

Bestimmung der Beständigkeit von Kunststoffen unter Medieneinfluß

T 1844

T 1844

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Abschlußbericht
zum Forschungsvorhaben IV 1-5-389/85

**Bestimmung der Beständigkeit von
Kunststoffen unter Medieneinfluß**

Bearbeiter: Dipl.-Phys. D. Kirch

Aachen, den 14. Juli 1986
Ki/Ne



Prof. Dr.-Ing. G. Menges

Der Bericht umfaßt:
34 Seiten
53 Abbildungen

Danksagung

Die Untersuchungen zum vorliegenden Forschungsbericht wurden dankenswerter Weise vom Institut für Bautechnik, Berlin, finanziert.

Der BASF AG danken wir für die kostenlose Bereitstellung von Probenmaterial. Weiterhin gilt unser Dank für wertvolle Hinweise aus der Praxis bezüglich der Versuchsdurchführung und Ergebnisse den Herren

Dr. Inhoffen,
Obering. Dipl.-Ing. Oestreich,
Obering. Dr. Schlehöfer,
Dr. Zöhren.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung
Summary
Résumé
2. Ausgangssituation
3. Zielsetzung
4. Versuchstechnik
 - 4.1 Werkstoff
 - 4.1.1 Gewichtsverhalten und Glühverluste
 - 4.2 Versuche nach DIN 53393
 - 4.3 Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung
 - 4.4 Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 - 4.5 Zeitstandbruch- und Kurzzeitzugversuche
 - 4.6 Verknüpfungsmöglichkeiten von Abminderungsfaktoren
 - 4.7 Mikroskopische Untersuchungen
 - 4.8 ESCA-Untersuchungen
 - 4.9 Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung und Auswertung
5. Versuchsergebnisse
 - 5.1 Gewichtsverhalten und Glühverluste
 - 5.2 Ergebnisse der Versuche nach DIN 53393
 - 5.3 Ergebnisse der Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung
 - 5.4 Ergebnisse der zeitreduzierten Versuche bei erhöhten Temperaturen
 - 5.4.1 Methode I
 - 5.4.2 ESCA-Messungen

- 5.4.3 Methode II
- 5.5 Ergebnisse der Zeitstandbruch- und Kurzzeitzugversuche
- 5.6 Verknüpfungen unterschiedlicher Abminderungsfaktoren
- 5.7 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen

- 6. Literatur

- 7. Abbildungen

1. Zusammenfassung

Untersuchungen zur Bestimmung der Medienbeständigkeit von Kunststoffen liegt die Theorie zugrunde, daß sich alle schädigenden Einflüsse durch einen Gesamtabminderungsfaktor, der sich aus den Komponenten

- A₁ Einfluß der Prüfzeit
- A₂ Einfluß der Art des Prüfmediums und
- A₃ Einfluß einer erhöhten Prüftemperatur

zusammensetzt, erfassen lassen.

Versuche, z.B. nach DIN 53393, wobei die Proben im Medium bei erhöhten Temperaturen eingelagert werden, ergeben den Abminderungsfaktor A₂ x A₃. Zur Bestimmung des Gesamtabminderungsfaktors werden z.Zt. folgende Methoden verwendet, wobei sich der jeweils aufgeführte Abminderungsfaktor ergibt.

Zeitstandbruchversuche an Luft	A ₁
Zeitstandbruchversuche im Medium	A ₁ x A ₂ x A ₃
Biegekriechversuche im Medium bei erhöhter Temperatur	A ₂ x A ₃
Kurzzeitzugversuche an Luft bei Raumtemperatur	} A ₃
Kurzzeitzugversuche an Luft bei erhöhter Temperatur	
Versuche nach DIN 53393	A ₂ x A ₃

Die Abminderungsfaktoren lassen sich multiplikativ beliebig miteinander verknüpfen, so daß sich jeweils ein Gesamtabminderungsfaktor, bestehend aus einem, zwei oder drei einzeln ermittelten Faktoren ergibt.

Die bisher genannten Verfahren haben jedoch teilweise gravierende Nachteile. So sind z.B. die Zeitstandbruchversuche im Medium sehr zeit- und kostenaufwendig und außerdem infolge von

Laminatschädigungen recht ungenau. Die Versuche nach DIN 53393 sind extrem zeitaufwendig (12 Monate und länger). Bei den Biege-kriechversuchen unter Medieneinwirkung erschwert vor allem die schwierige Handhabung der Prüfgeräte die Ermittlung brauchbarer Ergebnisse.

Diese Verfahren sind ohnehin nicht sehr genau, da durch ESCA-Messungen bewiesen wurde, daß nur extrem wenig Medium im Prüfzeitraum in das Laminat eindringt. Medienspuren konnten nur in der obersten Harzschicht nachgewiesen werden.

Somit kann ausgeschlossen werden, daß es möglich ist, mittels dieser Prüfmethode eine Voraussage zu treffen, wie sich ein GFK-Laminat nach 23 Jahren Medienbelastung verhält.

Als Abhilfe wurde daher das Verfahren der "zeitreduzierten Versuche bei erhöhten Temperaturen" entwickelt. Dabei werden die Proben bei drei erhöhten Temperaturen (in unserem Fall 70 °C, 90 °C, 110 °C) einige tausend Stunden lastfrei im Medium eingelagert und anschließend die Restbiegefestigkeit überprüft.

Darauf folgt eine teils graphische, teils rechnerische Auswertung, bei der sich der Abminderungsfaktor A_1 ergibt.

Die Komponente A_1 wird über Zeitstandbruchversuche an Luft und die Komponente A_3 über Kruzzeitzugversuche an Luft bestimmt. Da bei den "zeitreduzierten Versuchen bei erhöhten Temperaturen" eine mechanische Laminatschädigung unterbleibt, ist dieses Verfahren ohne Zweifel der Methode der Zeitstandbruchversuche unter Medieneinfluß überlegen.

Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist darin zu sehen, daß es gelingt, ein Eindringen des Mediums in das zu prüfende Laminat zu beschleunigen.

So kann man erstmals im Prüfzeitraum ein Verhalten simulieren, wie es dem Langzeitverhalten (23 Jahre) entspricht.

Summary

Aim of the investigation is to find a fast, save and cheap testing procedure for laminates of glassfibre reinforced plastics.

This was solved by comparing results of different procedures for the determination of plastics stability, quantified by the reduction factor A_2 if possible. Also investigated was the connection of different reduction factors for the registration of different influences stability diminishing as there are time, temperature and medium influence. Microscopic photos allow a visual registration of temperature and medium influences.

The result ist, that the methode of "time reduced tests in higher temperature" is the realisation of this testing procedure. Another effect of this method is the nearly complete avoidance of contradictory results, which are found more often in other procedures, (especially in the creep rupture test). Positive, compared to other methods, is the low expense of time and equipment.

Resumé

Le but des recherches est de trouver un procédé d'examination rapide, sûr et peu coûteux pour des résines de matières plastiques renforcées de fibres de verres.

Ceci s'obtiendrait en comparant les résultats des différents procédés pour la détermination de la stabilité des matières plastiques, si possible quantifié par le coefficient de perte A_2 .

Il a été examiné également à quel point est possible la connexion des différents coefficients de perte pour la régistration des différentes influences diminuant la stabilité comme le temps, la température et le médium. Des vues microscopiques permettent un contrôle visuel des influences des médiums et des températures.

Comme résultat il a été constaté, que cette méthode des "essais à temps réduit et à température élevée" représente la réalisation de ces recherches.

Un effet supplémentaire de cette méthode est aussi de négliger les résultats contradictoires des autres procédés (surtout avec les examinations avec charge constante jusqu'à la rupture). Positif, comparé à d'autres méthodes, est également le peu de dépenses de temps et de l'installation de teste.

2. Ausgangssituation

Zur ersten Abschätzung der Medienbeständigkeit von Kunststoffen wurden Ergebnisse aus Beständigkeitslisten herangezogen, so z.B. die AVK-Tauglichkeitsliste /1/. Diese Listen geben in der Regel nur qualitative Informationen in der Form "beständig" oder "nicht beständig". Sie eignen sich daher nur für eine Negativauswahl. Dies bedeutet, daß eine als "nicht beständig" bezeichnete Medien-Polymer-Kombination nicht benutzt werden sollte. Eine mechanische Auslegung von Bauteilen aus positiv beurteilten Kunststoffen ist aber alleine so nicht möglich.

Die Ergebnisse dieser Tauglichkeitslisten basieren im allgemeinen auf Einlagerungsversuche der Lamine ohne Last im Medium. Diese Versuche, z.B. einseitige Benetzung durch das Medium nach DIN 53393, verlängern allerdings die Zeit des Prüfverfahrens bis zu einem Jahr und mehr. Außerdem wird der gleichzeitige Einfluß einer mechanischen Last, die in der Praxis fast immer vorliegt, völlig außer Acht gelassen.

Zeitstandbruchversuche sowohl an Luft als auch im Medium haben im allgemeinen den Nachteil besonders großer Streuung der Meßwerte infolge von Querrissen im Laminat, hervorgerufen durch hohe Langzeitlasten (Bild 1). Diese Zeitstandbruchuntersuchungen sind außerdem sehr zeit- und vor allem kostenintensiv, da eine fast ununterbrochene Betreuung der Versuchsanlagen erforderlich ist.

3. Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein schnelles, kostengünstiges und genaues Prüfverfahren zu erarbeiten, bei dem der experimentelle Aufwand auf ein Minimum reduziert wird und im allgemeinen auf zeit- und kostenaufwendige Zeitstandbruchuntersuchungen verzichtet werden kann. Dies sollte durch den Vergleich der aus unterschiedlichen Vorgehensweisen ermittelten Abminderungsfaktoren erreicht werden. Inwieweit eine Verknüpfung von Abminderungsbeiwerten überhaupt zulässig ist, wird ebenfalls untersucht.

Quantitatives Ergebnis der zu entwickelnden Untersuchungsmethode ist der Abminderungsfaktor A_2 , der etwas über die Medienbeständigkeit des zu prüfenden Laminats aussagt.

4. Versuchstechnik

4.1 Werkstoff

Die Versuche wurden mit näherungsweise isotropen, 4-lagigen Mattenlaminaten aus Bisphenol-A-Harz durchgeführt. Die Laminatdicke betrug bei allen Proben 4 mm. Alle Proben wurden nach Herstellerangaben gepresst und getempert.

Mögliche Schutzschichten (Liner, Vlies, Gelcoat, etc. /10/) wurden nicht verwendet, um den experimentellen Aufwand, der durch zahlreiche mögliche Kombinationen entstehen würde, zu minimieren. Deshalb beziehen sich die in diesem Bericht ermittelten Abminderungsfaktoren nur auf den beschriebenen Laminataufbau. Bei einem anderen Laminattyp sind die Versuche entsprechend durchzuführen.

Da die Untersuchungen lediglich darauf ausgelegt sind, den Nachweis der Eignung der verschiedenen Prüfverfahren zu erbringen, wurde der Laminataufbau sehr einfach gehalten.

4.1.1 Gewichtsverhalten und Glühverluste

Parallel zu laufenden Versuchen wurde das Sorptions- bzw. Lösungsverhalten der Lamine in den verschiedenen Prüfmedien untersucht und die relative Gewichtszunahme über der Zeit als Wurzelfunktion aufgetragen.

Außerdem wurden von mehreren Proben gleichen Laminates der Glühverlust nach DIN EN 60 bestimmt /3/.

Diese Untersuchungen dienten dazu, Aussagen über die Qualität und Homogenität des Laminates zu erhalten.

4.2 Versuche nach DIN 53393

Diese Untersuchungen beinhalten sowohl ein- als auch beidseitige Probeneinlagerung im Medium ohne zusätzliche mechanische Last /2/. Bei der zweiseitigen Einlagerung sind unterschiedliche Einwirkzeiten bis zu 12 Monaten vorgesehen.

Nach Entnahme werden jeweils die Restbiegefestigkeiten ermittelt sowie visuelle Änderungen der Probenkörper begutachtet.

Durch eine doppellogarithmische Auftragung der relativen Restbiegefestigkeit über der Einlagerungszeit und Extrapolation der Restfestigkeitsgeraden auf $t_L = 2 \cdot 10^5$ h läßt sich dann der für die verwendete Einlagerungstemperatur geltende Abminderungsfaktor $A_2 \times A_3$ bestimmen. Dabei soll im folgenden "x" eine direkte experimentelle Verknüpfung, im Gegensatz zu ".", der rein mathematischen Verknüpfung, bedeuten.

Bei diesem Verfahren wird jedoch der gleichzeitige Einfluß einer mechanischen Last, wie er in der Praxis fast immer vorliegt, völlig außer Acht gelassen.

Für die einseitige Einlagerung ist nur eine Halbjahresentnahme vorgesehen, die keinerlei Extrapolation ermöglicht. Zusätzlich wurde hier noch ein Standardglykolharz mit Wasser und ein Neopentylglykolharz mit 30 % Schwefelsäure (H_2SO_4) geprüft. Die Prüftemperatur betrug in allen Fällen 30 °C.

4.3 Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung

Diese Untersuchungen beinhalten eine Einlagerung der Proben bei Gebrauchslast und Gebrauchstemperatur.

Als Gebrauchslast wurde die Biegelast gewählt, welche 15 % der Kurzzeitbiegefestigkeit entspricht. Vor Beginn der Kriechversuche wurden die Proben bis zur Sättigung bei Gebrauchstem-

peratur im Prüfmedium eingelagert. Nach Sättigung sowie nach 100 h bis 1000 h Dauer des Biegekriechversuchs wurden Proben aus den in Bild 2 dargestellten Meßplätzen entnommen und die Restbiegefestigkeit bestimmt /5/.

Aus der auf den Sättigungswert bezogenen relativen Restbiegefestigkeit erhält man nach Extrapolation auf $2 \cdot 10^5$ h Einlagerungszeit den Abminderungsfaktor $A_2 \times A_3$.

4.4 Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen

Durch chemische Korrosion verändern sich Moleküle bzw. Molekülgruppen und somit das Molekulargewicht. Dies bewirkt Eigenschaftsänderung des Werkstoffs. Durch reaktionskinetische Betrachtungen und die Anwendung des Arrheniusgesetzes lassen sich Eigenschaftsänderungen in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur formulieren. Dies wird für die unterschiedlichsten Arten von Kunststoffen beschrieben und soll nun auf GF-UP übertragen werden. Es gilt

$$\ln \frac{\sigma_B}{\sigma_0} = -t \cdot v_0 e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (1)$$

- mit: σ_B : Biegefestigkeit
 σ_0 : Ausgangsbiegefestigkeit
 $\frac{\sigma_B}{\sigma_0}$: relative Restbiegefestigkeit
 t : Zeit
 v_0 : Stoßkonstante
 E_A : charakterist. Aktivierungsenergie
 R : Gaskonstante
 T : absolute Temperatur

Werden für verschiedene Temperaturen die gleichen Eigenschaftswerte für verschiedene Zeiten ermittelt, so erhält man das Lebensdauergesetz

$$\ln t = \ln K + \frac{EA}{RT} \quad (2)$$

mit

$$K = \frac{1}{v_0} \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_B} \quad (3)$$

Aus Gleichung (2) und (3) wird deutlich, daß sich Alterungsvorgänge bei der Wahl geeigneter Koordinaten als Geraden darstellen lassen. So müßte die Restfestigkeit, im logarithmischen Maßstab aufgetragen, über der Einlagerungszeit einen linearen Zusammenhang ergeben. Bei der Anwendung des Lebensdauergesetzes wird durch Wahl der reziproken absoluten Temperatur sowie dem Logarithmus der Zeit ein linearer Zusammenhang zu erwarten sein /8,12/.

Die Auftragungsart ist Bild 3 zu entnehmen.

Die Prüfmethode kann so definiert werden: Die Proben sollen bei drei erhöhten Temperaturen (alle über Gebrauchstemperatur) einige 1000 Stunden im Prüfmedium eingelagert werden. Die maximale Prüftemperatur für glasfaserverstärkte ungesättigte Polyesterharze in diesem Prüfverfahren wird bestimmt durch die Temperatur, bei der der Abfall des Schubmoduls der Matrixharze gegenüber dem Wert bei Raumtemperatur ca. 20 % beträgt.

Ein typischer Verlauf des Schubmoduls über der Temperatur eines Bisphenol-A-Harzes ist in Bild 4 dargestellt.

Nach unterschiedlichen Einlagerungszeiten (100, 500, 1000 und 2000 h) werden Proben entnommen und die Restbiegefestigkeit überprüft und halblogarithmisch aufgetragen. Man wählt nun eine bestimmte Restfestigkeit (z.B. 70 %, siehe Bild 5) aus.

Diese Werte werden in ein Zeit-Temperatur-Diagramm (Lebensdauerkurve) übertragen und zu tieferen Temperaturen hin extrapoliert.

Kennt man nun die Gebrauchstemperatur und die vorgesehen Bauteillebensdauer, so erhält man einen Schnittpunkt für eine bestimmte Lebensdauerkurve. Der zu erwartende Abfall der Festigkeit infolge Medienbeanspruchung läßt sich so feststellen (in unserem Beispiel, Bild 5, 70 %. A_2 beträgt in diesem Fall $100/70 = 1,43$).

Als Prüfgerät zur Einlagerung sollten Glasbehälter zur Anwendung kommen. Bei Prüftemperaturen oberhalb des Siedepunkts bei Umgebungsdruck müssen Druckbehälter aus Edelstahl (z.B. Bild 6) verwendet werden.

4.5 Zeitstandbruch- und Kurzzeitzugversuche

Zur Ermittlung eines Wertes für A_1 wurden Zeitstandbruchversuche an Luft bei 23 °C durchgeführt /4,6/.

Derartige Untersuchungen wurden ebenfalls bei erhöhter Temperatur (30 °C) im Medium vorgenommen.

Im einzelnen lassen sich folgende Abminderungsfaktoren ermitteln:

Zeitstandbruchversuch:	Luft,	23 °C	A_1
	Medium,	30 °C	$A_1 \times A_2 \times A_3$

Zur rechnerischen Auswertung ist jedoch auch die Kenntnis des Temperaturfaktors A_3 erforderlich. Dieser wurde über Kurzzeitzugversuche an Luft bei 23 °C und 30 °C bestimmt und ergab sich durch den Quotienten

$$A_3 = \frac{\sigma_B(30^\circ \text{C})}{\sigma_B(23^\circ \text{C})}$$

4.6 Verknüpfungsmöglichkeiten von Abminderungsfaktoren

Wie schon eingangs erwähnt, besteht die Möglichkeit, Abminderungsfaktoren unterschiedlicher Vorgehensweisen miteinander zu verknüpfen. Diese sind dann mit dem Gesamtabminderungsfaktor

$$A_{\text{ges}} = A_1 \times A_2 \times A_3,$$

der sich aus den kombinierten Zeitstandbruchversuchen unter Last, Temperatur und Medieneinfluß ergibt, zu vergleichen.

Insgesamt lassen sich folgende Abminderungsfaktoren aus den geschilderten Vorgehensweisen bestimmen:

Aus der Verknüpfung der Ergebnisse von Zeitstandbruchversuchen an Luft bei 23 °C und den Versuchen nach DIN 53393:

$$A_{\text{ges}} = A_1 \cdot (A_2 \times A_3)$$

Hierbei stammt das A_1 von Zeitstandbruchversuchen und das $(A_2 \times A_3)$ von den Versuchen nach DIN 53393.

Nach der gleichen Formel lassen sich die Ergebnisse der Zeitstandbruchversuche an Luft bei 23 °C und der Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung miteinander verknüpfen, wobei dann aus letzteren der Faktor $A_2 \times A_3$ gewonnen wird.

Außerdem besteht noch die Möglichkeit, Ergebnisse der zeitreduzierten Versuche bei erhöhter Temperatur, der Zeitstandbruchversuche an Luft bei 23 °C und der Kurzzeitzugversuche miteinander zu kombinieren.

Für diesen Fall gilt:

$$A_{\text{ges}} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$$

4.7 Mikroskopische Untersuchungen

Zur visuellen Beurteilung von Schäden wurden von einigen Proben mikroskopische Aufnahme angefertigt.

Durch Anwendung unterschiedlicher Beleuchtungstechniken wurden Erosionserscheinungen der Probenoberfläche besonders hervorgehoben. Zu Vergleichszwecken wurden derartige Untersuchungen sowohl an Reinharzproben als auch an Laminaten durchgeführt.

4.8 ESCA-Untersuchungen

Zur Beurteilung des Eindringverhaltens der verschiedenen Prüfmedien in den Probekörper wurden ESCA-Analysen durchgeführt.

(ESCA = Elektron Spectroscopy for Chemical Analysis)

Als Ergebnis ergab sich jeweils ein Konzentrationsprofil, d.h. die Auftragung der Konzentration der schädigenden Substanz über der Probendicke.

4.9 Besonderheiten bei der Versuchsdurchführung und -auswertung

Zur numerischen Auswertung der Versuche sind die nachfolgend aufgeführten Gleichungen zu verwenden.

a. Biegeversuche:

Die Auswertung der Biegeversuche erfolgt in Anlehnung an DIN 53452 nach folgender Formel:

$$\sigma_B = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{b} \cdot \frac{l_v}{h^2} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot l^2}{l_v^2}\right)$$

- l_v : Auflagerabstand (mm)
- b : Breite der Probe (mm)
- h : Dicke der Probe (mm)
- F : Bruchkraft (N)
- l : Durchbiegung in Probenmitte (mm)

Der Term $\left(1 + \frac{4 \cdot l^2}{l_v^2}\right)$ ist ≈ 1 und berücksichtigt den Einfluß der Probendeformation auf die Biegespannung.

b. Zugversuche:

Hier wurde die Bruchlast nach

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot h}$$

bestimmt.

F: Bruchlast (N)
b: Breite der Probe (mm)
h: Dicke der Probe (mm)

c. Berechnung der Standardabweichung von Quotienten

Bei der Auswertung der verschiedenen Methoden wird der Quotient von Restfestigkeit zu Ausgangsfestigkeit (σ_B / σ_0) logarithmisch über der Zeit aufgetragen.

Geht man nun davon aus, daß sowohl Ausgangsfestigkeit als auch Restfestigkeit Standardabweichungen besitzen ($\Delta \sigma_0$ bzw. $\Delta \sigma_B$), so gilt für die Standardabweichung des Quotienten:

$$\Delta a = \sqrt{\left(\frac{\Delta \sigma_0}{\sigma_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \sigma_B}{\sigma_B}\right)^2}$$

Dies bedeutet, daß mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3 % alle Meßwerte des Quotienten im Intervall von $\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_0} - \Delta a\right)$ bis $\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_0} + \Delta a\right)$ zu finden sind.

Bei der Auswertung der zeitreduzierten Versuche bei erhöhten Temperaturen ist besonders zu beachten, daß die Geraden im Diagramm (Bild 5, oben) bis in den Festigkeitsbereich herunter, der der Restfestigkeit bei ϑ_g und t_L entspricht (Bild 5, unten), durch Meßpunkte belegt sind (ϑ_g ist die Gebrauchstemperatur, t_L die vorgesehene Bauteillebensdauer).

Dies ist unbedingt erforderlich, da ansonsten eine Umzeichnung, wie in Bild 5 dargestellt, nicht möglich ist.

Zusätzlich sollten bei allen Auswertungen noch die Korrelationskoeffizienten bestimmt werden, um eine Aussage über die Genauigkeit der Messung zu erhalten.

Unter der Voraussetzung, daß alle Meßwerte auf einer Geraden liegen, sollte der Korrelationskoeffizient möglichst nah bei 1 liegen; gute Ergebnisse erhält man ab etwa 0,9 .. 0,95.

5. Versuchsergebnisse

5.1 Gewichtsverhalten und Glühverluste

Bei insgesamt 3 Harz-Medien-Kombinationen wurden zur Bestimmung des Sorptionsverhaltens Gewichtsmessungen durchgeführt. Es ergaben sich nach 100 Tagen Einlagerung bei 30 °C im einzelnen folgende Ergebnisse /11/:

<u>Harz-Medien-Kombination</u>	<u>Gewichtsänderung des Laminates in %</u>
Bisphenol-A-Harz/H ₂ O	+ 0,3
Bisphenol-A-Harz/10 % NaOH	- 0,4
Bisphenol-A-Harz/50 % H ₂ SO ₄	- 0,1

Die Gewichtszunahme bei Wasser läßt auf einen reinen Quellungsprozeß schließen. Bei Natronlauge und Schwefelsäure läßt die eingetretene Gewichtsabnahme einerseits einen Lösungsprozeß vermuten bzw. eine Kombination von Quellungs- und Lösungsvorgängen. Die genauen Sorptionskurven sind Bild 7 bis 9 zu entnehmen.

Außerdem wurde an Proben aus Bisphenol-A-Harz-Laminaten noch der Glühverlust in Anlehnung an DIN EN 60 bestimmt.

Er betrug $P = 60 \%$, d.h. 60 % der Probenmasse entfallen auf das Matrixharz und 40 % auf die Faser. Die Streuung dieser Ergebnisse war $\leq 3 \%$

5.2 Ergebnisse der Versuche nach DIN 53393

Diese Versuche wurden mit 5 unterschiedlichen Harz-Medien-Kombinationen durchgeführt, wobei sich jeweils der im folgenden aufgeführte Abminderungsfaktor $A_2 \times A_3$ ergab

<u>Kombination</u>	<u>A₂ x A₃</u>
Standardglykolharz/H ₂ O	1,14
Neopentylglykolharz/30 % H ₂ SO ₄	1,16
Bisphenol-A-Harz/H ₂ O	1,16
Bisphenol-A-Harz/50 % H ₂ SO ₄	1,19
Bisphenol-A-Harz/10 % NaOH	1,52

Die Auswertungen dieser Untersuchungen sind in Bild 10 bis Bild 19 dargestellt.

Die Bilder 10, 12, 14, 16, 18 sind sogenannte Streudiagramme. Diese zeigen die Standardabweichung der relativen Restbiegefestigkeiten nach unterschiedlichen Einlagerungszeiten.

Die Bilder 11, 13, 15, 17 und 19 sind die doppellogarithmischen und extrapolierten Auftragungen der relativen Restbiegefestigkeiten über der Zeit. Hier wurden folgende Abkürzungen verwendet:

t_E: Einlagerungszeit
6e: 6 Monate einseitige Einlagerung

Der aus den Diagrammen ersichtliche Wert $1 \cdot 10^5$ h ist die rechnerische Bauteillebensdauer t_L.

Es ist noch darauf hinzuweisen, daß es sich bei den Laminaten aus Standardglykol- und Neopentylglykolharz sowie aus Bisphenol-A-Harz bei Einlagerung in 10 % NaOH um Handlamine handelt. Alle anderen Lamine waren im Kaltpreßverfahren hergestellte Platten.

Die gepreßten Platten haben aufgrund der exakteren Herstellung wesentlich geringe Standardabweichungen bei der Auswertung der einzelnen Prüfverfahren ergeben.

5.3 Ergebnisse der Biegekriechversuche unter Medien-
einwirkung

Nach diesem Verfahren wurden insgesamt 3 Harz-Medien-Kombinationen geprüft, wobei sich die folgenden Abminderungsfaktoren ergaben:

<u>Kombination</u>	<u>A₂ x A₃</u>
Bisphenol-A-Harz/H ₂ O	1,33
Bisphenol-A-Harz/50 % H ₂ SO ₄	1,30
Bisphenol-A-Harz/10 % NaOH	3,03

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist allerdings zu berücksichtigen, daß die Hauptschädigung des Laminates infolge Eindringens des Prüfmediums trotz Kantenversiegelung über die Kante in die Proben entstanden ist. Die Abminderungsfaktoren dürfen daher als erhöht betrachtet werden.

Auswertungen hierzu sind in Bild 20 bis Bild 25 dargestellt, wobei noch auf den in Bild 23 verwendeten, anderen Auftragungsmaßstab der relativen Restbiegefestigkeit hingewiesen werden muß. Dieser mußte verwendet werden, da die 10 %ige NaOH-Lösung die stärkste Schädigung verursachte, während Wasser und die 50 %ige Schwefelsäure eine gleichwertige, aber im Vergleich mit NaOH geringe Schädigung ergaben.

Die Bezeichnungsweise aus 5.2 wurde unverändert beibehalten.

5.4 Ergebnisse der zeitreduzierten Versuche
bei erhöhten Temperaturen

5.4.1 Methode I

In Anlehnung an die Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung wurden die auf die Größe 10 x 80 mm² gesägten und anschließend kantenversiegelten sowie nach Herstellerangaben gehärteten Proben im Prüfmedium eingelagert.

Die Ergebnisse dieser Messungen, im folgenden "Methode I" genannt, sind in Bild 26 bis 36 dargestellt. Die Prüftemperaturen betragen 50 °C, 60 °C und 70 °C. Diese wurden so gewählt, damit bei der höchsten Temperatur der Schubmodul der aus einer Messung der Reinharzprobe ermittelt wurde, gegenüber dem Wert bei Raumtemperatur nicht stärker als 20 % abfällt (siehe Bild 4).

Diese Festlegung wurde zunächst getroffen, um eine starke thermische Schädigung des Materials zu vermeiden. Der Vergleich von Bild 26 mit Bild 33 zeigt, daß die Wirkung der 50 %igen Schwefelsäure vergleichbar ist mit der von Wasser.

Aus Bild 30 ergibt sich, daß die 10 %ige Natronlauge die bei weitem größte Wirkung zeigt. Die Ermittlung der Abminderungsfaktoren wurde gemäß der im Kapitel 4.4 beschriebenen Verfahren vorgenommen.

Es ergaben sich:

<u>Kombination</u>	<u>A₂</u>
Bisphenol-A-Harz/H ₂ O	1,18
Bisphenol-A-Harz/50 % H ₂ SO ₄	1,23
Bisphenol-A-Harz/10 % NaOH	4,0

5.4.2 ESCA-Messungen

Diese Untersuchungen dienten dazu, eventuell in die Proben eingedrungenes Prüfmedium nachzuweisen.

Zu diesem Zweck wurden mit Hilfe eines Mikrotoms unterschiedliche Schichten von 30 μm bis 500 μm von den Probenoberflächen abgetragen und das Verhältnis der in NaOH vorkommenden Na-Atome, bezogen auf das C-Atom, ermittelt.

Randbereiche, bei denen sichtbar von der Kante her Medium eingedrungen war, wurden weggeschnitten, um nur den Anteil des Mediums zu erfassen, der von der Oberfläche her eingedrungen war.

In Bild 37 wird für die Einlagerungstemperaturen 50 °C, 60 °C und 70 °C das Eindringverhalten von H_2SO_4 , repräsentiert durch das S-Atom, dargestellt. Eindeutig läßt sich feststellen, daß selbst bei 70 °C ein Nachweis von S-Atomen oberhalb von ca. 100 μm nicht möglich ist.

Bild 38 zeigt das Eindringprofil sowohl von NaOH (100 h), nachgewiesen durch das Na-Atom als auch von H_2SO_4 (500 h), nachgewiesen durch das S-Atom bei Temperaturen von 50 °C, 60 °C und 70 °C. Aufgenommen wurden jeweils die Konzentrationen bei einer Eindringtiefe von 30, 50 und 100 μm . Bereits in einer Tiefe von 50 μm ließen sich bei 50 °C weder Spuren von Na noch von S nachweisen. Insofern kann man diese Prüftemperatur als zu niedrig ansehen. Außerdem sind in dieser Grafik auch noch die Ergebnisse der Versuche nach DIN 53393 nach Einlagerungszeiten von 1 Monat, 3 Monaten und 6 Monaten aufgetragen. Hier wurde nur die Menge des eingedrungenen Natriums bei 100 μm gemessen. Die Unterschiede in der Konzentration von einer 3-monatigen zu einer 6-monatigen Einlagerung sind innerhalb der Meßgenauigkeit vernachlässigbar klein.

Eine Schädigung des Laminates durch den Medieneinfluß kann man somit nicht als nachgewiesen annehmen. Bei 60 °C und 70 °C ist ein Konzentrationsgefälle von außen nach innen zu beobachten. Da aber nur bis zu einer Tiefe von 0,1 mm Medienspuren nachzuweisen sind, ist bei einer Laminatdicke von 4 mm eine schädigende Wirkung, hervorgerufen durch von der Oberfläche her eindringendes Medium, nicht wahrscheinlich.

5.4.3 Methode II

Die Ergebnisse der Untersuchungen nach 5.4.1 ergaben keine realistischen Abminderungsfaktoren, da trotz der Kantenversiegelung Medium von der Seite her in die Probe eindiffundierte. Da andererseits aber durch ESCA-Messungen nachgewiesen wurde, daß kein Medium durch die Probenoberfläche eingedrungen war, wurde die Versuchsdurchführung entsprechend abgeändert.

Statt der bei Methode I biegeprüffähig gesägten und anschließend kantenversiegelten Proben wurden zusätzlich Platten der Größe 100 x 130 mm² nach vorheriger Kantenversiegelung eingelagert. Diese Vorgehensweise wird im folgenden als Methode II bezeichnet. Aus diesen Platten wurden dann nach der Entnahme die Prüfkörper der Größe 10 x 80 mm² geschnitten. Auf diese Weise wurde der Einfluß der Diffusion des Mediums über die Kantenversiegelung in den Prüfkörper unterdrückt.

Zusätzlich wurde noch die Prüftemperatur auf maximal 110 °C erhöht. Dieses Vorgehen lag in ESCA-Messungen begründet, denen zufolge bei 70 °C fast kein Medium in die Probe eindrang. Bei dem vorliegenden Harztyp, der in diesem Temperaturbereich noch keinen sehr starken Schubmodulabfall zu verzeichnen hat, siehe Bild 4, und der sich zudem durch seine Hydrolysebeständigkeit auszeichnet, ist diese Vorgehensweise angemessen.

Bei anderen Harztypen ist die Festlegung der Prüftemperaturen individuell anhand des Schubmodulverlaufes über der Temperatur neu zu bestimmen. Dabei sollte in der Regel eine Abnahme des Schubmoduls von mehr als 20 % vermieden werden. Der Wert von 110 °C ergab sich aus der vom Harzhersteller angegebenen Temperatur. Diese durfte nicht überschritten werden, um mögliche Nachhärtungsreaktionen auszuschließen. Die neuen Prüftemperaturen wurden zu 70 °C, 90 °C und 110 °C festgelegt, wobei der Wert von 70 °C auch dazu diente, Methode II mit Methode I zu vergleichen.

Es ergab sich, daß die mittlere Biegefestigkeit bei Methode I wesentlich stärker abgefallen war, als es bei der Methode II der Fall war.

Daraus resultierten auch erhöhte Abminderungsbeiwerte bei Methode I. Zusätzlich ließ sich noch bei Methode II eine geringere Streuung der Meßwerte als bei Methode I feststellen (vgl. Bild 30, Bild 39). Die Untersuchungen nach Methode II betrafen nur die Kombination Bisphenol-A-Harz/NaOH 10 %, wobei sich ergab:

<u>Kombination</u>	A_2
Bisphenol-A-Harz/10 % NaOH	$\frac{1}{1,82}$

Die Auswertung dieser Untersuchungen ist Bild 39 bis Bild 41 zu entnehmen.

5.5 Ergebnisse der Zeitstandbruch- und Kurzzeitzugversuche

Bei den durchgeführten Zeitstandbruchuntersuchungen wurden nach der doppellogarithmischen Auftragung der relativen Restfestigkeit über der Zeit die folgenden Abminderungsfaktoren ermittelt:

Zeitstandbruchversuche an Luft bei 30 °C: (ZBV_{Luft})

$$A_1 = 1,07$$

Der Verlauf der relativen Restfestigkeit über der Zeit ist in Bild 42 dargestellt.

Zeitstandbruchversuche im Medium bei 30 °C: (ZBV_{Med})

$$A_1 \times A_2 \times A_3 \text{ (H}_2\text{O)} = 1,09$$

$$A_1 \times A_2 \times A_3 \text{ (10 \% NaOH)} = 4,31$$

$$A_1 \times A_2 \times A_3 \text{ (50 \% H}_2\text{SO}_4) = 1,85$$

A₁ berücksichtigt den Zeitfaktor
A₂ den Medieneinfluß und
A₃ den Einfluß der Prüftemperatur

Aus Zeitstandbruchversuchen bei 30 °C im Prüfmedium erhält man somit ein A₁ × A₂ × A₃.

Bei unseren Untersuchungen ergeben sich folgende Zahlenwerte:

$$A_1 \times A_2 \times A_3 \text{ (H}_2\text{O)}: 1,09$$

$$A_1 \times A_2 \times A_3 \text{ (10 \% NaOH)}: 4,31$$

$$A_1 \times A_2 \times A_3 \text{ (50 \% H}_2\text{SO}_4): 1,85$$

Ein Wert für A₁ A₂ A₃ läßt sich unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Zeitstandbruchversuche an Luft (A₁), der zeitreduzierten Versuche bei erhöhten Temperaturen (A₂) und der Kurzzeitzugversuche an Luft (A₃) bestimmen.

Ergebnisse unserer Untersuchungen sind bei Methode I die folgenden Zahlenwerte:

$$A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \text{ (H}_2\text{O)}: 1,07 \cdot 1,18 \cdot 1 = 1,26$$

$$A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \text{ (10 \% NaOH)}: 1,07 \cdot 4,0 \cdot 1 = 4,28$$

$$A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \text{ (50 \% H}_2\text{SO}_4): 1,07 \cdot 1,23 \cdot 1 = 1,32$$

Bei den zeitreduzierten Versuchen nach Methode II ergab sich:

$$A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \text{ (10 \% NaOH): } 1,07 \cdot 1,82 \cdot 1 = 1,95$$

Als nächstes sind die Verknüpfungen der Art $A_1 \cdot (A_2 \times A_3)$ zu bestimmen. Diese Kombination läßt sich sowohl aus den Versuchen nach DIN 53393 ($A_2 \times A_3$) und den Zeitstandbruchversuche von Luft (A_1) als auch aus den Zeitstandbruchversuchen (A_1) und den Biegekriechversuchen unter Medieneinwirkung ($A_2 \times A_3$) bestimmen. Diese Werte können allerdings infolge Eindringen des Mediums sowohl über die Kantenversiegelung als auch durch Risse in der Oberfläche (siehe Bild 1) als zu hoch angesehen werden.

Diese Auswertungen sind Bild 43 bis Bild 45 zu entnehmen.

Kurzzeitzugversuche (KZV) wurden an Luft wohl bei 23 °C als auch bei 30 °C durchgeführt.

Er ergab sich der Temperaturfaktor A_3 zu 1.

5.6 Verknüpfungen unterschiedlicher Abminderungsfaktoren

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit werden folgende Abkürzungen verwendet:

Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen:	ZRV
Zeitstandbruchversuche:	ZBV
Kurzzeitzugversuche:	KZV
Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung:	BME
Versuche nach DIN 53393:	DIN

Ziel der Untersuchung ist es jeweils, den Gesamtabminderungsfaktor, welcher sich aus A_1 , A_2 und A_3 zusammensetzt, zu ermitteln.

Hierzu gibt es folgende multiplikative Verknüpfungsmöglichkeiten:

$$\begin{aligned} & A_1 \times A_2 \times A_3 \\ & A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \\ & A_1 \cdot (A_2 \times A_3) \end{aligned}$$

Die Ergebnisse sehen wie folgt aus:

A: Verknüpfung von DIN und ZBV (Luft):

$$\begin{aligned} A_1 (A_2 \times A_3) (H_2O): & \quad 1,16 \cdot 1,07 = 1,24 \\ A_1 (A_2 \times A_3) (10 \% NaOH): & \quad 1,52 \cdot 1,07 = 1,63 \\ A_1 (A_2 \times A_3) (50 \% H_2SO_4): & \quad 1,19 \cdot 1,07 = 1,27 \end{aligned}$$

B. Verknüpfung von BME und ZBV (Luft):

$$\begin{aligned} A_1 \cdot (A_2 \times A_3) (H_2O): & \quad 1,33 \cdot 1,07 = 1,42 \\ A_1 \cdot (A_2 \times A_3) (10 \% NaOH): & \quad 3,03 \cdot 1,07 = 3,24 \\ A_1 \cdot (A_2 \times A_3) (50 \% H_2SO_4): & \quad 1,30 \cdot 1,07 = 1,39 \end{aligned}$$

5.7 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen

Zunächst wurden zu Vergleichszwecken zwei Aufnahmen der Oberfläche eines Bisphenol-A-Harz-Laminates angefertigt (Bild 46). Hier sind sowohl einige Glasfasern in einer ansonsten glatten Oberfläche als auch diffus durchscheinende Fasern im Probeninneren zu erkennen.

Bereits nach einer Einlagerungszeit von 500 h bei 70 °C in 10 %iger Natronlauge sind durch ein Anlösen der oberen Harzschicht freigelegte Glasfasern sichtbar geworden (Bild 47).

Betrachtet man dagegen ein Laminate, welches bis 100 °C 2000 h im gleichen Medium eingelagert war, so sieht man deutlich die infolge des Medieneinflusses aufgetretene reliefartige Struktur der Oberfläche (Bild 48).

Die Querschnittsaufnahme dieses Laminates zeigt noch deutlicher die Schädigungen, besonders in den oberen Harzschichten (Bild 49).

Zu Vergleichszwecken wurden noch einige Reinharzproben untersucht. Hier treten Schädigungen allerdings erst im Bereich hoher Einlagerungszeiten und -temperaturen auf (110 °C, 2000 h, siehe Bild 50).

Alle Reinharzproben waren vor der Einlagerung poliert worden, d.h. sie besaßen fast die Oberflächengüte von Glas.

Die Bilder 51 bis 53 zeigen Aufnahmen eines "alten" Bauteils nach Praxiseinsatz.

Es handelt sich dabei um ein halbkreisförmiges Rohrsegment aus einer GFK-Betriebsleitung. Diese bestand aus GF-UP, Basis Bisphenol-A.

Die Beanspruchung erfolgte über vier Jahre durch konzentrierte NaOCL-Lösung (Natronbleichlauge) bei Umgebungstemperatur.

Bild 51 (oben) zeigt eine Gesamtansicht in natürlicher Größe. Im Bild unten ist eine Verbindungsstelle der zwei Rohrabschnitte vergrößert dargestellt, wobei insbesondere auf die Schädigung im Bereich des Totwassergebietes hingewiesen werden muß.

Bild 52 zeigt die vom Medium geschädigte Innenseite des Rohres.

In Bild 53 schließlich ist die Dicke des geschädigten Bereichs in einer Querschnittsaufnahme dargestellt.

Die sichtbare Eindringtiefe des Mediums betrug ca. 0,3 mm.

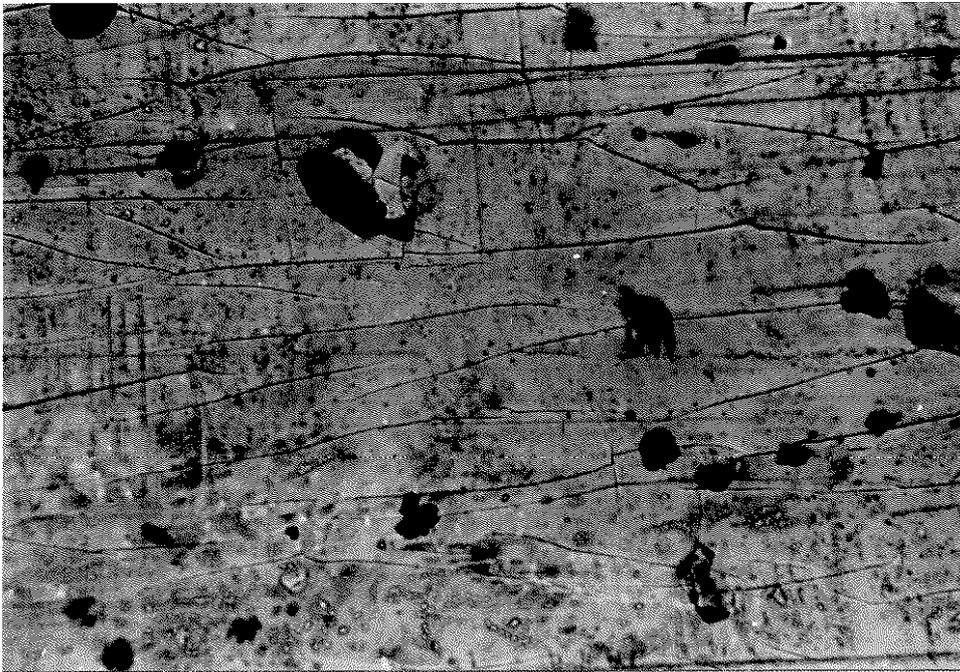
6. Literatur

- /1/ N.N. AVK-Tauglichkeitsliste
Arbeitsgemeinschaft verstärkte
Kunststoffe e.V.
6000 Frankfurt/Main
- /2/ N.N. Deutsche Industrienorm DIN 53393
Prüfung von glasfaserverstärkten
Kunststoffen
Verhalten bei Einwirkung von
Chemikalien
- /3/ N.N. Europäische Norm
DIN EN 60
Bestimmung des Glühverlustes
- /4/ N.N. Deutsche Industrienorm
DIN 53444
Zeitstand-Zugversuch
- /5/ N.N. Deutsche Industrienorm
DIN 53452
Biegeversuch
- /6/ N.N. Deutsche Industrienorm
DIN 53455
Zugversuch
- /7/ N.N. Deutsche Industrienorm
DIN ISO 4433
Widerstandsfähigkeit von Polyolefin-
Rohren gegen chemische Durchflußstoffe
- /8/ Löwer, K.
Minte, J.
Thebing, U.
Cordes, H. Bestimmung der Beständigkeit von
Kunststoffen unter Medieneinfluß
(Vorgehensweise)
Tischvorlage zur SVA-Sitzung
am 5.5.1982 in Augsburg

- /9/ Inhoffen, E. Die Erzielung optimaler Chemikalien-
beständigkeit mit UP-Harzen in:
Ehrenstein, G.W.
Glasfaserverstärkte Kunststoffe
Expert Verlag
7031 Grafenau, 1981
- /10/ Minte, J. The influence of Wall Thickness,
Menges, G. Diameter and Agressive Media on
Knausenberger, R. the creep-Failure-Behaviour of
Pipes
Society of Plastic Engineers (SPE)
ANTEC 1983, Chicago, Conference
Proceeding
- /11/ Munschek, H. Unveröffentlichter Prüfbericht
IKV Aachen, 1984
Archiv-Nr. B 8404
- /12/ Bieling, U. Korrosion von Faserverbundwerk-
Cordes, H. stoffen - was ist zu tun ?
Löwer, K. 11. Kunststofftechnisches Kolloquium
Schmitz, J. Aachen 1982

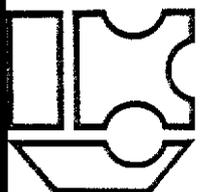
7. Abbildungen

↑
Beanspruchungsrichtung



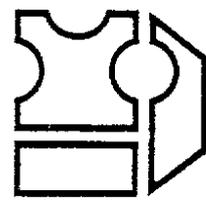
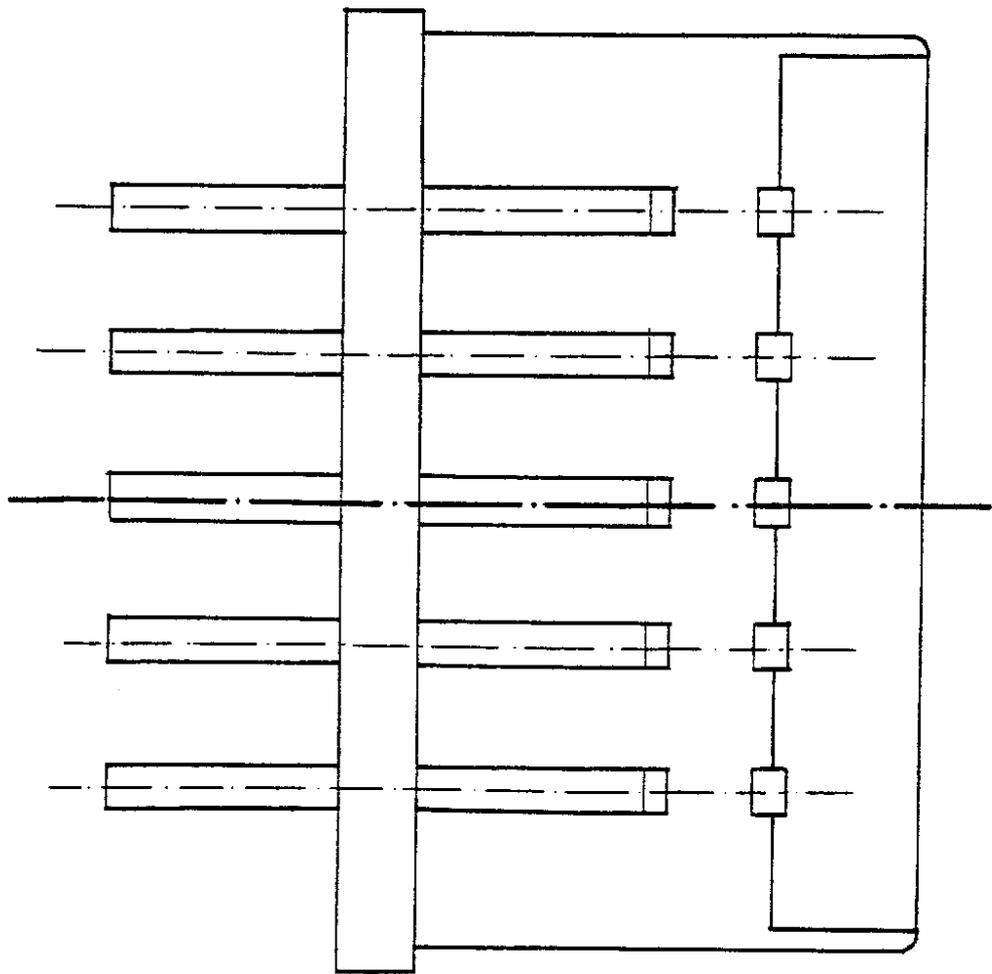
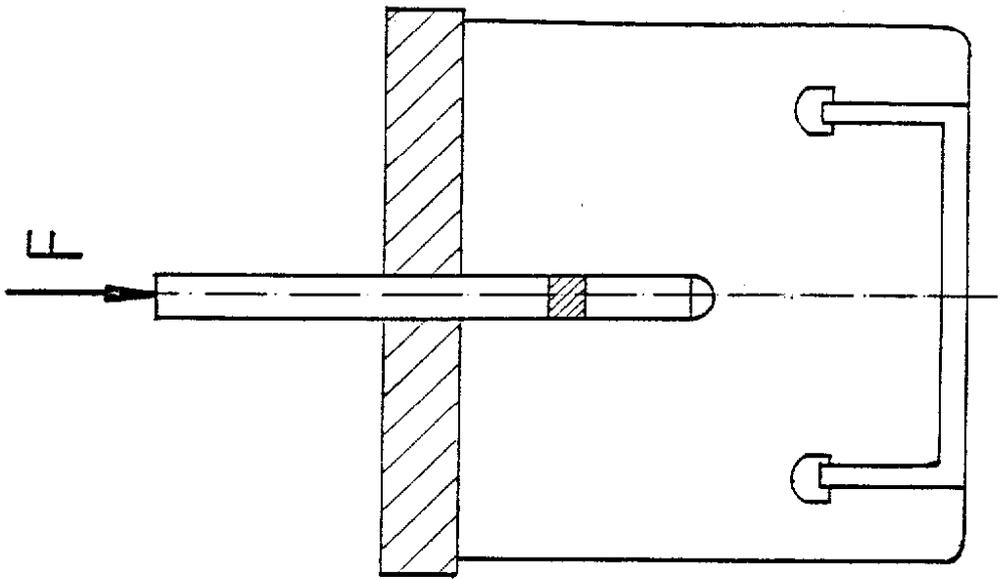
↓
100-fach

Querrisse in GFK - Laminat
bei Zeitstandbruchversuchen

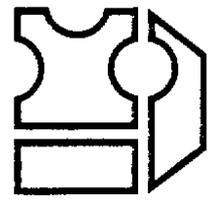
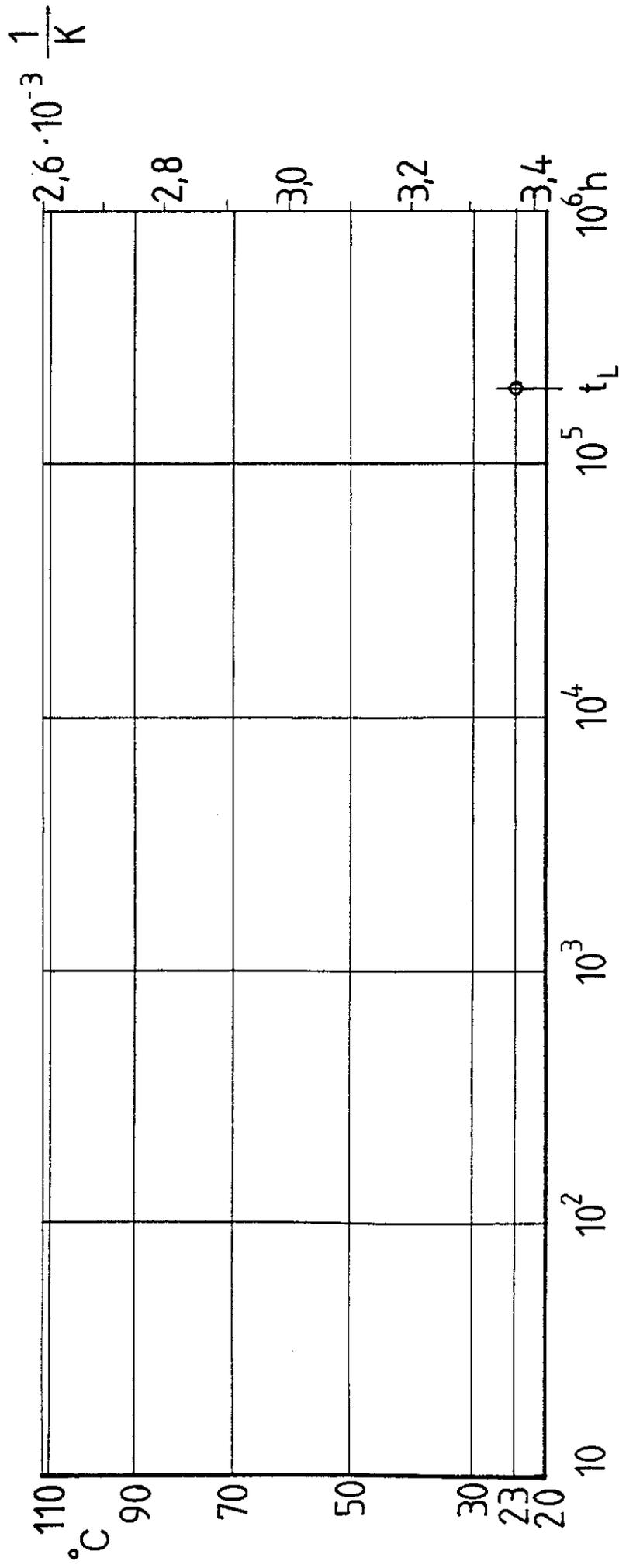


Bisphenol-A Harz / Laminat
Zeitstandbruchversuch

Bild 1

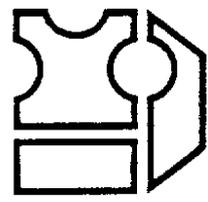
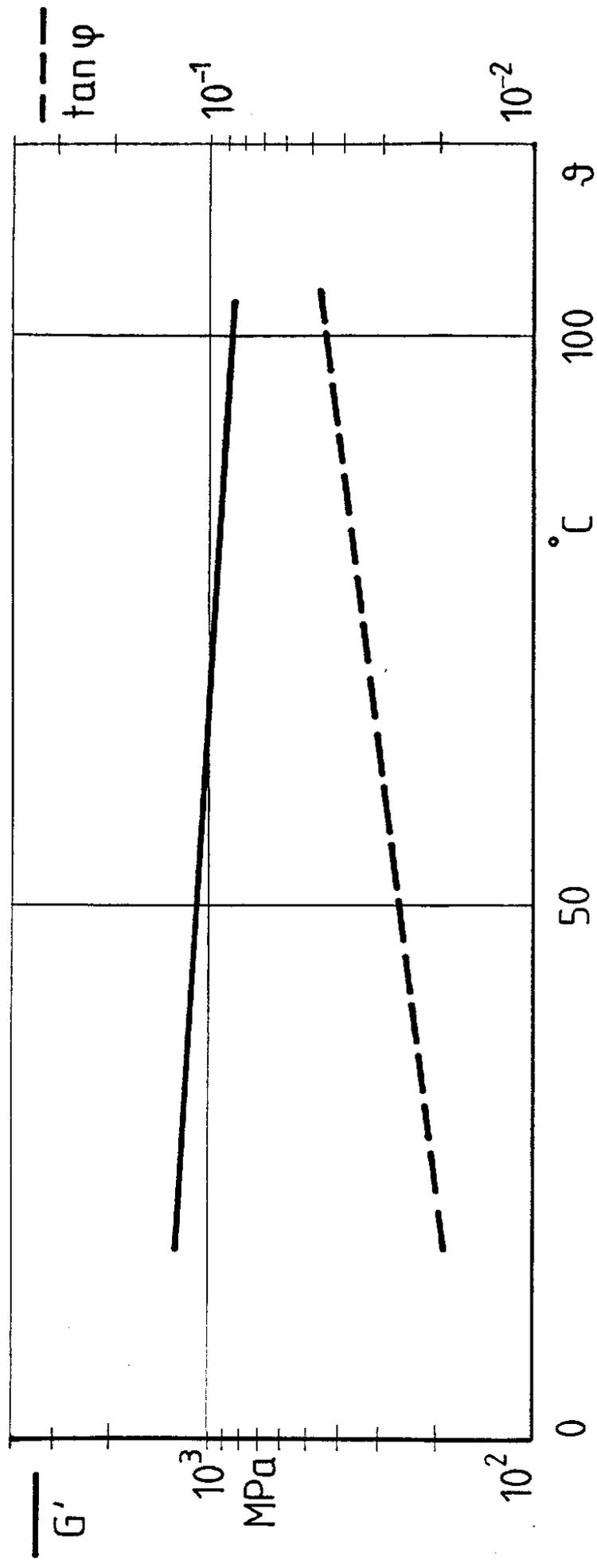


Biegekrechversuche unter Medieneinwirkung
Prüfgerät

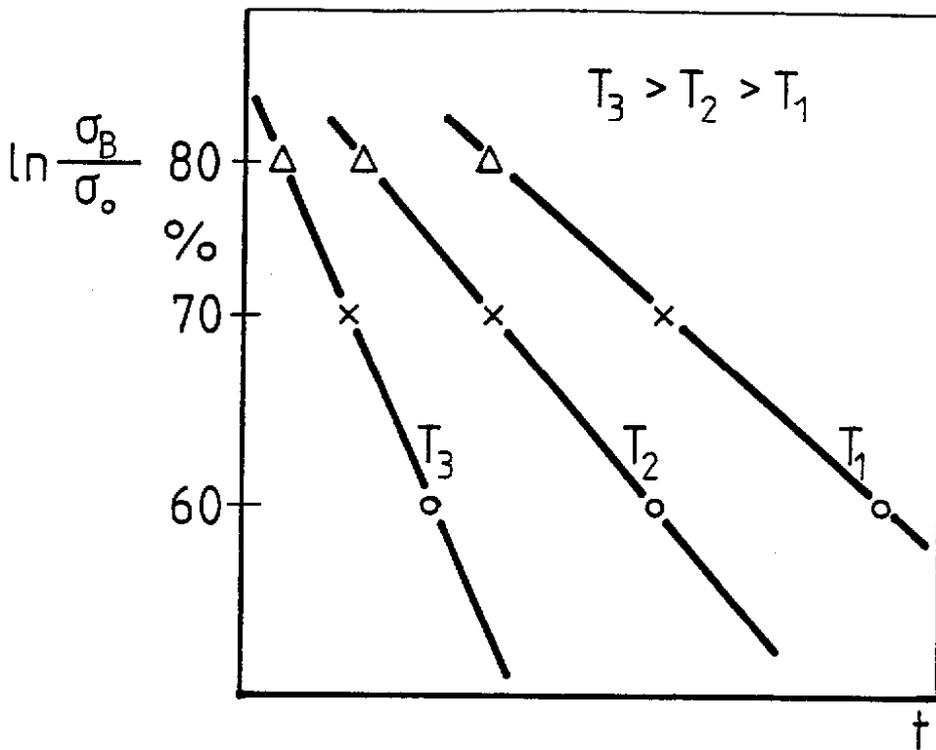


Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen

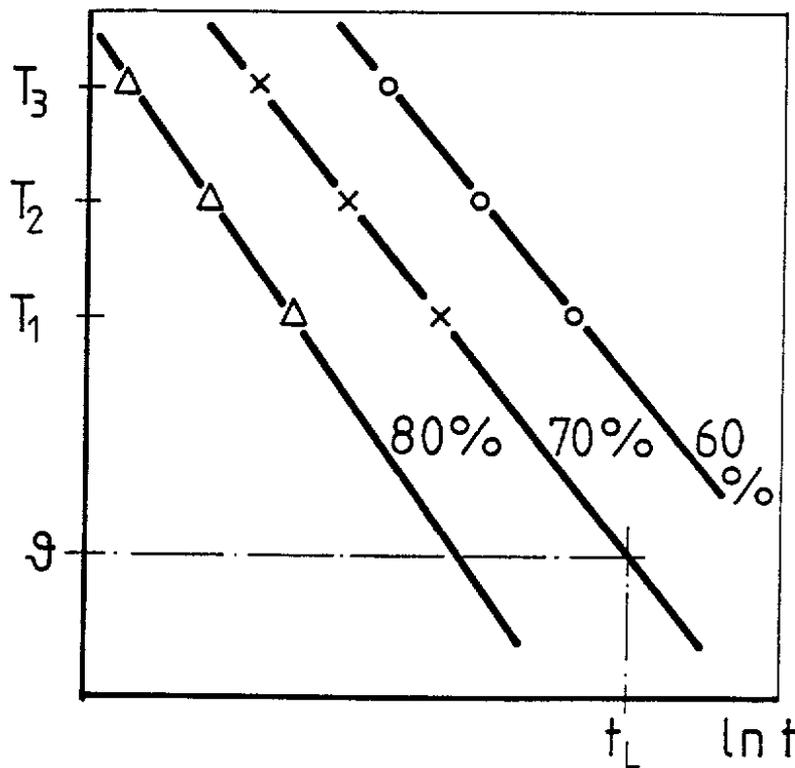
Auftragsart



Zusammenhang Schubmodul G' vs. Temperatur
 Bisphenol-A Harz, getempert

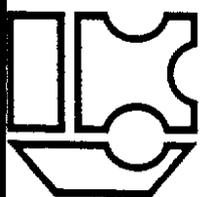


Messen



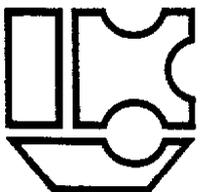
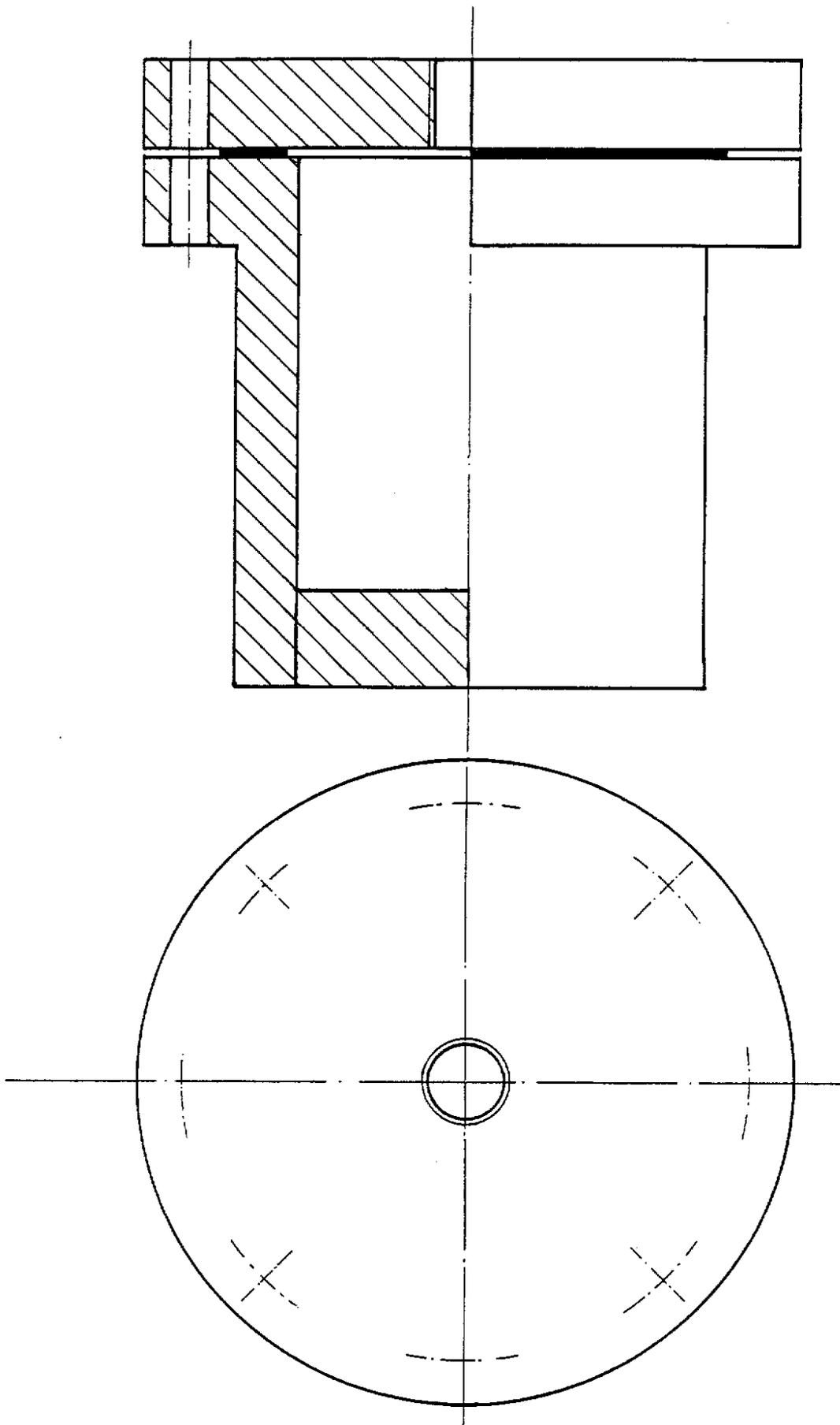
Umzeichnen

$$A_2 = \frac{100}{70} = 1,43$$



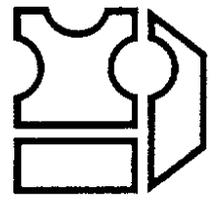
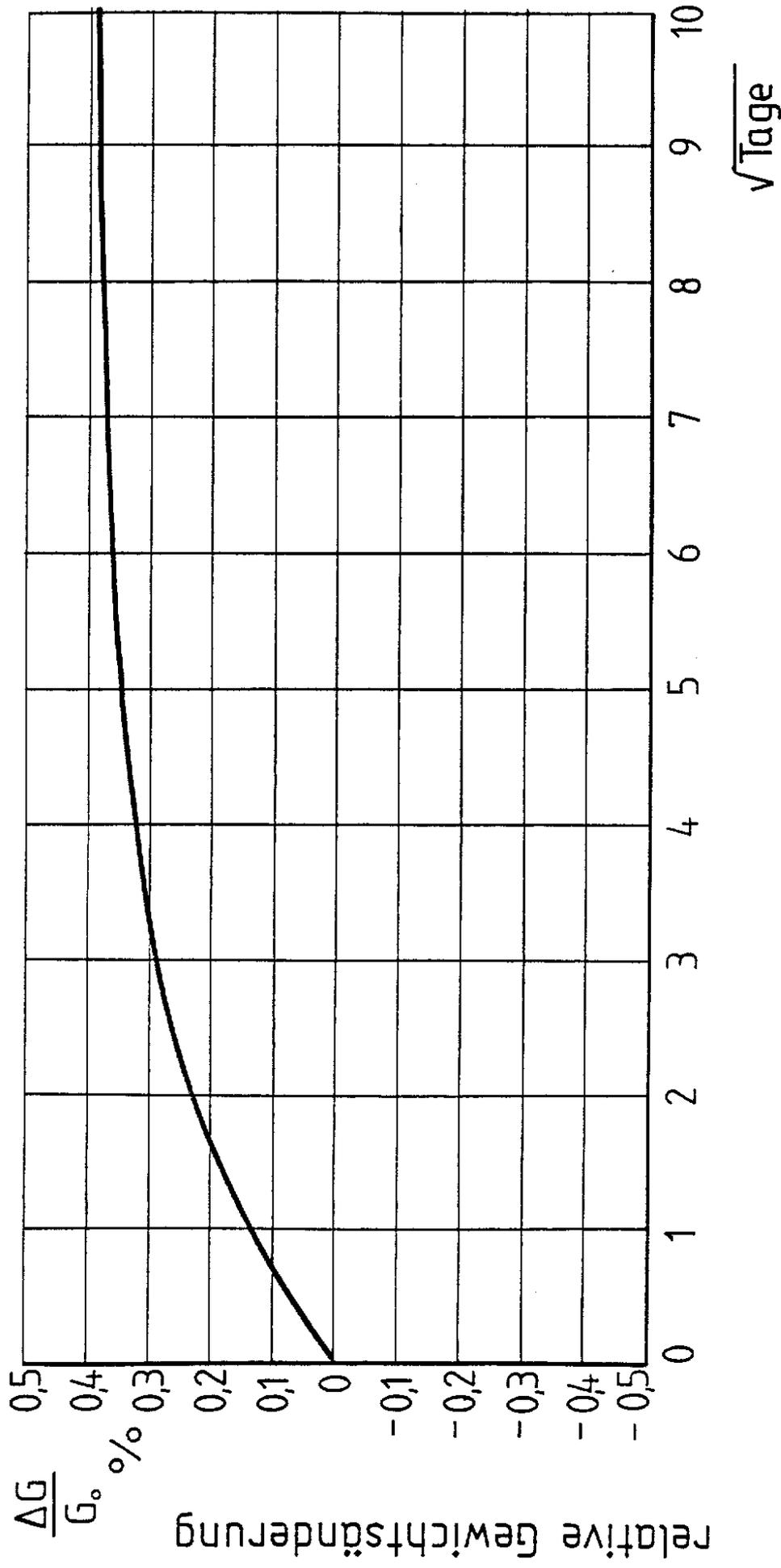
Zeitred. Vers. b. erh. Temperaturen
 Vorgehensweise

Bild 5

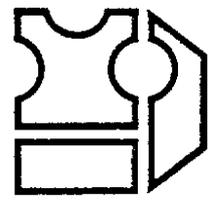
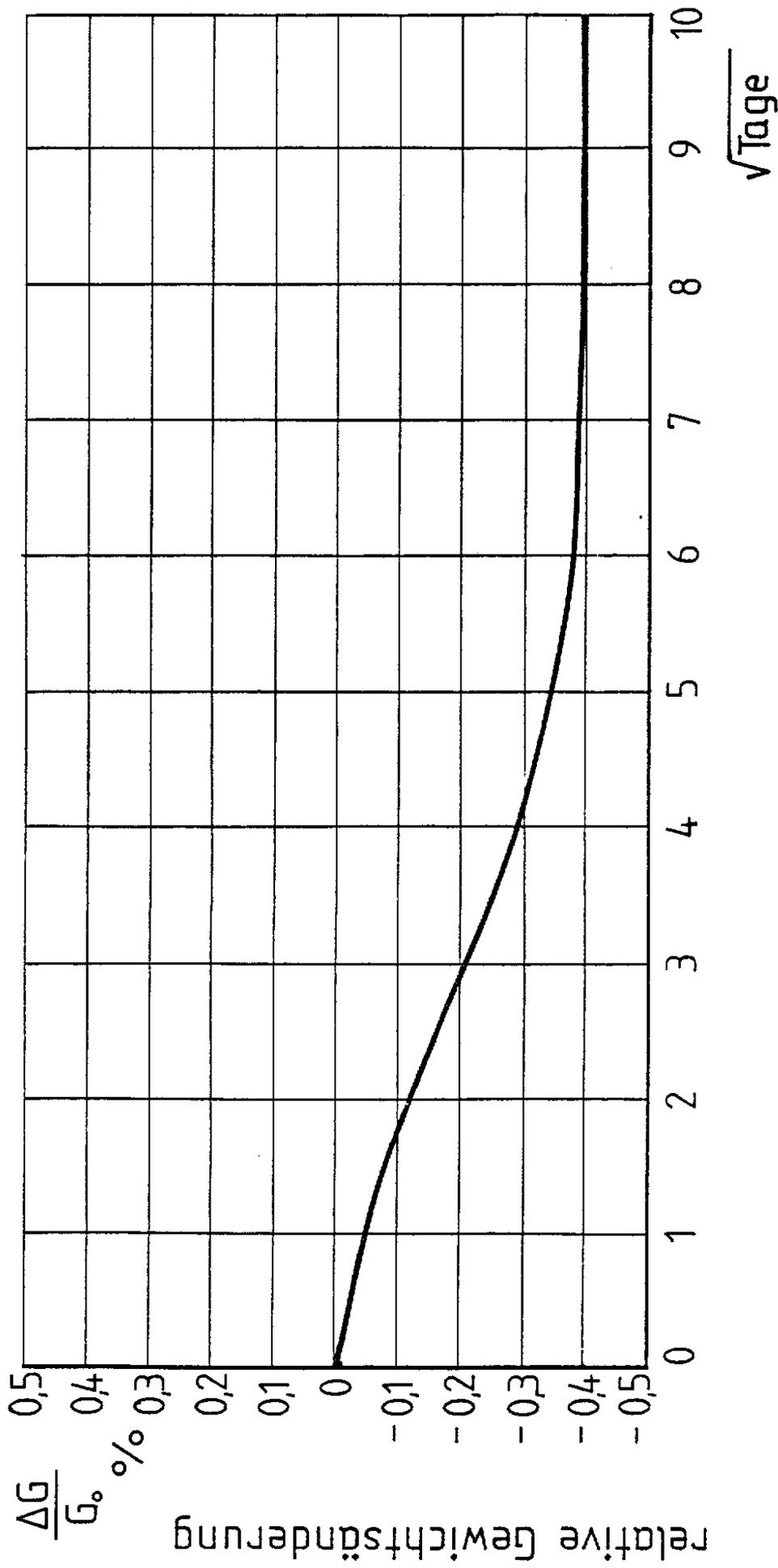


Zeitred. Vers. b. erh. Temperaturen
Prüfgerät / Druckbehälter

Bild 6

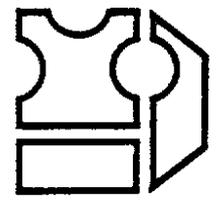
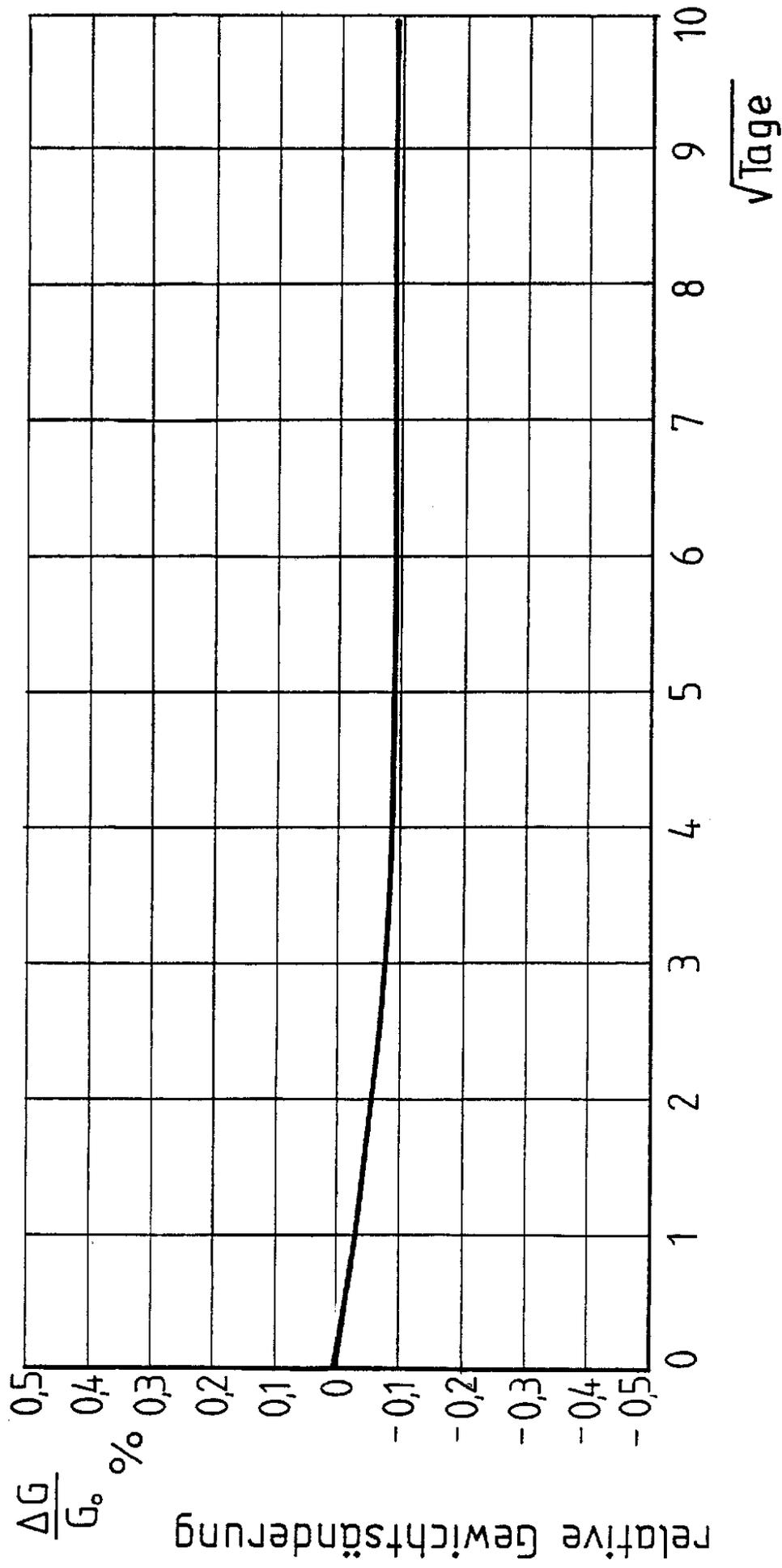


Relative Gewichtsänderung von verstärktem
Bisphenol-A Harz in H₂O

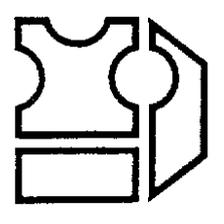
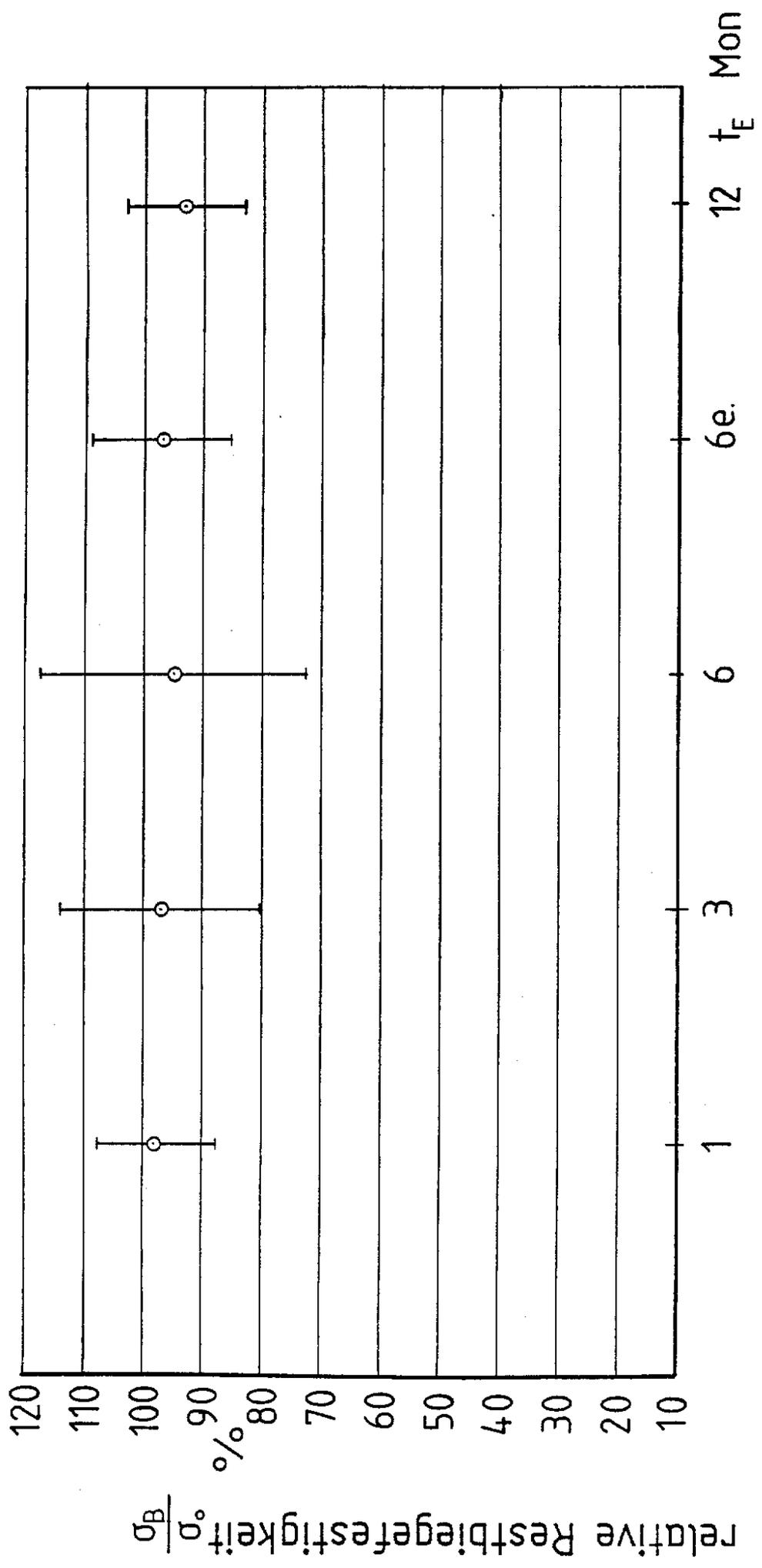


Relative Gewichtsänderung von verstärktem
Bisphenol-A Harz in 10 % NaOH

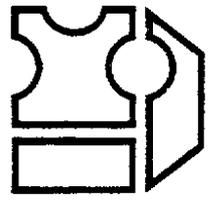
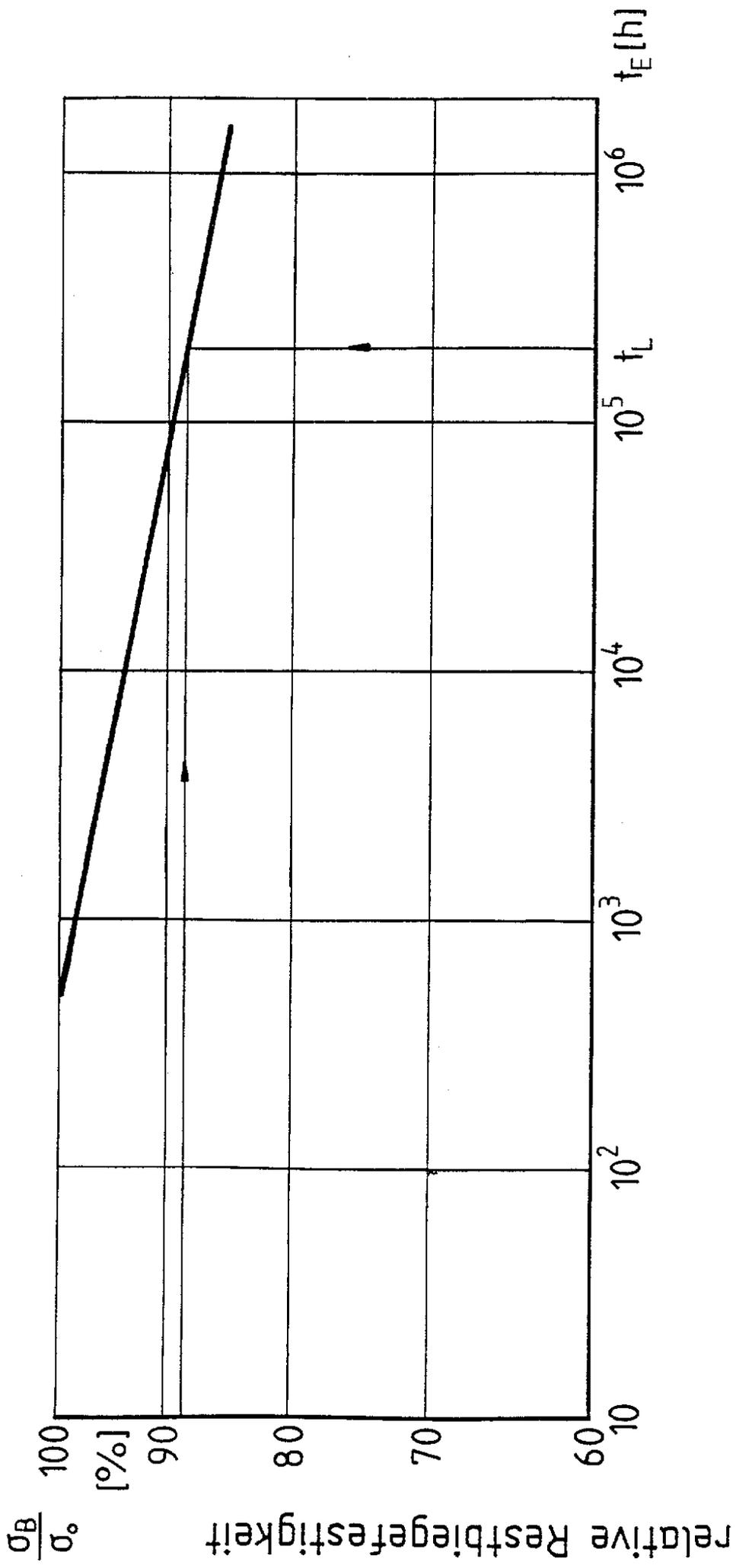
Bild 8



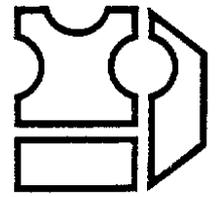
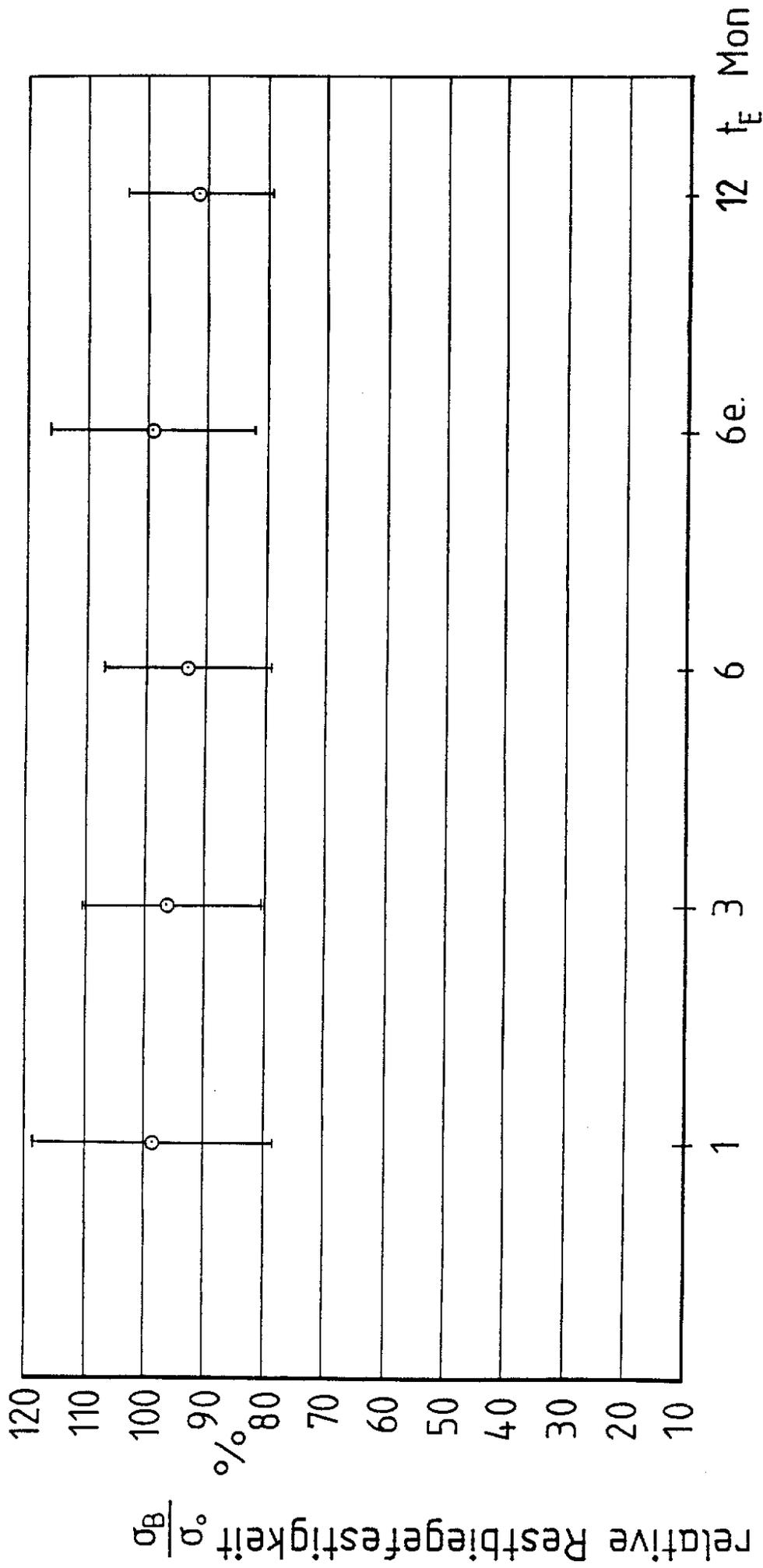
Relative Gewichtsänderung von verstärktem
Bisphenol-A Harz in 50 % H_2SO_4



Untersuchungen nach DIN 53393
 Standardglykolharz / H₂O / Streudiagramm



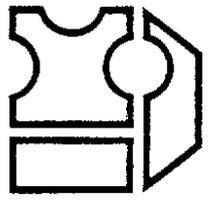
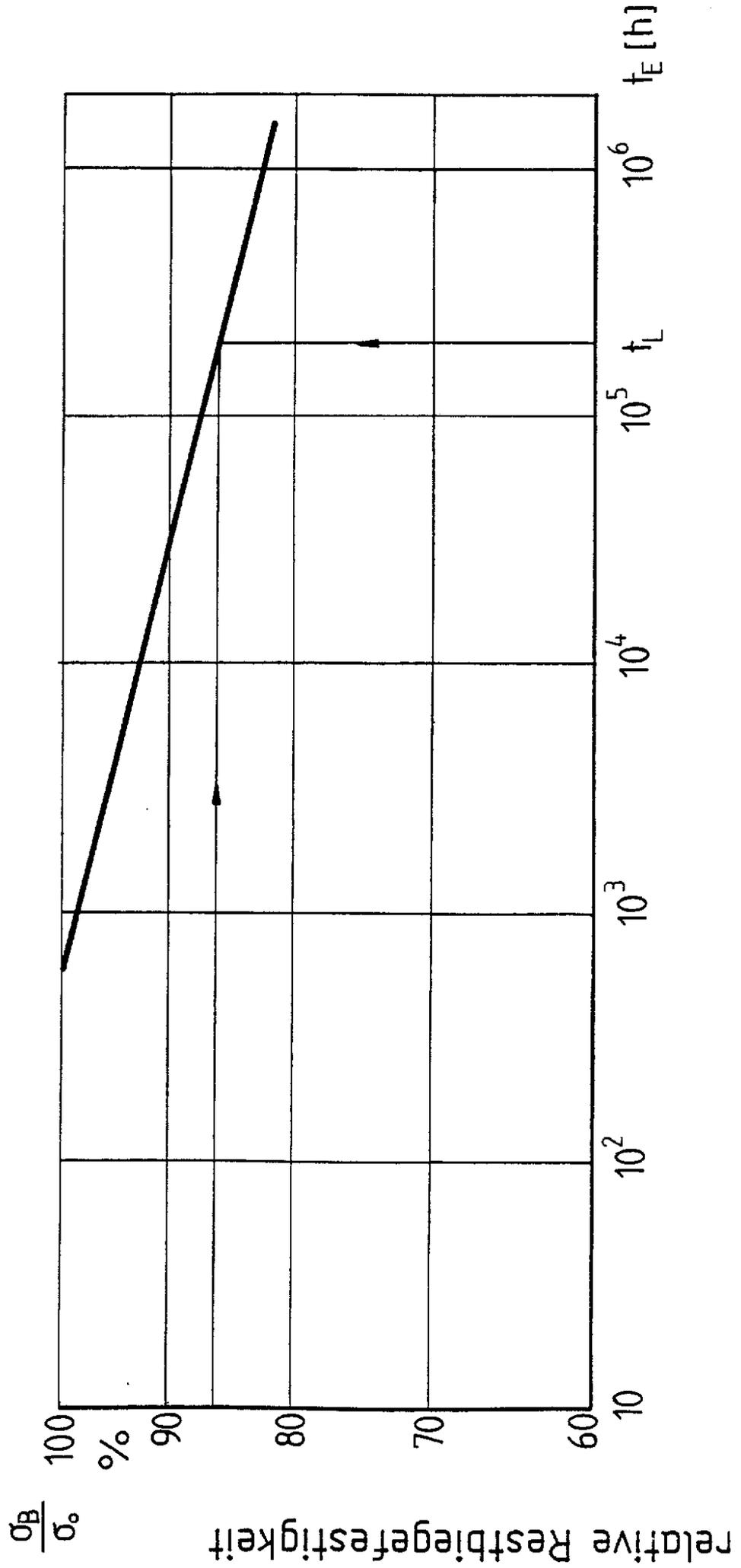
Untersuchungen nach DIN 53393
Standardglykolharz / H₂O



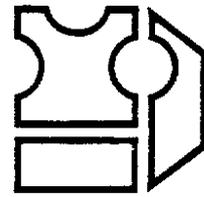
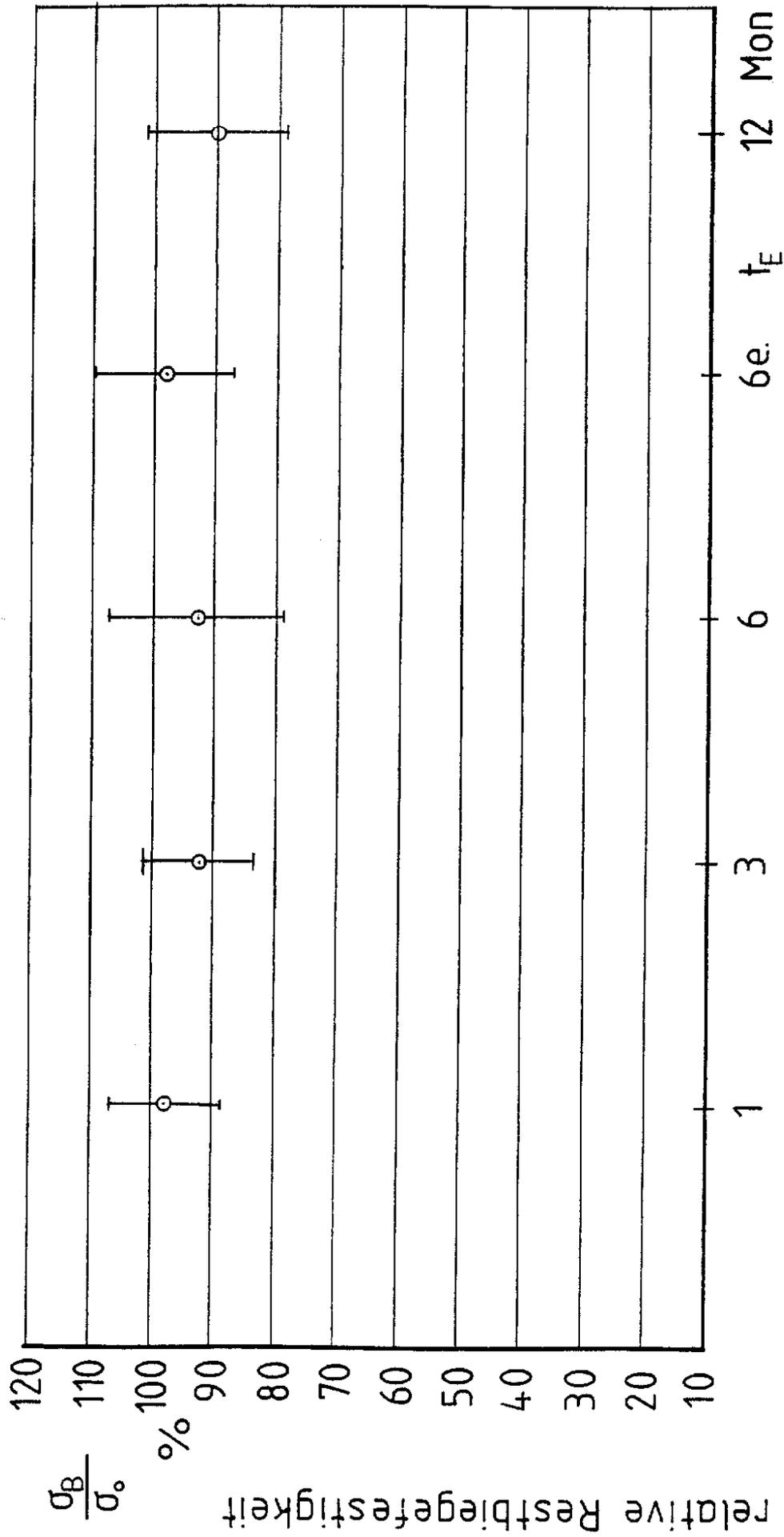
Untersuchungen nach DIN 53393

Neopentylglykolharz / 30 % H_2SO_4 / Streudiagramm

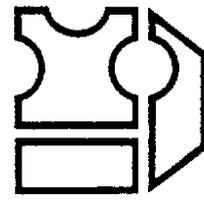
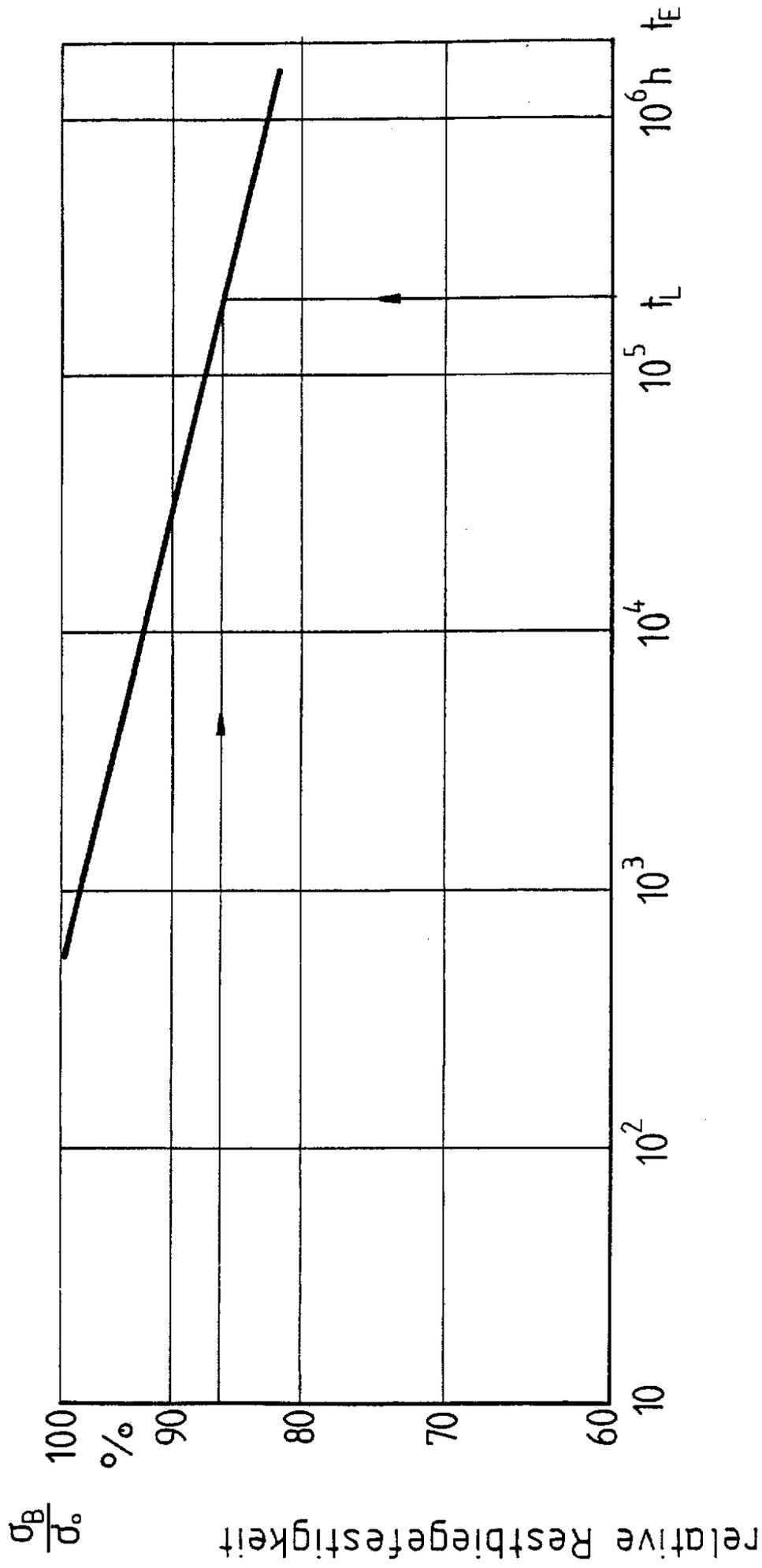
Bild 12



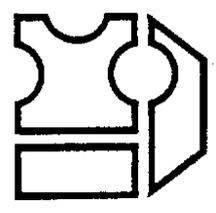
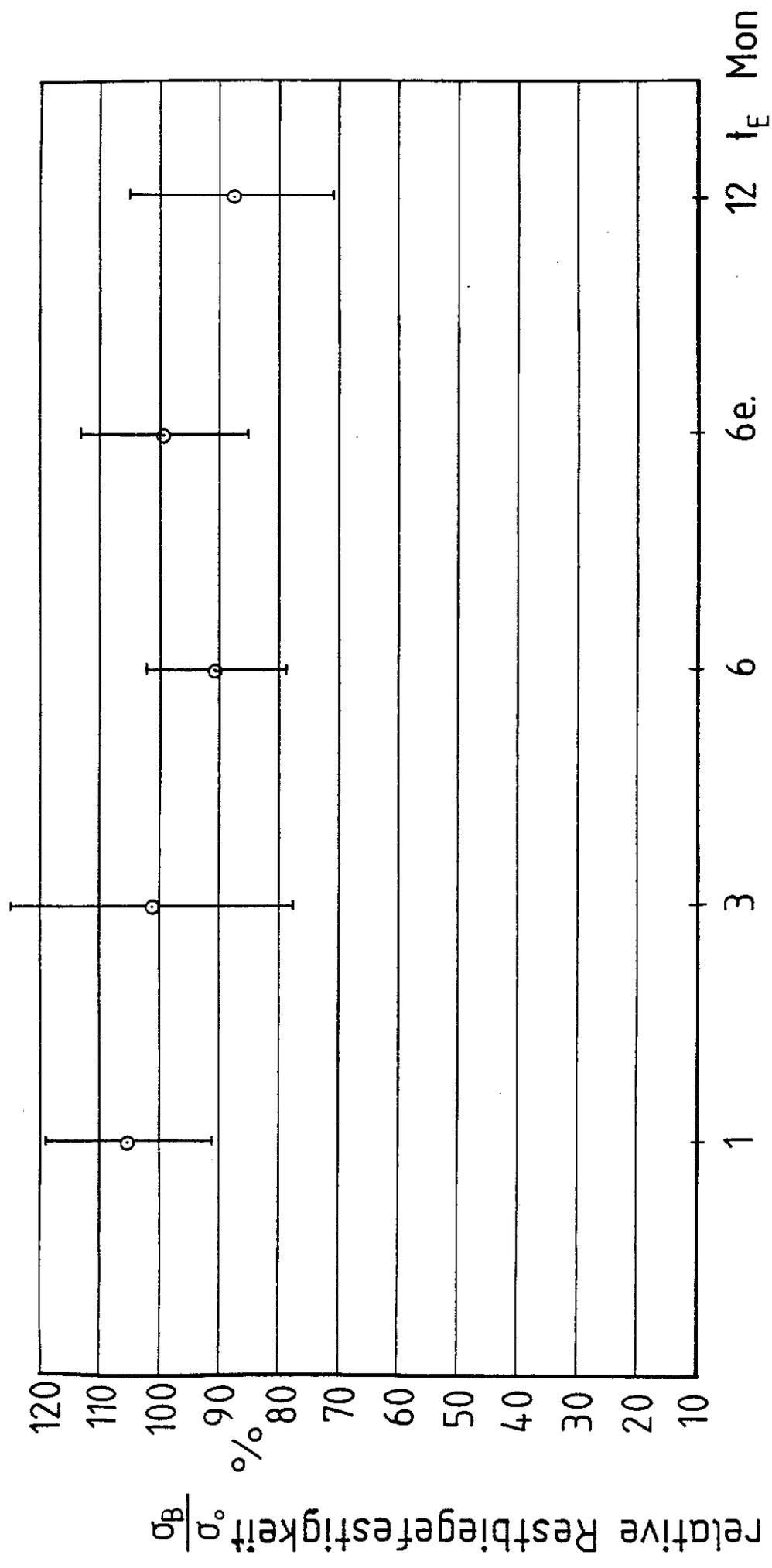
Untersuchungen nach DIN 53393
 Neopentylglykolharz / 30 % H₂SO₄



Untersuchungen nach DIN 53393
 Bisphenol-A Harz / H₂O / Streudiagramm

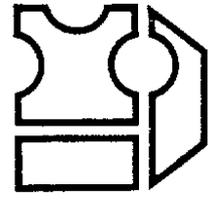
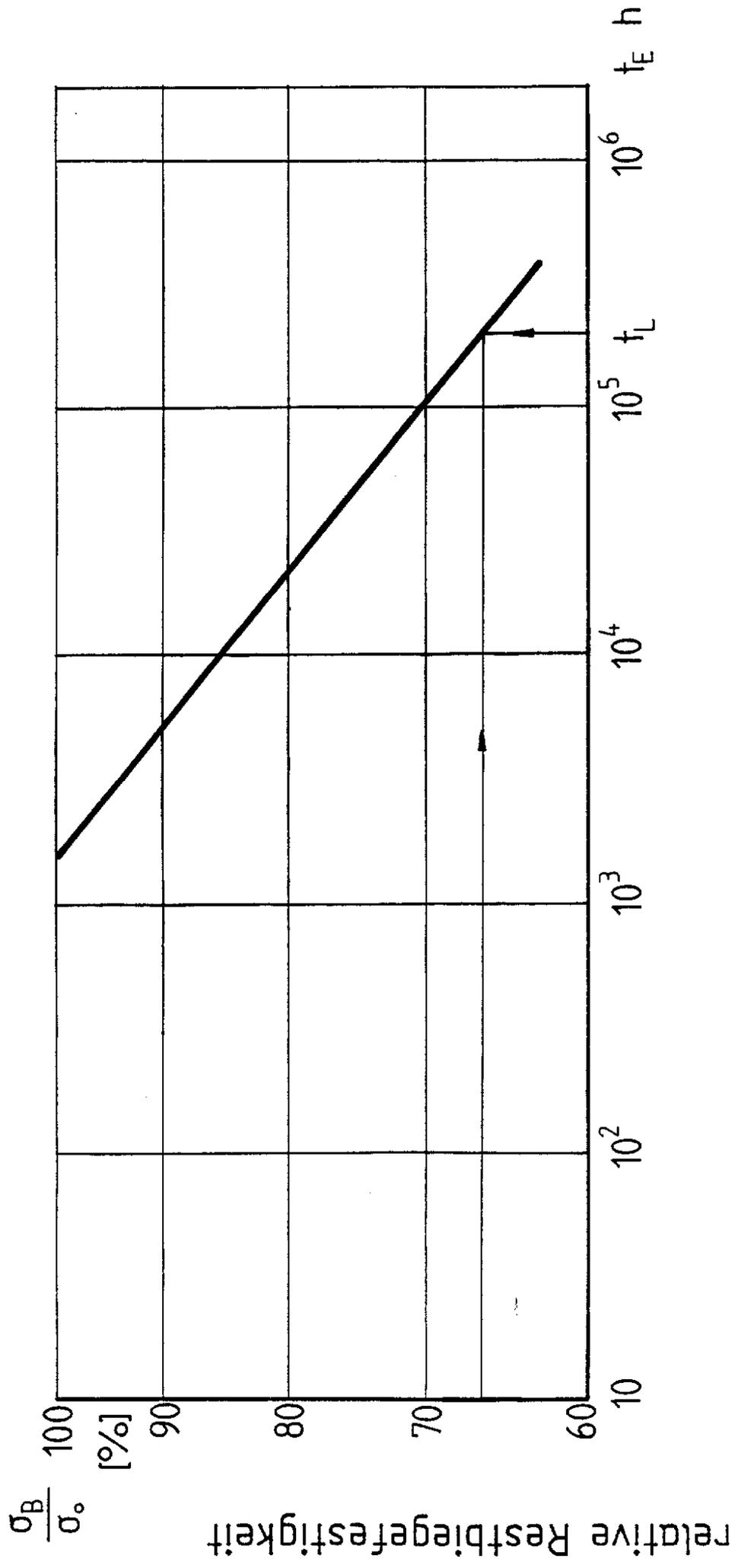


Untersuchungen nach DIN 53393
Bisphenol-A Harz / H₂O

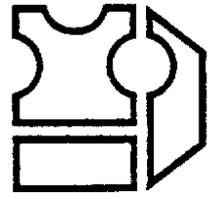
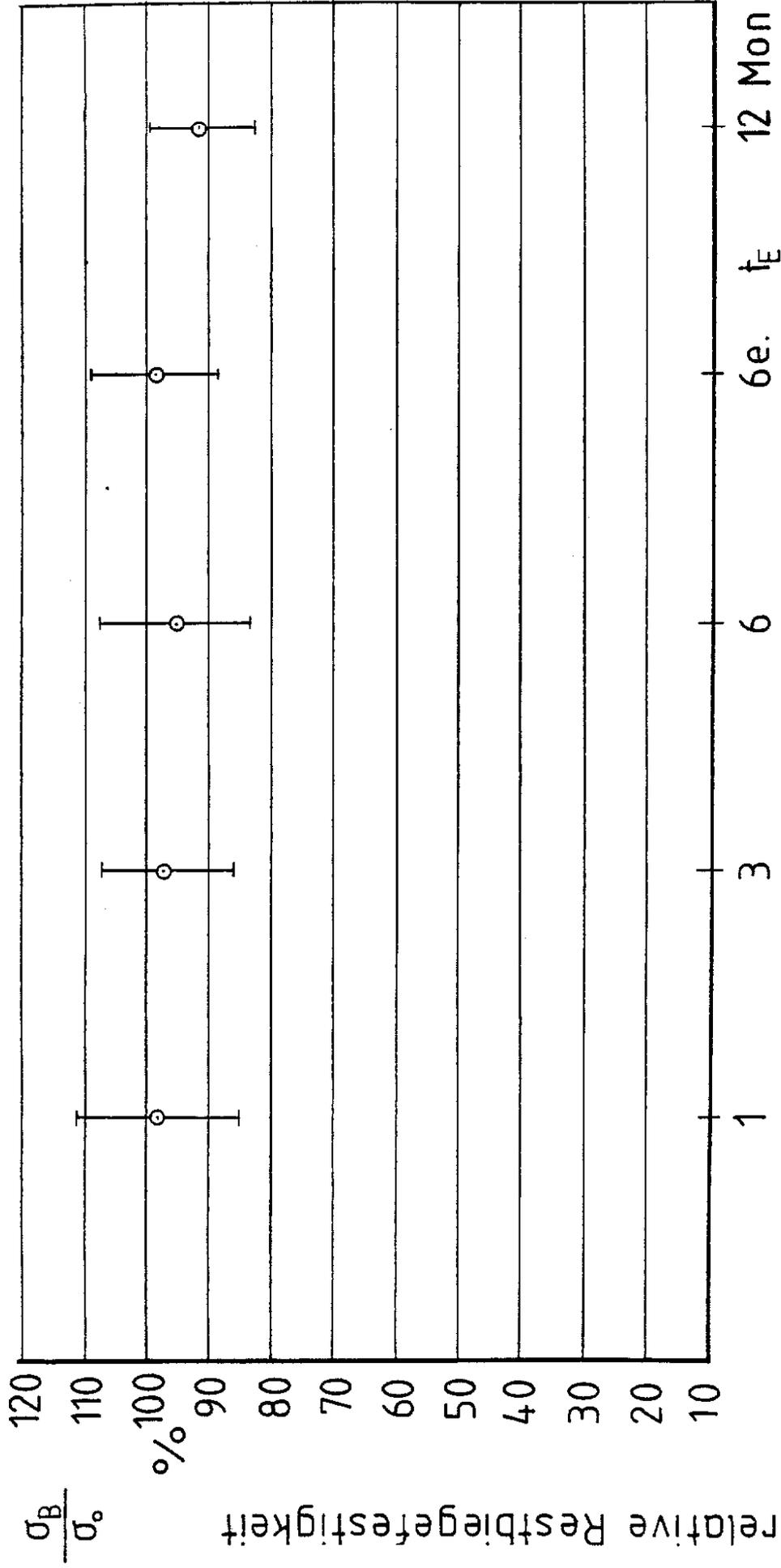


Untersuchungen nach DIN 53393

Bisphenol-A Harz / 10% NaOH / Streudiagramm



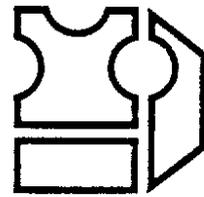
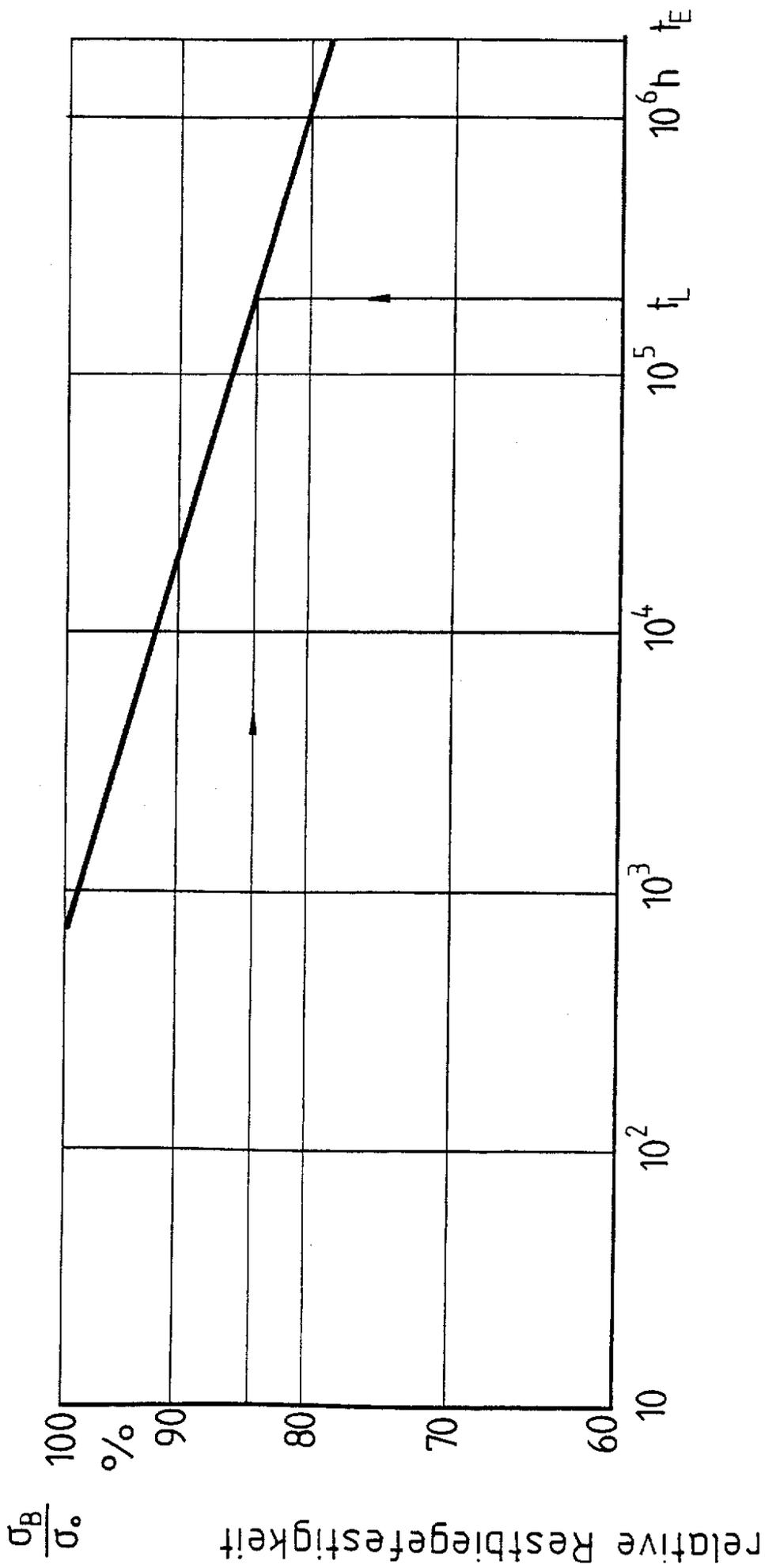
Untersuchungen nach DIN 53393
 Bisphenol-A Harz / 10% NaOH



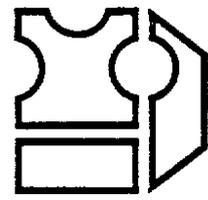
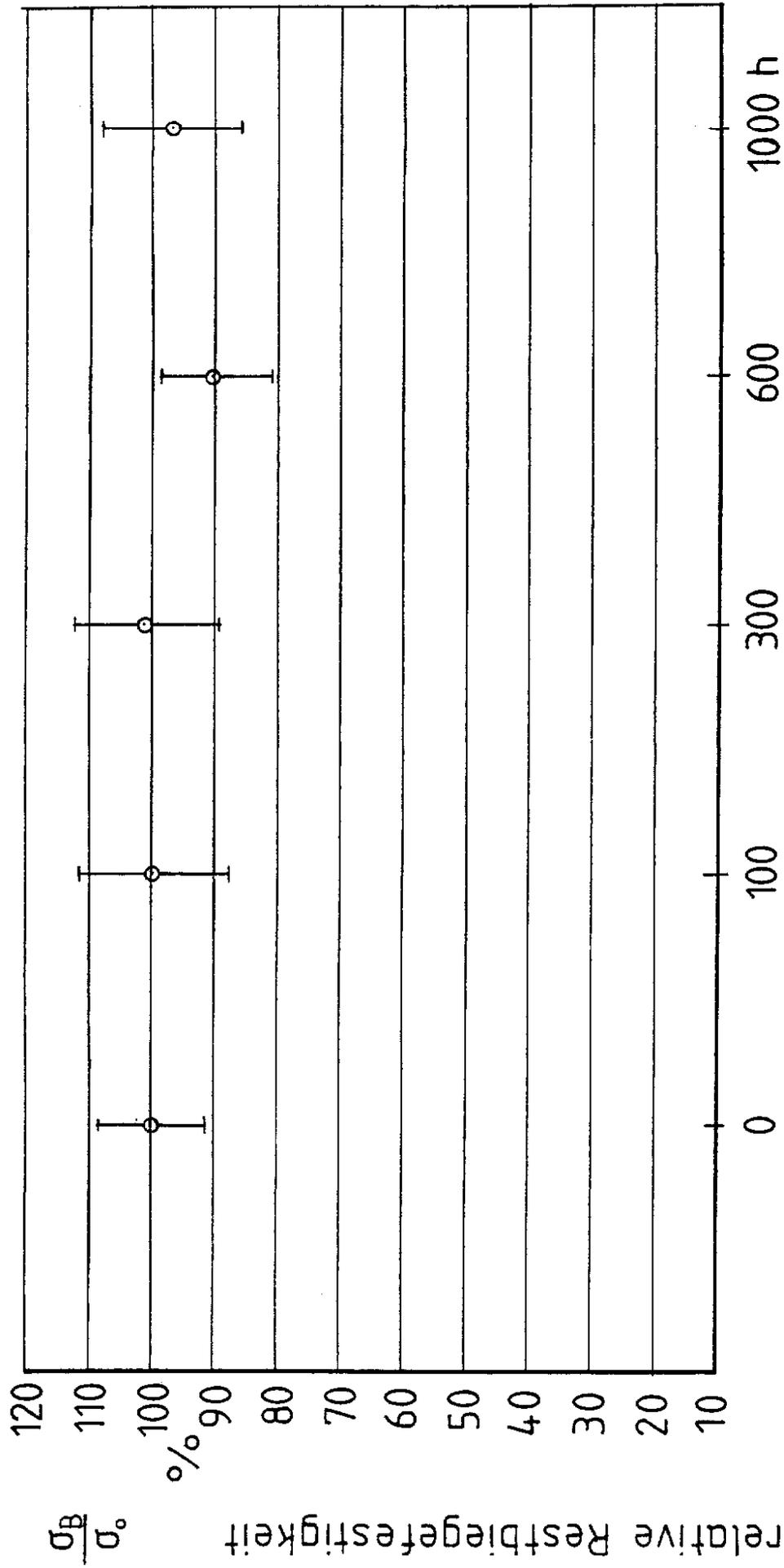
Untersuchungen nach DIN 53393

Bisphenol-A Harz / 50 % H₂SO₄ / Streudiagramm

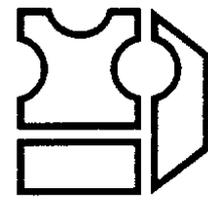
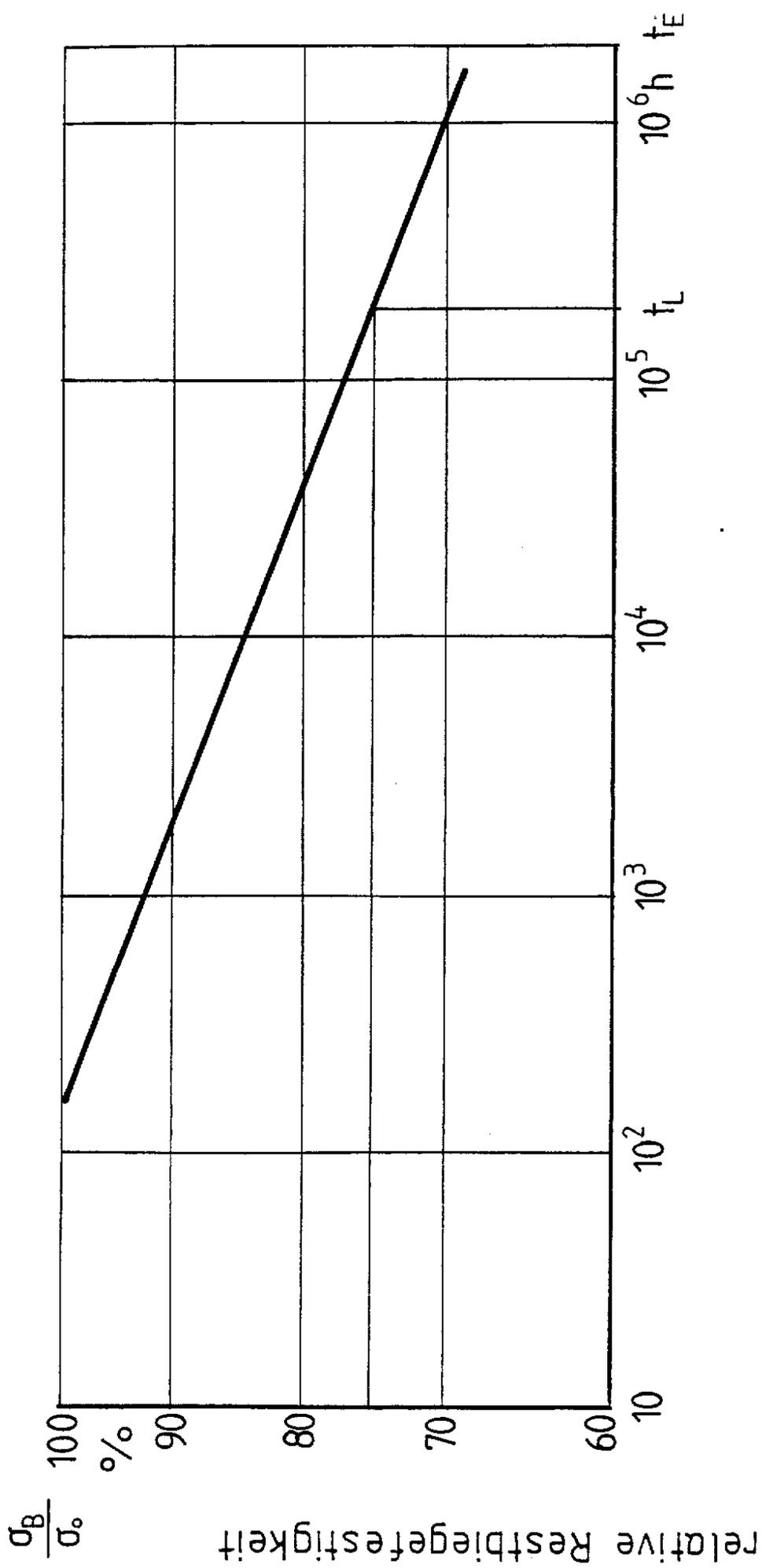
Bild 18



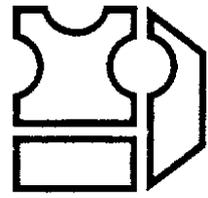
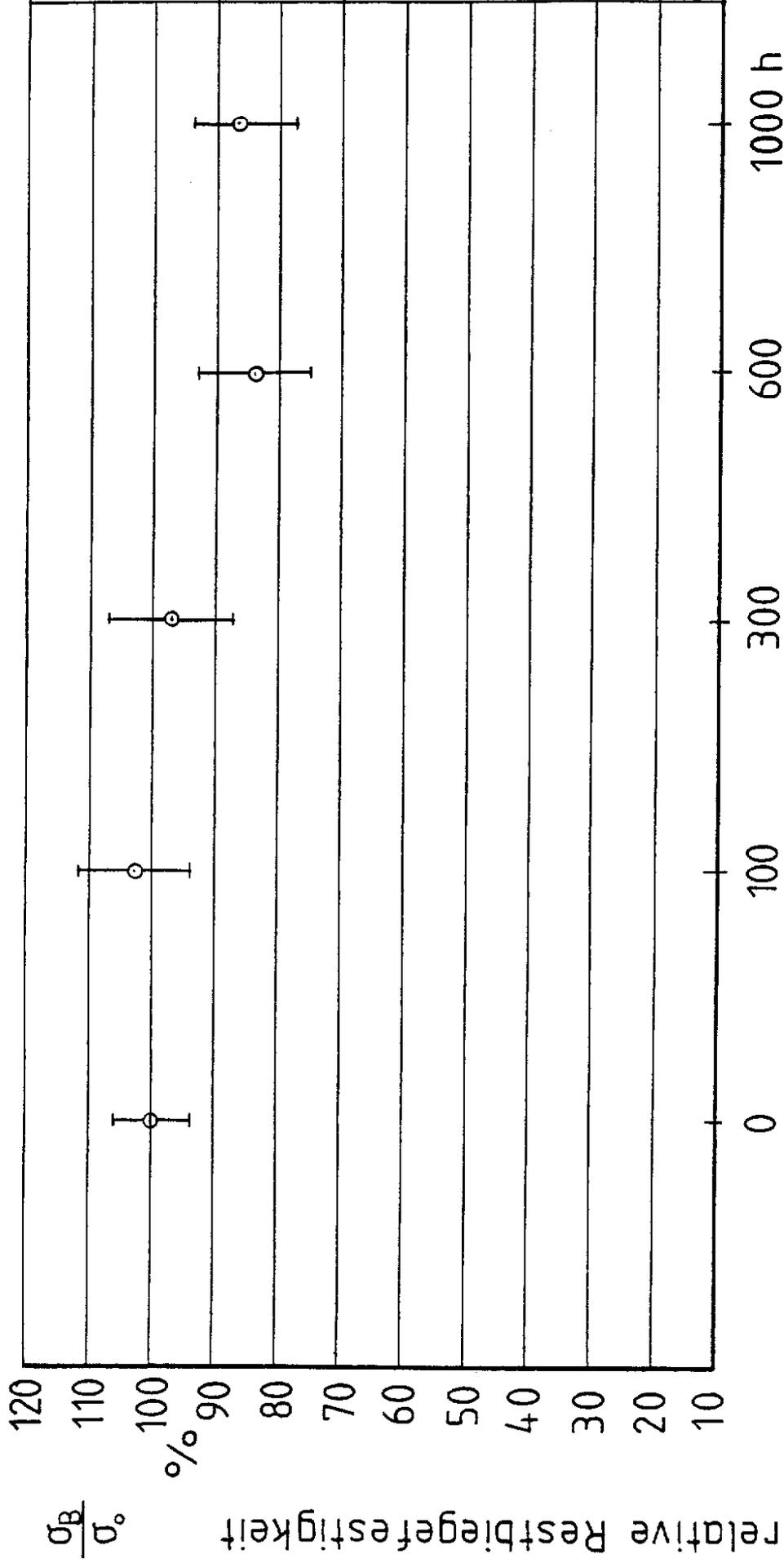
Untersuchungen nach DIN 53393
Bisphenol-A Harz / 50 % H₂SO₄



Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung Bisphenol-A Harz / H₂O / Streudiagramm



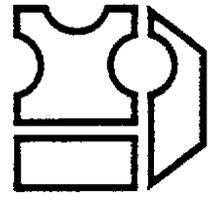
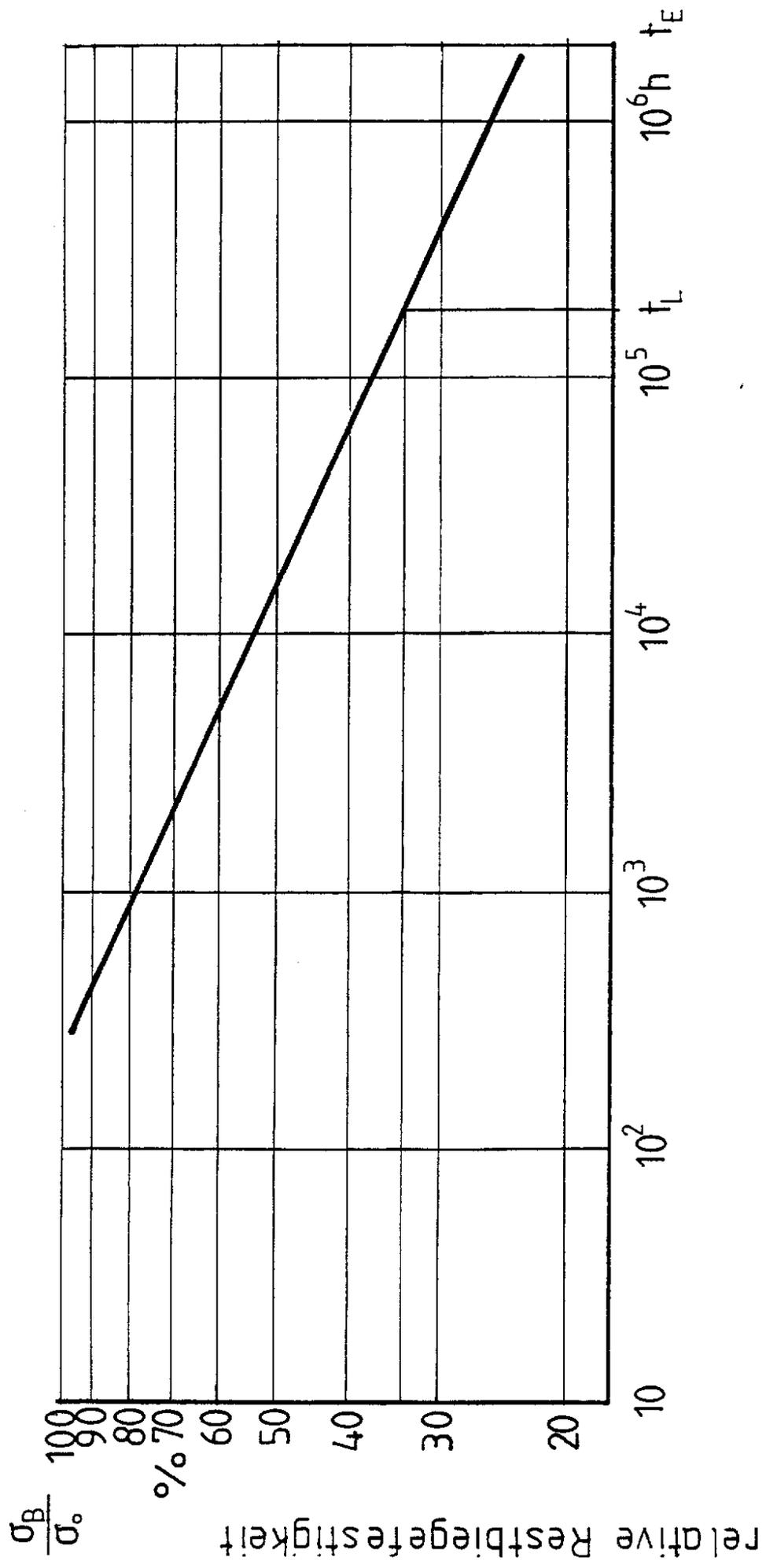
Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung
 Bisphenol-A Harz / H₂O



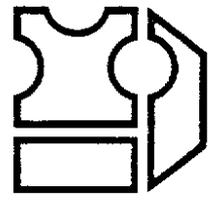
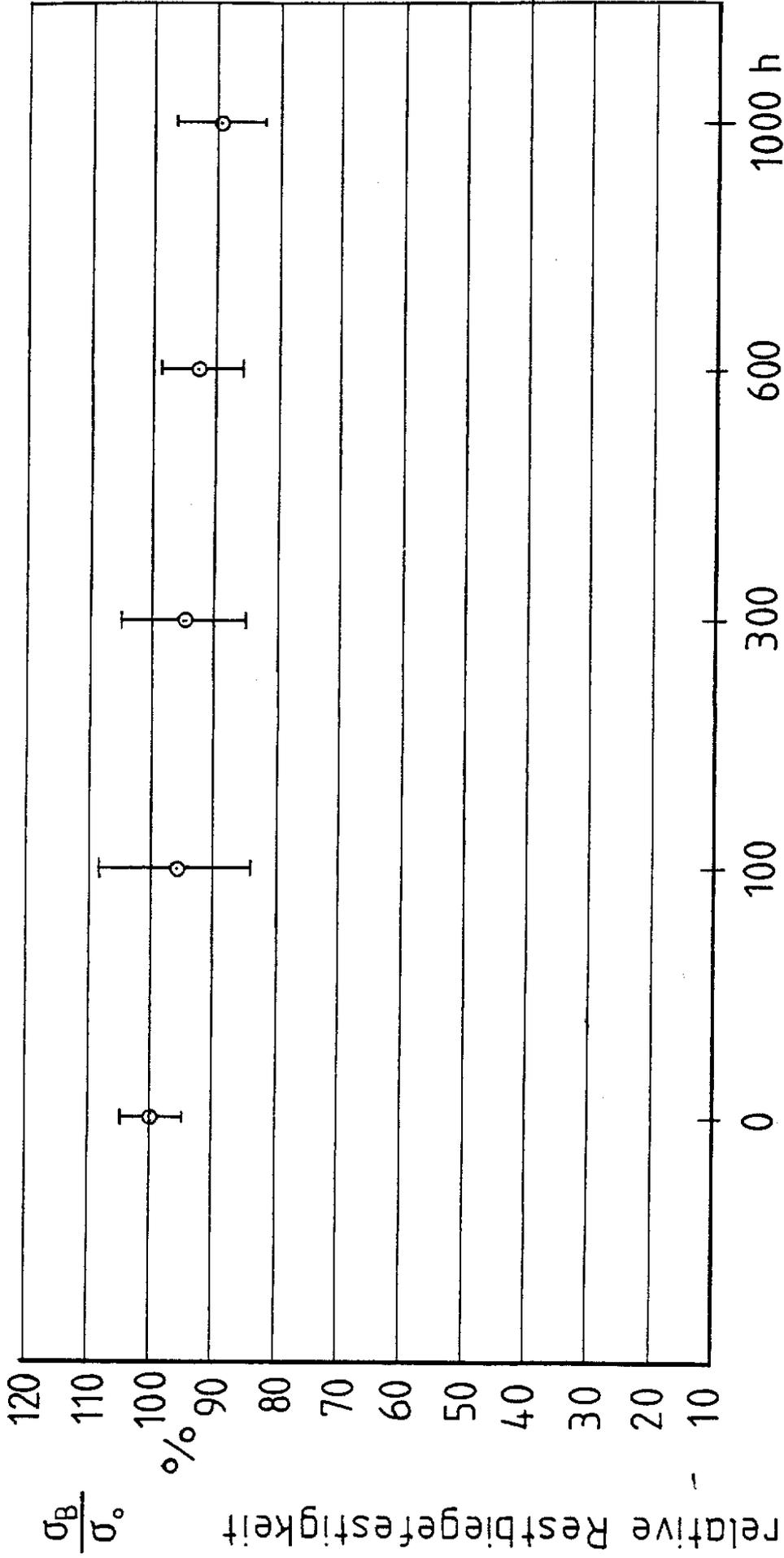
Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung

Bisphenol-A Harz / 10 % NaOH / Streudiagramm

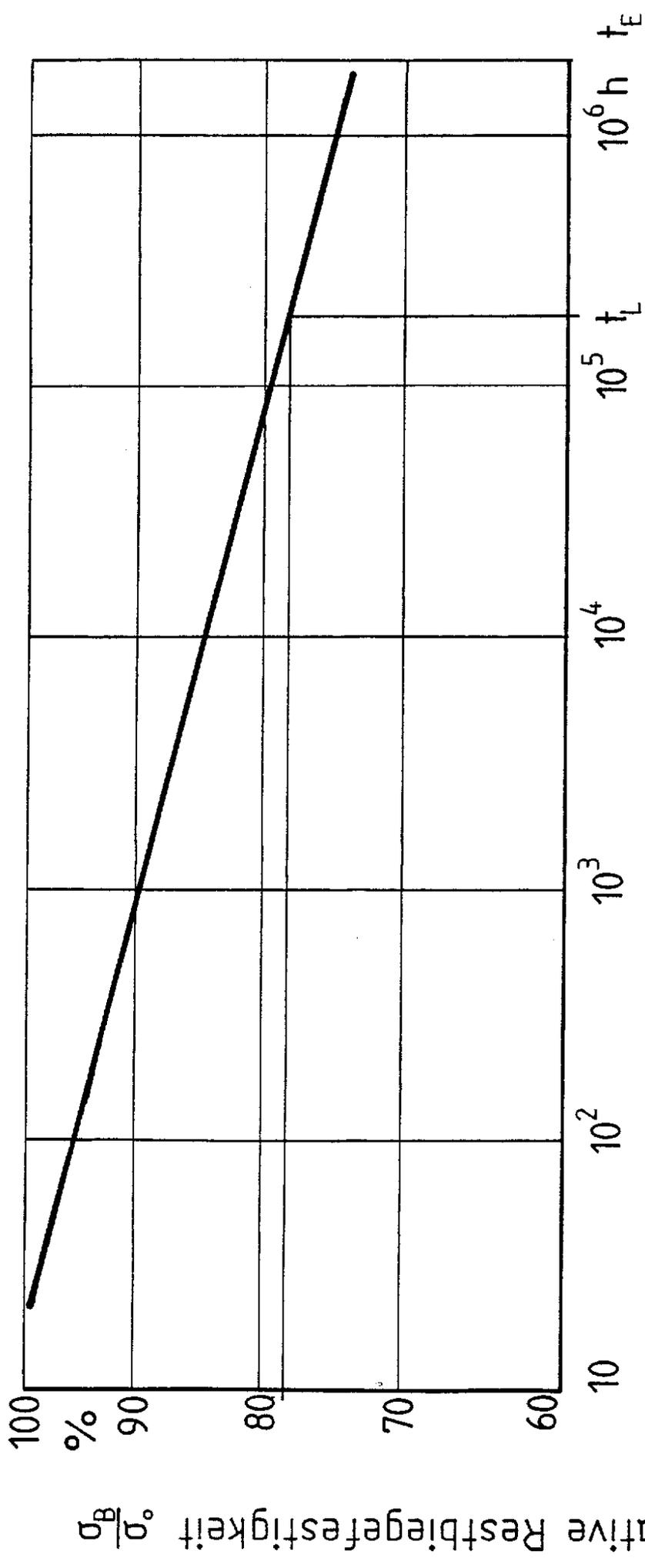
Bild 22



Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung
 Bisphenol-A Harz / 10 % NaOH



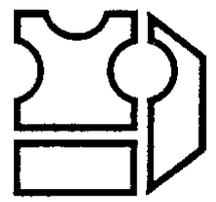
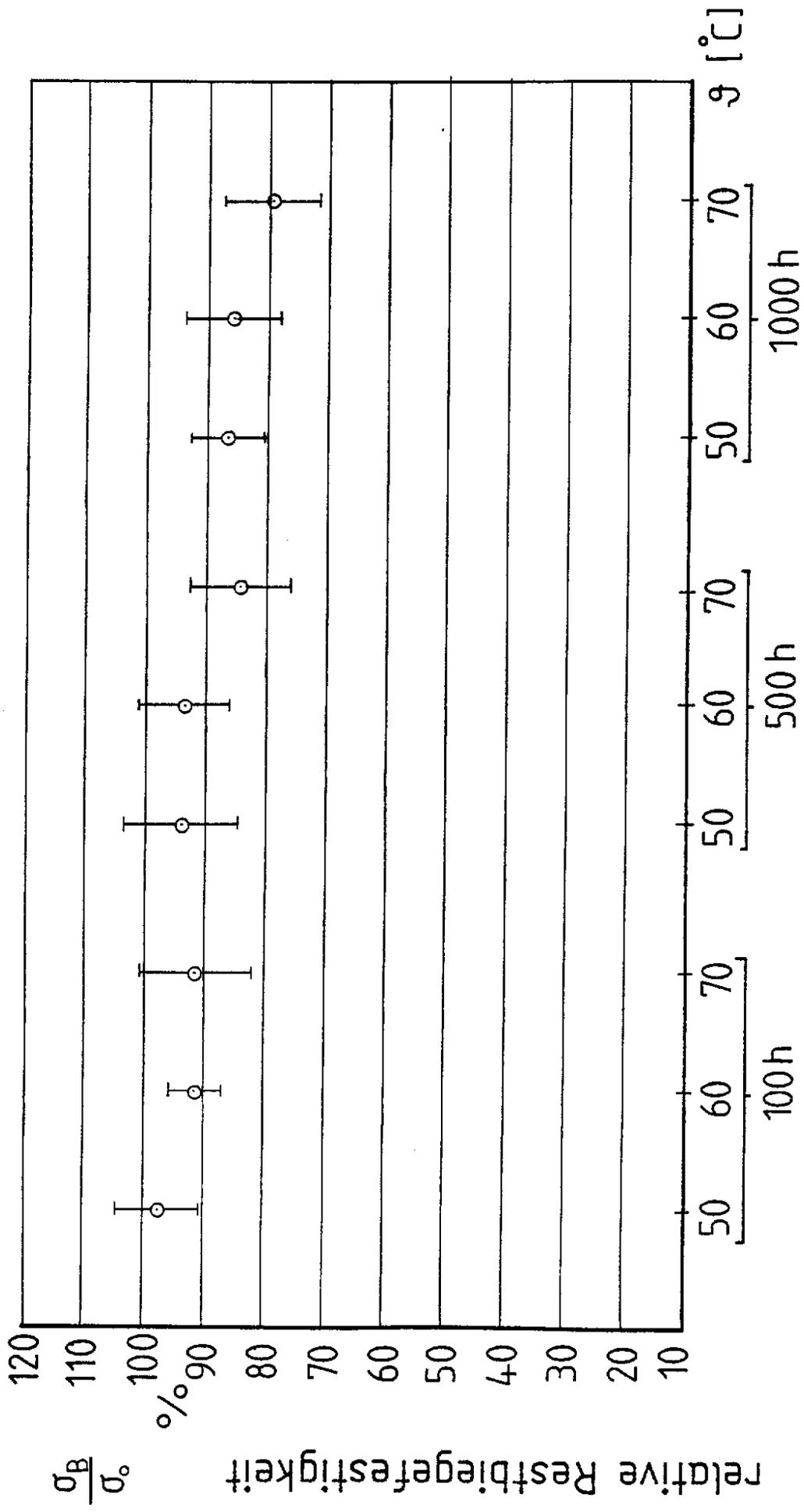
**Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung
Bisphenol-A Harz / 50 % H₂SO₄ / Streudiagramm**



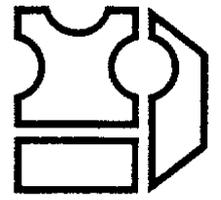
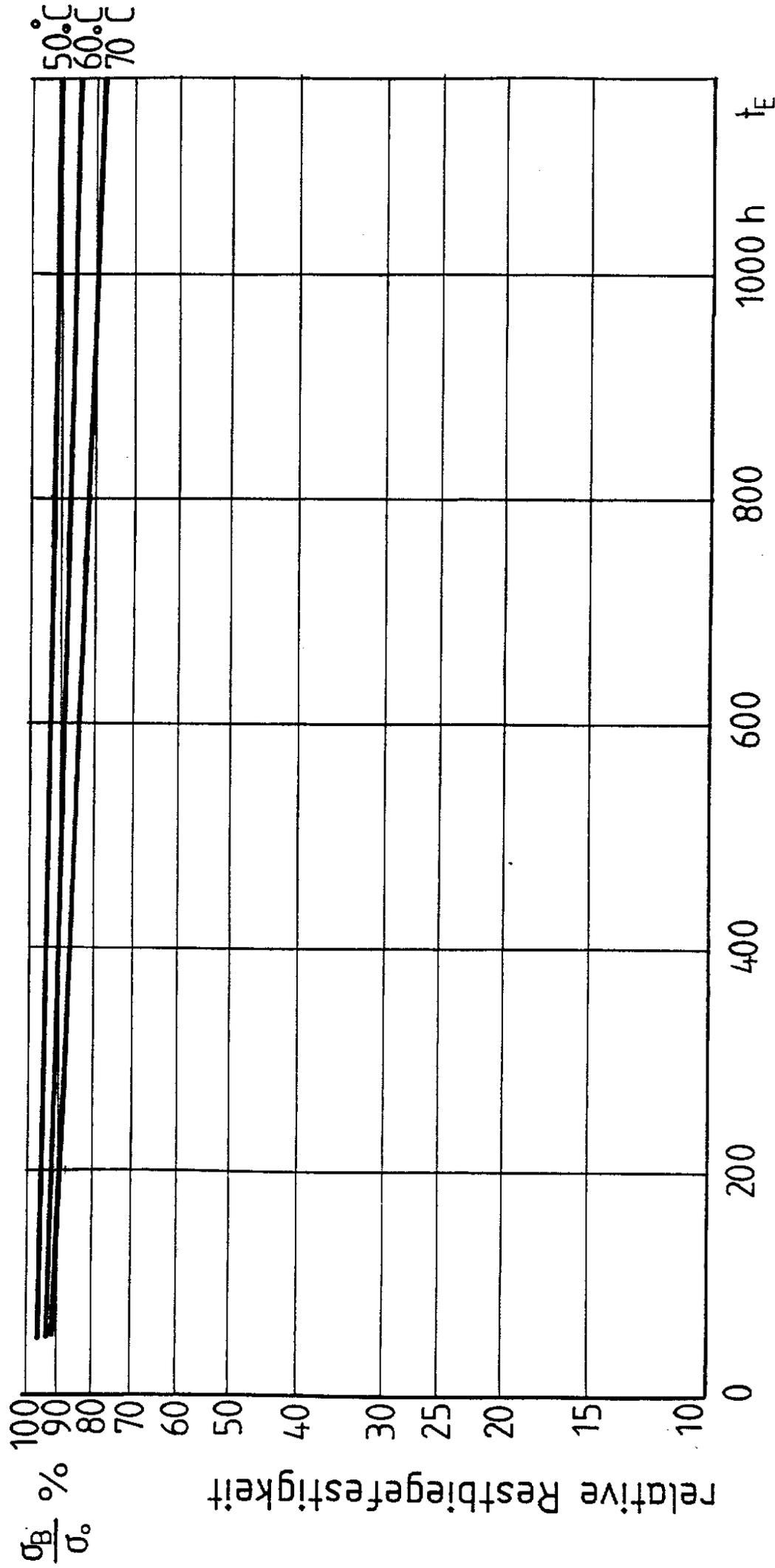
relative Restbiegefestigkeit $\frac{\sigma_{\text{B}}}{\sigma_0}$



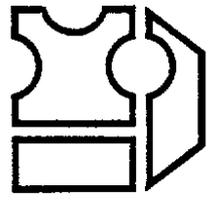
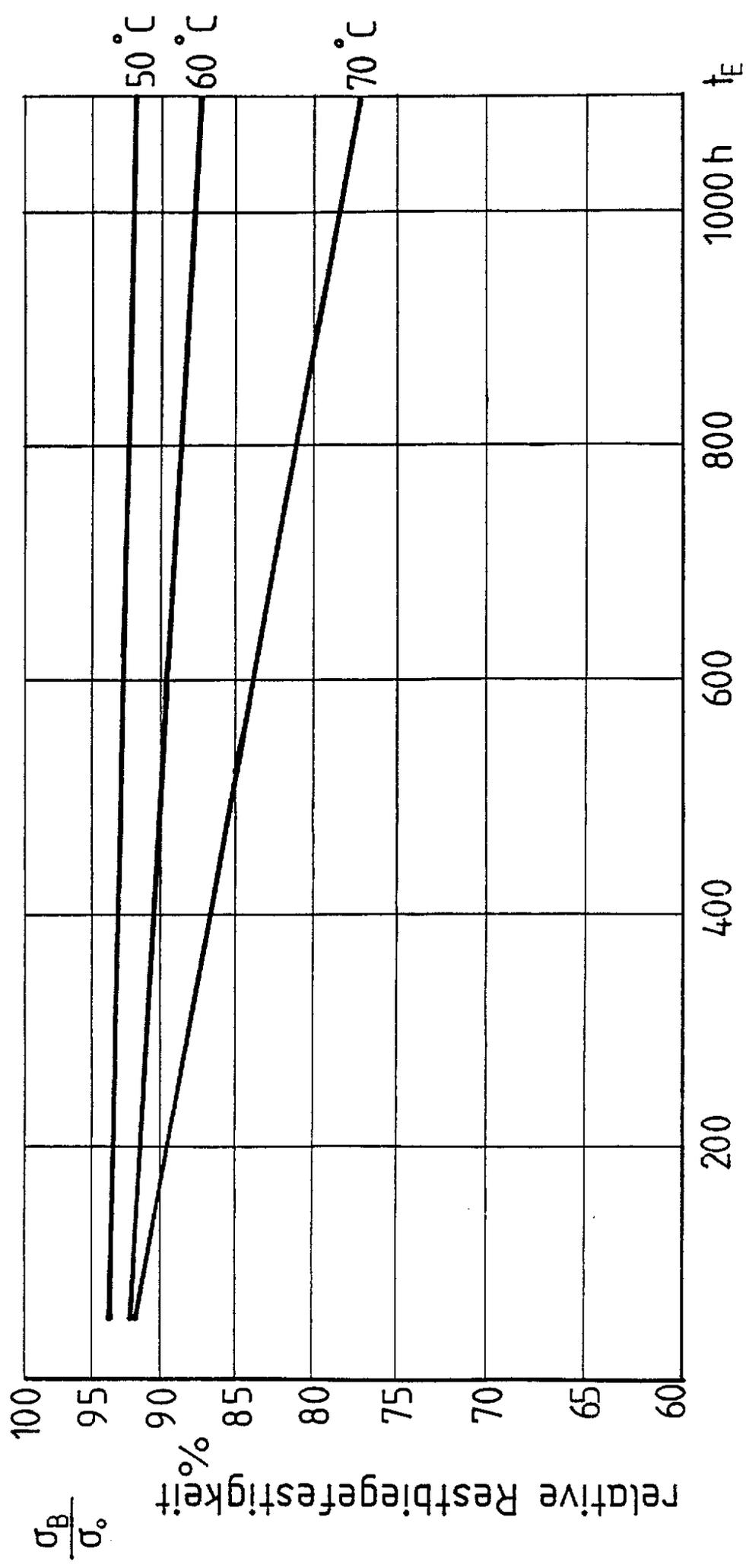
Biegekriechversuche unter Medieneinwirkung
 Bisphenol-A Harz / 50 % H_2SO_4



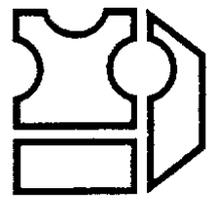
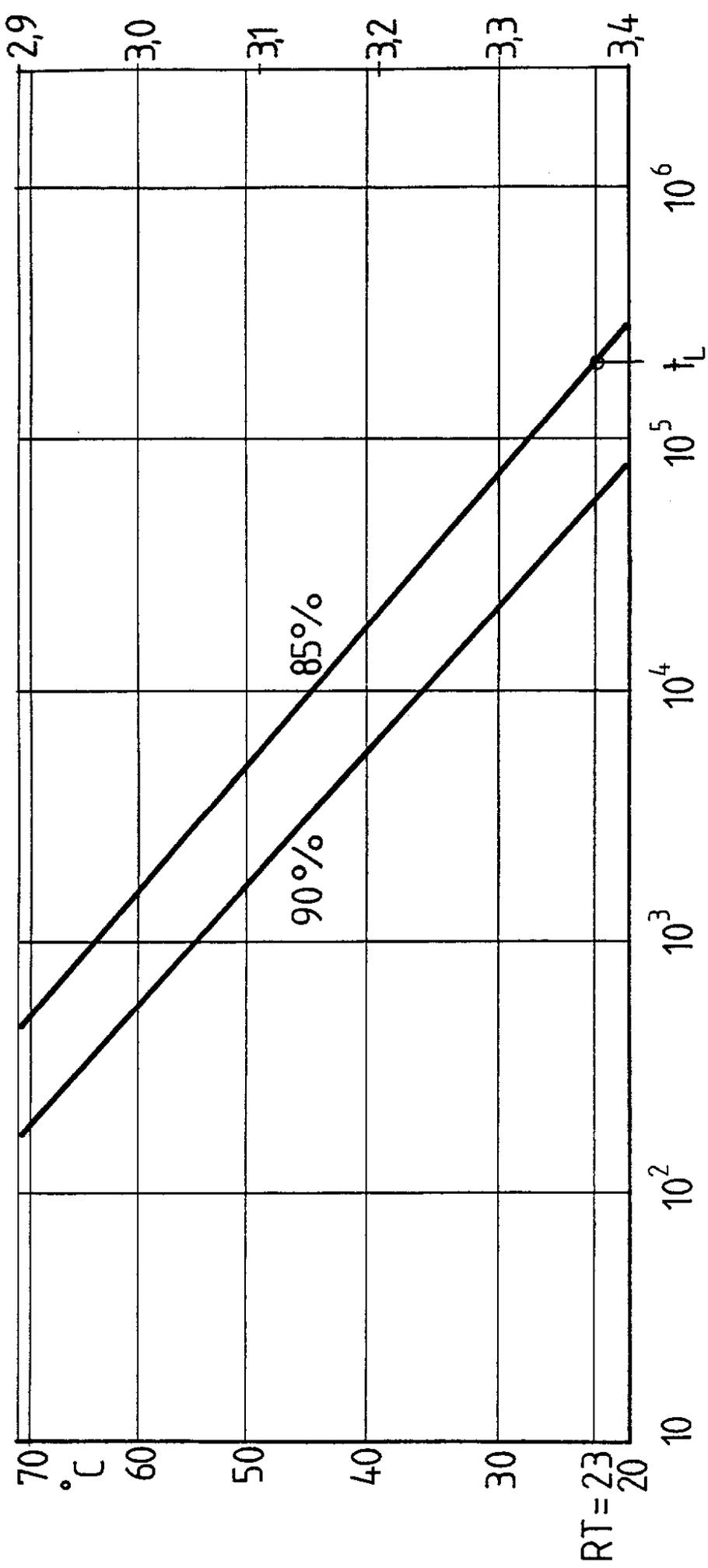
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 Bisphenol-A Harz / H₂O / Streudiagramm



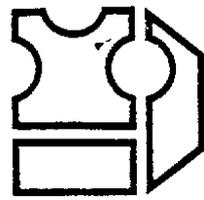
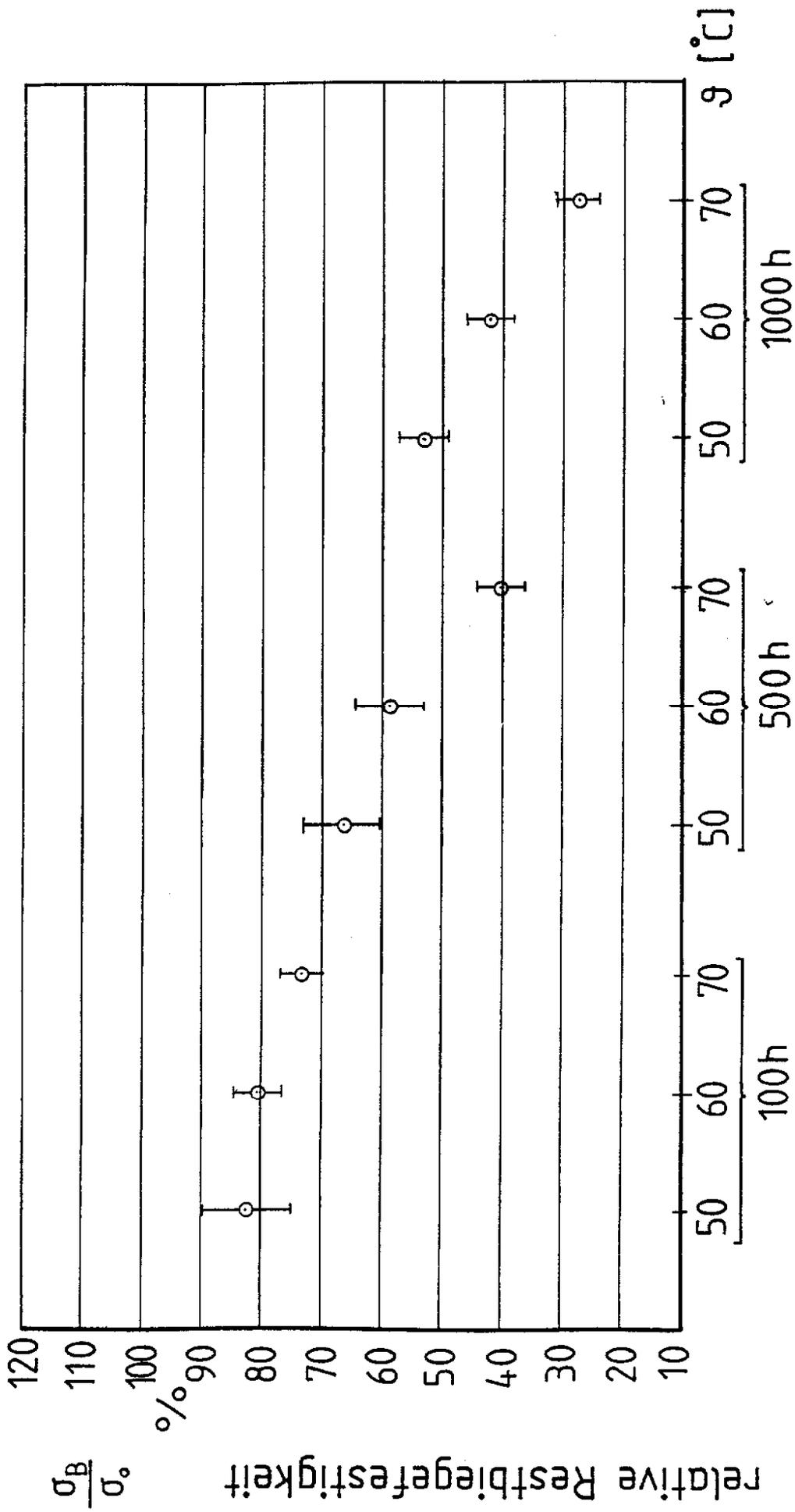
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen Bisphenol-A Harz / H₂O



Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 Bisphenol-A Harz / H₂O



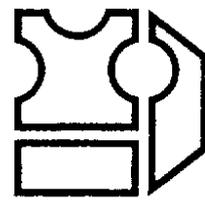
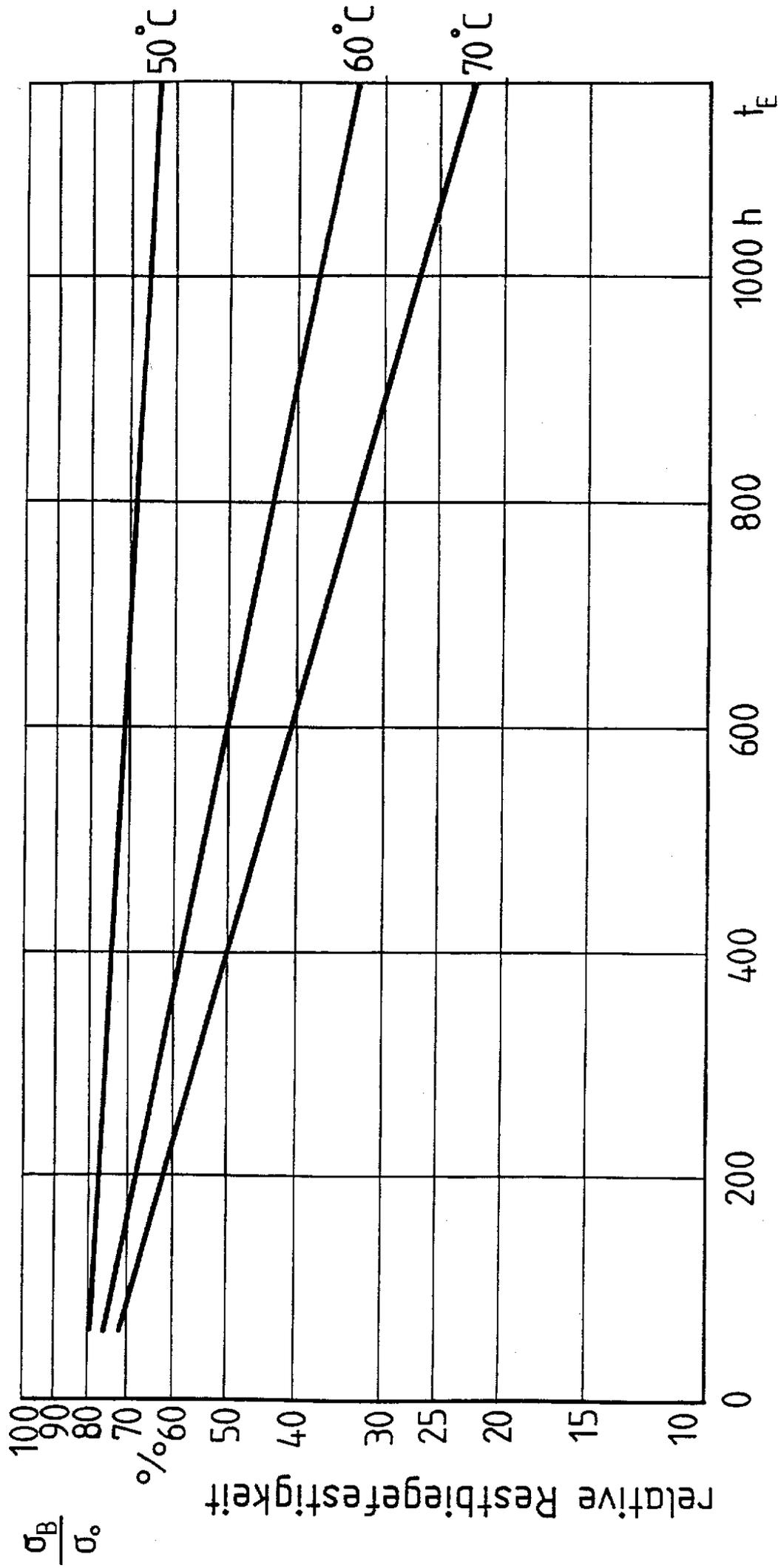
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 Bisphenol-A Harz / H₂O



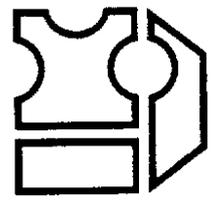
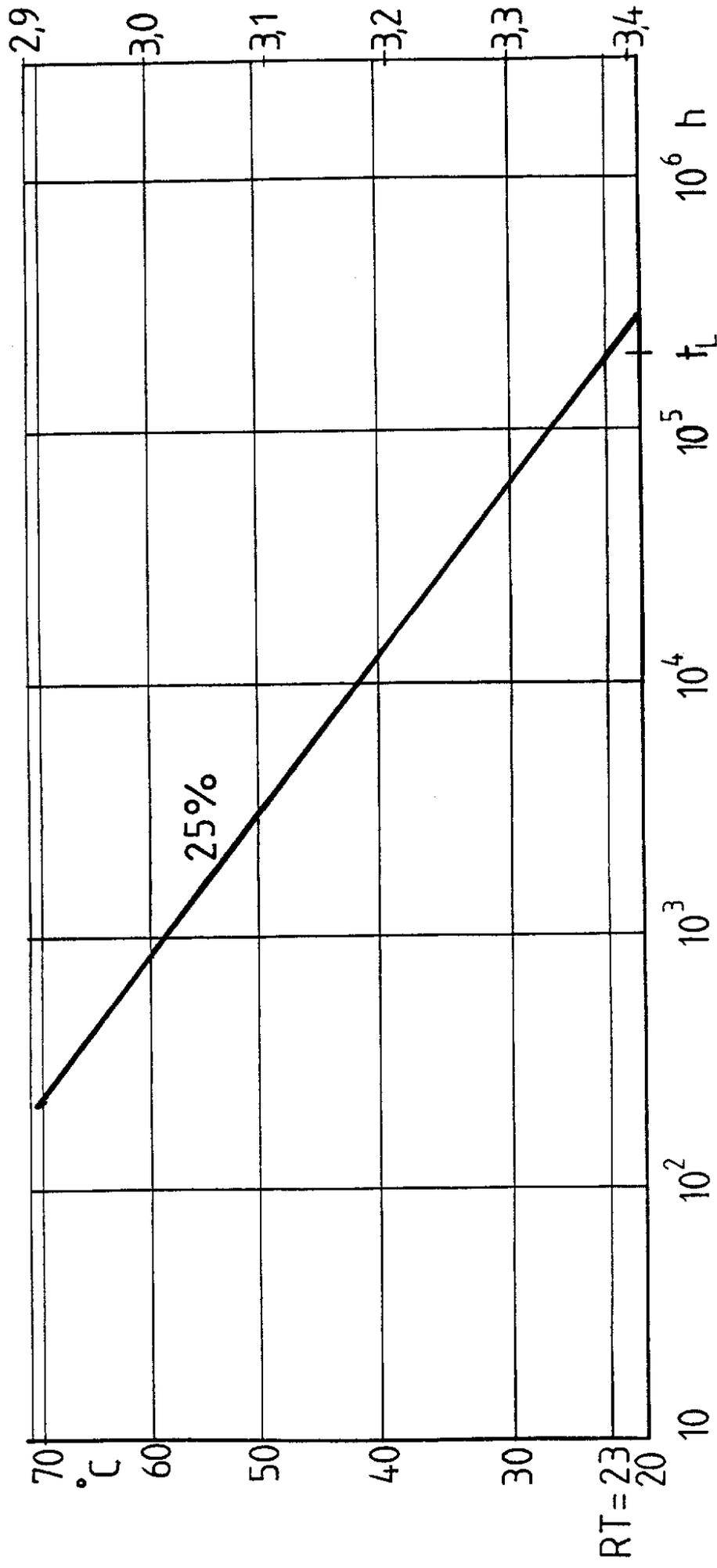
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen I

Bisphenol-A Harz / 10 % NaOH / Streudiagramm

Bild 30



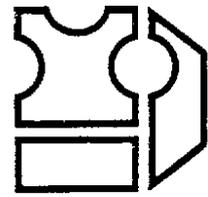
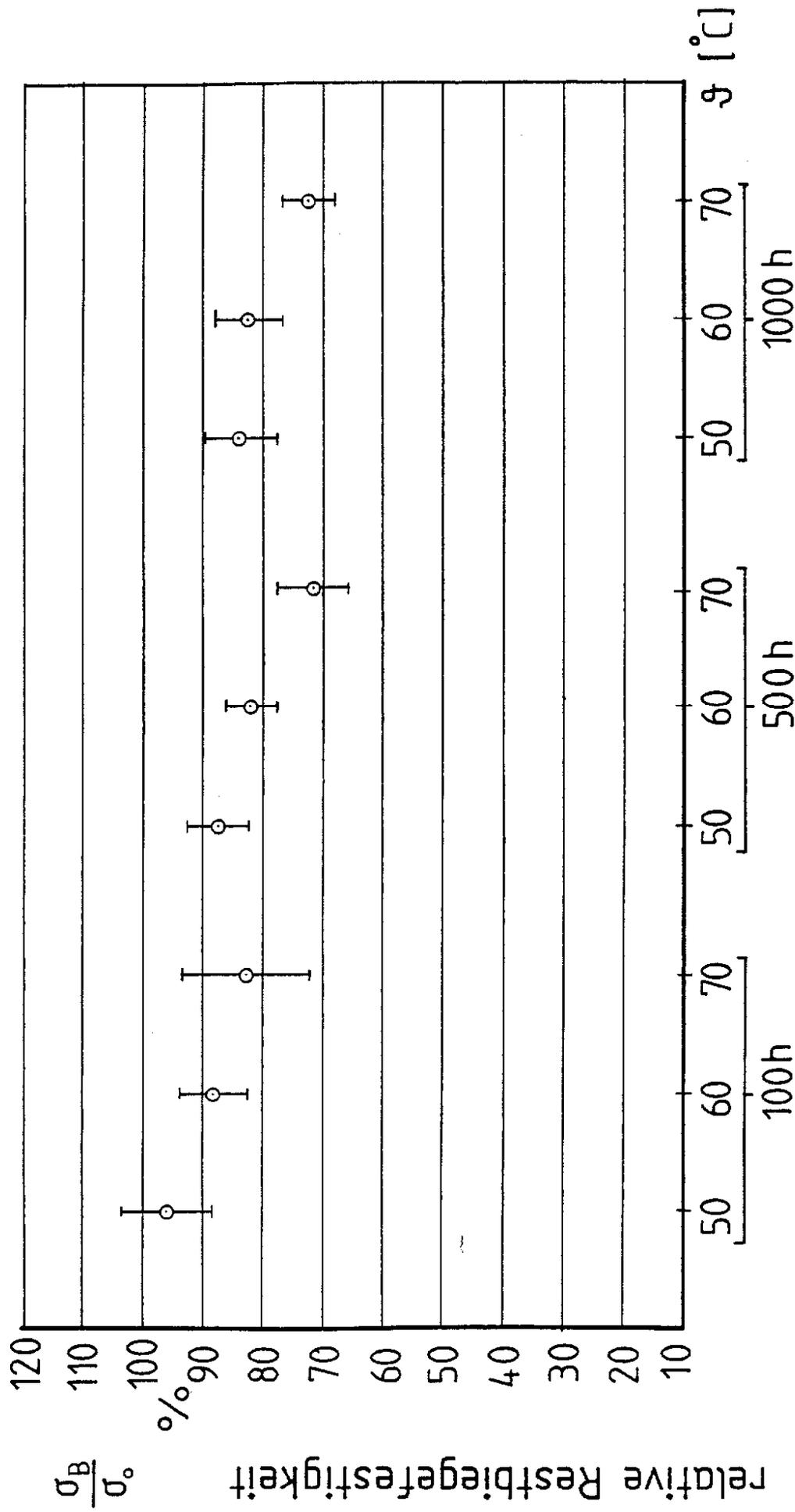
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 I
 Bisphenol-A Harz / 10 % NaOH



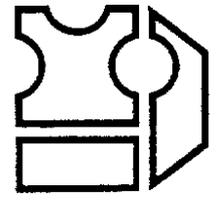
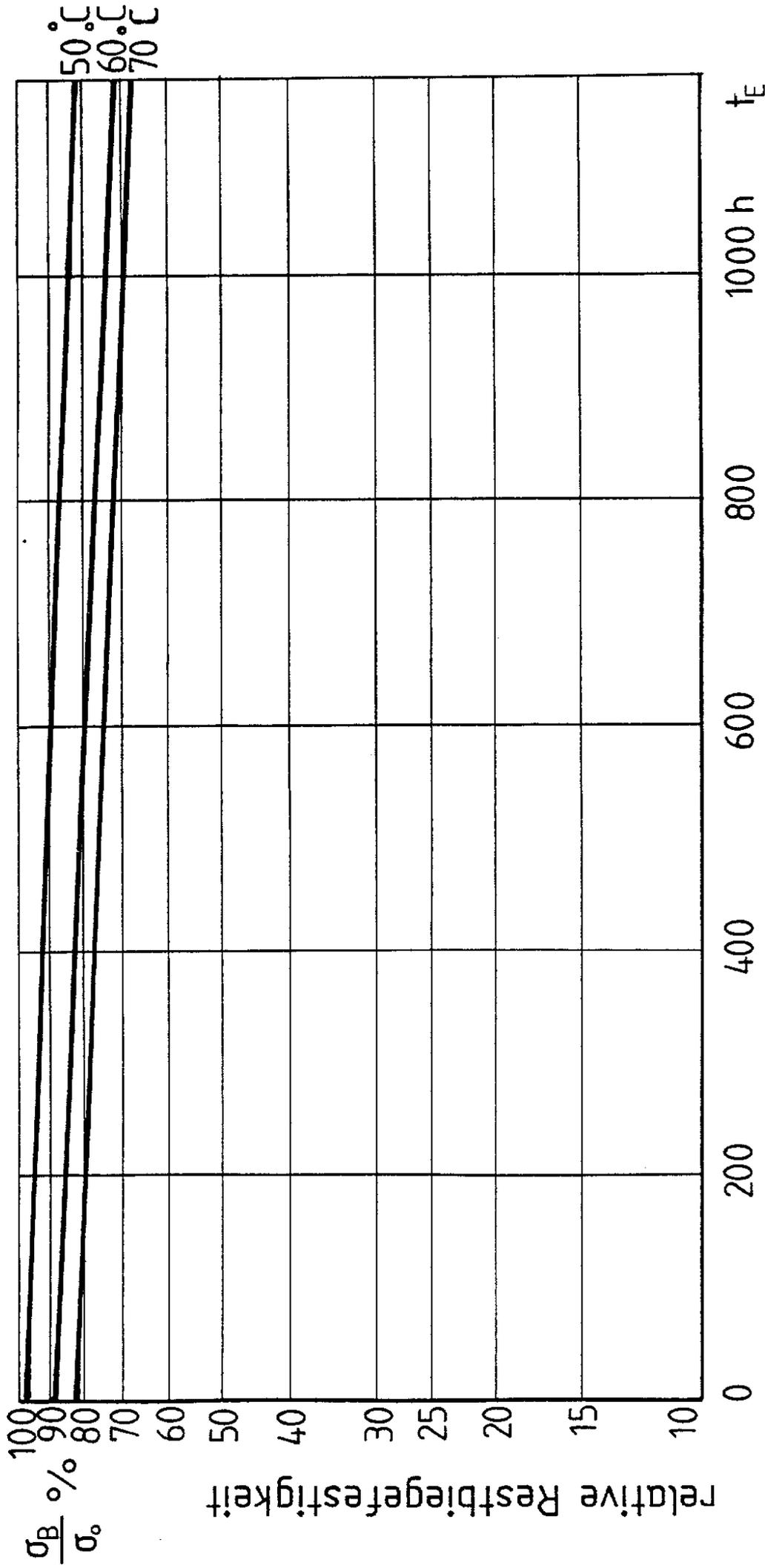
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 Bisphenol-A Harz / 10 % NaOH

I

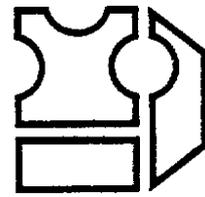
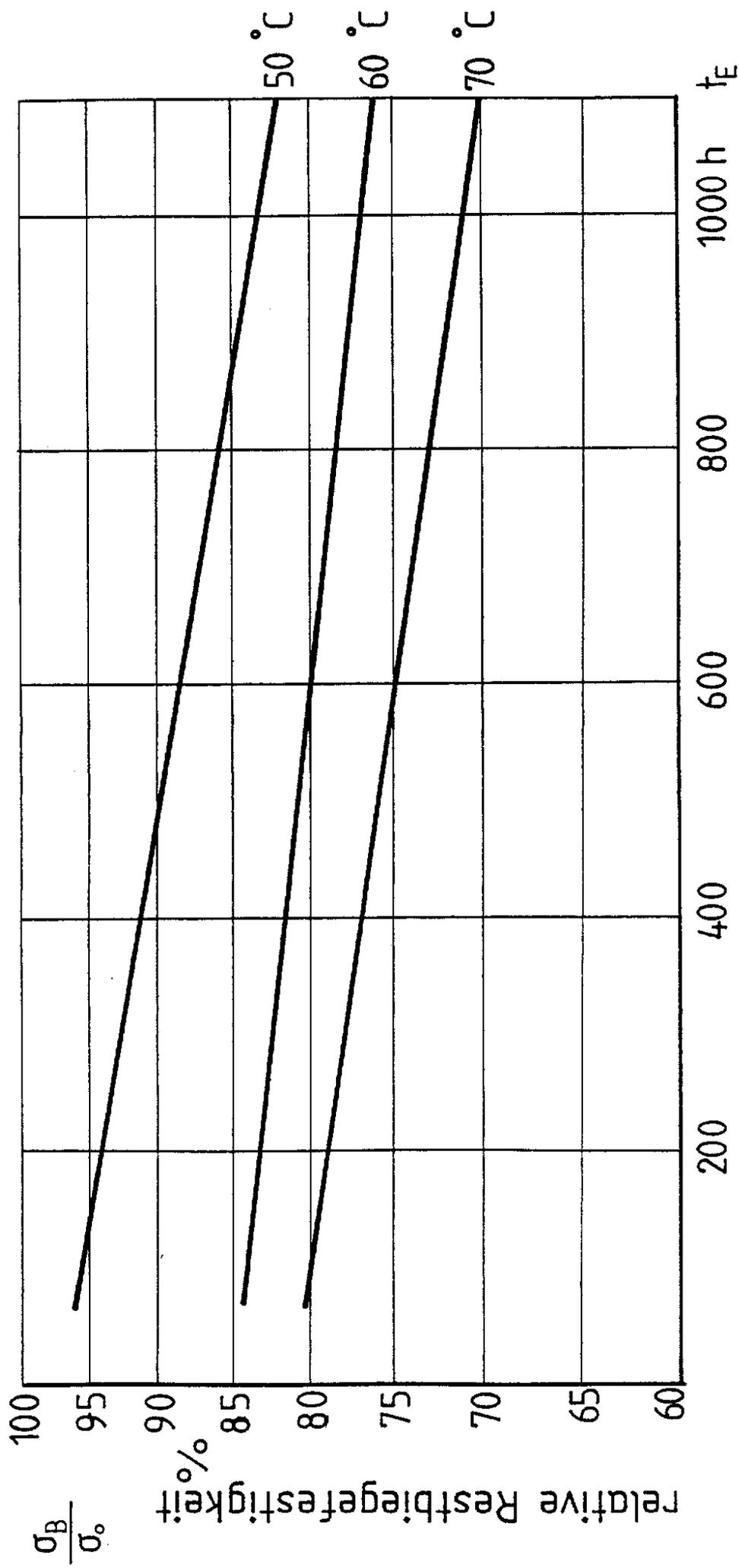
Bild 32



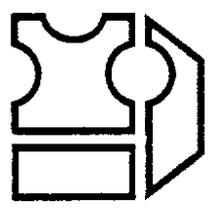
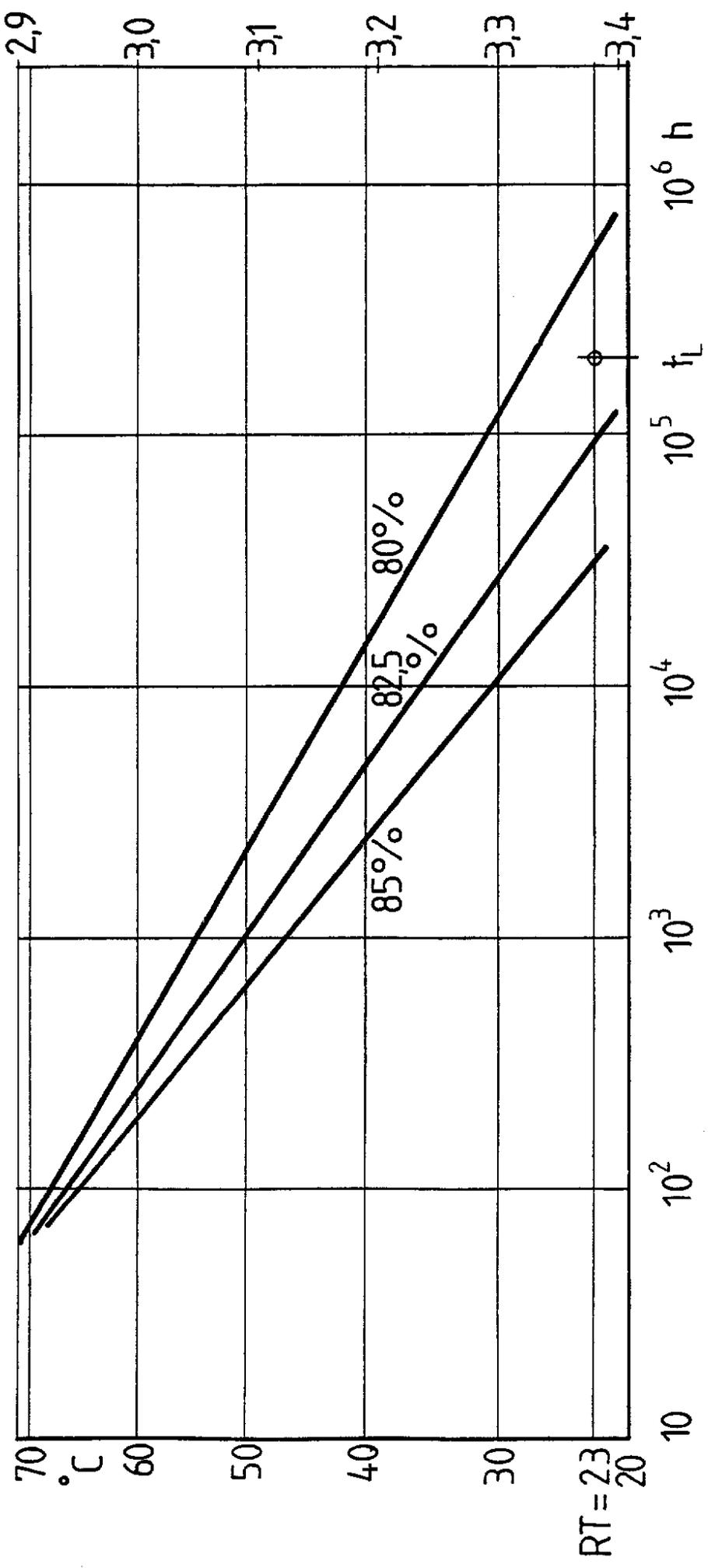
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 Bisphenol-A Harz / 50 % H_2SO_4 / Streudiagramm



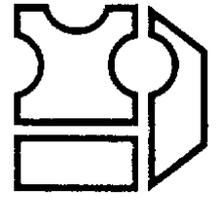
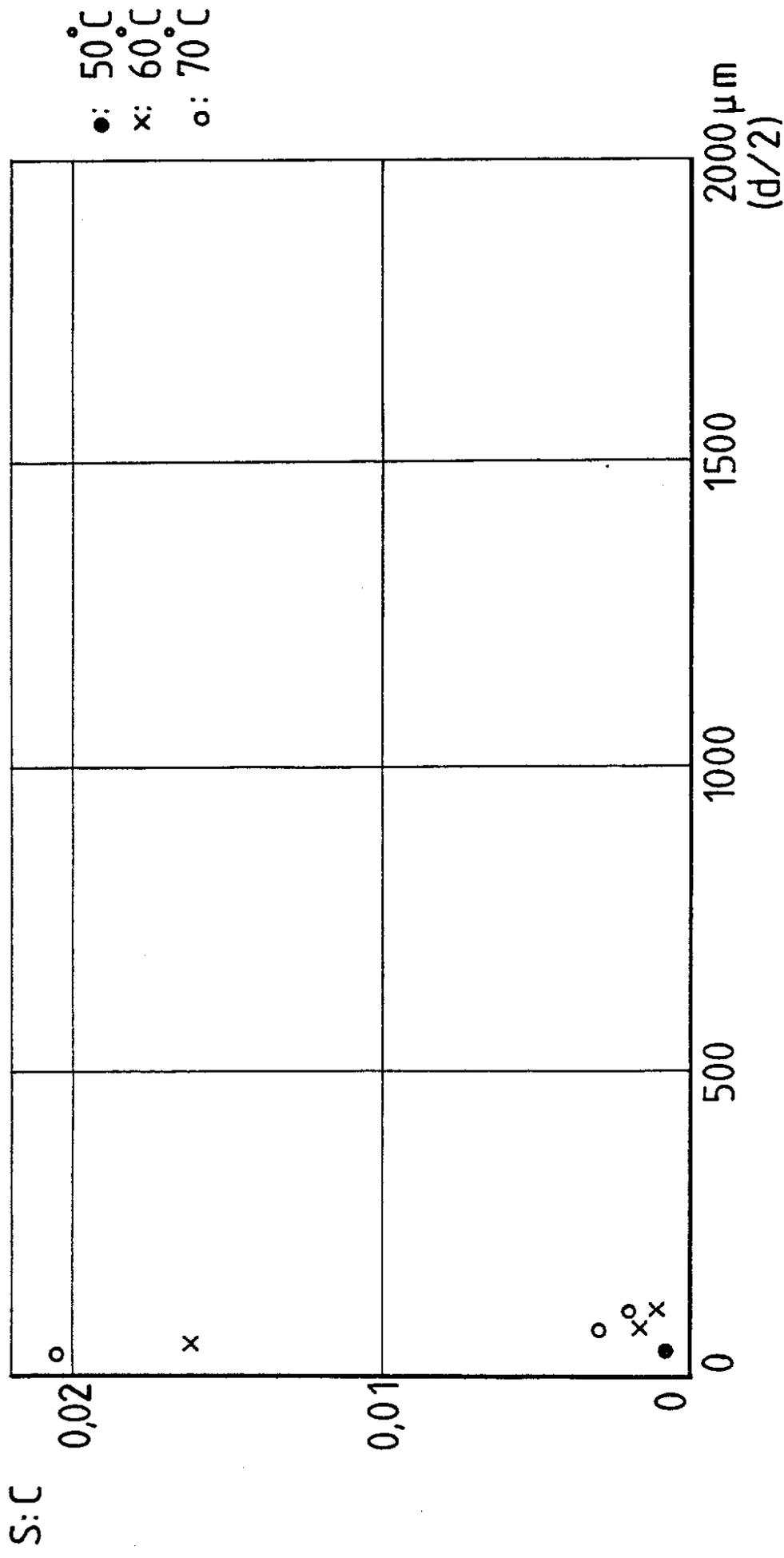
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 Bisphenol-A Harz / 50 % H_2SO_4



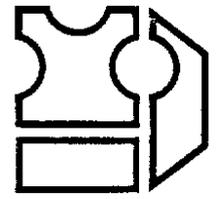
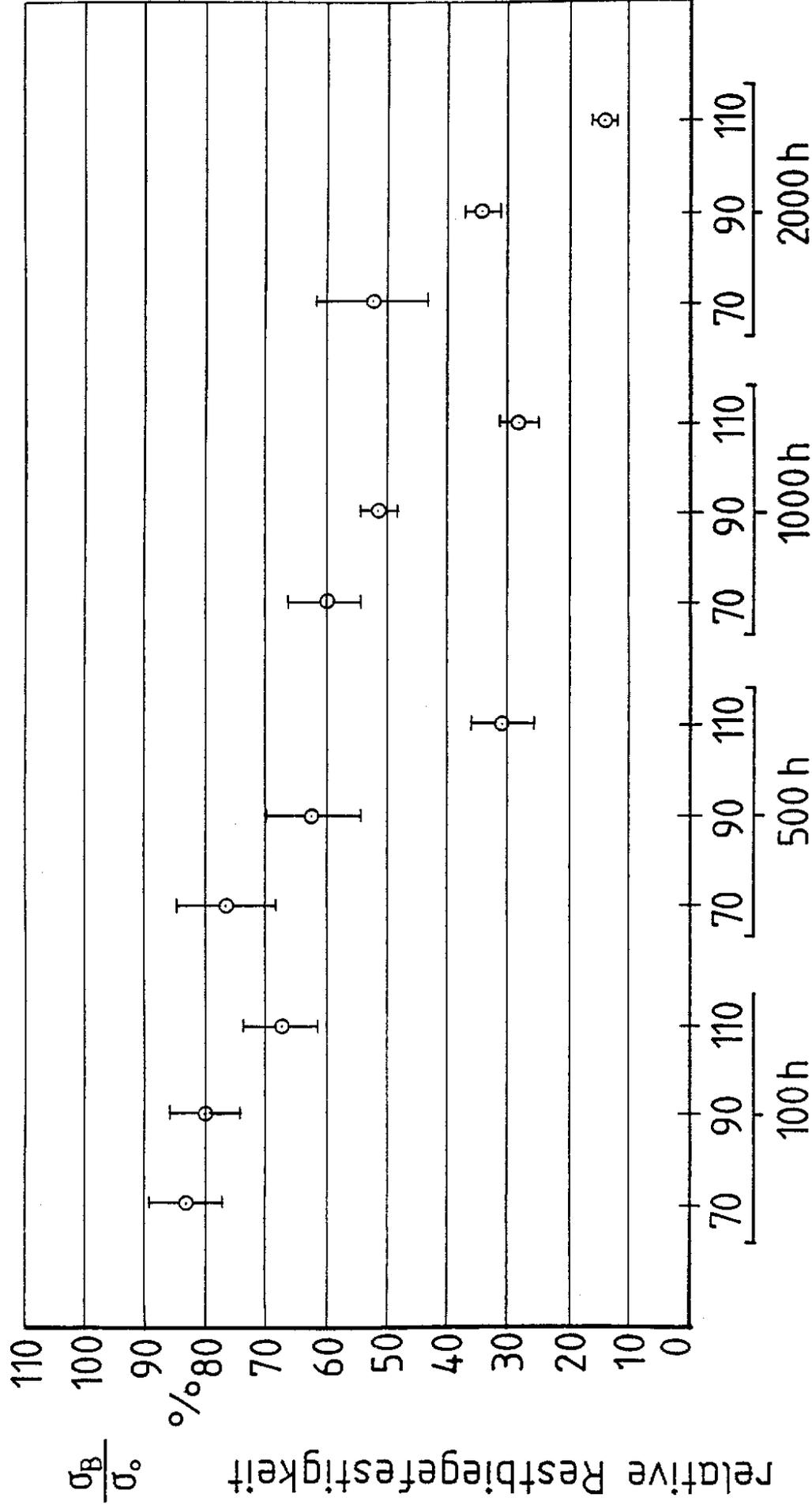
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 Bisphenol-A Harz / 50 % H_2SO_4



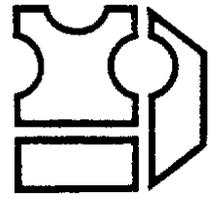
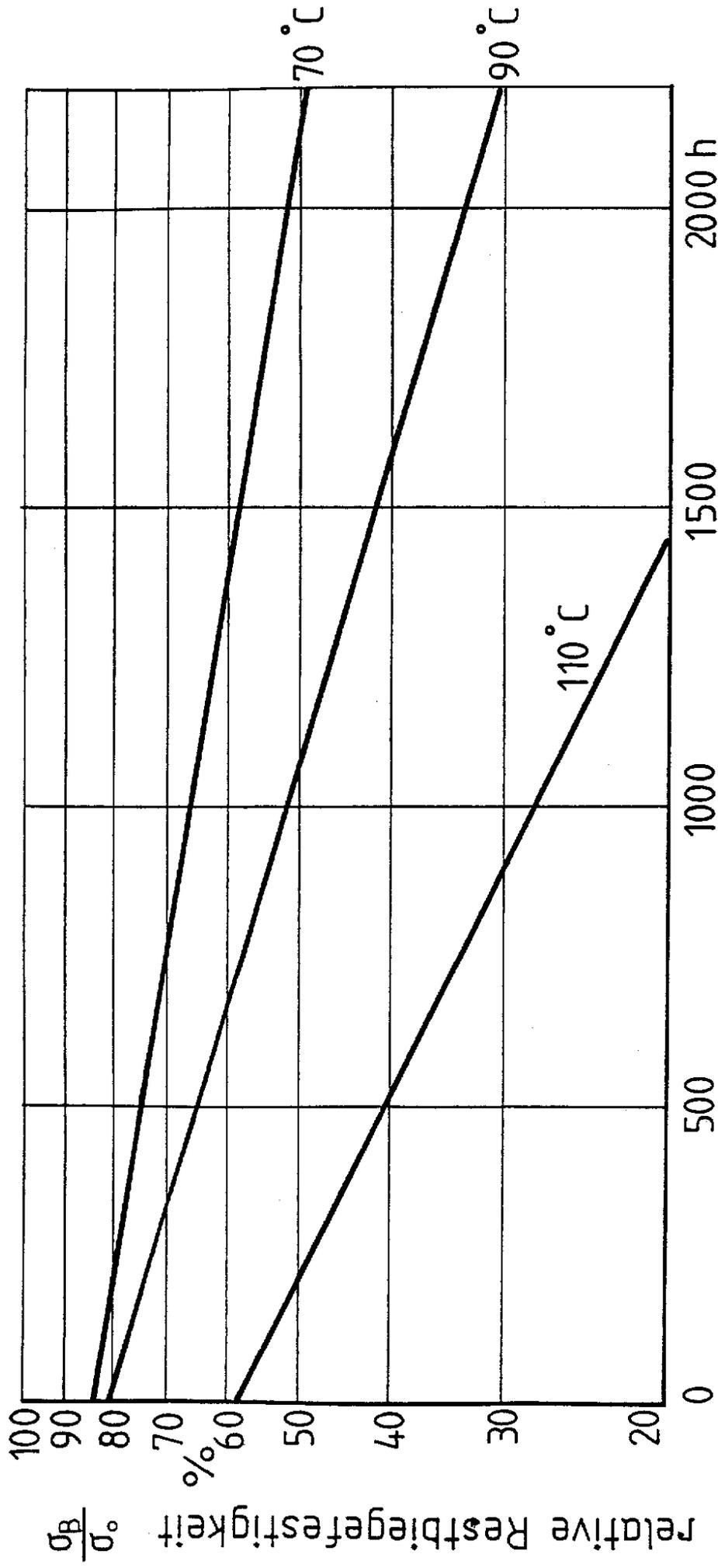
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen
 Bisphenol-A Harz / 50 % H₂SO₄



ESCA-Analyse der ZRV-Methode
 Bisphenol-A Harz / 500h / 50 % H₂SO₄

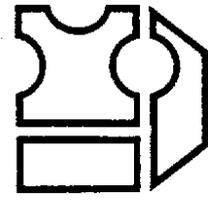
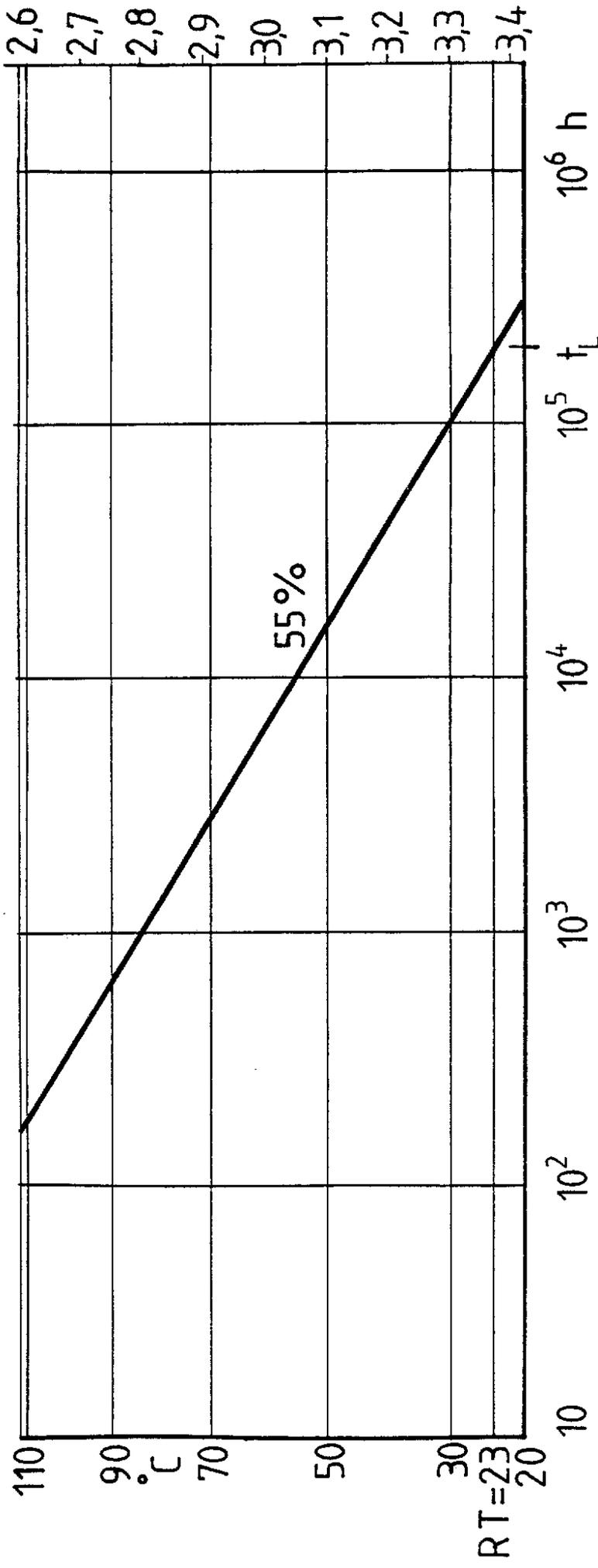


Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen II
 Bisphenol-A Harz / 10 % NaOH / Streudiagramm Bild 39



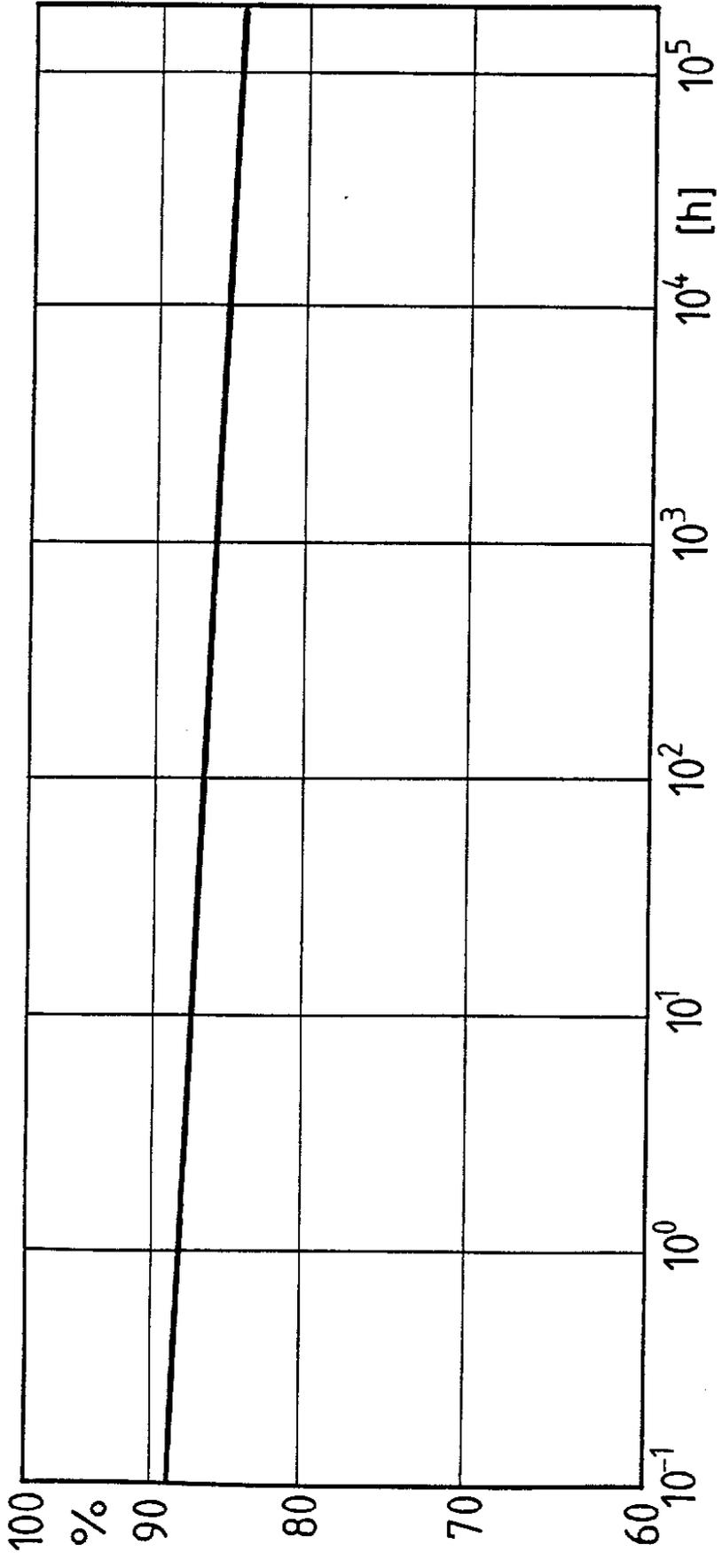
Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen II

Bisphenol-A Harz / 10 % NaOH

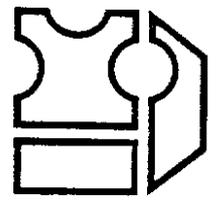


Zeitreduzierte Versuche bei erhöhten Temperaturen II
 Bisphenol-A Harz / 10 % NaOH

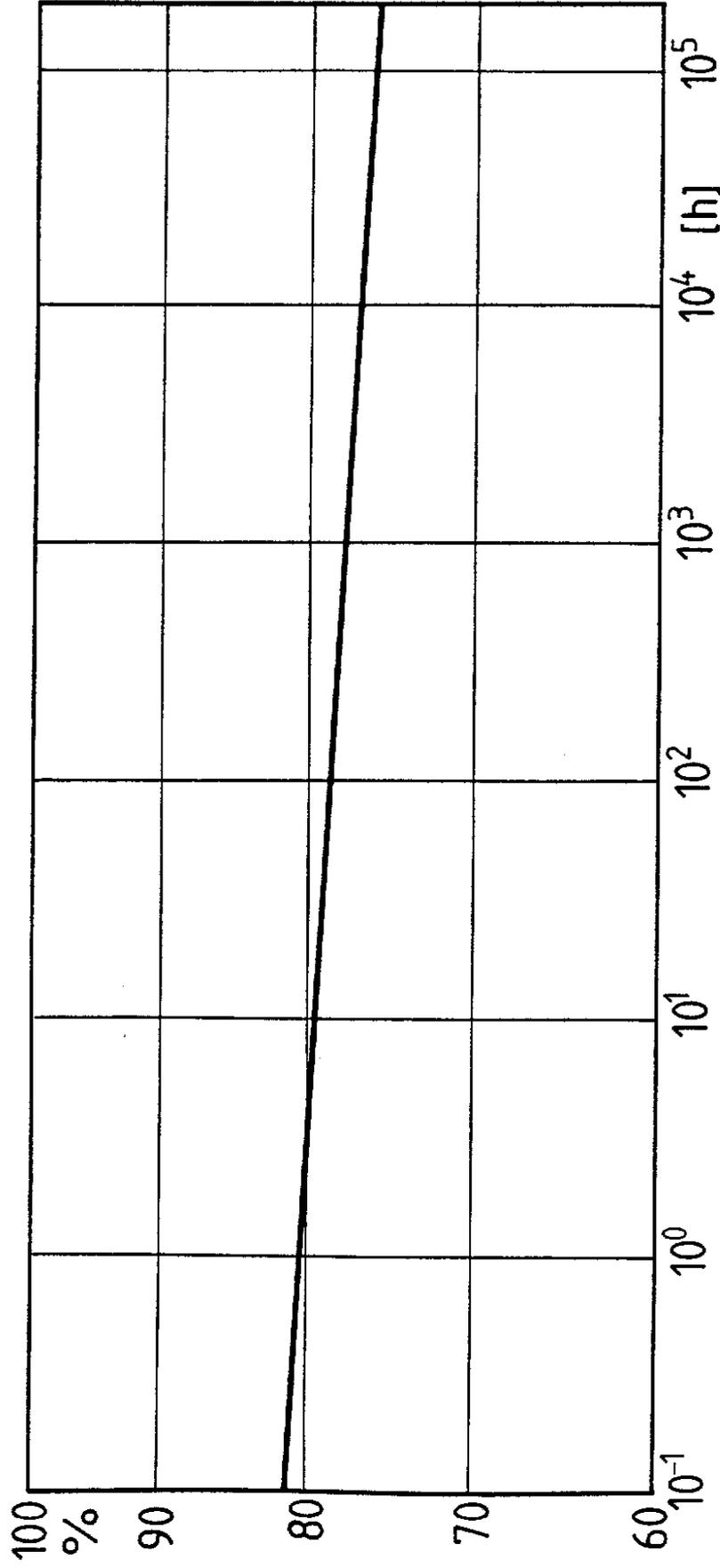
Bild 41



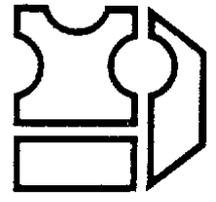
relative Restbiegefestigkeit



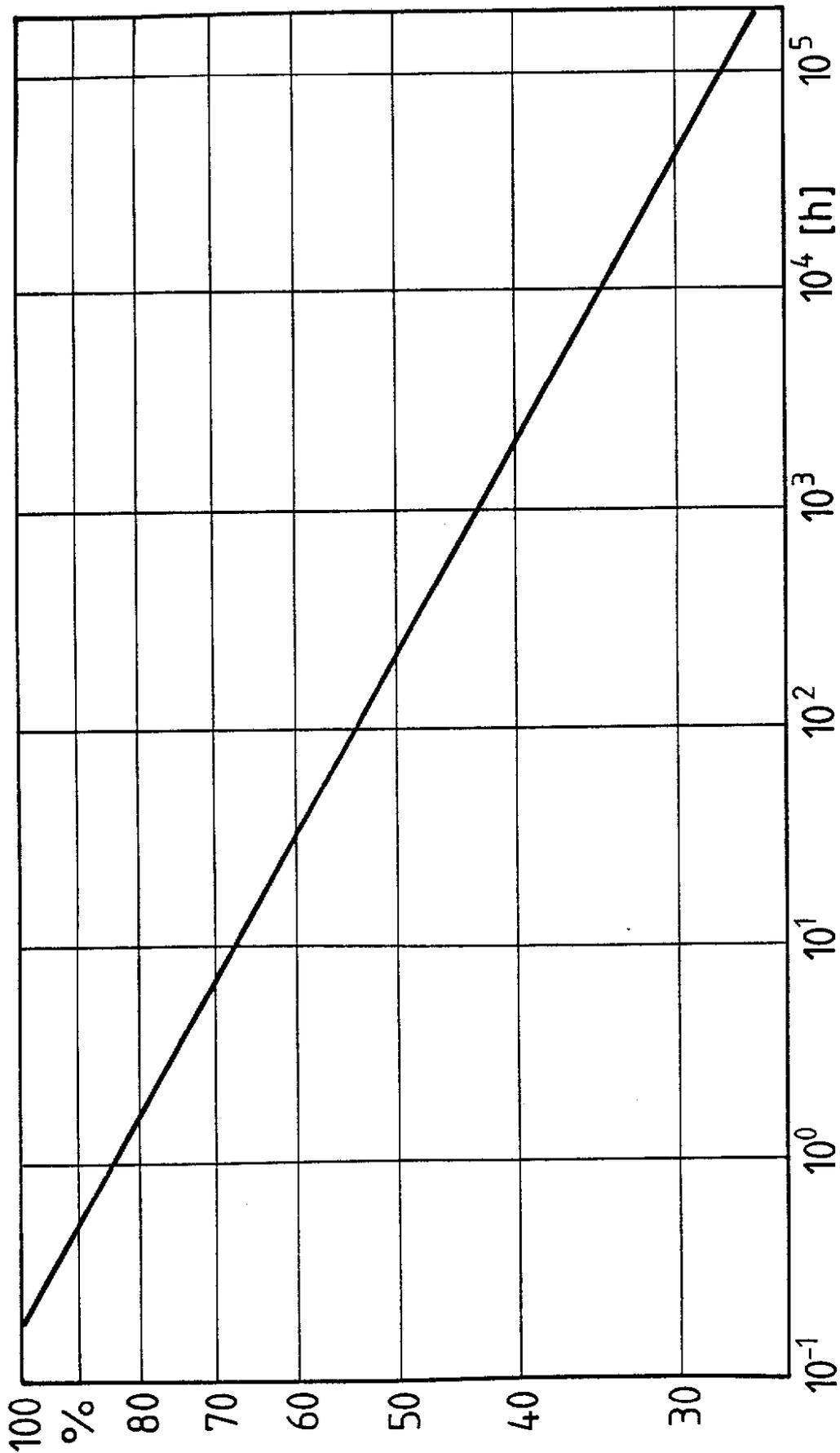
Zeitstandbruchversuche / Luft
Bisphenol-A Harz



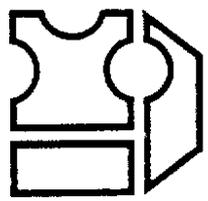
relative Restbiegefestigkeit



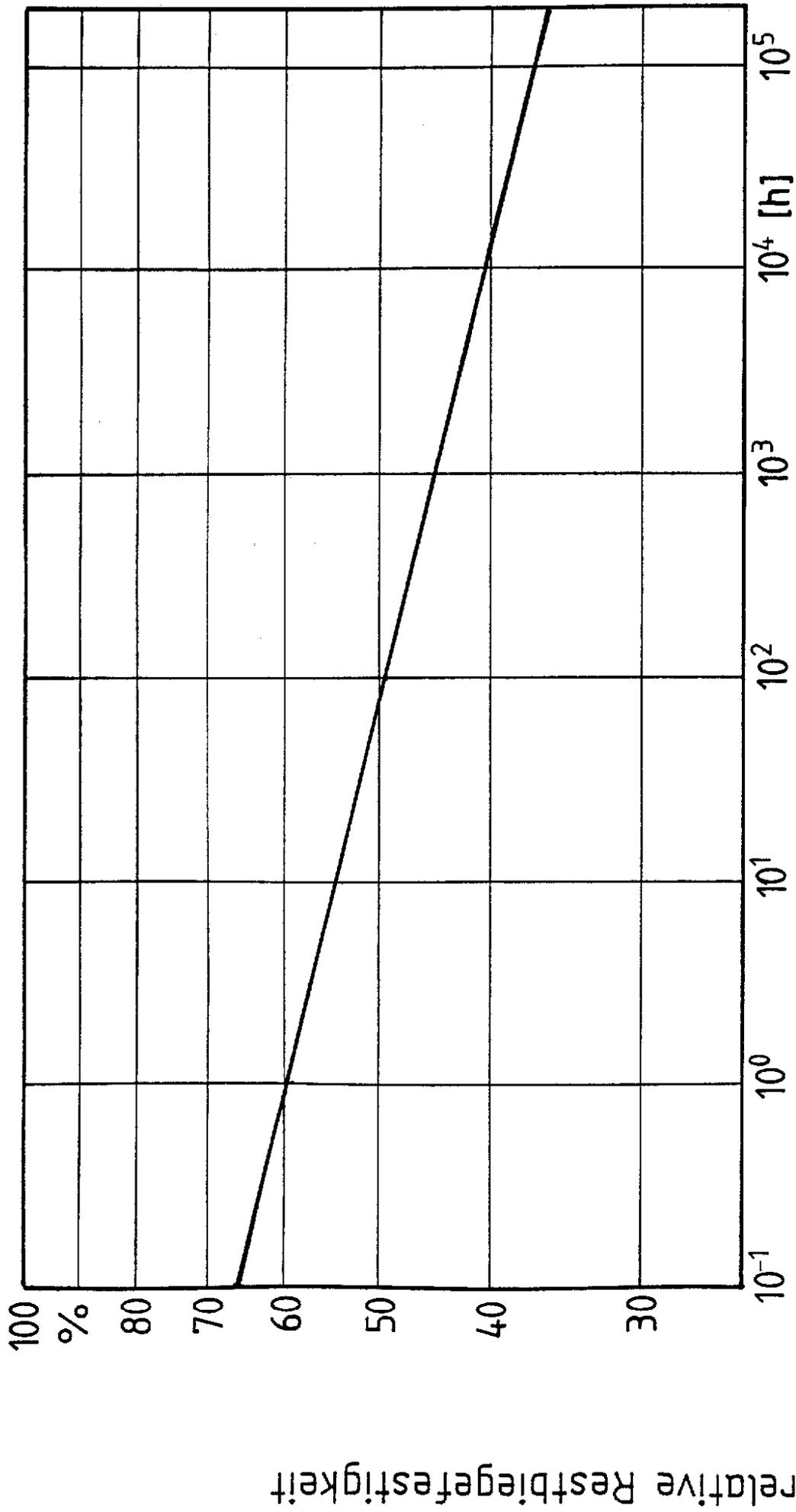
Zeitstandbruchversuche / H₂O
 Bisphenol-A Harz



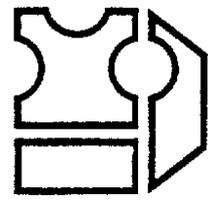
relative Restbiegefestigkeit



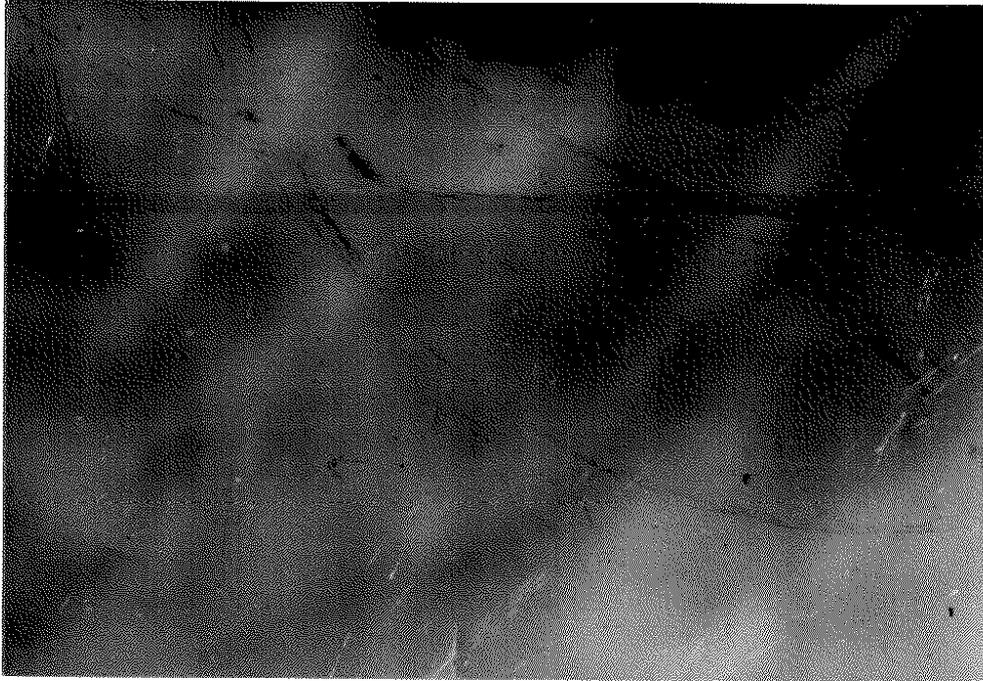
Zeitstandbruchversuche / 10 % NaOH
Bisphenol-A Harz



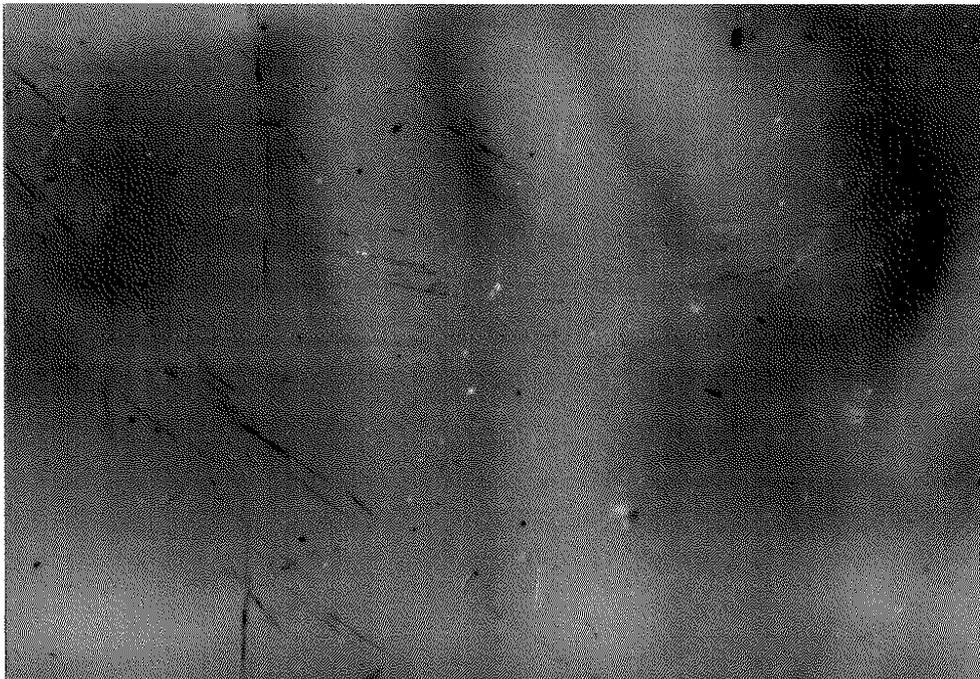
relative Restbiegefestigkeit



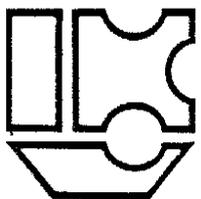
Zeitstandbruchversuche / 50 % H₂SO₄
 Bisphenol-A Harz



10-fach



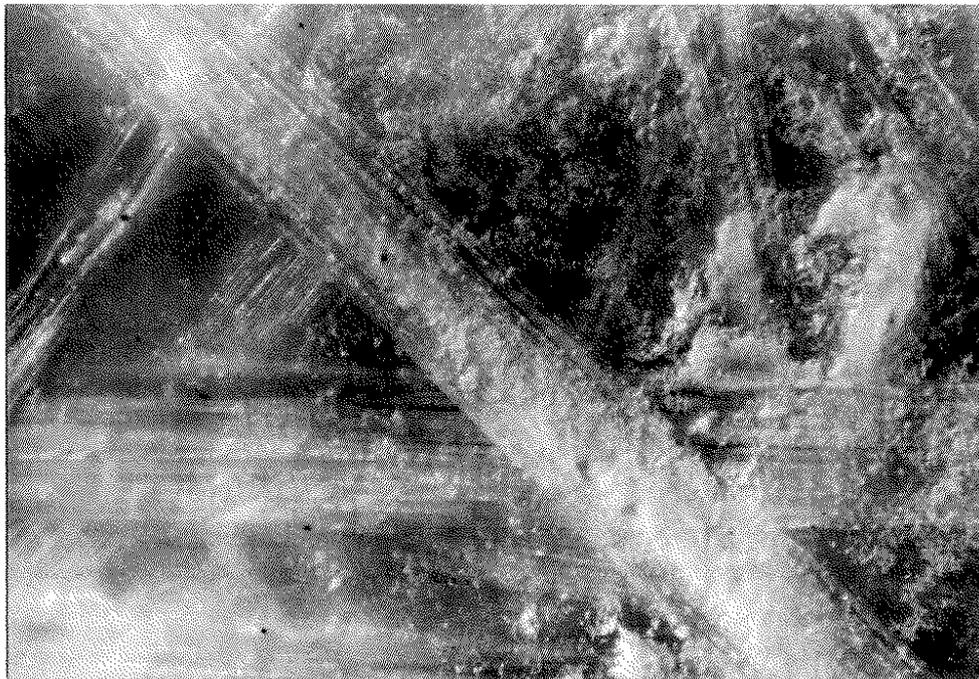
32-fach



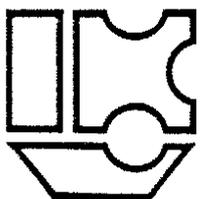
Bisphenol-A Harz / Laminat
nicht eingelagert



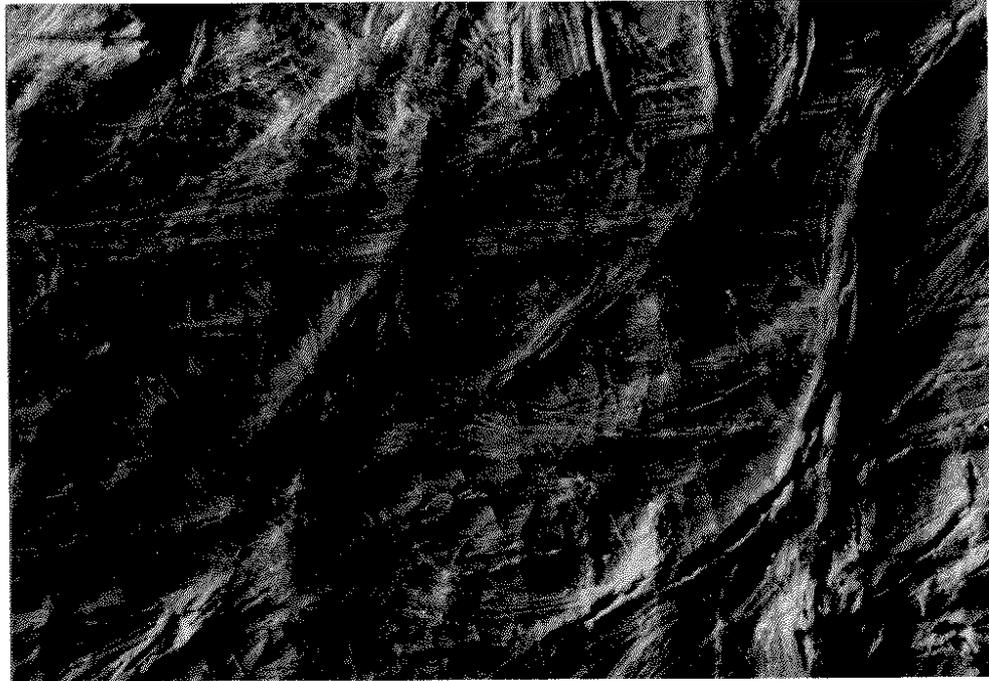
10-fach



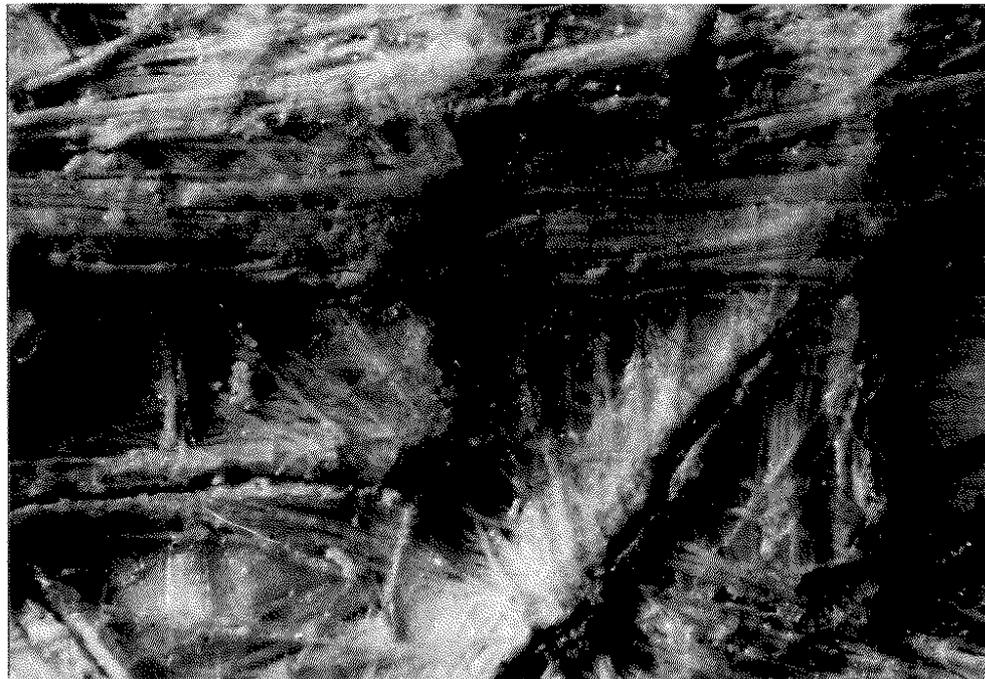
32-fach



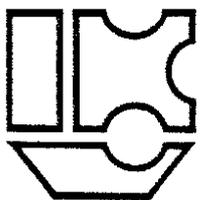
Bisphenol-A Harz / Laminat
70 C / 500h, 10 % NaOH



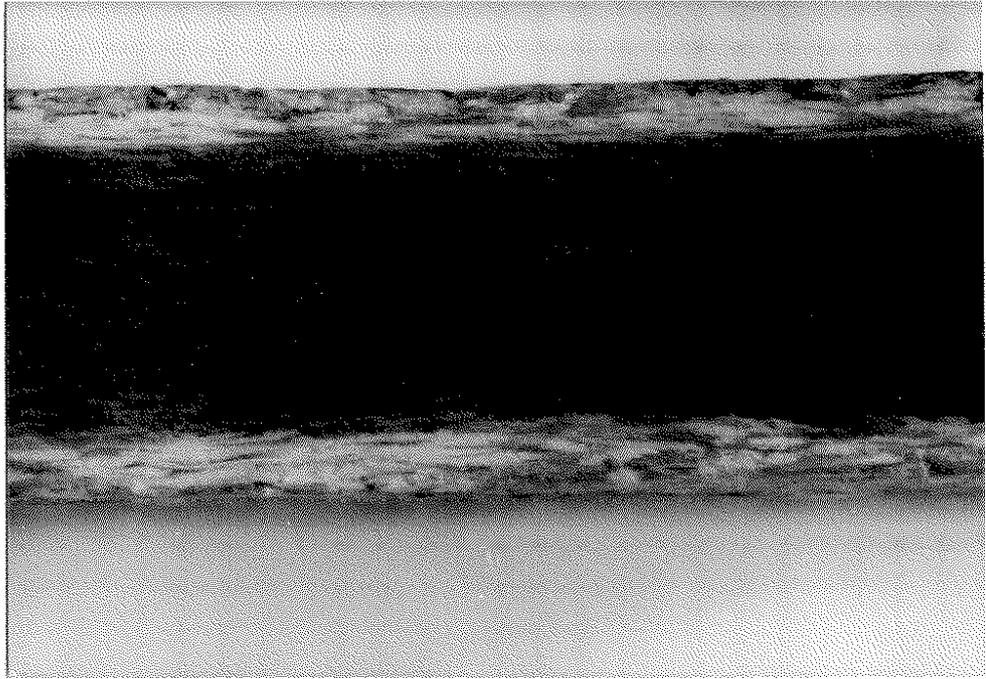
10-fach



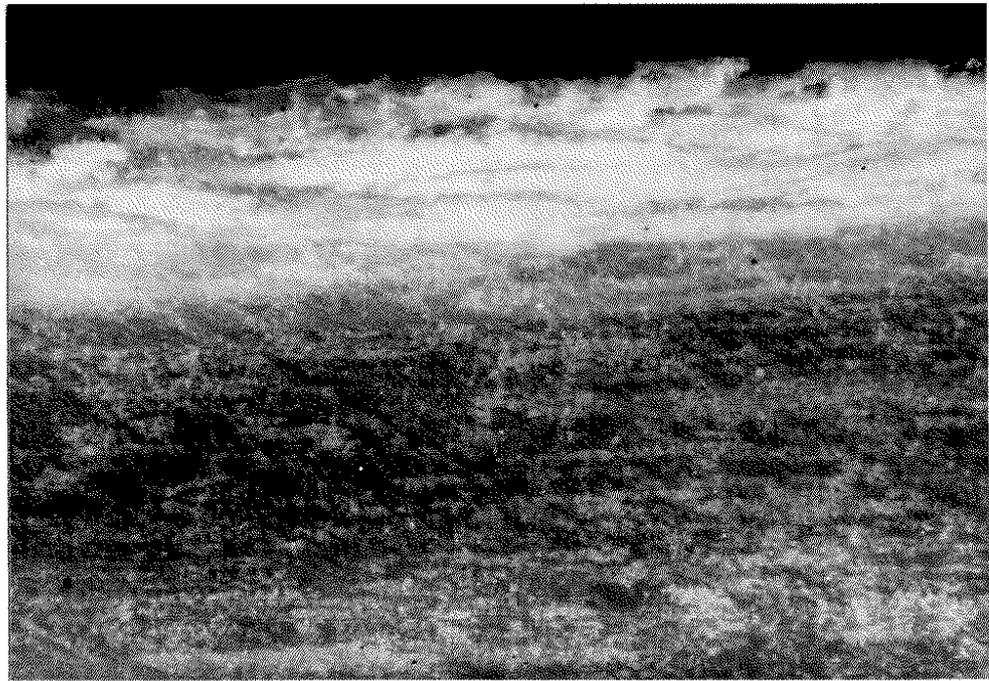
32-fach



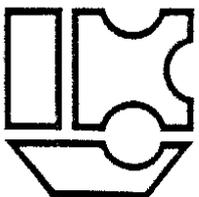
Bisphenol-A Harz / Laminat
110 C / 2000h, 10 % NaOH



10-fach

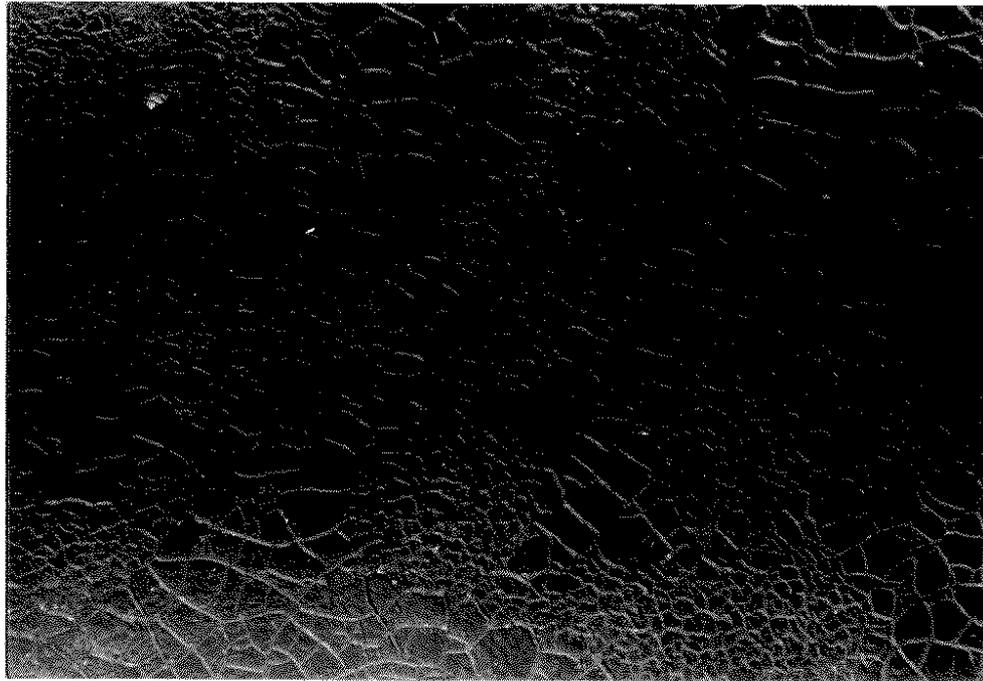


32-fach

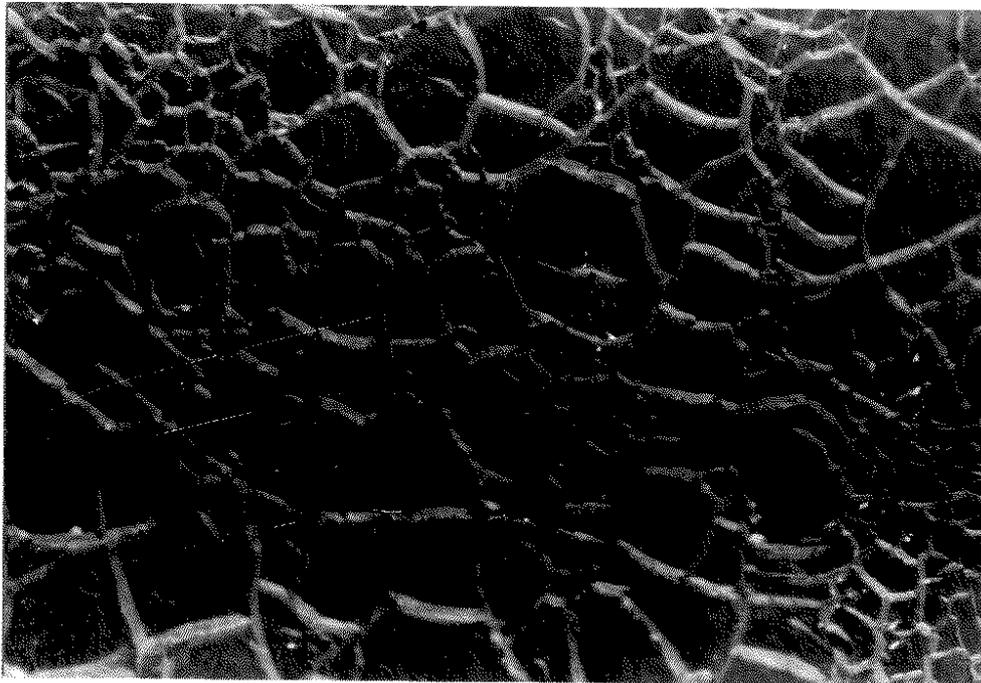


Bisphenol-A Harz / Laminat
110 C / 2000h, 10 % NaOH

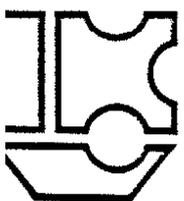
Bild 49



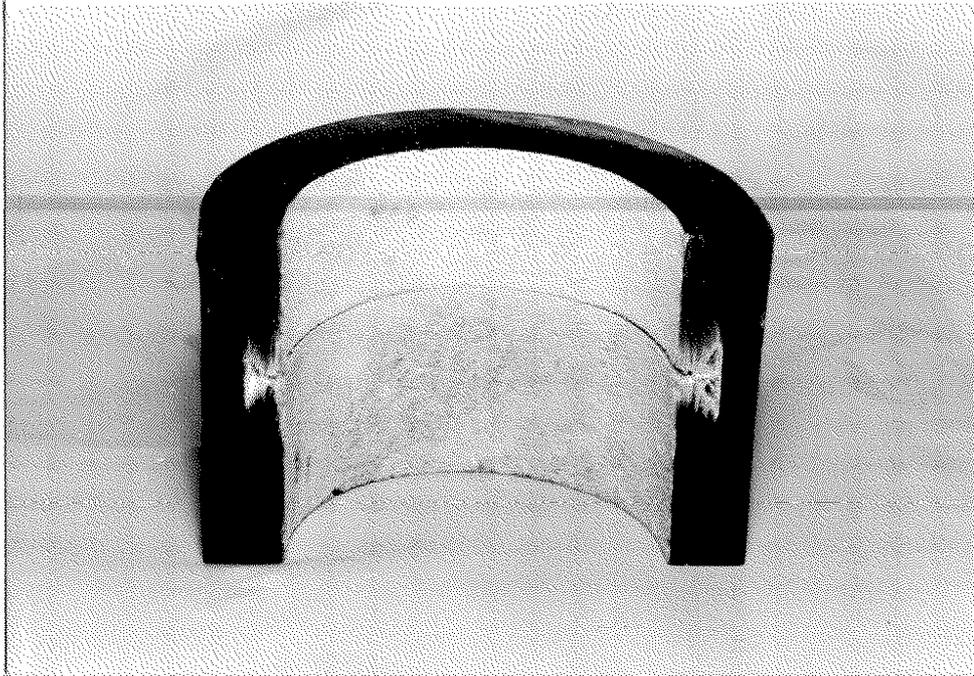
10-fach



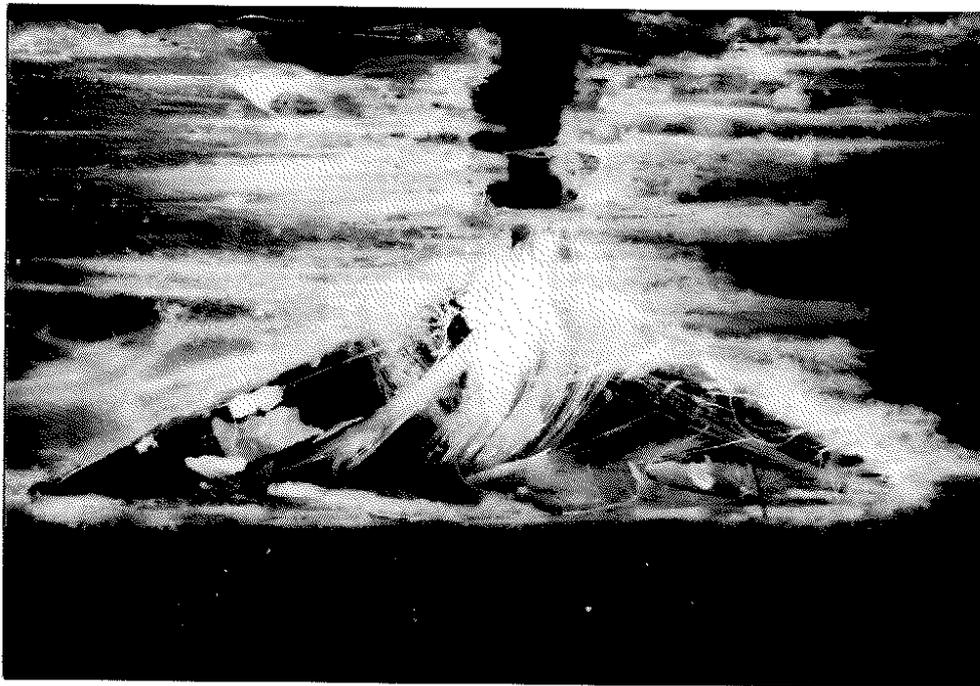
32-fach



Bisphenol-A Harz / Reinharz
110 C / 2000h, 10 % NaOH

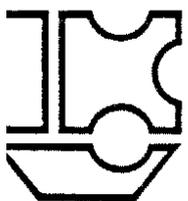


Gesamtansicht

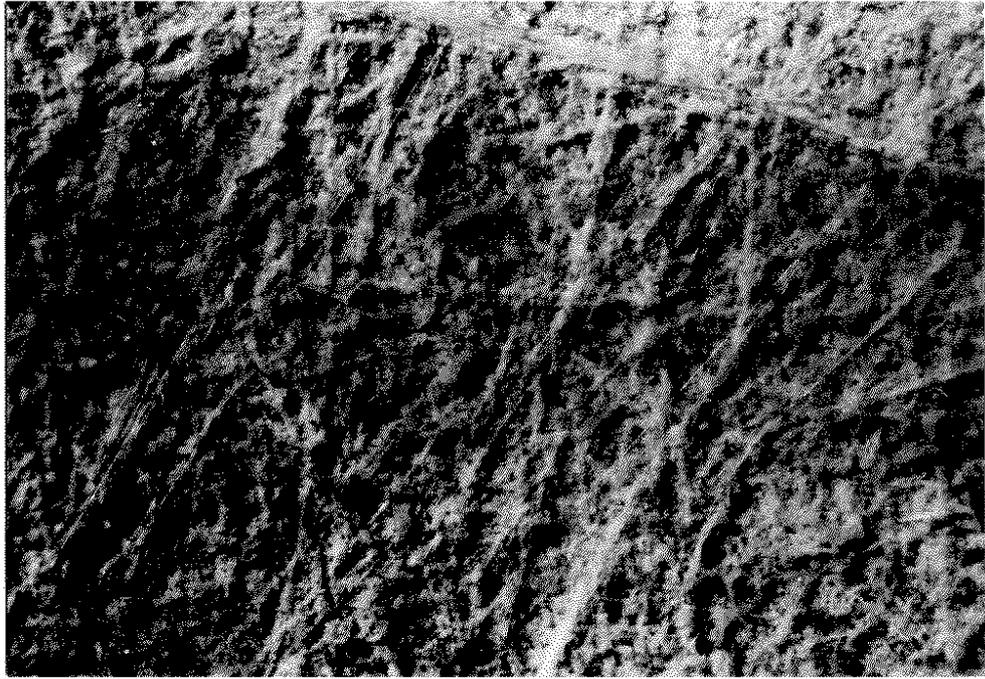


Totwassergebiet

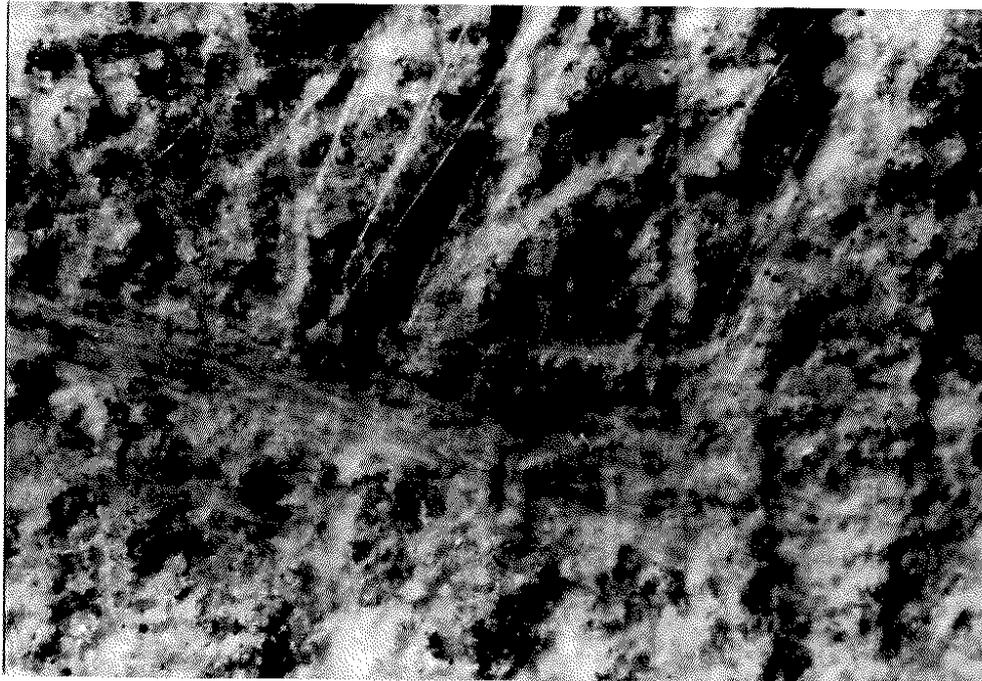
9-fach



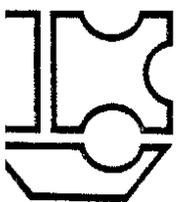
„Altes“ Bauteil



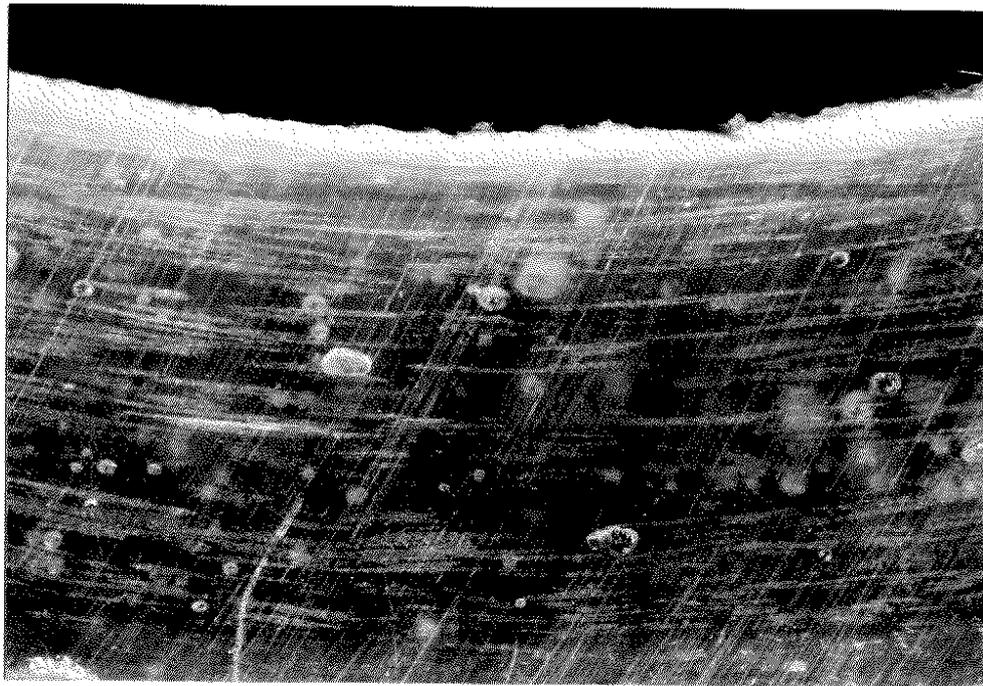
10-fach



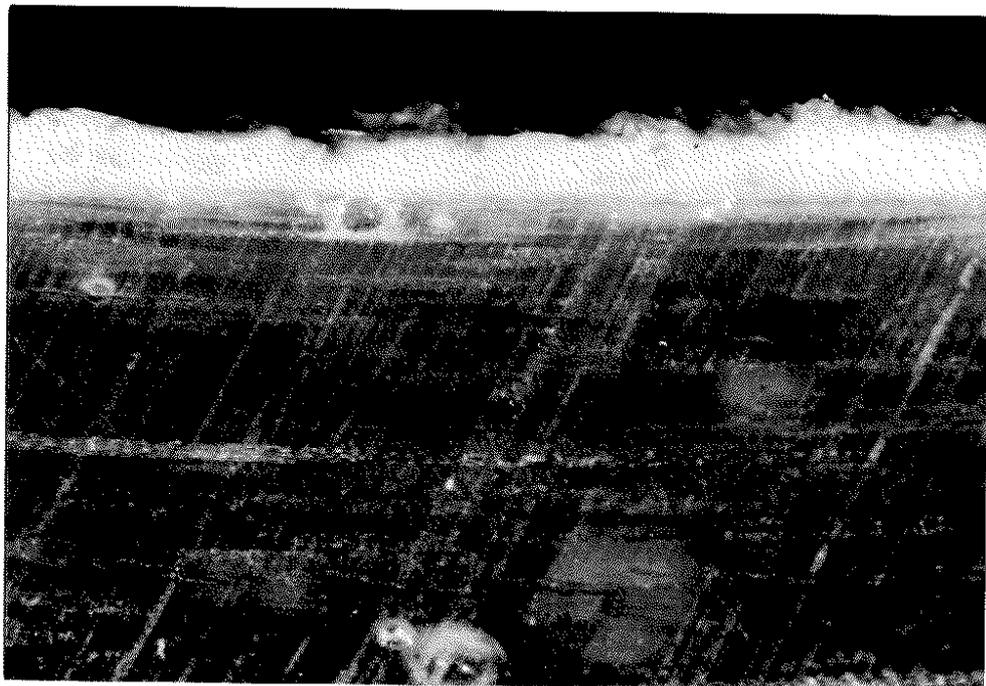
32-fach



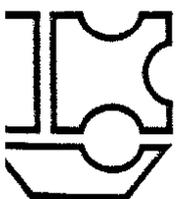
“Altes” Bauteil
Innenseite



10-fach



32-fach



"Altes" Bauteil
Querschnitt