944).

⁵⁾ V. STEIGER, Diss. Zürich 1918, s. Stahl und Eisen **33**, 1442 (1913). — SCHNEIDER, Aluminium **20**, 188 (1938). — GRASSMANN & LEGE, Giesserei **28**, 345 (1941); **29**, 230 (1942). — ROTH & SEUMEL, Giesserei **30**, 153 (1943). — Über den Unterschied zwischen so gemessenen Gussspannungen und den eigentlichen Eigenspannungen s. ZEERLEDER und FICHTER, Giesserei **28**, 456 (1941).

⁶⁾ Über weitere einfache Verfahren s. z. B. SACHS, „Praktische Metallkunde“ II, Berlin 1934.

⁷⁾ HEYN und BAUER, Int. Z. Metallographie **1**, 16 (1911) und viele andere Literaturstellen.

stufenweise vor und wird desto ungenauer, je dickere Schichten jedesmal abgedreht werden. Die Spannungen in der Längsrichtung des Stabes werden durch sukzessive Summation berechnet. Dabei wird angenommen, in jeder abgedrehten Zone sei die Spannung gleichmässig über den ganzen Querschnitt verteilt. Zur Beurteilung der Messungen ist es vorteilhaft, die Gesamtverlängerung Δl^1) als Funktion des noch vorhandenen Querschnitts F graphisch aufzutragen. Ungenauigkeiten werden damit sofort sichtbar und man kann die Messresultate, wenn nötig, graphisch ausgleichen.

Das Verfahren ist etwas grob und zu sehr von den Messstufen abhängig. Bedeutend eleganter wird die Rechnung, wenn man kontinuierlich rechnet (Differenzieren statt Differenz bilden), s. Abschnitt c.

c) *Modifiziertes Heyn-Bauer-Verfahren.*

Auf Grund einer Bemerkung von SACHS²⁾ haben wir die kontinuierlichen Gleichungen für das Heyn-Bauer-Verfahren abgeleitet. Die Messung geschieht genau gleich: man *dreht einen Zylinder ab* und misst die Längenänderungen. Daraus erhält man dann die Längsspannungen.

Die Längsspannung s^1) einer bestimmten Schicht von der Dicke $d\varrho$ mit dem Radius ϱ setzt sich aus 2 Bestandteilen zusammen: aus der durch das Abdrehen anderer Schichten beseitigten Spannung s' und der der Schicht eigenen Spannung s'' .

$$s = s' + s'' \quad (1)$$

Aus den bekannten Definitionsgleichungen ergibt sich nun:

$$ds_0 F = -E \frac{dl}{l_0} F = -E d\lambda F \quad (2)$$

$$ds_0 = -E d\lambda \quad (3)$$

dl = Längenänderung bei Entfernung einer Schicht.

ds_0 = die durch Entfernung der Schicht im übrigbleibenden Querschnitt F *beseitigte* Spannung.

Setzt man die Kräfte in der Schicht und im übrigbleibenden Querschnitt einander gleich, so wird:

$$s'' dF = ds_0 F \quad (4)$$

Daraus wird:

$$s'' = -EF \frac{d\lambda}{dF} = -EF \frac{d\lambda}{dF} \quad (5)$$

¹⁾ Bezeichnungen s. Tabelle 1.

²⁾ SACHS, Z. Metallk. **19**, 354 (1927).

Die durch Entfernung einer beliebigen Schicht vom Radius ϱ^* an der Stelle ϱ entstehende Spannung ds' berechnet sich ähnlich wie ds_0 :

$$ds' = E d\lambda \quad (6)$$

und daraus die *beseitigte* Spannung:

$$s' = - \int_{l_0}^l ds' = - \frac{E}{l_0} (l - l_0) = - E \lambda \quad (7)$$

Aus den Gleichungen (1), (5) und (7) ergibt sich für die Längsspannung:

$$s = - E \left(F \frac{d\lambda}{df} + \lambda \right), \quad F = f \quad dF = df \quad (8)$$

Damit ist die kontinuierliche Gleichung für das modifizierte Heyn-Bauer-Verfahren abgeleitet.

Zur Rechnung wird Δl als Funktion von f oder F aufgezeichnet und für geeignete (ganzzahlige, damit die nachfolgende Rechnung einfach wird) Werte von F die Grösse $\frac{dl}{df}$ aus dem Diagramm entnommen. So kann die ganze Auswertung kurz und praktisch gestaltet werden. Die meisten unserer Versuche wurden nach diesem Verfahren ausgewertet.

d) Einfaches Ausbohr-Verfahren.

Da beim weiter unten beschriebenen, komplizierteren Sachs'schen Verfahren der Zylinder *ausgebohrt* — statt abgedreht — wird, lag es nahe, die obigen Betrachtungen auch auf den Fall des Ausbohrens auszudehnen. Nun ändert sich die Gleichung (4), denn jetzt ist $df = -dF$, da $F = f_0 - f$. Sie wird

$$-s'' df = ds_0 F \quad (9)$$

wo F = übrigbleibender Querschnitt = $f_0 - f$ und entsprechend

$$s'' = EF \frac{d\lambda}{df} \quad (10)$$

Daraus ergibt sich dann analog dem modifizierten Heyn-Bauer-Verfahren für die Längsspannung:

$$s = E \left(F \frac{d\lambda}{df} - \lambda \right), \quad F = f_0 - f \quad (11)$$

Diese Gleichung ist bei SACHS (l. c., Anm. 5) enthalten und geht als Vereinfachung aus dem Sachs'schen Verfahren hervor. Sie

gilt mit diesen Vorzeichen jedoch *nur* für Ausbohrversuche. Beim Abdrehen ergibt sich Gleichung (8)¹⁾.

e) *Verfahren von Sachs (Ausbohren).*

Das Verfahren ist in der unter Anmerkung 5 genannten Arbeit von SACHS ausführlich beschrieben abgeleitet und mit Beispielen belegt worden. — Man bohrt einen Zylinder oder ein Rohr sukzessive aus und misst die entstehenden Längenänderungen und die Durchmesseränderungen an der Aussenhaut. Daraus werden die Längs-, Tangential- (Ring-) und Radialspannungen errechnet und zwar mit kontinuierlichen Gleichungen.

Bei der numerischen Berechnung der Spannungen ist am besten so vorzugehen: Man zeichnet auf Grund der Messwerte Δ und Θ ²⁾ als Funktion von f oder F auf und bestimmt zur Vereinfachung des weiteren Ganges die Werte von Δ und Θ und von $\frac{d\Delta}{df}$ und $\frac{d\Theta}{df}$ aus dem Diagramm für besonders einfache f - resp. F -Werte (z. B. ganzzahlige). Auch die δf -Werte sind dann besonders günstig.

Die Endgleichungen für die Spannungen sind in der Tabelle 2 enthalten.

f) *Modifiziertes Sachs-Verfahren (Abdrehen eines Rohres).*

Da eine genaue Durchmesserbestimmung an einem Zylinder recht schwierig ist, probierten wir auch, den Versuch so durchzuführen, dass ein *Rohr aussen abgedreht* wurde, und massen dann die Änderungen des Innendurchmessers dieses Rohres. Eine solche Innenkalibermessung ist ziemlich genau.

Bei der Ableitung der Gleichungen ergeben sich gegenüber SACHS gewisse Änderungen:

1. Sachs geht von folgenden Gleichungen aus, die die in einem Rohr entstehenden Tangentialspannungen t und Radialspannungen r mit dem am Rohr herrschenden Innendruck p_a und Aussendruck p_b in Verbindung bringen³⁾. Unter einem Innendruck p_a ergibt sich:

$$t = \frac{\varrho^2 + b^2}{\varrho^2(b^2 - a^2)} \cdot a^2 p_a \quad (12)$$

$$r = \frac{\varrho^2 - b^2}{\varrho^2(b^2 - a^2)} \cdot a^2 p_a \quad (13)$$

wo a und b Innen- und Aussenradius des Rohres bezeichnen.

¹⁾ Die Bemerkung bei SACHS ist irreführend, da man dort den Eindruck gewinnt, die Gleichung (11) gelte für das Abdrehen.

²⁾ Bezeichnungen s. Tabelle 1.

³⁾ Ableitung dieser Gleichungen bei A. und L. FÖPPL: *Drang und Zwang*, Bd. I, Berlin und München 1920.

Unter einem Aussendruck p_b erhält man:

$$t = - \frac{\varrho^2 + a^2}{\varrho^2(b^2 - a^2)} \cdot b^2 p_b \quad (14)$$

$$r = - \frac{\varrho^2 - a^2}{\varrho^2(b^2 - a^2)} \cdot b^2 p_b \quad (15)$$

2. Bei einem dünnwandigen Zylinder ist der Querschnitt:

$$\pi(b^2 - a^2) = 2\pi\varrho d\varrho \quad (16)$$

wenn $a \approx \varrho \approx b$.

Da nun für die Berechnung der Innendruck die gleiche Rolle spielt wie bei SACHS der Aussendruck, hat man bei den weiteren Betrachtungen die Gleichungspaare (12) und (13) mit (14) und (15) zu vertauschen. Steht die betrachtete dünne Schicht $d\varrho$ vom Radius ϱ unter den Spannungen s'' und t'' , so ist die Radialspannung nicht mehr unabhängig. Der Zusammenhang ergibt sich, wenn wir (16) in (12) einsetzen und berücksichtigen, dass nun $p_a = dr''$:

$$dr'' = t \frac{d\varrho}{\varrho} \quad (17)$$

(Man erhält also dieselbe Gleichung wie SACHS).

3. Die Ableitung der *Längsspannung* lautet nun folgendermassen: Die Entfernung des Querschnitts df mit der Spannung s'' bedingt die Beseitigung von ds_a im übrigbleibenden Querschnitt F .

$$F = f - f_a = \pi(\varrho^2 - a^2) \quad (18)$$

Wie schon in Abschnitt c begründet, wird also (entsprechend Gleichung 4)

$$s'' df = ds_a(f - f_a) \quad (19)$$

oder unter Zugrundelegung der Sachs'schen Formulierung

$$s'' = - \frac{E}{1 - \mu^2} (f - f_a) \frac{d(\lambda + \mu \vartheta)}{df} \quad (20)$$

Dabei ist für ds_a ein aus der Elastizitätstheorie hervorgehender allgemeiner Ausdruck eingeführt worden¹⁾.

An der Berechnung von s' ändert sich gegenüber SACHS nichts.

4. Bei der Berechnung der *Tangentialspannung* ist wiederum von (12) statt von (14) auszugehen. Wir berechnen zunächst die

¹⁾ Bezeichnungen s. Tab. 1.

Spannung dt_a , die den durch die Entfernung der Schicht $d\varrho$ mit Radius ϱ erzeugten Formänderungen an der Innenwand des Rohres entspricht. Es wird also in Gleichung (12) $\varrho = a$ und $p_b = dr''$ eingeführt:

$$dt_a = - \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \cdot p_b \quad (21)$$

b ist nun Parameter und kann gleich ϱ gesetzt werden:

$$dt_a = \frac{2\varrho^2}{a^2 - \varrho^2} dr'' \quad (22)$$

(entsprechend der Gleichung (6) bei SACHS).

Berücksichtigt man (17) und führt wiederum den allgemeinen Spannungsausdruck ein, so ergibt sich:

$$t'' = - (f - f_a) \frac{E}{1 - \mu^2} \frac{d(\vartheta + \mu\lambda)}{df} \quad (23)$$

Bei der Berechnung von t' nach SACHS ist sinngemäss b durch a und dt_b durch dt_a zu ersetzen.

Die Spannung dt' , welche die durch das Abdrehen der Schicht mit Radius ϱ^* an der Stelle ϱ erzeugten Formänderungen zu kompensieren imstande ist, berechnet sich aus (14):

$$dt' = - \frac{\varrho^2 + a^2}{\varrho^2(\varrho^{*2} - a^2)} \varrho^{*2} dr^* \quad (24)$$

$dr^* =$ Radialspannung in der Schicht mit Radius ϱ^* .

Tabelle 1.

Bedeutung der in Rechnungen und Tabellen vorkommenden Grössen.

1. Die Summationen Σ sind jeweils algebraisch durchzuführen. (Berücksichtigung des Vorzeichens).
2. Vorgestelltes d und δ sind praktisch gleichbedeutend. d gibt den Charakter eines Differentials an, δ den einer Differenz.

- a = Innenradius eines Rohres.
 b = Aussenradius eines Rohres.
 D = Durchmesser, variabel.
 D_0 = ursprünglicher Durchmesser.
 D_i = Innendurchmesser eines Rohres.
 D_e = Enddurchmesser.
 D^* = $D_0/2$ bei Stangen.
 = Mittel der Anfangsdurchmesser bei Rohren.

- E = Elastizitätsmodul.
 $E' = E/1 - \mu^2$.
 ε = Fehler = Abweichung vom Mittelwert.
 $f = \pi \varrho^2$.
 $\delta f = \delta f$ = Schichtquerschnittsfläche resp. Änderung des Gesamtquerschnitts bei Entfernung einer Schicht.
 f_0 = ursprünglicher Querschnitt des Zylinders oder Rohres (Fläche des Kreisrings).
 f_e = Endquerschnitt, gerechnet wie f_0 .
 $f_i = \pi a^2$ = Innenquerschnitt eines Rohres.
 F = übrigbleibender Querschnitt beim Abdrehen oder Ausbohren (bei Röhren Kreisringfläche).
 $= f$ beim Abdrehen eines Zylinders.
 $= f - f_i$ beim Abdrehen eines Rohres.
 $= f_0 - f$ beim Ausbohren.
 F^* = zu D^* gehöriges F .
 l = Messlänge, variabel.
 l_0 = ursprüngliche Messlänge.
 L = volle Länge.
 $\delta l = dl$ = Längenänderung beim Abdrehen oder Ausbohren einer Schicht.
 $\Delta l = \Sigma \delta l = l - l_0$ = Gesamtlängenänderung.
 $\lambda = \Delta l/l_0 = \Sigma \delta \lambda$ = spezifische Längenänderung.
 $d\lambda = \delta \lambda = dl/l_0$ = spezifische Längenänderung beim Abdrehen oder Ausbohren einer Schicht.
 $A = \lambda + \mu \vartheta$.
 μ = Poisson'sche Konstante (Querkontraktion, angenommen zu 0,34).
 m = mittlerer Fehler.
 P = Kraft.
 p_a = Innen- und Aussendruck an einem Rohr.
 p_b
 r = Radialspannung (r' usw. wie bei s).
 ϱ = Radius der betrachteten Schicht (Hauptparameter bei allen Verfahren. Ausbohren = Innenradius, Abdrehen = Aussenradius).
 $d\varrho$ = Schichtdicke am Radius gemessen.
 ϱ_i = Innenradius eines Rohres.
 s = Längsspannung.
 s' = Längsspannung, die in der betrachteten Schicht durch die Entfernung anderer Schichten erzeugt wurde.
 ds' = Spannung, die die durch das Abdrehen einer Schicht (mit Radius ϱ^*) an der Stelle ϱ erzeugten Formänderungen zu kompensieren imstande ist.
 s'' = Längsspannung, die der betrachteten Schicht eignet.
 ds_0 = die durch Entfernung der betrachteten Schicht im übrigbleibenden Querschnitt F beseitigte Spannung.
 (ds_a, ds_b)
 t = Tangential- oder Ringspannung (t' usw. wie bei s).
 ϑ = spezifische Durchmesseränderung = $D - D_0/D_0$.
 $\Theta = \vartheta + \mu \lambda$.
 V = abgedrehtes, resp. ausgebohrtes Volumen $(f_0 - F^*)l_0$.
 W^* = Formänderungsarbeit infolge Auslösens der Spannungen.
 $W = W^*/V$ = gerechnet auf 1 cm³ des abgedrehten resp. ausgebohrten Volumens V .
 δW = Formänderungsarbeit bei Entfernung einer Schicht.

Entsprechend folgt aus (21):

$$dt_a = - \frac{2 \varrho^{*2}}{\varrho^{*2} - a^2} dr^* \quad (25)$$

und weiter:

$$dt' = \frac{a^2 + \varrho^2}{2 \varrho^2} dt_a \quad (26)$$

Diese Gleichung stimmt mit der entsprechenden Sachs'schen überein, wenn man b durch a ersetzt. Im Ausdruck für t' muss statt f_b nun f_a geschrieben werden.

5. Will man die *Radialspannung* ermitteln, so geht man von einer der Formel (24) analogen, aus (15) hervorgehenden Beziehung aus:

$$dr' = - \frac{\varrho^2 - a^2}{2 (\varrho^{*2} - a^2)} \varrho^{*2} dr^* \quad (27)$$

Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung von (25) folgendes:

$$dr' = \frac{\varrho^2 - a^2}{2 \varrho^2} dt_a \quad (28)$$

Man erhält also dieselbe Gleichung für r' resp. für r , das ja gleich r' angenommen wird, wie SACHS, wenn der Ausdruck $(f_b - f)$ durch $(f - f_a)$ ersetzt wird.

6. Zur endgültigen Aufstellung der Formeln sind nun die Spannungsanteile s' und s'' usw. zu addieren (entsprechend Gl. 1) und man findet folgende Endgleichungen:

$$\begin{aligned} s &= -E' \left(F \frac{dA}{df} + A \right) \\ t &= -E' \left(F \frac{d\Theta}{df} + \frac{f_i + f}{2f} \Theta \right) \\ r &= E' \frac{F}{2f} \Theta \\ F &= f - f_i \end{aligned} \quad (29)$$

g) Allgemeine Bemerkungen über die verschiedenen Verfahren.

Eine Zusammenstellung der Formeln, mit Hilfe welcher die Spannungen nach den hier beschriebenen Verfahren zu berechnen sind, findet sich in Tabelle 2. Bei der überwiegenden Anzahl unserer Versuche rechneten wir nach dem im Abschnitt c beschriebenen „Modifizierten Heyn- und Bauer-Verfahren“. Das Sachs'sche oder

Tabelle 2.

Die verschiedenen Rechnungsverfahren.

Name	Ab- schnitt	Messung	Rechnung ¹⁾	Glei- chung Nr.
Heyn & Bauer	2 b	Abdrehen Längenände- rung	$s_n \delta f_n =$ $E/l_0 [(l_n - l_0) F_n - (l_{n-1} - l_0) F_{n-1}]$ ²⁾	—
Modifiz. Heyn und Bauer	2 c	Abdrehen Längenände- rung	$S = -E \left(F \frac{d\lambda}{df} + \lambda \right)$ $F = f$	8
Einfaches Ausbohrver- fahren	2 d	Ausbohren Längenände- rung	$s = E \left(F \frac{d\lambda}{df} - \lambda \right)$ $F = f_0 - f$	11
Sachs	2 e	Ausbohren Längenände- rung Durchmesser- änderung	$s = E' \left(F \frac{d\Lambda}{df} - \Lambda \right)$ $t = E' \left(F \frac{d\Theta}{df} - \frac{f_0 + f}{2f} \Theta \right)$ $r = E' \frac{F}{2f} \Theta$ $F = f_0 - f$	—
Modifiz. Sachs	2 f	Abdrehen eines Rohres Längenände- rung Innendurch- messerände- rung	$S = -E' \left(F \frac{d\Lambda}{df} + \Lambda \right)$ $t = -E' \left(F \frac{d\Theta}{df} + \frac{f + f_i}{2f} \Theta \right)$ $r = E' \frac{F}{2f} \Theta$ $F = f - f_i$	29

das Modifizierte Sachs'sche Verfahren schien uns für unseren Zweck zu kompliziert zu sein, da es uns nur darauf ankam, ein Mass für den Spannungszustand nach einer bestimmten Materialbehandlung zu finden. Wie wir dieses Mass bestimmten, ist im nächsten Abschnitt beschrieben.

¹⁾ Bezeichnungen s. Tab. 1.

²⁾ Die Indices n beziehen sich auf das stufenweise Abdrehen.

h) *Berechnung der Formänderungsenergie.*

Die Rechenverfahren ergeben die inneren Spannungen und diese können dann z. B. als Funktion von ϱ graphisch aufgetragen werden. Aus diesen Diagrammen lässt sich ersehen, wie gross die Spannungen in einer bestimmten Schicht sind, aber der Gesamtspannungszustand ist damit noch nicht gekennzeichnet. Man sollte diesen zahlenmässig festlegen können, um die Resultate nachher miteinander zu vergleichen. Es ist zum Beispiel nicht günstig, als Mass für den Gesamtzustand die Spannungsspitzen, die meistens beim grössten und kleinsten Durchmesser zu finden sind, anzugeben, denn deren genaue Höhe ist durchaus zufällig und hängt von der Art des Rechnens ab. Man könnte daran denken, die Steigung der Spannungs-Radius-Kurve als Mass zu verwenden, aber auch dem stehen Schwierigkeiten entgegen, da die Kurven oft sehr stark von einer Geraden abweichen, so dass es nicht *eine* Steigung gibt, die für den ganzen Verlauf charakteristisch wäre. Es empfiehlt sich auch nicht, die Fläche, die von der Spannungs-Radiuskurve oder von der Spannungs-Querschnittskurve umschrieben wird, als Mass einzuführen, da beiden eine einfache physikalische Bedeutung fehlt.

Als Grösse, die den Spannungszustand gut charakterisiert, scheint uns die freiwerdende Spannungsenergie günstig zu sein. Sie lässt sich aus den wirksamen Kräften und den entsprechenden Längenänderungen berechnen. Nach Gleichung (4) und (9) ist die Kraft, mit der die abgedrehte Schicht den übrigbleibenden Querschnitt zusammenhielt oder auseinanderzog:

$$P = ds_0 F \quad , \quad (35)$$

wobei wieder für ds_0 der Ausdruck aus Gleichung (3) eingesetzt werden darf. Die beim Abdrehen einer einzigen Schicht freiwerdende Arbeit ist also

$$\delta W = -P \delta l = EF \delta \lambda \delta l \quad (31)$$

Durch Summation oder Integration könnte so die gesamte freiwerdende Arbeit errechnet werden. Da diese Zahl jedoch dann von der Abdrehstufe, d. h. von der Grösse der jeweils abgedrehten Fläche abhängig ist, muss noch eine willkürliche Festsetzung getroffen werden, damit die an den einzelnen Probestäben erhaltenen Werte vergleichbar werden. Um die Rechnung möglichst einfach zu gestalten, legten wir uns nicht auf eine bestimmte Abdrehstufe fest, sondern rechneten die Arbeit aus, die frei wird, wenn der Stab in einem Mal auf die Hälfte seines Durchmessers abgedreht resp.

ausgebohrt würde. Bei einem Rohr wählt man analog eine Abdrehung oder Ausbohrung bis zum mittleren Durchmesser (Mittel zwischen Aussen- und Innendurchmesser). Die dem Durchmesser D^* entsprechenden Werte von F und Δl seien F^* und Δl^* . Dann wird

$$W^* = E/l_0 \cdot F^* \Delta l^{*2} \quad (32)$$

Um den Einfluss der verschiedenen Messlängen und Anfangsdurchmesser auszuschalten, dividierten wir diese Zahl jeweils noch durch das abgedrehte (resp. ausgebohrte) Volumen und bezeichneten die Grösse

$$W = W^* / V \quad (33)$$

als *spezifische Formänderungsarbeit*. Dabei ist

$$V = (f_0 - F^*) l_0 \quad (34)$$

3. Durchführung der Versuche.

a) Material.

Die meisten Versuche wurden mit der Legierung Avional M¹⁾ (Gattung Al-Cu-Mg nach VSM) durchgeführt, da diese Gattung den Prototyp der aushärtbaren Legierungen darstellt. Bei einigen Messungen verwandten wir Avional-D und -SK, Legierungen derselben Gattung, und teilweise auch Anticorodal (Gattung Al-Si-Mg nach VSM), das ebenfalls aushärtbar ist. Die Zusammensetzungen und hauptsächlichsten Eigenschaften dieser Legierung sind in Tab. 3 zusammengestellt.

Tabelle 3²⁾.

Legierung 5)	Zusammensetzung (Al = Rest)					Streck- grenze ³⁾ $\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	Zug- festig- keit σ_B kg/mm ²	Deh- nung δ %
	Cu %	Si %	Mn %	Mg %	Cr %			
Avional-M	3,5–5	0–1,0	0,2–1,5	0,2–1,5	—	26–36	40–48	12–20 ⁴⁾
Avional-D	3,5–5	0–1,0	0,2–1,5	0,2–1,5	—	24–30	38–44	16–22
Avional-SK	3,5–5	0–1,0	0,2–1,5	0,2–1,5	0,1–0,5	30–42	43–50	10–22
Anticorodal (Zustand B)	—	0,5–1,5	0,5–1,0	0,5–1,0	—	27–38	32–42	8–14

¹⁾ Über die Eigenschaften dieser Legierung s. z. B. IRMANN, Schweizer Archiv 5, 48–60 (1939).

²⁾ Die mechanischen Eigenschaften sind für den ausgehärteten Zustand von Pressprodukten angegeben.

³⁾ Bezieht sich auf 0,2% Dehnung.

⁴⁾ Kann bei Stangen mit Durchmesser über 5 mm bis auf 10% heruntergehen.

⁵⁾ Geschützte Wortmarken.

Diese Legierungen wurden in der Form von gepressten Rundstangen mit meist 40 mm Durchmesser (bei den früheren Versuchen 50 mm Durchmesser) verwendet. Die Länge betrug gewöhnlich 21 cm, bei den Reckversuchen jedoch 35 bis 40 cm.

Um die Stirnflächen der Stäbe, die für die Messung vollständig eben sein müssen, während der Bearbeitung (Abdrehen usw.) zu schützen, benützten wir zum Einspannen auf der Drehbank aufschraubbare Kappen. Die Kappen besaßen aussen einen Mitnehmerstift, der von der Drehbewegung der Bank erfasst wurde. Die äussersten Partien des Probekörpers wurden nicht abgedreht, denn hier sass das Gewinde (das während der Bearbeitung unter der Kappe lag). Die Messlänge l_0 , auf die es ankommt, ist also bei allen Abdrehversuchen kleiner als die Gesamtlänge L und zwar stets ca. 19 cm.

b) Messung.

1. Die *Längenänderungen* massen wir mit einer Mikrometerschraube, die auf einem Gestell mit Gegenanschlag montiert war. Es wurden Tausendstelmmillimeter (μ) abgelesen und die Streuung betrug nur 1–2 μ . Um alle Temperatureinflüsse zu vermeiden, befand sich die ganze Messlehre in einem Thermostaten mit Temperaturschwankungen von weniger als 0,5°. Dieser Thermostat hatte ca. 5 cm dicke, mit Isolationsmaterial gefüllte Doppelwände aus Holz und wurde mit einer Kohlenfadenlampe und einem Quecksilber-Kontaktthermometer mit Relais auf einer Temperatur von 30° gehalten. Auf diese Weise wurde erreicht, dass keine Temperaturreduktion notwendig war, da alle Messungen bei derselben Temperatur vorgenommen wurden. Vor jeder Messung befanden sich Probekörper und Mass mindestens eine Stunde lang im Thermostaten. Die Mikrometerschraube wurde zur Messung von aussen her durch eine mit Tuch abgeschlossene, kleine Öffnung betätigt und durch ein Glas abgelesen.

Damit immer an denselben Stellen gemessen wurde, war die Auflagestelle markiert. Jeder Punkt wurde 3mal abgelesen und davon und dann von den Längendifferenzen, die sich bei Entfernung einer Schicht zwischen den Ablesungen in den jeweils 4 Mess-Stellungen ergaben, das Mittel genommen. (Die 4 Mess-Stellungen entsprechen den 4 Lagen, die man erhält, wenn man den Probekörper 4mal um seine Achse um je 90° dreht.)

2. *Aussendurchmessermessung*: Dazu fand eine Messuhr Verwendung. Sie wurde auf ein Spezialgestell montiert, auf welches die Probekörper nach jeder Bearbeitung in immer wieder gleiche, unverrückbare Lage gelegt werden konnten. Ablesen konnte man

auf 1μ genau, aber die Streuung war eher grösser als bei der Längenmessung, nämlich etwa $2\text{--}3\mu$. Es wurde in 2 Lagen (durch eine Drehung des Probekörpers um 90° ineinander übergehend) gemessen. Die Mittelung erfolgte wie bei der Längsspannung (Mittel der Ablesungen, Mittel der Differenzen).

3. *Innendurchmesser-messung*: Den Innendurchmesser massen wir mit dem Innenkaliber „Micro-Maag“ (Messkopf 50 mm). Der Probezylinder von 80 mm Durchmesser wurde anfangs auf 50 mm ausgebohrt und die Durchmesseränderungen mit einer Ablesegenauigkeit von 2μ festgestellt. Die Streuung war auch nur 2μ . Gemittelt wurde wieder in gleicher Weise (3 Ablesungen).

Sowohl die Aussen- als auch die Innendurchmesser-Messungen sind relativ schwierig, exakt auszuführen, da es hierbei sehr viele Fehlerquellen gibt: leichte Unrundheit des Stabes, Durchmesser-Schwankungen im Rohr usw. Wir probierten deshalb die entsprechenden Verfahren (Sachs und Modifiziertes Sachs) nur in wenigen Versuchen aus.

c) *Beispiele und Vergleich der Verfahren und ihre Genauigkeit.*

Um das von uns *modifizierte Heyn-Bauer-Verfahren* näher zu erläutern, geben wir im folgenden ein Beispiel:

Probestab: Durchmesser ursprünglich $4,00\text{ cm} = D_0$, entsprechend
 $f_0 = 12,57\text{ cm}^2$

Messlänge: $l_0 = 19,0\text{ cm}$

Endquerschnitt $f_e = 0,99\text{ cm}^2$

Material: Avional-D, bei 520° während 2 h gegläht¹⁾, abgeschreckt und bei 50° während 24 h ausgehärtet.

Der Stab wurde sukzessive um je 2 mm (= Abnahme des Radius) abgedreht. Die entsprechenden Längenänderungen δl wurden summiert und diese Summe (Δl) als Funktion des jeweils noch vorhandenen Querschnitts aufgetragen (s. Fig. 1). Für die weitere Rechnung wurden nun auf dieser Kurve für einfache F -Werte, nämlich für $F = 12,57, 12, 10, 8, 6, 4, 2, 1$ das zugehörige Δl und als Steigung die Grösse dl/df abgelesen. Entsprechend den angegebenen Formeln rechneten wir nun mit diesen Werten weiter und erhielten so die Spannungen s . Für den Elastizitätsmodul E , der bei dieser Rechnung gebraucht wird, setzten wir bei den ersten Versuchen stets 6800 kg/mm^2 (als Mittelwert) ein. Später bestimm-

¹⁾ Diese Temperatur ist höher als die normale Homogenisierungstemperatur ($495\text{--}500^\circ$) und wurde versuchsweise so gewählt.

ten wir E für jeden Stab (nach dem Abdrehen) und benützten diesen Wert. In Abhängigkeit von dem aus der Fläche F zurückberechneten Radius ϱ sind die Spannungswerte s in Fig. 2 aufgetragen. Man sieht daraus, dass aussen Druck- und innen Zugspannungen herrschen. Diese Erscheinung wird bei allen ausgehärteten Probestäben beobachtet und ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die inneren Partien des Stabes, die während der Abkühlung (Abschrecken) länger warm bleiben und sich entsprechend auch länger im plastischen Gebiet befinden, mehr zusammenschrumpfen als die äusseren.

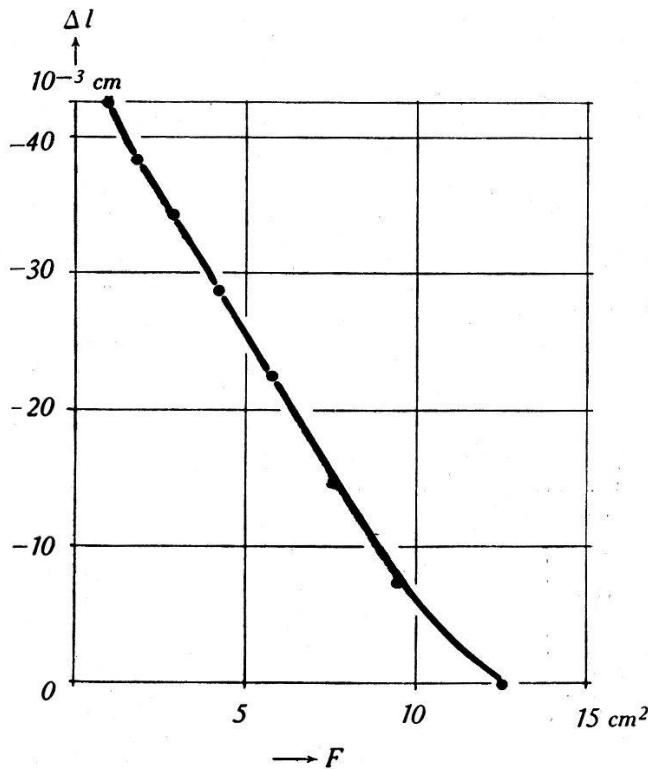


Fig. 1.

Gesamtverlängerung Δl als Funktion des noch vorhandenen Querschnitts F .
Material: Avional M, gegl. 2 h bei 520°, abgeschr. und ausgeh. 24 h, 50°.

In der Fig. 2 ist zum Vergleich die Spannungsverteilung, die man nach dem *Heyn-Bauer-Verfahren* erhält, gezeichnet (strichpunktierte Kurve). Die Abweichung der beiden Kurven ist verhältnismässig gering und geht, wie schon erwähnt, auf die etwas gröbere Rechnungsweise des gewöhnlichen Heyn- und Bauer-Verfahrens zurück. Zur Ermittlung der spezifischen Formänderungsarbeit lasen wir aus dem Diagramm der Fig. 1 die zum halben Anfangsdurchmesser D^* gehörige Verlängerung ($-33,2 \cdot 10^{-3}$ cm) ab und errechneten nach Gleichung (32) und (33) $W = 0,69$ kgcm/cm³.

Zur Demonstration der *Zuverlässigkeit* der Messungen lassen wir hier noch ein Beispiel folgen, bei welchem es sich um Anticorodal handelt, das während 2 h bei 540° geglüht, abgeschreckt und während 12 h bei 160° warmgehärtet wurde. Im Spannungsverlauf zeigt sich eine ausgeprägte Kerbe beim Radius 1,75 cm (s. Fig. 3). Die gleiche Erscheinung wurde bei anderen Abschnitten derselben Pressstange gefunden. Wie eine nachträgliche Kornätzung der Stirnflächen ergab (s. Fig. 4), besass diese Stange eine grobkristalline Zone, deren Grenzfläche der Lage des Spannungsminimums entspricht.

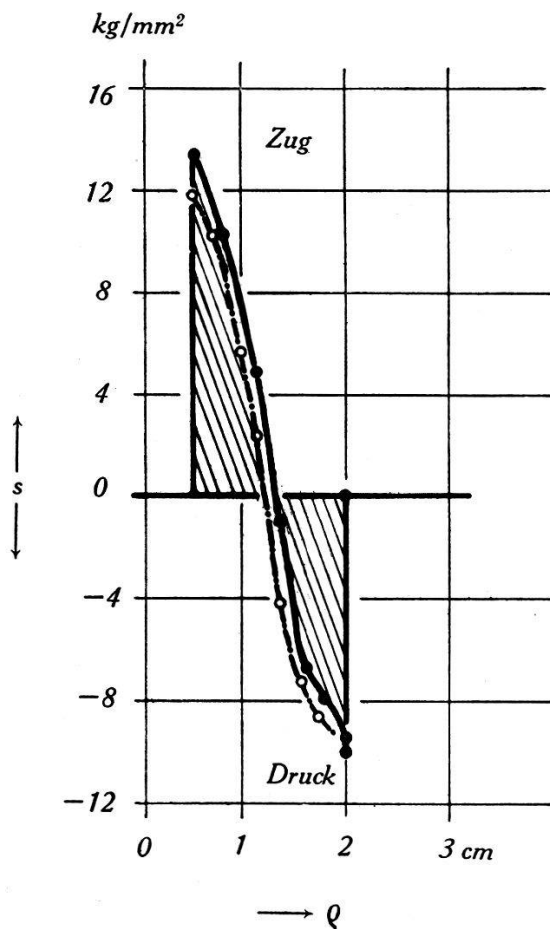


Fig. 2.

Eigenspannungen s als Funktion des Radius ρ ; Material wie bei Fig. 1.

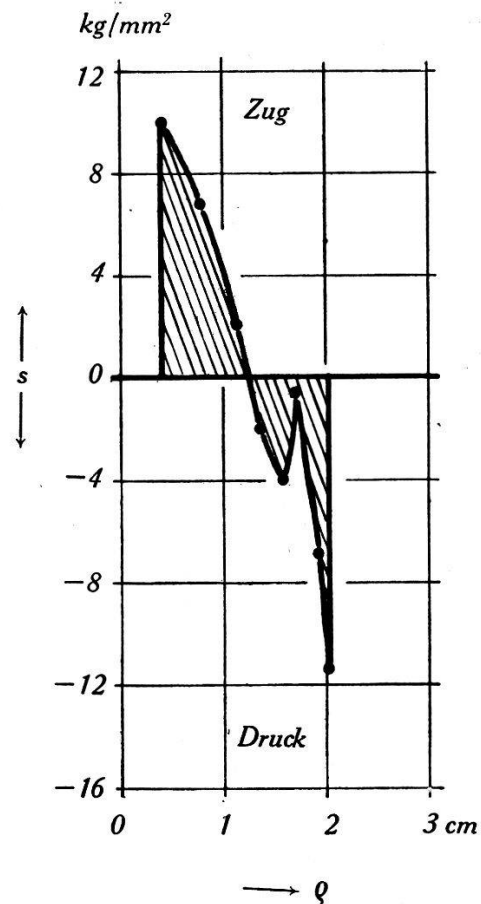


Fig. 3.

Eigenspannungen s als Funktion des Radius ρ . Stab aus Anticorodal mit grobkristalliner Randzone. Ge-
glüht 2 h bei 540°, abgeschreckt,
ausgehärtet 12 h bei 160°.

d) Genauigkeit der Ergebnisse.

Wir berechnen den mittleren Fehler der Formänderungsarbeit mit Hilfe der Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate. In der Tabelle 4 sind die Werte der spezifischen Form-

änderungsarbeiten W von verschieden ausgehärteten Probestäben und die Abweichungen ε von ihrem Mittelwert zusammengestellt. Material: Avional-M.

Alle Stäbe sind 2 h bei 495—500° gegläht und dann abgeschreckt. Mit A sind die anschliessend während 4 d bei 20° und mit B die während 24 h bei 50° ausgelagerten Proben bezeichnet.

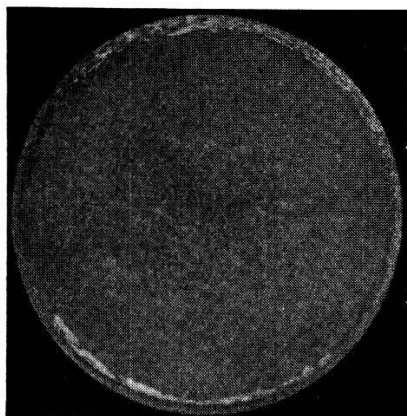


Fig. 4.

Querschliff durch den Anticorodalstab mit grobkristalliner Randzone (s. Fig. 3).

Tabelle 4.

A				B			
Nr.	W kgcm/cm ³	$\varepsilon \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon^2 \cdot 10^{-4}$	Nr.	W kgcm/cm ³	$\varepsilon \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon^2 \cdot 10^{-4}$
53	0,32	0	0	34	0,52	+ 14	196
54	0,38	+ 6	36	44	0,32	— 6	36
87	0,38	+ 6	36	45	0,43	+ 5	25
88	0,20	— 12	144	56	0,25	— 13	169
Mittel: 0,32 Summe ε^2 : 216				Mittel: 0,38 Summe ε^2 : 426			

Der mittlere Fehler der Einzelwerte berechnet sich nach der Formel:

$$m^2 = \frac{\sum \varepsilon^2}{n-1} \quad (35)$$

(n = Anzahl der Beobachtungen)

Es wird:

$$m_A = \sqrt{216/3} \cdot 10^{-2} = \pm 0,085 \text{ kgcm/cm}^3$$

$$m_B = \sqrt{426/3} \cdot 10^{-2} = \pm 0,12 \text{ kgcm/cm}^3$$

Die Streuung (d. h. der mittlere Fehler) der einzelnen Werte der spezifischen Formänderungsenergie beträgt also in diesem Fall ca. $0,1 \text{ kgcm/cm}^3$ oder etwa 20 bis 30 % des Wertes. Es ist zu beachten, dass diese Tatsache kaum auf Messfehlern beruht, sondern dass sie der Ausdruck der *natürlichen Streuung* des inneren Spannungszustandes von gleich behandelten Stäben ist. Die relativ grosse Streuung kommt in einigen weiter unten mitgeteilten Ergebnissen zum Ausdruck.

4. Ergebnisse.

a) Presszustand (Avional-M).

Die von uns im Presszustand untersuchte Probe hatte eine spezifische Formänderungsarbeit von $0,085 \text{ kgcm/cm}^3$. Die Spannungen hatten einen Maximalwert von 6 kg/mm^2 . Wie erwartet, sind diese Zahlen im Vergleich zu denjenigen, die an ausgehärteten Stäben gemessen wurden, klein. Bei der Spannungsverteilung über den Querschnitt fällt auf, dass in den Aussenzonen *Zug*- und in den Innenzonen *Druck*-Spannungen vorhanden sind. Da beim Pressen der Materialfluss aussen infolge der Reibung an der Matrice gehemmt wird, ist dieses Verhalten verständlich.

b) Normale Aushärtung (Avional-M).

Die Probestäbe wurden bei $495\text{--}500^\circ$ während 2 h geglüht (homogenisiert), abgeschreckt in Wasser von 20° und entweder während 24 h bei 50° oder während 4 d bei 20° der Aushärtung unterworfen. Über die Resultate wurde zum Teil bereits bei der Genauigkeitsbetrachtung im vorhergehenden Abschnitt 3 d berichtet. Die spezifische Formänderungsenergie der kalt und der warm ausgehärteten Proben ist innerhalb der Fehlergrenze gleich. Die Spannungsmaxima liegen bei 10 bis 12 kg/mm^2 .

In ausgehärtetem Material haben wir demnach stets hohe innere Spannungen. Sie werden gewöhnlich *Abschreckspannungen* genannt. Nach der herrschenden Ansicht stehen sie mit der Verfestigung im Zusammenhang. Über die Deutung der Spannungsverteilung s. oben, Abschnitt 3 c.

c) Einfluss der Temperatur vor dem Abschrecken.

1. *Avional-M*. Bei den endgültigen Versuchen wurden alle Probestäbe zuerst bei der Homogenisierungstemperatur ($495\text{--}500^\circ$) geglüht und dann vor dem Abschrecken an der Luft auf verschiedene Temperaturen bis hinunter zu 350° abgekühlt. Der Zusammenhang zwischen Formänderungsarbeit und Temperatur vor dem Ab-

schrecken ist aus der *Fig. 5* ersichtlich. Trotz der starken Streuung, die naturgemäss vorhanden ist¹⁾, erkennt man, dass ein Spannungsmaximum vorliegt. Dieses liegt auffälligerweise nicht bei der Homogenisierungstemperatur, sondern ziemlich darunter bei ca. 450°. Der grössten Verfestigung (die eben nach Glühung bei der Homogenisierungstemperatur eintritt) entspricht also nicht der stärkste innere Spannungszustand. Zur Verdeutlichung ist als Mass für die Festigkeit in der *Fig. 5* die Brinellhärte eingetragen.

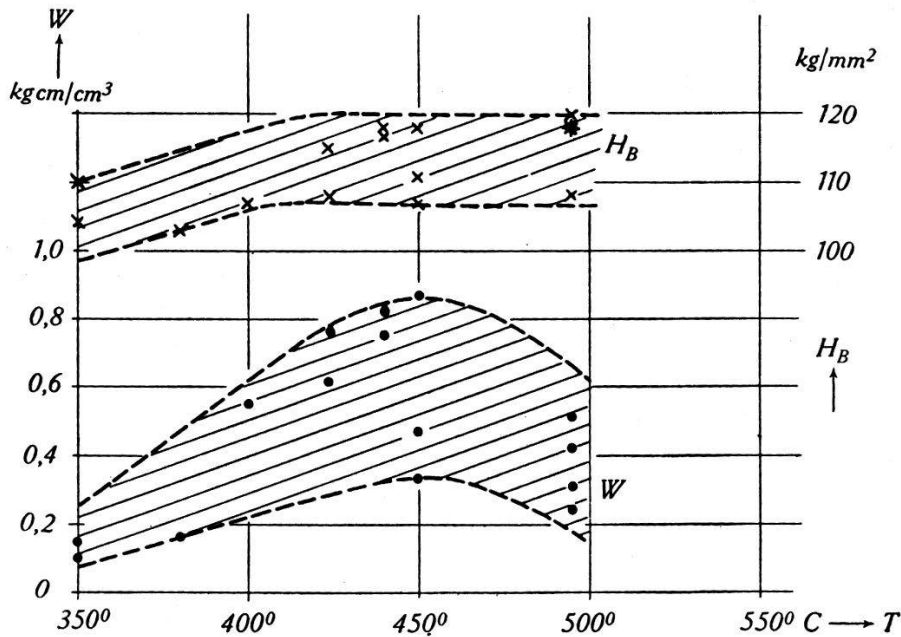


Fig. 5.

Abhängigkeit der spezifischen Formänderungsarbeit W und der Brinellhärte H_B von der Temperatur T vor dem Abschrecken. Material: Avional M.

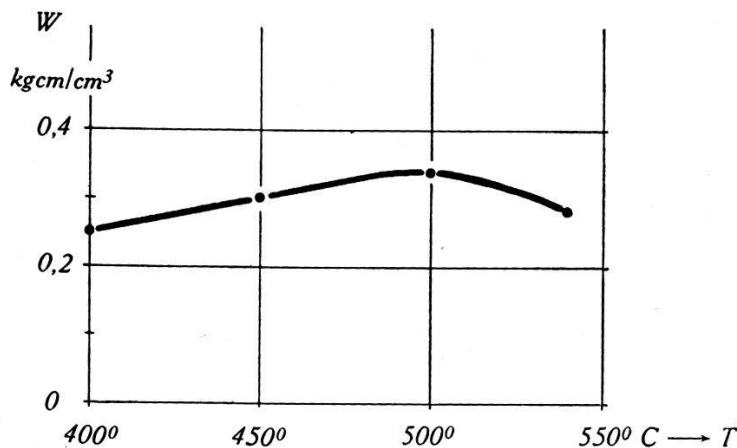


Fig. 6.

Abhängigkeit der spezifischen Formänderungsarbeit W von der Temperatur T vor dem Abschrecken. Material: Anticorodal.

¹⁾ S. Genauigkeitsbetrachtung im Abschnitt 3d.

2. *Anticorodal*. Die Versuche wurden nach den gleichen Grundsätzen wie bei Avional durchgeführt. Die Homogenisierungstemperatur liegt in diesem Fall bei 540° . Wie die graphische Darstellung der Ergebnisse in *Fig. 6* zeigt, ist der Verlauf der Kurve eher flacher als bei Avional. Wiederum liegt das Maximum nicht bei der Homogenisierungstemperatur, sondern erheblich darunter, bei etwa 500° .

d) *Einfluss der Temperatur des Abschreckmittels.*

1. Es wurde mit Avional-M eine normale thermische Behandlung durchgeführt (Glühen bei $495\text{--}500^{\circ}$ während 2 h, Abschrecken und Aushärten bei 50° während 24 h). Neben der gewöhnlichen Abschreckung in Wasser von 20° wurde jedoch noch eine solche in Wasser von 60° resp. 100° vorgenommen. Wie man aus *Fig. 7* sieht, nimmt die Formänderungsenergie mit der Erhöhung der Temperatur des Abschreckwassers stark ab und sinkt auf sehr kleine Werte. Während die spezifische Formänderungsarbeit bei Abschreckung in 20-grädigem Wasser im Mittel (4 Probestäbe) $0,38\text{ kgcm/cm}^3$ beträgt, ist die für 100-grädiges Wasser im Mittel auf $0,0040\text{ kgcm/cm}^3$ gefallen. Die Festigkeitswerte (aufgezeichnet ist die Brinellhärte) nehmen — wie erwartet — ebenfalls schwach ab mit steigender Temperatur des Abschreckwassers.

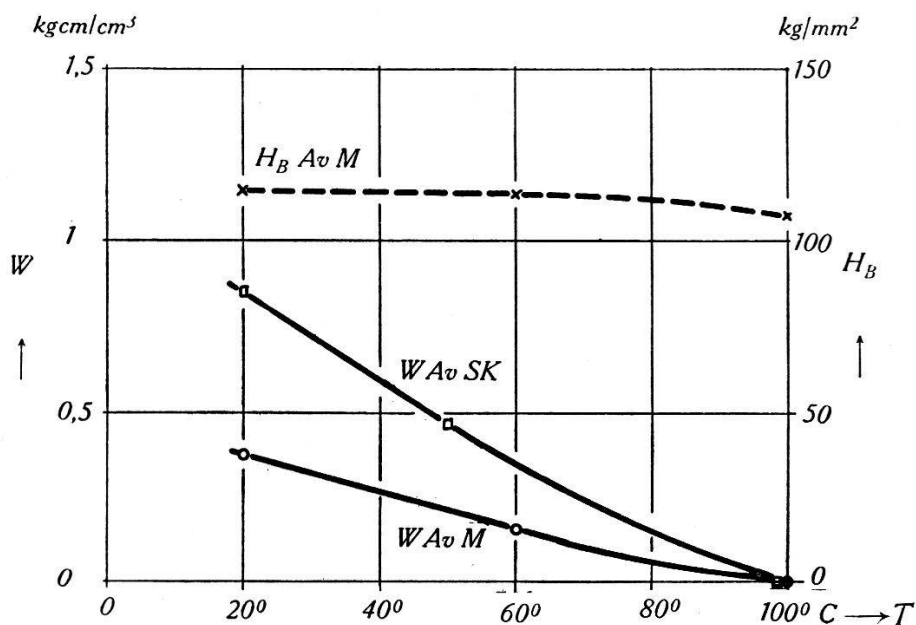


Fig. 7.

Spezifische Formänderungsarbeit W und Brinellhärte H_B als Funktion der Temperatur T des Abschreckwassers. Material: Avional M und SK.

Die Punkte sind Mittelwerte.

2. Analog verhält sich *Avional-SK* (gleiche Homogenisierungs-glühung wie *Avional*). Der Verlauf der Formänderungsarbeit ist auch in *Fig. 7* enthalten. Ähnliche Resultate wurden schon in der Arbeit von v. ZEERLEDER (l. c.) und neuerdings von FROMMER und LLOYD¹⁾ mitgeteilt.

e) *Erwärmung bei verschiedenen Temperaturen bis zu 400°.*

Glüht man die Pressstangen *ohne* vorhergehende *Aushärtung*, so ergibt sich eine stetige Abnahme der Formänderungsarbeit (resp. der Spannungen, s. *Fig. 8*) mit der Glüh-temperatur. Die Glühdauer

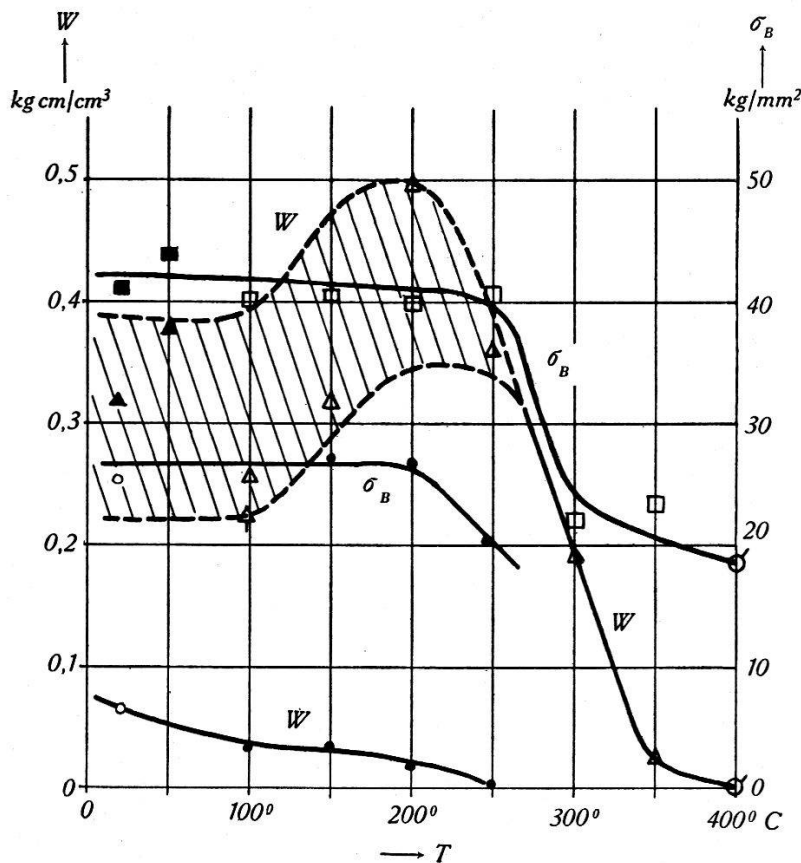


Fig. 8.

Abhängigkeit der spezifischen Formänderungsarbeit W und der Zugfestigkeit σ_B von der Erwärmungstemperatur T . Material: *Av M.*

- \triangle = W , nach Aushärtung erwärmt während 24 h
- \blacktriangle = W , Aushärtung bei 20° und 50°
- \square = σ_B , nach Aushärtung erwärmt während 24 h
- \blacksquare = σ_B , Aushärtung bei 20° und 50°
- \triangle = W , nach Aushärtung erwärmt während 6 h
- \oslash = normal weichgeglüht (400°/4 h)
- \bullet = ohne vorhergehende Aushärtung erwärmt während 24 h
- \circ = Presszustand

¹⁾ FROMMER und LLOYD (J. Inst. of Metals **70**, 91 (1944)) finden, dass die Spannungen erst von einer Wassertemperatur von 70° an abnehmen.

betrug jeweils 24 h. Bei 260—270° ist von den Spannungen im Presszustand praktisch nichts mehr vorhanden. Die Zugfestigkeit ist bis 200° ziemlich konstant und beginnt bei höheren Temperaturen stark zu fallen. Bei diesen nicht ausgehärteten Probestäben fanden wir, dass bei den schwachen auftretenden Spannungen meist zu äusserst und zu innerst im Stab Druckspannungen und in einer mittleren Zone Zugspannungen vorhanden waren.

Die vor dem Glühen *ausgehärteten* Proben ergaben einen starken Abfall der Formänderungsenergie bei Temperaturen über ca. 250°. Bemerkenswert ist hier, dass zuerst — bis etwa 200° — ein Anstieg des Spannungszustandes eintritt. Sofern es sich nicht nur um Streuung handelt, hängt diese Erscheinung sehr wahrscheinlich mit der in diesen Temperaturbereichen wirksamen Warmaushärtung zusammen. Entsprechend beginnt die Zugfestigkeit auch erst bei etwa 250° zu fallen (Darstellung Fig. 8).

Nach gewöhnlicher *Weichglühung* (4 h bei 400°, langsam abkühlen lassen) sind die vorher vorhandenen Spannungen praktisch vollständig verschwunden. Die spezifische Formänderungsarbeit betrug bei unserem Versuch nur noch 1,4 gcm/cm³ und die Spannungen erreichten im Maximum noch 1 kg/mm². Der Energiewert fügt sich gut in die Kurve der Fig. 8 ein.

f) Einfluss des Reckens.

Nach den ersten Tastversuchen gingen wir immer folgendermassen vor:

Die Probestäbe waren ca. 40 cm lang, wurden in der mittleren Partie auf einen Durchmesser von 30 mm abgedreht und mit Schultern versehen wie Zerreissprobestäbe. In dieser Gestalt wurden sie auf einer 60 t Zerreissmaschine gereckt. Anschliessend drehten wir hieraus wieder einen ca. 21 cm langen Stab mit 2 planen Flächen. Wenn man diese Vorsichtsmassregel nicht ergreift, brechen die Stäbe immer innerhalb des Bereiches der Einspannbacken bei schon relativ niedrigen Dehnungen (Kerbwirkung).

Zuerst untersuchten wir die Spannungen in Stäben, die vorher weichgeglüht worden waren (während 4 h bei 400° erhitzt). Die Formänderungsarbeit ist in Fig. 9 als Funktion des Reckgrades aufgetragen. Mit steigendem Reckgrad fällt sie zuerst schwach ab und durchläuft dann anscheinend ein sehr flaches Minimum. Der Wiederanstieg geht aus unseren Messungen wegen der verhältnis-

mässig grossen Streuung nicht eindeutig hervor. Das Auftreten von *Reckspannungen*, die dieser Anstieg anzeigt, ist sicher von den genauen Reckbedingungen und vom Zufall abhängig, da eigentlich eine inhomogene Belastung zur Spannungserzeugung benötigt wird. (Unsere Belastung war — im grossen gesehen — homogen.)

Eine weitere Versuchsserie betraf den Einfluss des Reckgrades auf die Spannungen in Stäben, die vorher *vollständig ausgehärtet* waren (2 h bei 495—500° gegläht, abgeschreckt und 24 h bei 50° warmgehärtet). Das Ergebnis ist wieder aus der *Fig. 9* ersichtlich.

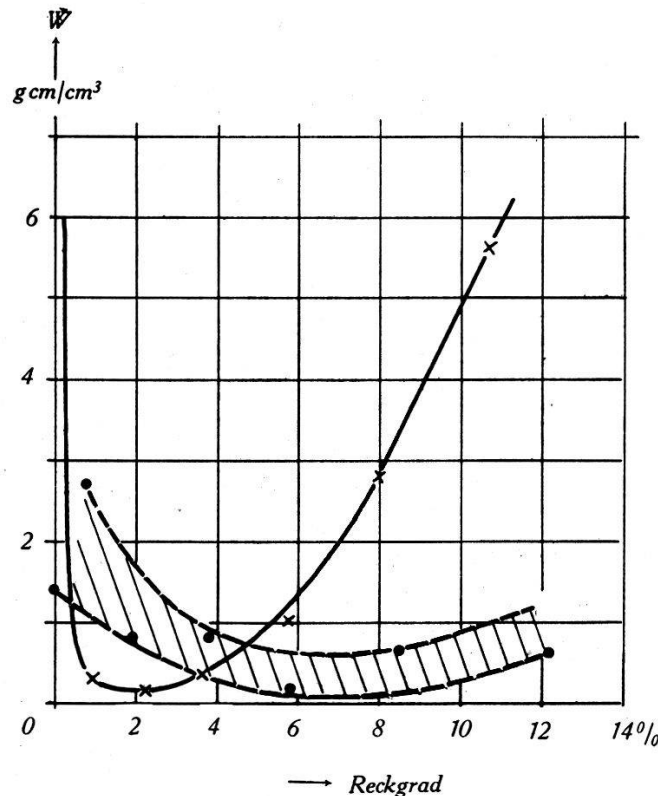


Fig. 9.

Abhängigkeit der spezifischen Formänderungsarbeit W vom Reckgrad. Reckung nach Weichglühung und nach Aushärtung. Material: Avional M.

• = Reckung nach Weichglühung. x = Reckung nach Aushärtung.

Schon bei 1% Reckgrad sind die Abschreckspannungen praktisch vollständig zerstört¹⁾. Beim Vergleich der Fig. 9 und der Fig. 6 sieht man, dass die Formänderungsarbeit rund 1000mal kleiner

¹⁾ Dass die Abschreckspannungen durch eine 2%ige Reckung oder durch eine 1%ige Stauchung ziemlich vollständig zerstört werden, geht schon aus der Arbeit von V. ZEERLEDER (l. c.) hervor.

geworden ist. Die Spannungsspitzen sind nun von der Grössenordnung $0,2 \text{ kg/mm}^2$. Nach Durchgang durch ein Minimum bei ca. 2% beginnt sofort ein enormer Anstieg. Die Reckspannungen wachsen erheblich schneller als bei den vorher weichgeglühten Stäben. Im Gegensatz zu den Ergebnissen nach der Weichglühung zeigten sich nun immer aussen Druck- und innen Zugspannungen.

Diese Spannungsverteilung ist plausibel: Bei schwacher Reckung werden die Druckspannungen in den Aussenzonen des ausgehärteten Stabes entlastet. Entsprechend vermindern sich auch die Zugspannungen im Innern und die Abschreckspannungen sind damit zum grössten Teil verschwunden. Bei weiterer Reckung wird der Werkstoff in den äusseren Partien stärker verformt als in den Innenzonen¹⁾. Infolgedessen hat man in der Entlastung innen Zug- und aussen Druckspannungen.

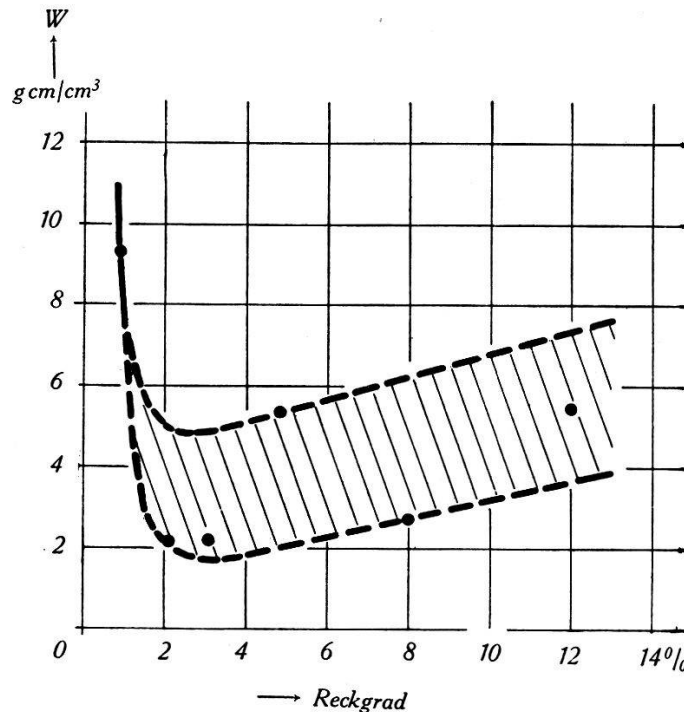


Fig. 10.

Abhängigkeit der spezifischen Formänderungsarbeit W vom Reckgrad nach dem Abschrecken. Material: Av. M.

Zuletzt untersuchten wir noch die Spannungen in Material, das *unmittelbar nach* dem Glühen (2 h bei 495°) und *Abschrecken*

¹⁾ Hierbei mag die Form der Probestäbe eine Rolle spielen. Sicher ist aber auch die bekannte Erscheinung (die z. B. KOCHENDÖRFER in seinem in Fussnote 2 erwähnten Buche beschreibt) beteiligt, dass die äusseren Partien leichter verformbar sind als die inneren.

gereckt wurde¹⁾. Das Resultat ist aus *Fig. 10* ersichtlich. Im wesentlichen haben wir hier die gleichen Verhältnisse wie bei der Reckung nach vollständiger Aushärtung. (Der grössern Streuung wurde durch Angabe eines Streubereichs Rechnung getragen.) Hauptsächlich ist wieder festzuhalten, dass bei Reckgraden von über ca. 1% die Abschreckspannungen praktisch vollständig zerstört sind. Wiederum steigen die Spannungen bei Reckgraden über 3% anscheinend schwach an.

5. Schlussfolgerungen.

Aus den eingangs genannten Gründen sind Eigenspannungen im allgemeinen nicht erwünscht. Da sie bei der Aushärtung von Aluminiumlegierungen in hohem Masse entstehen, sollten ausgehärtete Produkte einer einfachen Nachbehandlung unterworfen werden, um die inneren Spannungen zu zerstören. Am einfachsten ist es, Stangen, Rohre, Bleche usw. schwach nachzurecken resp. zu richten, wie es gebräuchlich ist. Schon bei einem Prozent Reckgrad werden die Spannungen weitgehend und bei zwei bis drei Prozent Reckgrad maximal zerstört. Dabei ist es nach unseren Versuchen gleichgültig, ob die Streckung resp. das Richten unmittelbar nach dem Abschrecken oder erst nach der Kalt- oder Warmaushärtung ausgeführt wird.

Eine andere Möglichkeit, die inneren Spannungen zu zerstören, besteht darin, dass der Gegenstand bei einer Temperatur geglüht wird, bei welcher der Spannungszustand aufgehoben wird, die Festigkeitseigenschaften aber noch nicht leiden. Leider gibt es für Avional keine solche Temperatur, denn aus *Fig. 9* geht deutlich hervor, dass die Eigenspannungen und die Festigkeit bei denselben Glühtemperaturen — bei ca. 250° — merklich zu sinken beginnen. Wenn die mechanischen Eigenschaften also diejenigen des ausgehärteten Materials sein sollen, kommt eine Erwärmungsbehandlung nicht in Frage. Spielt die Festigkeit jedoch nicht eine massgebende Rolle, so ist das Weichglühen eine sichere Massnahme, um die Eigenspannungen zu beseitigen.

Versucht man durch Steigerung der Temperatur des Abschreckwassers die Entstehung innerer Spannungen zu vermeiden,

¹⁾ Da jede Messung der Eigenspannungen an einem Stab mehrere Tage in Anspruch nahm, wurden die abgeschreckten und gereckten Proben jeweils während 4 bis 5 Tagen gelagert, bis die Kaltaushärtung fertig war. Auf diese Weise vermieden wir, dass während der Spannungsmessung irgendwelche äussere oder innere mechanische Änderungen der Proben eintraten, die mit der Kaltaushärtung zusammenhängen.

so muss man bis ca. 100° gehen. Abgesehen von den vermehrten Umständen und Kosten erleiden jedoch die mechanischen Eigenschaften hiebei bereits eine merkliche Einbusse.

Für die Erlaubnis zur Veröffentlichung dieser Arbeit spricht der Verfasser der Aluminium-Industrie A.-G. seinen besten Dank aus.

Neuhausen,
Forschungsinstitut der
Aluminium-Industrie-Aktien-Gesellschaft
(Chippis).
