

**II. Internationale Tagung
über
glasfaserverstärkte Kunststoffe und Gießharze**

vom

13. - 18. März 1967

in Berlin

**Institut für organische Hochpolymere
der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin**

Prüfung der Relaxation und der Beständigkeit von GFK unter Spannung

K. P. Božant, L. Skupin

Bauforschungsinstitut der Technischen Hochschule in Prag, ČSSR

Es wurde eine einfache Methode für die Prüfung der mechanischen Konstanten und Festigkeiten langdauernd belasteter Glasfaserlaminat und anderer Kunststoffe ausgearbeitet, bei der die streifenartigen Probemuster durch Fixierung ihrer Enden in einem Bogen deformiert werden. Die Relaxation der Spannung wird durch Messung der Verringerung der Bogenschubkraft des Streifens bestimmt. Aus der Veränderung der Kraft bei einer kleinen plötzlichen Änderung der Spannweite wird sodann die Verringerung des Elastizitätsmoduls durch Degradation festgestellt. Die einfache Auswertung der Messung ist aus dem Grunde möglich, weil das Gesetz des Kriechens der Kunststoffe, einschließlich der Laminat, im wesentlichen linear ist. Der Vorteil dieser Methode besteht überdies auch darin, daß die im gespannten Zustand befindlichen Prüfkörper leicht in andere Medien, Bäder und Veterometer verlagert werden können. Durch Prüfungen wurden Angaben über den Einfluß verschiedener aggressiver Medien auf die Steifigkeit und Festigkeit unter Spannung befindlicher Prüfkörper aus Glasfaserlaminaten gewonnen.

1. Anordnung einer langdauernden Prüfung

a) Eine einfache Meßmethode ist schematisch auf Bild 1 veranschaulicht. Der gebogene Streifen wird in Vorsprünge auf einer festen Unterlage verspreizt und die Bogenschubkraft wird in einzelnen Augenblicken gemäß Bild 1 mittels Kompensationsmethode auf einer Waage durch Extrapolation aus den Werten der Bogenschubkraft, die zum Beispiel bei der Zusammenpressung der Enden zueinander um 1 mm und 2 mm gemessen wird, bestimmt. Gleichzeitig kann aus den gemessenen Werten auch der Tangentenelastizitätsmodul im gegebenen Augenblick bestimmt werden. Die Aufstützung des Streifens muß allerdings so angeordnet sein, daß jeder Einfluß von Reibung ausgeschlossen bleibt.

b) Statt Wägungen kann zur Kompensationsmessung der Kraft auch ein starres Dynamometer verwendet werden, zum Beispiel mit einem elektrischen Kraftgeber mit ohmschem Widerstand nach Bild 2. Als Pühler des Dynamometers dient eine mit einem Ausschnitt versehene Stange, die durch eine Öffnung im Anschlag der Unterlage durchgeht.

c) Kleine Zusammenpressungen des Streifens bei der Messung der Kraft können ausgeschlossen werden, wenn die Bogenschubkraft aus Veränderungen der Eigenfrequenz einer zwischen den Enden des Streifens aufgezogenen Saite bestimmt wird. Diese Methode hat jedoch eine größere Streuung zur Folge und ist weniger verlässlich.

d) Die Kompensationsmethode mit Dynamometer kann auch zur dynamischen Prüfung verwendet werden, zum Beispiel zur Messung von Veränderungen der Bogenschubkraft bei pulsierender Deformation (Bild 3).

2. Geometrische Form des gebogenen Streifens

Wenn wir in Betracht ziehen, daß das Gesetz des Kriechens linear ist, ist die im Verlauf der Zeit eintretende Formveränderung des Bogens vernachlässigbar, was auch durch Resultate von Prüfungen mit Glasfaserlaminaten und mit PVC bestätigt wurde. Bei konstanter Biegesteifigkeit des dünnen Streifens $E_0 I$ erfüllt die Biegelinie bei großen Deformationen - sogenannten *Elastica* - die Differentialrechnung:

$$(1) \quad d^2 \lambda / ds^2 = - (u \lambda) / h \cdot \rho$$

wo s die Koordinate der Bogenlänge, h die Pfeilhöhe des Bogens, ρ den Krümmungsradius des Bogens im Scheitelpunkt, y die Entfernung des Punktes von der Sehne, X die Längekoordinate der Sehne, $\sin \lambda = dy/ds$, $dx = ds \cdot \cos \lambda$ bedeutet.

Die Lösung führt zu elliptischen Integralen, aus denen die Tabelle 1 ausgerechnet wurde, die alle erforderlichen Parameter der *Elastica* anbietet (Bild 4).

3. Bestimmung des Relaxationsmoduls, des momentanen Elastizitätsmoduls und der Spannung. Der Relaxationsmodul ist definiert als $E_{rel}(t) = \sigma(t)/\epsilon_0$, wo ϵ_0 die konstante er-

schwungene Deformation und $\sigma(t)$ die Spannung in der Zeit t bedeutet.

Es gilt:

$$(2) \quad E_{rel}(t) = P(t) \cdot h \cdot \rho / y$$

wo $P(t)$ die Bogenschubkraft in der Zeit t bedeutet.

Für die relative Relaxation bei dem linearen Gesetz des Kriechens gilt:

$$(3) \quad \frac{E_{rel}(t)}{E_0} = \frac{P(t)}{P_0}$$

und für den momentanen Elastizitätsmodul ergibt sich aus der Kraft dP , die für die Zusammenpressung der Streifenenden um den kleinen Wert dl notwendig ist, die Beziehung:

$$(4) \quad E = \frac{h \cdot l_0^2}{I} \cdot \frac{dP}{dl} \cdot \frac{d(l/L_0)}{d(l/l_0)}$$

Wenn es sich um eine große plötzliche Veränderung der Streifenspannweite handelt, beträgt der entsprechende Modul:

$$(5) \quad E = \frac{l_0 (P_1 h_1 - P_2 h_2)}{I (L_1 h_1 - L_2 h_2)}$$

wo h_1, ρ_1, P_1 und h_2, ρ_2, P_2 die ursprünglichen und die veränderten Werte bedeuten. Normale Spannungen in den Randfasern sind:

$$(6) \quad \sigma = \left(- \frac{\cos \alpha}{F} \pm \frac{dy}{2I} \right) P$$

wo d die Dicke des Streifens und F die Fläche des Querschnitts bedeuten.

Die von der Biegung hervorgerufene Spannung ist auch

$$\sigma = \pm \frac{1}{2} E \cdot \frac{d}{\rho}$$

wo ρ der Krümmungsradius ist.

4. Ausgeführte Prüfungen der Relaxation und aus denselben gezogene Schlussfolgerungen

Wir werden nun einige Resultate von Prüfungen anführen, die im Bauforschungsinstitut der Technischen Hochschule in Prag ausgeführt wurden. Verwendet wurden hierzu 2 mm dicke, 400 mm lange und 40 - 70 mm breite Streifen, die aus Laminatplatten herausgeschnitten wurden, die durch 5 Schichten Glasgewebe Yplast 350 mit Leinwandbindung, oder durch eine Glasmatte verstärkt wurden. Diese Verstärkungen hatten gewichtsmäßig einen Harzgehalt von 50 % bei Laminaten mit Gewebe und 35 % bei Laminaten mit Matte, und verwendet wurde Polyesterharz ChS 104. Die Meßresultate sind in den Bildern 5 bis 14 angeführt. Aus ihnen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Streuung der absoluten Werte σ und E ist bei handlaminieren Platten bedeutend (bis 20 %); es ist jedoch möglich solche relative Werte der Relaxation zu vergleichen, deren Variabilitätskoeffizient 2 bis 5 % betrug (bei höheren Temperaturen mit Rücksicht auf die Unvollkommenheit der Einrichtung bis 10 %).
- Die Relaxationskurven haben im semilogarithmischen Maßstab die Form von Geraden in einem sehr weiten Bereich (weites Spektrum der Relaxationszeiten), ungefähr von 1 Minute bis zu einem Jahr bei 20°C).
- Die relative Relaxation der durch Gewebe verstärkten Laminaten ist bei einem Winkel von 45° zur Faser ungefähr um 50 bis 100 % höher als in Faserrichtung. Bei matteverstärkten Laminaten ist sie überraschenderweise nur wenig höher als bei Gewebe entlang der Fasern.
- Die Temperatur ist der bedeutendste Faktor. Aber auch bei 100°C bleibt noch eine Restspannung.
- Die Lagerung im Wasser erhöht die Relaxation bei nicht appetiertem Gewebe beil. um 30 %; die Erhöhung nimmt ihren Anfang erst ungefähr 1 Stunde nach dem Eintauchen. Damit wird der mechanische Charakter der Adhäsion zwischen Glas und Harz bestätigt.
- Die gleiche Erhöhung entsteht auch bei der Lagerung im Klimaschrank (Veterometer), wenn Berieselung mit Wasser und Bestrahlung mit ultraviolett Strahlen erfolgt.
- Die relative Relaxation ist nur schwach von der Spannung abhängig (kleine Nicht-linearität).
- Die Geltung des Prinzips der Superposition mit der Zeit ist bei veränderlicher Deformation grob annehmbar. Für entgegengesetzte wechselnde Deformationen wurde gute Über-

einstimmung erhalten. Für stufenweise Belastung, Entlastung und wiederholte Belastung macht sich die Nichtlinearität erkenntlich, wie wenn $d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$, was offensichtlich gewissen vorhergehenden Defekten in der Struktur entspricht (während für plötzliche Belastungen $d^2\sigma/d\varepsilon^2 < 0$ gilt, das ist elastisch-plastischer Charakter). Bei plötzlicher großer Steigerung oder Senkung der Temperatur wurde kein Gegensatz zum Prinzip der Zeit-Temperatur-Superposition festgestellt (mit Anwendung der Hypothese der Zeitskalareduktion). Besonders bei Temperatursenkung kommt es zu keiner Steigerung der Spannung bei gleicher Deformation, das Absinken nimmt seinen Fortgang langsamer.

- Die Deformationen sind bei einer Temperatur von 20°C reversibel nur ungefähr zu 45 %, im Wasser beil. zu 40 %, bei 60°C zu 10 %. Bei einer Temperatur von 20°C ist der Reversibilitätsprozeß nicht einmal nach einem Jahr beendet.
- Bei einer Temperatursteigerung auf 80° bis 100°C sind langdauernde Deformationen vollkommen reversibel.

5. Dauerhaftigkeitsprüfungen

Die chemische Degradation des Materials nimmt ihren Fortgang in der Regel in der Richtung von der Oberfläche zur Mitte des Querschnitts, so daß sich die vom Trägheitsmoment des Querschnitts abhängigen mechanischen Eigenschaften (beim Streifen $I = \frac{1}{12} b \cdot d^3$) mehr verändert werden als jene Eigenschaften, die von der Fläche abhängig sind (beim Streifen $F = b \cdot d$). Bei vergleichenden Prüfungen und auch in Füllen, in denen es nicht notwendig ist, den Spannungszustand in der Konstruktion genau zu reproduzieren, ist es somit vorteilhaft, die Muster auf Biegung zu beanspruchen. Bei Streifen, die nach der vorgeschlagenen Methode auf Biegung beansprucht werden, wird auch praktisch der Einfluß der Schubkräfte ausgeschlossen, was die Auswertung der Resultate vereinfacht.

Degradationsfunktionen. - Bezeichnen wir die Kurve $\varphi_b(t) = \sigma_b(t)/\sigma_{b0}$, wo $\sigma_b(t)$

die langdauernde Festigkeit in der Zeit t und σ_{b0} die anfängliche Festigkeit bedeuten, als Degradationsfunktionen der Festigkeit. Experimentell werden die Werte $\sigma_b(t)$ auf die Weise festgestellt, daß man bei Prüfkörpern, die bei verschiedener Spannung gelagert werden, die bis zur Zerstörung verfllossene Zeit registriert. Die Linie $\varphi_b(t)$ wird also allgemein nicht identisch sein mit der Linie der Verringerungen der Festigkeiten, die auf die Weise festgestellt wird, daß man aus der Prüfkörperzerstörung sukzessive ein Muster nach dem anderen prüft und dabei die Verringerungen der kurzdauernden Festigkeiten mit der Zeit ermittelt.

Nichtdestruktive Prüfungsmethoden nehmen Zuflucht zur indirekten Bestimmung der Funktion $\varphi_b(t)$ aus den seitlichen Veränderungen des Elastizitätsmoduls, der Dämpfung, der elektrischen Eigenschaften, der optischen Eigenschaften, der Härte und Ähnlichen. In unserem Fall wird auf den Verlauf der Funktion $\varphi_b(t)$ aus der Veränderung der Biegesteifigkeit $D(t) = E(t) \cdot I(t)$ des Streifens geschlossen, die durch die Veränderung der gemessenen Bogenschubkraft $P(t)$ indiziert ist. Die Verhältnisse $D(t)/D_0$ geben uns dann die Degradationsfunktion der Steifigkeit $\varphi_D(t)$. Es verbleibt nun die Frage, wie der Verlauf $\varphi_D(t)$ und $\varphi_b(t)$ miteinander zusammenhängt. Es ist offensichtlich, daß dem Anfangspunkt $\varphi_b(t_0) = 1$ ebenfalls $\varphi_D(t_0) = 1$ entsprechen wird, und ferner, daß bei $\sigma_b(t_*) = 0$ auch $D(t_*) = 0$ gelten wird, so daß die Endpunkte der beiden Funktionen ebenfalls identisch sein werden. Die mit der Zeit eintretende Verringerung der Steifigkeit wird jedoch, besonders bei der Bildung von Rissen, langsamer sein als die Verringerung der Festigkeit. Der gegenseitige Zusammenhang $\varphi_D(t)$ und $\varphi_b(t)$ wird durch statistische Parameter gebunden sein, weil über die Festigkeit des Musters der schwächste Querschnitt entscheidet, während die Steifigkeit von der Struktur des ganzen beanspruchten Bereichs abhängig ist.

Anmerkung: Die Spannung der Laminatkonstruktionen pflegt meistens sehr niedrig zu sein, und zwar im Hinblick auf die Festigkeit des Materials; über die Verwendbarkeit (Sicherheit) der Konstruktion entscheiden in der Regel die Deformationen. Die Kenntnis der Größe $\varphi_D(t)$ ist beim Laminat deswegen oft nützlicher als die Kenntnis der Größe $\varphi_b(t)$. Die Bestimmung von $\varphi_b(t)$ kann dadurch vereinfacht werden, daß anstatt der Veränderung der

Querschnittsfläche (zum Beispiel durch Erosion) und dadurch auch der Veränderung des Trägheitsmomentes I , diese Veränderung durch das Absinken des Elastizitätsmoduls im betreffenden Bereich auf Null einbezogen wird.

Wenn wir außerdem den Streifen der Wirkung eines aggressiven Mediums nur mittels seiner oberen und unteren Oberfläche aussetzen (mit einer solchen Wirkung kann bei Streifen mit einem Verhältnis der Breite zur Dicke $b/d \gg 1$, eventuell bei Streifen, deren Seitenkanten durch Anstrich geschützt sind, gerechnet werden), wird der Elastizitätsmodul E an einer beliebigen Stelle des Querschnitts nur von der Zeit und der Entfernung y von der Querschnittsmitte abhängig sein.

Zur eindeutigen Definition muß eine Voraussetzung für die Zeitveränderung des Moduls auf der Streifenoberfläche (die Veränderung kann konstant sein, ist jedoch allgemein mit der Zeit veränderlich) und ferner für die Veränderung des Moduls entlang der Querschnittshöhe (welche im einfachsten Fall linear sein kann) und den gleichen Zeitverlauf wie auf der Oberfläche, gewählt werden. Wenn wir zum Beispiel $\frac{\partial E(t,y)}{\partial t} = \cot \alpha$ einführen, wird dem Winkel $\alpha = 0^\circ$ eine Oberflächenkorrosion entsprechen, die in Schichten fortschreitet (zum Beispiel Korrosion von Stahl in Peuchte - Bild 15 a), dem Winkel $\alpha = 90^\circ$ die gleiche Degradation entlang der ganzen Querschnittshöhe (zum Beispiel poröse Stoffe in Flüssigkeiten, Stoffe, die den Wirkungen einer harten Strahlung ausgesetzt sind - Bild 17 b).

Die Größe der degradierten Fläche $F^*(t)$ im Spannungsdiagramm (Bild 16) kann bei konstanter Streifenformation aus der Veränderung der Kraft $P(t)$ berechnet werden. Für den Querschnitt im Scheitelpunkt gilt:

$$(7) \quad [P_0 - P(t)] h_0 = b \cdot r^*(t) \int_0^{d/2} \sigma(t,y) \frac{E(t,y)}{E_0} dy = b \cdot r^*(t) \cdot F^*(t)$$

Zum gewählten Verlauf $\frac{\partial E(t,y)}{\partial t}$ kann man dann im Spannungsdiagramm die bildliche Darstellung der Linien $E(t,y)$ finden und die Größe der Fläche $F^*(t)$ und der Hebelarme der inneren Kräfte $r^*(t)$ bestimmen.

In der ersten Annäherung kann eine lineare Veränderung des Elastizitätsmoduls entlang der Querschnittshöhe nach Bild 16 gewählt werden, für die

$$(8) \quad y = -E(t,y) \tan \alpha + E(t, d/2) \tan \alpha + d/2$$

gilt, und für die Größe der Spannung bei ihrer Verteilung über den Querschnitt nach dem Dreieck gilt:

$$(9) \quad \sigma_0(y) = \frac{\sigma_0(d/2)}{d/2} y$$

In der Zeit t ist die Spannung $\sigma(t,y)$ gegeben:

$$(10) \quad \sigma(t,y) = \sigma_0(y) \frac{E(t,y)}{E_0}$$

und nach Einsetzung aus (8) und (9) und nach entsprechender Gestaltung ergibt sich:

$$(11) \quad \sigma(t,y) = \frac{\sigma_0(d/2)}{E_0 d/2 \tan \alpha} \left[y^2 - y E(t, d/2) \tan \alpha + d/2 \right]$$

was die Gleichung der Parabel, deren Achse zur Achse σ parallel ist, bedeutet (die Parabeln sind im Bild 16 in das Spannungsdiagramm eingezeichnet).

Die Richtigkeit der den Verlauf $E(t,y)$ betreffenden Voraussetzung kann durch Prüfungen von Streifen mit verschiedenen Dicken d überprüft werden. Die Kontrolle kann auch durch Beobachtung der Strukturveränderungen des Streifenquerschnitts mittels Mikroskop, chemischer Analyse und Ähnlichem vorgenommen werden.

Die Prüfung der Degradation eines gebogenen Streifens verläuft infolge des Einflusses landsauernder Deformationen bei seitlich veränderlicher Spannung, was bei der Auswertung berücksichtigt werden muß. Ein Beispiel der Auswertung der Degradationsprüfung unter Berücksichtigung der Spannungsrelaxation und des im Absatz 1, Punkt a und b beschriebenen

Meßvorgangs, ist in der Tabelle 2 angeführt. Resultate der Degradationsprüfungen - Degradationskurven der Steifigkeit $\varphi_D(t)$ - sind im Bild 17 a, b, c angeführt, und aus denselben ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

- Mit dem Ansteigen der Spannung verläuft die Degradation des Laminats schneller als beim spannungslosen Muster. Diese Wirkung ist besonders in stark aggressivem Medium erkennbar, wie zum Beispiel in 15 %iger Lösung von H_2SO_4 .
- Die Länge der Zeit bis zur Zerstörung ist von der Spannung nicht linear abhängig, verkürzt sich aber mit dem Ansteigen der Spannung exponential.

6. Beziehungen zwischen den Resultaten beschleunigter Prüfungen und dem natürlichen Altern

Setzen wir voraus, daß für die Dauerhaftigkeit der Konstruktion die langfristige Festigkeit des Materials entscheidend ist (in manchen Fällen kann es der Deformationszustand sein, oder eventuell optische, Isolations- und ander Eigenschaften).

Im allgemeinen hängt die Dauerfestigkeit von der anfänglichen Festigkeit, Temperatur, Charakter und Intensität der aggressiven Faktoren, und der zeitlichen Veränderungen dieser Faktoren auf der Oberfläche und im ganzen Bereich des Elements ab.

Wenn auf das Material in überwiegendem Maße äußere Kräfte und Temperaturveränderungen einwirken, wollen wir den Degradationsprozeß als "mechanische Degradation", im Falle Überwiegender chemischer Einwirkungen als "chemische Degradation" bezeichnen. (Die Ursachen der beiden Degradationsprozesse haben offenbar denselben Ursprung in Veränderungen der Mikrostruktur des Materials. Die Trennung ist nur für Prüfungen der Degradation und deren Auswertung vorteilhaft).

Im einfachsten Fall verläuft die mechanische Degradation bei konstanter Spannung und Temperatur ($\sigma = \text{konst.}$, $T = \text{konst.}$). Die Beziehung für die Lebensdauer τ_b , die eine inverse Funktion zur langfristigen Festigkeit ist, kann zum Beispiel mit Anwendung Zirkov's Ausdrucks folgendermaßen formuliert werden:

$$(12) \quad \tau_b = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \sigma \sigma}{k T}$$

wo τ_0, U_0, T Konstanten des Materials und k Boltzmann's Konstante bedeuten.

Aus der Analyse der Formel (12) ergibt sich, daß man die mechanische Degradation durch Steigerung der Spannung oder durch Temperaturerhöhung beschleunigen kann.

Die chemische Degradation des Materials kann je nach dem Charakter der aggressiven Faktoren entweder mit konstanter, oder mit veränderlicher Intensität verlaufen. Zur ersten Gruppe gehören zum Beispiel die Wirkungen gewisser Strahlungsgattungen und Wirkungen aggressiver Bäder, zur zweiten meistens natürliche Einwirkungen, hauptsächlich Witterungseinflüsse.

Im Laboratorium ist es möglich, die Effekte der mit konstanter Intensität einwirkenden Einflüsse einigermaßen durch Vergrößerung dieser Intensität zu beschleunigen (Intensität der Strahlung, Konzentration der Lösung). Langdauernde Wirkungen bei normaler Intensität können sodann durch Extrapolation von Werten abgeschätzt werden, die sich in einer kürzeren Zeit bei größerer Intensität ergeben haben.

Bei veränderlicher Intensität des aggressiven Faktors kann man, vorausgesetzt daß es zu keiner Regeneration des Materials kommt, den Degradationsprozeß auf die vorangehenden Fälle bei konstanter Intensität zerlegen und die Einwirkung auf die gleiche Weise beschleunigen. Wir werden hier zwei am häufigsten vorkommende Fälle anführen:

- a) Die Einwirkungen haben abwechselnd eine Intensität von $A = 0$ und $A_1 > 0$, wobei die Gesamtdauer der Einwirkung im ersten Fall $\sum \Delta t_{A_1} = t_{A_0}$ ist und im zweiten Fall $\sum \Delta t_{A_1} = t_{A_1}$ (Bild 19). Eine Beschleunigung des Prozesses erreicht man, wenn man $\sum \Delta t_{A_1} = 0$ als gültig betrachtet und die Intensität von A_1 auf A_2 vergrößert. Wenn der Reduktionszeitfaktor $\alpha_{A_1 A_2}$ bekannt ist, (derselbe wird aus einigen Prüfungen ermittelt und drückt das Verhältnis zwischen den Zeiten t_1 und t_2 aus, bei denen die Degradation bei verschiedenen Intensitäten A_1 und A_2 den gleichen Grad erreicht, das ist zum Beispiel die Festigkeiten nehmen um den gleichen Wert ab) dann ist der Punkt t der

wirklichen Degradationsfunktion gegeben (Bild 19 a):

$$(13 a) \quad t = t_p a_{A_{12}} + \sum \Delta t_{A_i}$$

b) Die Einwirkungen haben abwechselnd eine Intensität von $A_1 > 0$ und $A_2 > A_1$, wobei die Gesamtdauer der Einwirkungen $\sum \Delta t_{A_1} = t_{A_1}$ und $\sum \Delta t_{A_2} = t_{A_2}$ beträgt (Bild 19 b). Der Fall ist analog zum ersten Fall und der Punkt t der wirklichen Degradationsfunktion ist gegeben (Bild 19 b):

$$(13 b) \quad t = a_{A_{12}} (t_1 \cdot a_{A_{12}} + t_2')$$

In der Natur nimmt die Degradation des Materials ihren Verlauf in der Regel bei veränderlicher Spannung und gleichzeitig auch bei veränderlicher Intensität des aggressiven Faktors. Wenn wir im Laboratorium bei der Verfolgung einer solchen Degradation einen der Degradationsprozesse beschleunigen, werden im allgemeinen die übrigen Prozesse nicht im gleichen Maße beschleunigt, oder sie müssen auch überhaupt nicht beschleunigt werden. Bei der Auswertung müssen deswegen die Resultate in geeigneter Weise superponiert werden, damit sie in guter Relation mit der Wirklichkeit verbleiben. Wir wollen nun einige der häufigsten Superpositionsfälle anführen:

c) Die konstante Intensität des aggressiven Faktors A_1 wird auf A_2 vergrößert und dadurch wird die Zeit bis zur Zerstörung von τ_1 auf τ_2 verkürzt (Reduktionsfaktor ist $a_{A_{12}} = \tau_1/\tau_2$). Wirkt nun bei einem normalen Prozeß (A_1, τ_1) die Spannung σ_1 und Temperatur T_1 , wird es, um zu erreichen, daß die mechanische Degradation gleichermaßen beschleunigt wird wie die chemische, notwendig sein entweder die Spannung auf $\sigma_2 > \sigma_1$ zu vergrößern, oder die Temperatur auf $T_2 > T_1$ zu erhöhen (Bild 20).

Wenn zum Beispiel die Materialkonstanten aus der Gleichung (12) bekannt sind, ergeben sich die diesbezüglichen Werte σ_2 oder T_2 :

$$(14 a) \quad \sigma_2 = \sigma_1 + \frac{k T_1}{\gamma} \ln a_{A_{12}}$$

$$(14 b) \quad T_2 = \frac{T_1 (V_0 - \gamma \sigma_1) + \ln a_{A_{12}}}{V_0 - \gamma \sigma_2}$$

d) Die Wirkung des aggressiven Faktors ist zyklisch abwechselnd bei der Frequenz f_1 , welche auf f_2 ansteigt ($f_2/f_1 = r$)

a) Spannung $\sigma_1 = \text{konst.}$

In diesem Fall ist die Lösung analog wie beim Beispiel c).

β) Es wirken abwechselnd die Spannungen $\sigma_{1 \min}$ und $\sigma_{1 \max}$.

Wenn die Bedingung gegeben ist, daß die Temperatur T_1 bei der beschleunigten Prüfung die gleiche sein soll wie beim normalen Prozeß, kann man in gewissen Grenzen $\sigma_{2 \max}$ (eventuell $\sigma_{2 \min}$) wählen und die entsprechenden $\sigma_{2 \min}$ ($\sigma_{2 \max}$) folgendermaßen berechnen:

Den Spannungen $\sigma_{1 \max}, \sigma_{1 \min}$ mögen beim normalen Prozeß Lebensdauer τ_1, τ_1' und den Spannungen $\sigma_{2 \max}$ und $\sigma_{2 \min}$ bei den beschleunigten Prüfungen Lebensdauer τ_2, τ_2' entsprechen (Bild 21). Aus dem beschleunigten Zyklus der chemischen Degradation möge gelten:

$$(15) \quad \left(\frac{\tau_1}{2} + \frac{\tau_1'}{2} \right) / \left(\frac{\tau_2}{2} + \frac{\tau_2'}{2} \right) = r > 1$$

und somit
$$\tau_2' = \frac{\tau_1 + \tau_1'}{r} - \tau_2$$

(15 a)

Die Werte τ_1, τ_1' und τ_2 werden aus der Gleichung (12) durch Einsetzung der zugehörigen Spannungen $\sigma_{1 \max}, \sigma_{1 \min}$ und $\sigma_{2 \max}$ bestimmt. Für $\sigma_{2 \min}$ ergibt sich wiederum durch Einsetzung in die Gleichung (12):

$$(16) \quad \sigma_{2 \min} = \frac{V_0 - k T_1 \ln \frac{\tau_2}{\tau_1}}{\gamma}$$

Es kann auch gefordert werden, daß bei der beschleunigten Prüfung die gleichen Spannungen wirken sollen wie beim normalen Prozeß (σ_{\max} , σ_{\min}). Diese Bedingung kann durch Temperaturerhöhung von T_1 auf T_2 erfüllt werden. In analoger Weise wie im vorhergehenden Fall wird errechnet:

$$(17) \quad T_2 = \frac{U_0 - \sigma \sigma_{\min}}{K \ln \frac{\tau_2}{\tau_0}}$$

$$(18) \quad \ln \tau_2 + \tau_2 \frac{\ln \tau_1'}{\ln \tau_1} - \frac{(\tau_2 - \tau_1') \ln \tau_1'}{\gamma \ln \tau_1} = 0$$

7. Festigkeitsprüfung des Musters nach vorangehender langdauernder Belastung

Bei Anwendung einer nichtdestruktiven Methode zur Feststellung der langfristigen Festigkeit nach dem momentanen Elastizitätsmodul können die Zeiten bis zur Zerstörung manchmal sehr lang sein. Dann kann man die Lebensdauer oder die langfristigen Festigkeiten nicht verlässlich bestimmen. In solchen Fällen ist es vorteilhaft, die Festigkeitsprüfung mittels einer plötzlichen Zusatzbelastung und vorhergehender langdauernder Beanspruchung des Musters durch eine gewisse kleinere Deformation oder Kraft auszuführen. Es ist erforderlich den Streifen in derselben Weise zerstören zu lassen, wie er langfristig beansprucht war. Da die Zerstörung von Streifen aus Kunststoffen in der Regel erst bei großen Deformationen vor sich geht, wurde eine besondere Einrichtung (Bild 22) entworfen, in der die Biegung durch Knickung hervorgerufen wird und zwecks Erreichung der erforderlichen Krümmung die Enden des Streifens in steife Arme eingespannt werden. Gemessen wird die Kraft beim Eintritt der Zerstörung und gleichzeitig die Pfeilhöhe des Bogens. Die Festigkeit wird mit der anfänglichen, auf diese Weise gemessenen Festigkeit verglichen.

8. Schlussfolgerungen für die Entwerfung von langdauernd belasteten Laminatkonstruktionen

- Bei langdauernd belasteten Konstruktionen muß man die Einflüsse des äußeren Mediums in Erwägung ziehen, die die Degradation des Materials verursachen. Die Nachprüfungen der Degradation müssen dann bei der gleichen Beanspruchung des Musters vorgenommen werden, wie die maximalen Spannungen der Konstruktion groß sind.
- Bei der Beurteilung der Deformationen und der Konstruktionsstabilität bei langdauernder Belastung muß mit einem 2 bis 3-mal kleineren Modul gerechnet werden.
- Das relative Kriechen des mit Matte verstärkten Laminats ist ungefähr gleich groß wie das des gewebeverstärkten Laminats, so daß sich die Matte im Hinblick auf langdauernde Belastung nicht als eine weniger geeignete Verstärkung erweist.
- Bei flächigen Elementen mit ebener Spannung (Platten, Wände, Schalen) muß bei langdauernder Belastung mit einem größeren Absinken des Elastizitätsmoduls mit der Zeit gerechnet werden als bei der Beurteilung der Deformation und Stabilität von Trägern, bei denen die Wände im wesentlichen axial beansprucht werden.
- Bei Konstruktionen, die der Einwirkung von Wasser (Regen) ausgesetzt sind, muß mit einem schnelleren Absinken des Elastizitätsmoduls gerechnet werden als bei trocken gehaltenen Konstruktionen (ungefähr zweimal).
- Bei veränderlicher Belastung der Konstruktionen kann für die Formänderung annähernd das Prinzip der Superposition in Erwägung gezogen werden.

Der Elastizitätsmodul des Laminats ist nicht so temperaturempfindlich wie der Modul des verwendeten Harzes. Der Modul des Laminats ist nicht einmal bei 100°C auf Null gesunken, während der Modul des verwendeten Harzes praktisch schon bei 80°C auf Null sinkt.

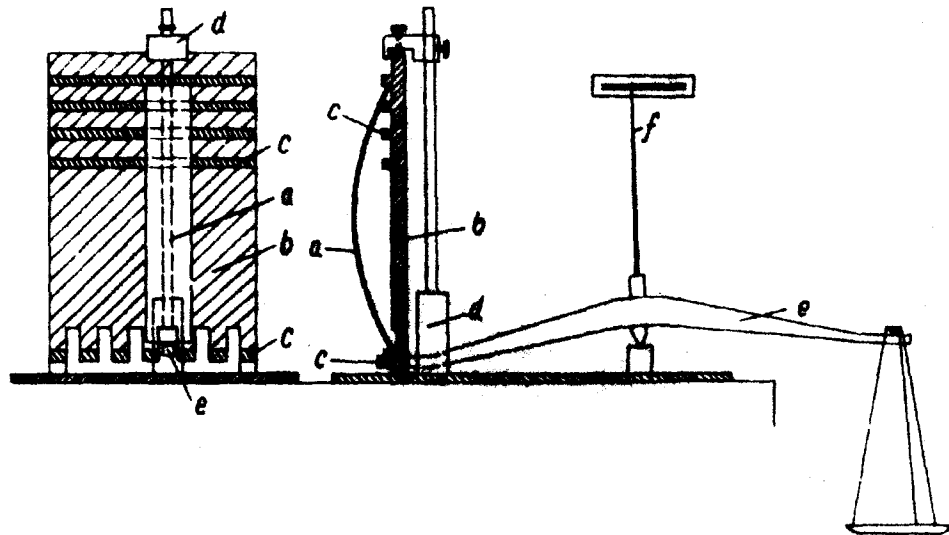


Bild 1: Waage zur Messung der Bodenschubkraft der Streifen in der Unterlage
 (a - Streifen, b - Unterlage, c - Vorsprünge für die Versetzung des Streifens,
 d - Einspannungsständer, e - Wasserarm, der durch Ausschnitte in der Unterlage
 durchgeht, f - Zeiger).

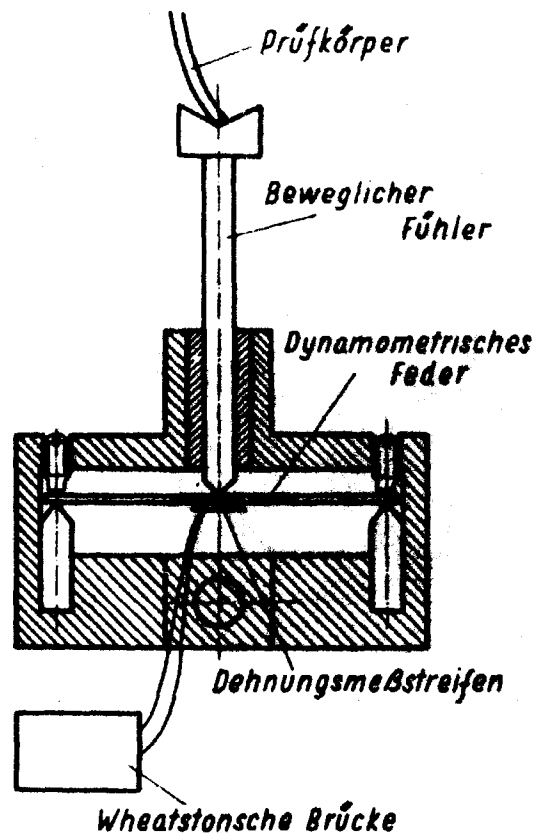


Bild 2: Dynamometer zur Messung der Bodenschubkraft der Streifen in der Unterlage
 (die Deformationen des dynamometrischen Elements werden mittels elektrischer
 Widerstandstensiometer gemessen).

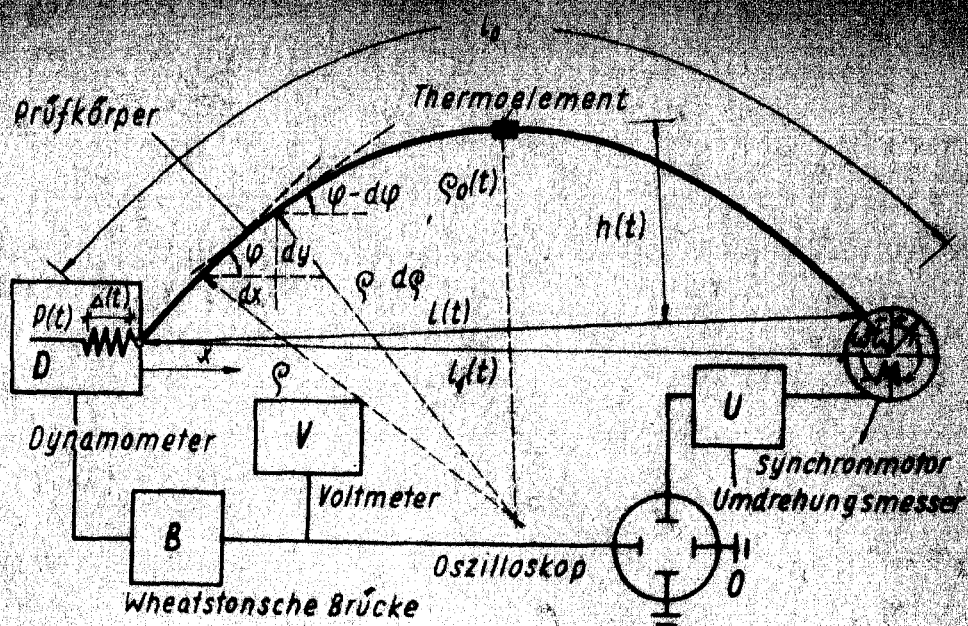


Bild 3: Anordnung der dynamischen Prüfung des Streifens

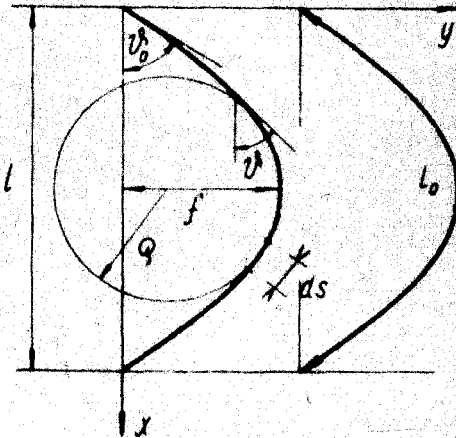


Bild 4: Geometrie des gebogenen Streifens ("elastica").

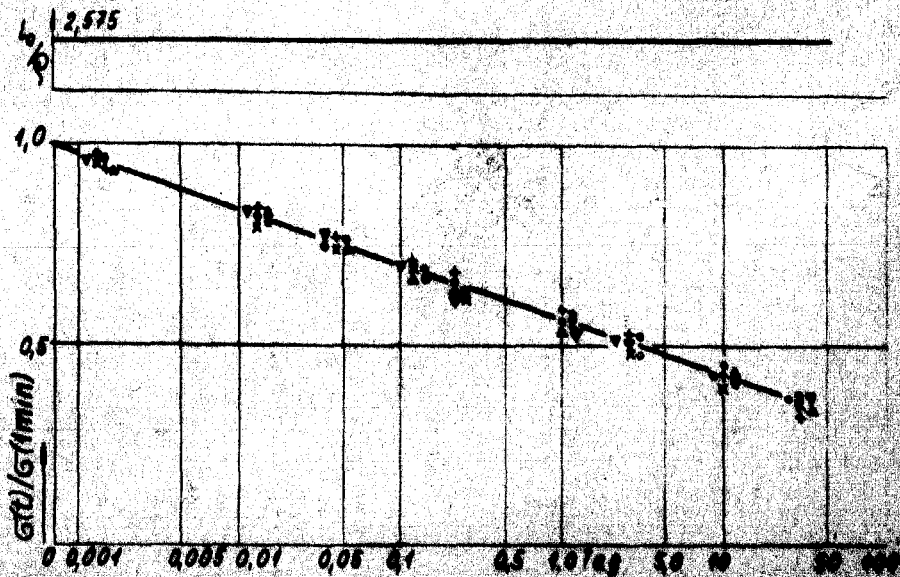


Bild 5: Beispiel der Streuungen bei der Messung der Relaxation von sechs Messern auf einer Messung (Luftlagerung 50 V r.F., Temperaturen 21°C, Verstärkung durch Messer unter 45°, $1/1_0 = 10/3\pi$).

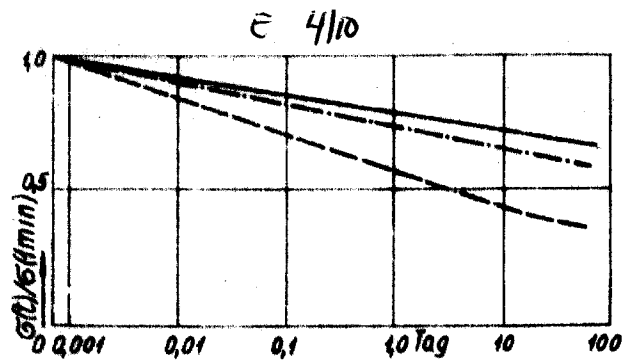


Bild 6: Vergleich der Relaxation des Laminats bei Verstärkung durch Gewebe, Beanspruchung entlang der Fasern (—), Beanspruchung unter 45° zu den Fasern (---), und bei Verstärkung durch Matte (-.-.-), $T = 20^\circ\text{C}$.

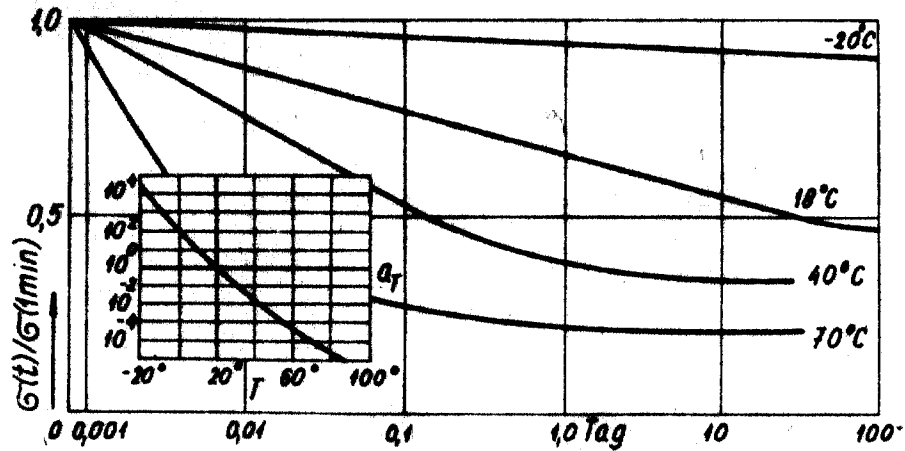


Bild 7: Relaxation bei verschiedenen Temperaturen und Koeffizienten der entsprechenden Zeitreduktion (Verstärkung durch Gewebe, Beanspruchung entlang der Fasern).

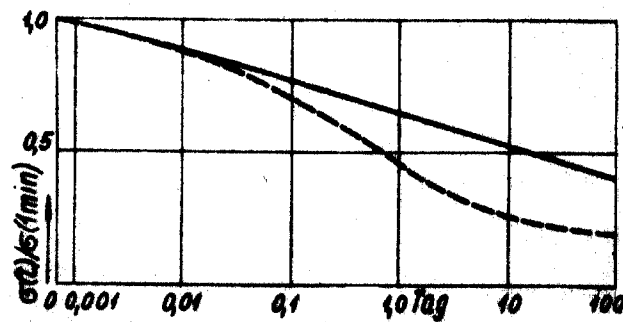


Bild 8: Relaxation in der Luft (—) und im Wasser (---). Laminat verstärkt durch Gewebe, Beanspruchung entlang der Fasern, $T = 18^\circ\text{C}$.

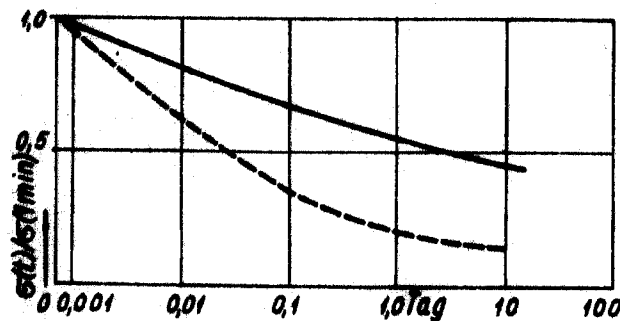


Bild 9: Relaxation in der Luft (—) und im Veterometer (---). (Laminat verstärkt durch Gewebe, Beanspruchung entlang der Fasern, $T = 30^\circ\text{C}$, ultraviolette Strahlung und Berieselung mit Wasser).

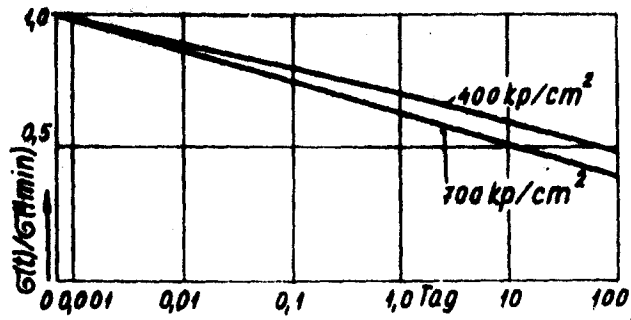


Bild 10: Abhängigkeit der Streifenrelaxation von der Größe der maximalen Spannung (Laminat verstärkt durch Gewebe, Beanspruchung entlang der Fasern, Luftlagerung, $T = 18^{\circ}\text{C}$).

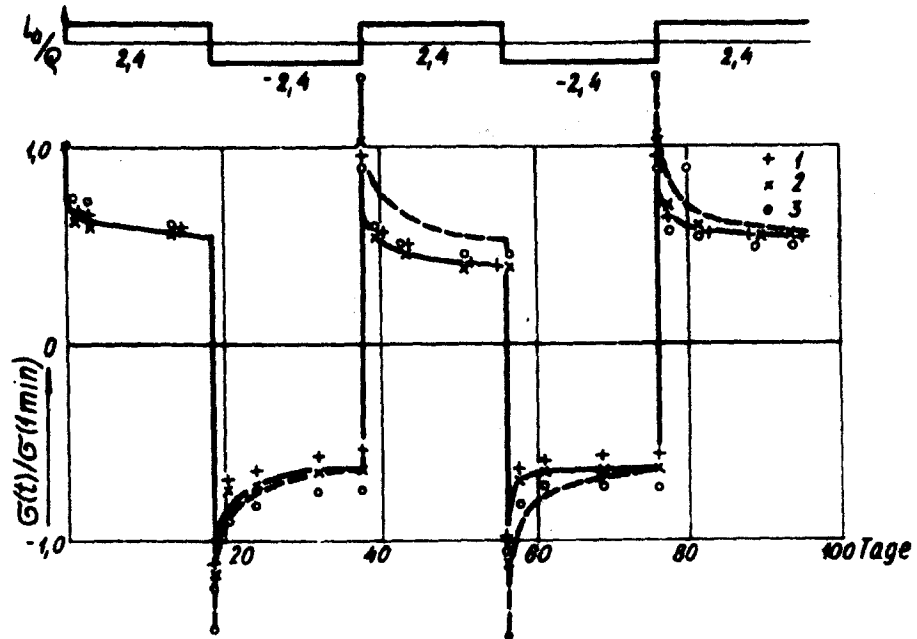


Bild 11: Vergleich des Spannungsverlaufs bei abwechselnder Deformation (—) mit dem theoretischen Verlauf nach dem Prinzip der Superposition (---). (Laminat verstärkt durch Gewebe, Beanspruchung entlang der Fasern, Luftlagerung 19°C , Beispiel der Streuung bei der Messung dreier Muster).

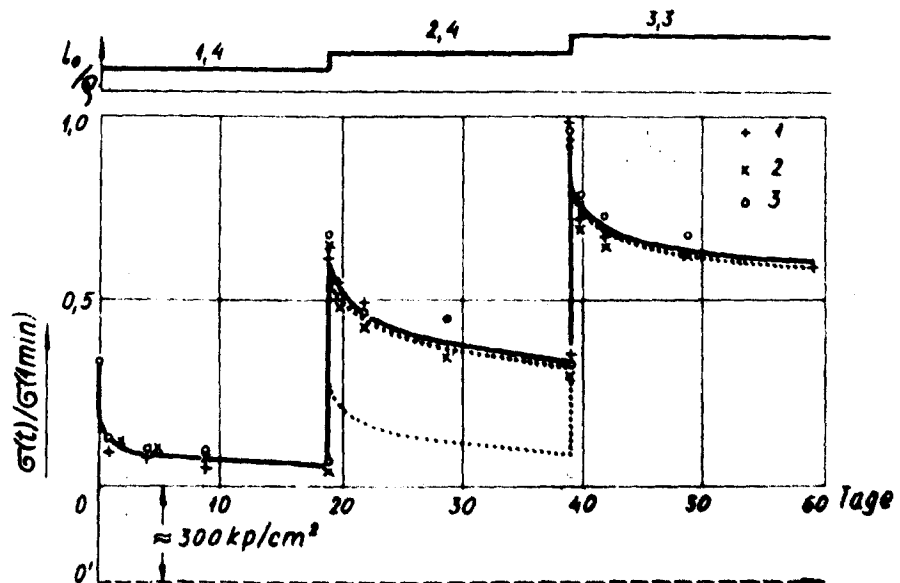


Bild 12: Vergleich des Spannungsverlaufs bei stufenweise wachsender Deformation (—) mit dem theoretischen Verlauf nach dem Prinzip der Superposition (•••••) bei wirklicher Achse $\sigma = 0$ und bei verschobener Achse (---). (Laminat verstärkt durch Gewebe, Beanspruchung entlang der Fasern, Luftlagerung 19°C , 3 Muster).

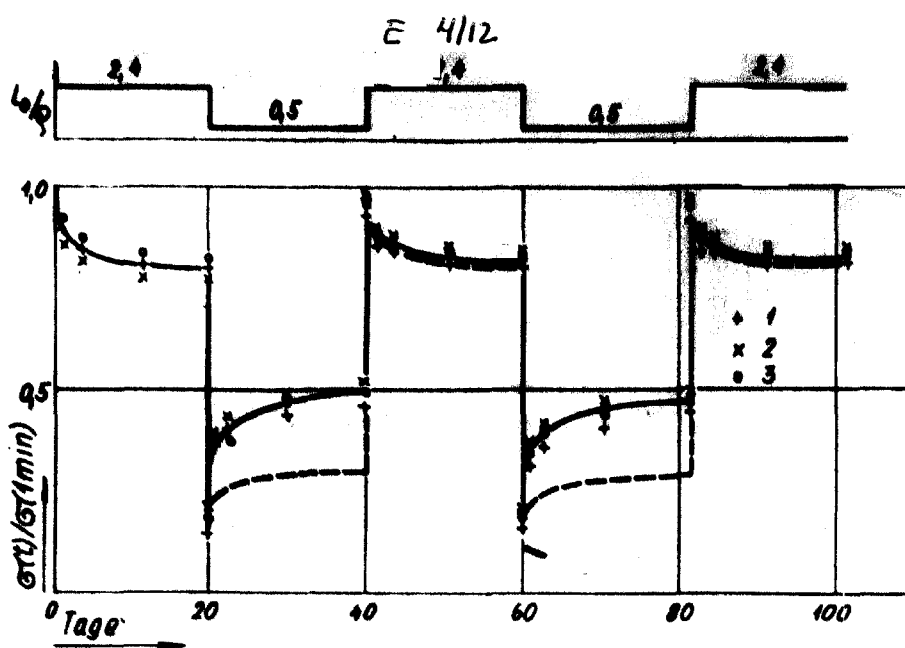


Bild 13: Vergleich des Spannungsverlaufs bei wiederholter Deformation (—) mit dem theoretischen Verlauf nach dem Prinzip der Superposition (---). (Laminat verstärkt durch Gewebe, Beanspruchung entlang der Fasern, Luftlagerung 19°C, 3 Muster)

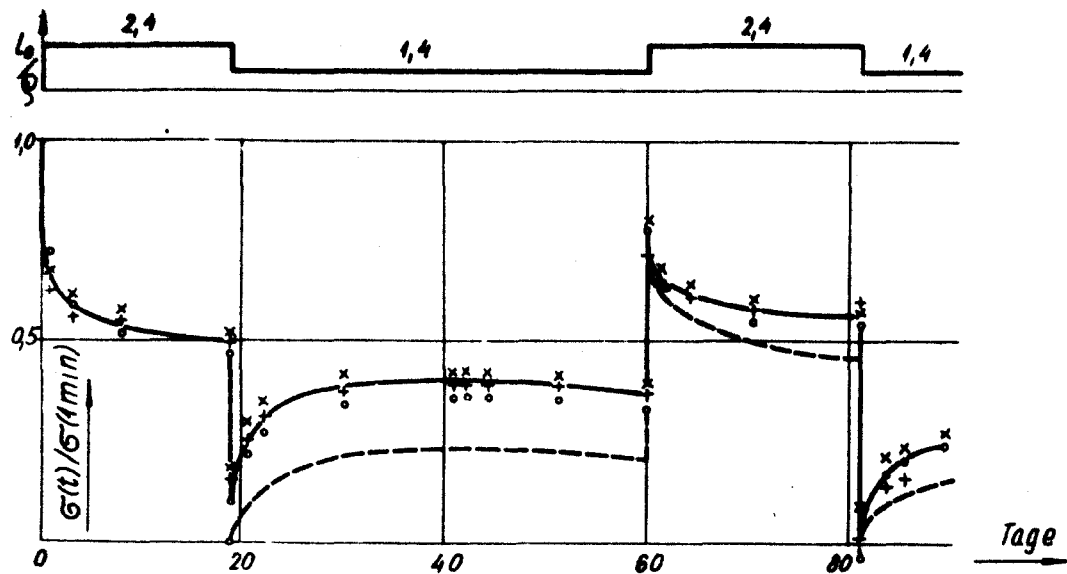


Bild 14: Vergleich des Spannungsverlaufs bei pulsierender Deformation (—) mit dem theoretischen Verlauf nach dem Prinzip der Superposition (---). (Laminat verstärkt durch Gewebe, Beanspruchung entlang der Fasern, Luftlagerung 19°C, 3 Muster)

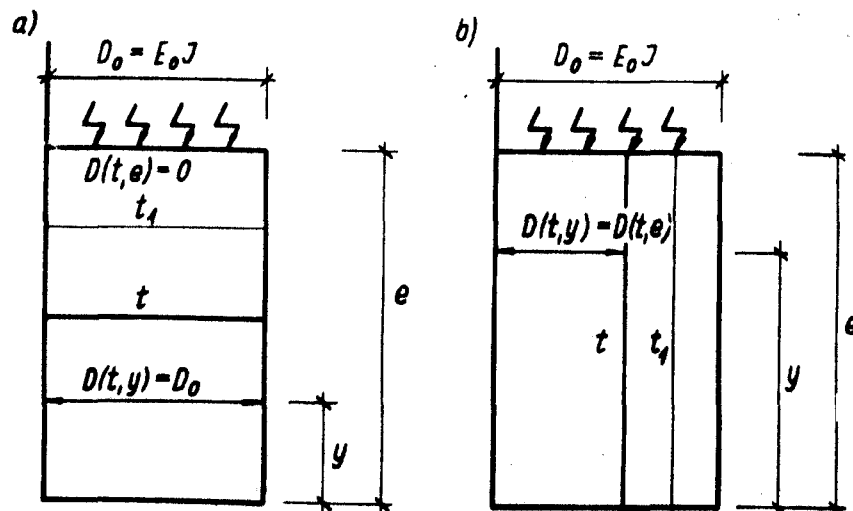


Bild 15: a) Schichtenweise, in der Richtung von der Oberfläche fortschreitende Degradation, $\alpha = 0$
 b) Gleichmäßig über den ganzen Querschnitt fortschreitende Degradation, $\alpha = 90^\circ$

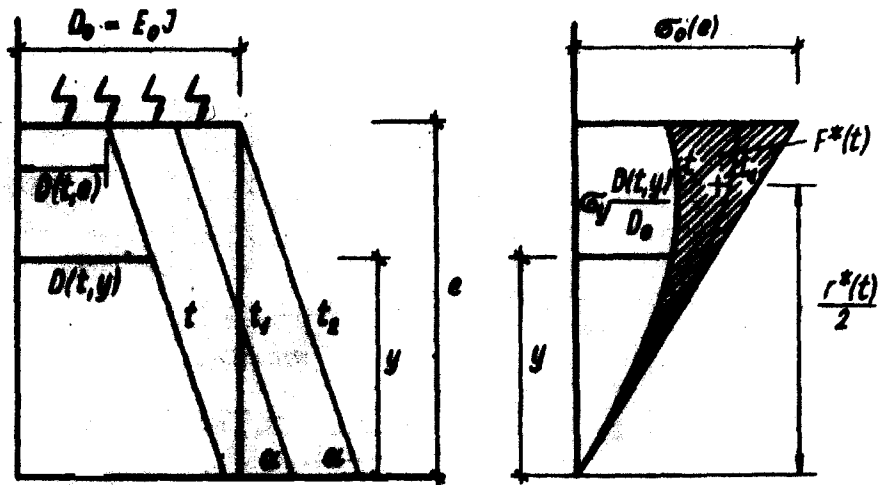


Bild 16: Linearer Verlauf der Degradation über dem Querschnitt und Veranschaulichung des Degradationsvorganges im Spannungsdiagramm (Parabeln 2°)

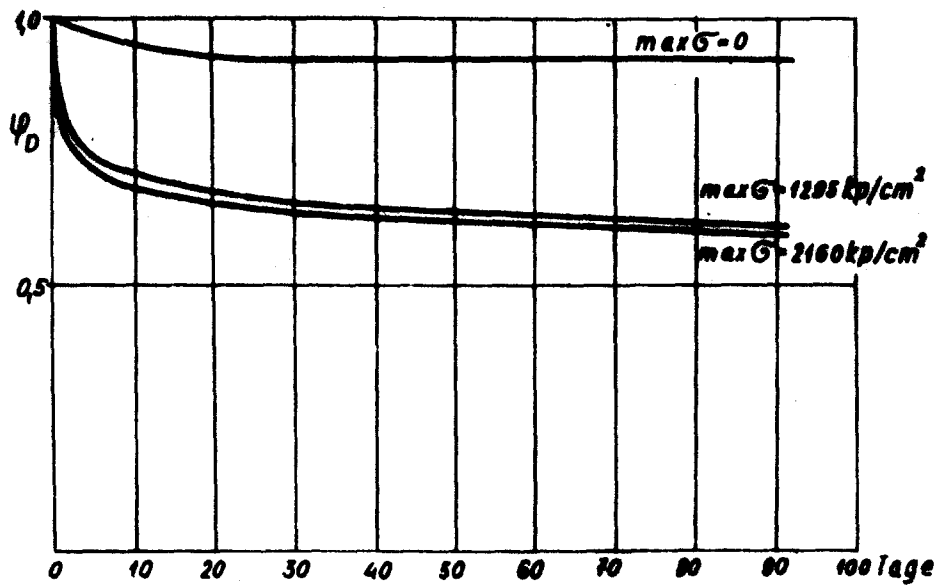


Bild 17 a:
in der Luft 20°C

Bild 17: Degradationskurven eines Polyesterlaminats (Harz ChS 104, Gewebe Yplast 350) bei verschiedener Spannung und verschiedener Art der Lagerung:

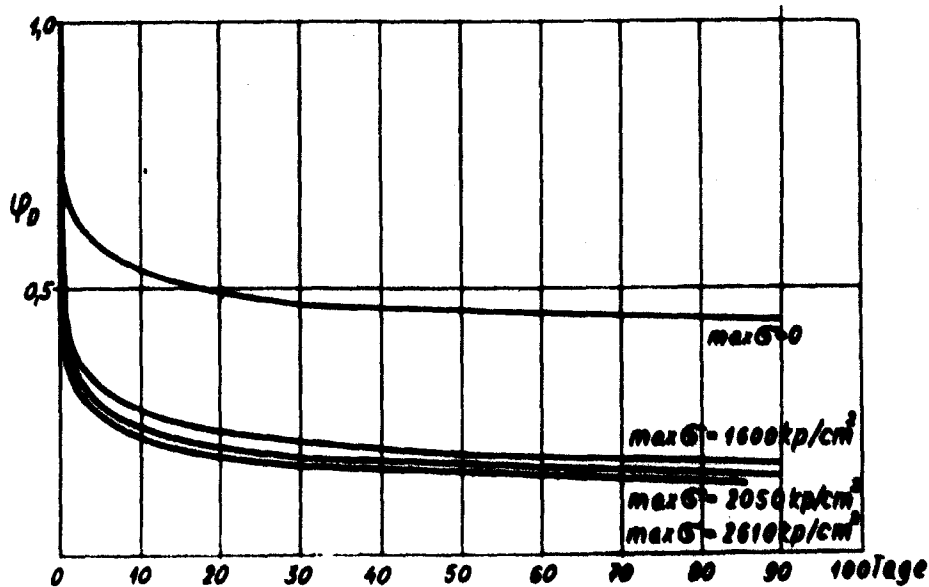


Bild 17 b:
im Wasser 20°C

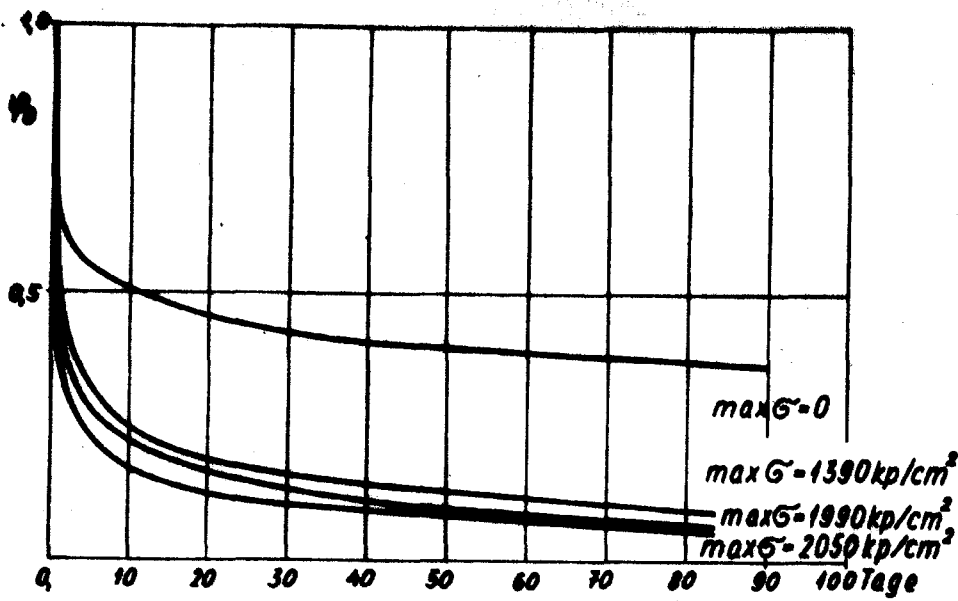


Bild 17 a:
in 15 %-iger Lösung
von H_2SO_4 bei 20°C

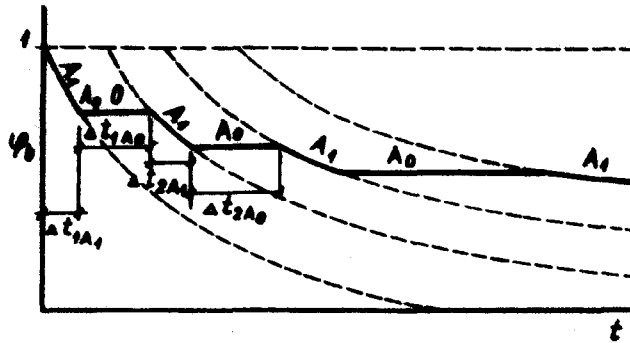
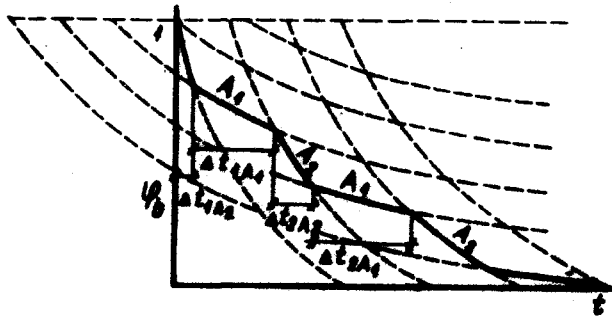


Bild 18:
Degradationsfunktionen bei veränderlicher Intensität A des aggressiven Faktors:

a) $A_0 = 0, A_1 > 0$



b) $A_1 > 0, A_2 > A_1$

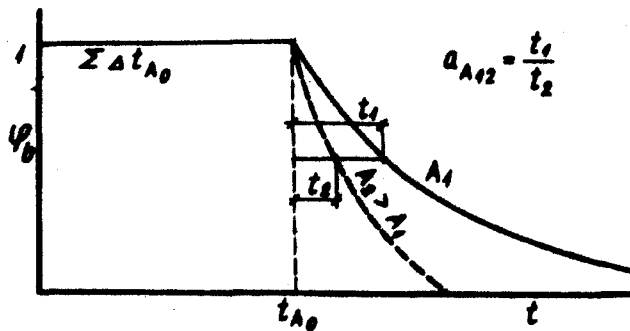
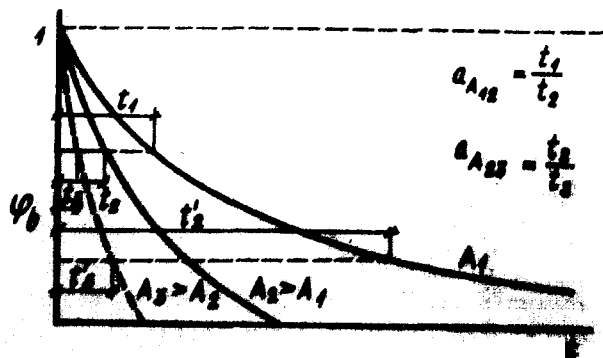


Bild 19:

Vorgang bei der Superposition der Degradationen bei beschleunigter Prüfung:

a) $A_0 = 0, A_1 > 0$



b) $A_1 > 0, A_2 > A_1$

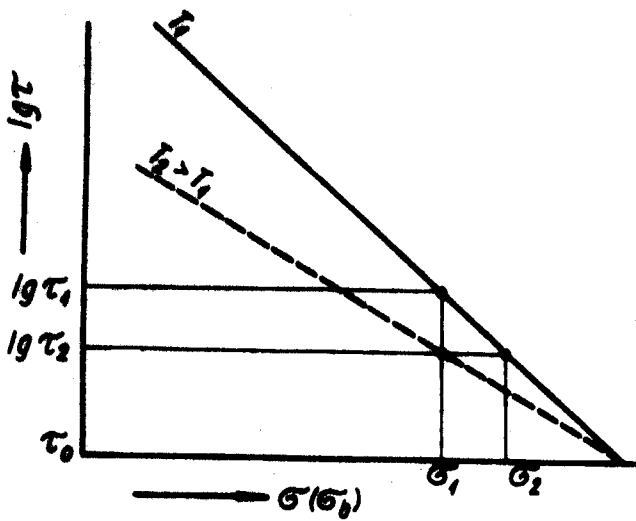


Bild 20:
Superposition der Degradation bei konstanter Spannung

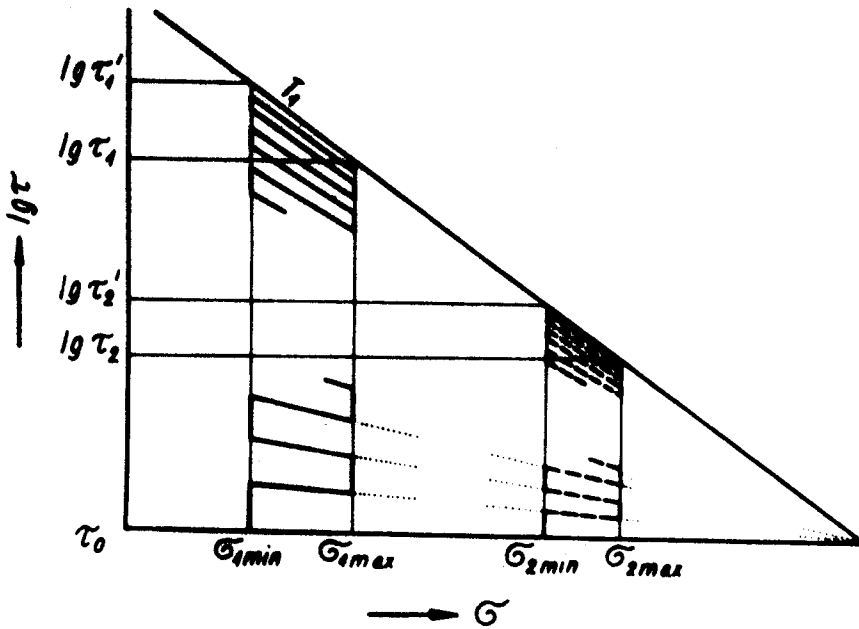
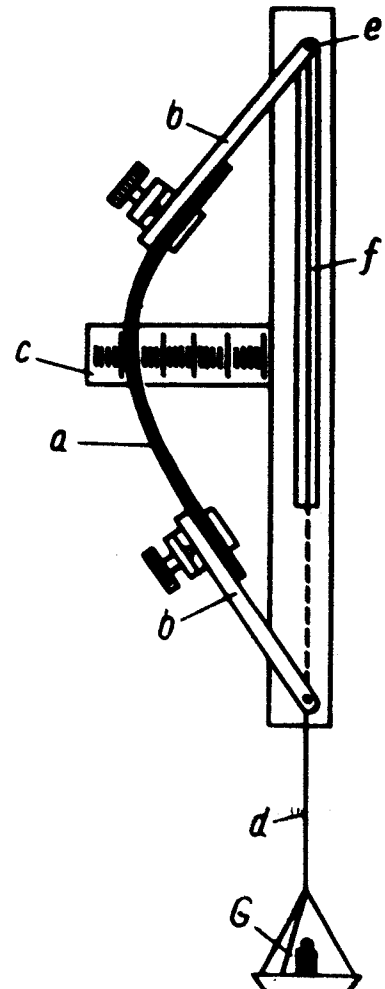


Bild 21: Superposition der Degradationen bei zyklisch veränderlicher Spannung

Bild 22: Einrichtung zur Prüfung der Streifenfestigkeit nach langdauernder Belastung
(a - Streifen, B - steife Arme, c - Skala zur Messung der Pfeilhöhe, d - Litze, e - Rolle, f - Leitfalz)



Elasticon		h/l_0	l/l_0	s_0	$\frac{d(l/l_0)}{d(l_0/l_0)}$	l_0/q	h/l_0	e/l_0	s_0	$\frac{d(e/l_0)}{d(l_0/l_0)}$
l_0/s_0	$d(l_0/s_0)$				(x)					(x)
0	0,198	0	1,000	0		3,801	0,3221	0,680	67,18	
0,198	0,198	0,0200	(0,998)	3,60		4,071	0,3363	0,640	71,60	
0,396	0,199	0,0400	(0,995)	7,20	0,0175	4,330	0,3486	0,600	75,79	0,154
0,595	0,201	0,0600	(0,991)	10,85	0,0280	4,589	0,3596	0,560	79,92	0,155
0,796	0,204	0,0800	(0,984)	14,50	0,0395	4,845	0,3690	0,520	83,93	0,156
1,000	0,207	0,1000	0,975	18,20	0,0500	5,100	0,3772	0,480	87,80	0,157
1,207	0,211	0,1200	(0,963)	20,94	0,0605	5,355	0,3842	0,440	91,65	0,158
1,413	0,216	0,1400	(0,948)	25,75	0,0715	5,608	0,3899	0,400	95,37	0,158
1,634	0,222	0,1600	(0,932)	29,63	0,0820	5,860	0,3945	0,360	98,99	0,157
1,856	0,230	0,1800	(0,912)	33,60	0,0910	6,116	0,3981	0,320	102,57	0,155
2,086	0,239	0,2000	0,891	37,69	0,1000	6,382	0,4007	0,280	106,20	0,151
2,325	0,250	0,2200	(0,866)	41,91	0,1080	6,649	0,4023	0,240	109,75	0,148
2,575	0,264	0,2400	(0,838)	46,30	0,1150	6,921	0,4030	0,200	113,25	0,145
2,839	0,282	0,2600	(0,806)	50,89	0,1200	7,202	0,4027	0,160	116,75	
3,121	0,306	0,2800	(0,772)	55,48	0,1275	7,498	0,3988	0,120	120,32	
3,427	0,338	0,3000	0,734	60,94	0,1250	8,445	0,3913	0,000	130,72	
3,765	0,393	0,3200	(0,692)	66,58						
4,148	0,454	0,3400	(0,648)	72,85						
4,602		0,3600	(0,602)	80,11						

Tabelle 1: Die in () gesetzten Werte wurden durch graphische Interpolation gewonnen. In den unter (x) angeführten Werten ist die letzte Dezimalstelle nur annähernd angegeben.

Muster No. :

Lagerung :

Anfängliche Parameter :

$l_0 =$, $b =$, $d =$,

Δl (Konstante des Instruments)

$c =$, $h_0 =$, $\bar{p}_0 =$, $E_0 =$,

Berechnete Werte :

$h_0 =$, $q_0 =$, $\bar{p}_0 = \frac{E_0 \cdot d}{2 q_0}$

$\frac{d(l/l_0)}{d(l_0/l_0)} =$, $K = \frac{h_0 \cdot l_0^2}{\Delta l} \cdot \frac{d(l/l_0)}{d(l_0/l_0)} =$

$\Delta P(t) = \bar{P}(t) - P(t)$

$P_0, P(t)$ sind Reaktionen des gebogenen Streifens in der Unterlage am Anfang und in der Zeit t ,

$\bar{P}_0, \bar{P}(t)$ sind Reaktionen bei der Verkleinerung der Spannweite um Δl am Anfang und in der Zeit t)

ZEIT	T °C	h_0	$\bar{P}(t)$	$P(t)$	$\Delta P(t)$	$\bar{p}(t) = \bar{p}_0 \cdot \frac{\bar{P}(t)}{\bar{P}_0}$	$D(t) = K \Delta P(t)$	$\gamma_0(t) = \frac{D(t)}{D_0}$

Tabelle 2: Beispiel der Prüfungsaufzeichnung