

# Einfluss des Kriechens auf die Stabilität längsgedrückter GFK-Zylinderschalen

**T 1291**

T 1291

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Einfluß des Kriechens auf die Stabilität längsgedrückter  
GFK-Zylinderschalen  
Gesch.Z.: Nr. 1-5-99/75

### 1. Einleitung

Zylindrische Schalen aus faserverstärkten Kunststoffen finden in der praktischen Anwendung einen immer größer werdenden Einsatz. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Werkstoffen ist bei diesen Werkstoffen das Verhältnis von  $E/\epsilon_{\text{Bruch}}$  recht klein. Dadurch wird das Stabilitätsverhalten für die Dimensionierung maßgebend. Hinzu kommt noch, daß die Kunststoffe ein zeitabhängiges Verhalten zeigen, welches von der Belastungsart und -dauer abhängig ist. Dieser Einfluß des "Kriechens" auf das Bruchverhalten ist schon vielfältig theoretisch und wenig experimentell untersucht worden. Der Einfluß des Kriechens auf das Stabilitätsverhalten von Zylinderschalen ist theoretisch von Gienke /1,2,3/ für längsgedrückte Zylinderschalen untersucht worden. Experimentelle Untersuchungen über langzeitige Belastungen von Zylinderschalen mit äußerem Überdruck sind in /4/ durchgeführt worden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, das Verhalten von Zylinderschalen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) unter planmäßigem Längsdruck <sup>und</sup> Querkraftbiegung zu untersuchen. Diese Untersuchungen wurden im Kurz- und Langzeitversuch an Schalen mit definierten Vorbeulen durchgeführt. Parallel dazu sind Kurzzeitversuche an Schalen "ohne Vorbeulen" und mit Ausschnitten gefahren worden, damit vergleichende Aussagen möglich sind.

Frühere Versuche und Rechnungen für kurzzeitbelastete Zylinderschalen zeigen, daß die ertragbare Kurzzeitbeullast nicht nur von der Genauigkeit der Schalenherstellung abhängig ist, sondern auch vom Laminataufbau. Entscheidender Einfluß bei den verschiedenen möglichen Laminaten ist die sog. "innere" Bauungenaugigkeit des Laminats. So haben z.B. reine Wickellamine aufgrund der praktisch gleichmäßigen Rovingvorspannung eine geringe innere Bauungenaugigkeit. Dagegen

sind Lamine mit  $0^\circ/90^\circ$  Verstärkungen mit einer relativ großen inneren Bauungenaugigkeit belegt, da die Fäden in Achsrichtung ( $0^\circ$ ) nicht vorgespannt sind und somit nicht "gerade" im Laminat liegen. Diese innere Ungenauigkeit macht sich im Kriechversuch deutlich durch einen großen Kriechbeiwert für die axiale Richtung bemerkbar.

Bei der Auswahl der Lamine für die vorgesehenen Versuche wurden die Eigenarten der Lamine und die Häufigkeit ihres Einsatzes in der Industrie berücksichtigt. Folgende drei Laminattypen wurden für die Versuche ausgewählt:

Laminat I :  $0^\circ/90^\circ$  - Verstärkung  
Laminat II: Wirrfaser/ $90^\circ$  - Verstärkung  
Laminat III:  $\pm 45^\circ/90^\circ$  - Verstärkung

Die Wahl der Vorbeulen wurde auf in der Praxis mögliche Formen beschränkt. Zur Untersuchung kommen Zylinderschalen mit Einzelbeulen und Ringbeulen (auf den ganzen Umfang gleichbleibende Vorbeule).

Die Versuche sind an Zylinderschalen mit Modellabmessungen ( $M \approx 1 : 4$ ) durchgeführt worden. Dieses Vorgehen erlaubte zum einen eine große Anzahl von Versuchen und zum anderen auch eine entsprechende Variation.

## 2. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

### 2.1 Voruntersuchungen

Bevor mit den eigentlichen Versuchen begonnen werden konnte, mußten einige Voruntersuchungen durchgeführt werden. Da neben den Materialeigenschaften die geometrischen Abmessungen und Einspannbedingungen und eine Vielzahl von Parametern mehr einen Einfluß auf das Beulverhalten haben, mußten einige orientierende Versuche durchgeführt werden.

Um für alle gleichartigen Versuche eine einheitliche Lagerung zu bekommen, wurde die in Abb. 1 gezeigte Ausführung gewählt. Diese Einspannung gewährleistete, daß an den Zylinderenden die Radialverschiebung  $w$  und die Neigung über der Zylinderachse  $w'$  null sind und für die Verschiebung in Längs- und Umfangsrichtung  $u$  und  $v$  nur eine Starrkörperdrehung der Endscheiben um die Lagerkugeln möglich ist. Um den Einfluß der Zylinderlänge auszuschließen, wurde die Länge der Zylinder so gewählt, daß eine Beeinflussung von der Lagerung vernachlässigbar klein ist.

Mit dieser Einspannung wurden ein paar Versuche an längsgedrückten Zylinderschalen mit den vorgegebenen Laminaten durchgeführt. Diese dienten dazu, um Beulformen und Beulgrößen festzustellen, die für die Auslegung der einzubringenden Vorbeulen wichtig sind.

## 2.2 Herstellung und Aufbau der Schalen

Die für die späteren Untersuchungen erforderlichen Zylinder aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (GF-UP) wurden alle im Wickelverfahren auf einem wiederverwendbaren Kern im TDK-Labor der FH Aachen hergestellt. Aus der Vielzahl der möglichen Lamine für solche Schalen wurden solche ausgewählt, die in der Praxis für tragende Bauteile dieser Art häufig verwendet werden. Im einzelnen sind dies (Abb. 2a):

- I.  $0^\circ/90^\circ$  Laminat mit dünnen Zwischenschichten aus Wirrfasern.
- II. Wirrfaser/ $90^\circ$  Laminat
- III. +  $45^\circ/90^\circ$  Laminat

Wegen des vorhandenen Wickelkerns und der vorgegebenen Lamine konnte das  $r/t$ -Verhältnis nicht über 150 ausgedehnt werden. Dies bedeutete, daß die Versuche an relativ dickwandigen Schalen durchgeführt wurden. Da aber das  $E/C$ -Verhältnis klein ist, spielte sich der Beulvorgang praktisch im quasi-elastischen Bereich ab.

Neben dieser Laminatvariation trat noch eine Variation der Vorbeulenform und Größe auf. Im einzelnen wurden folgende definierte Vorbeulen aufgebracht:

Beulform A:

lokale Vorbeulen (rechteckige Form; gegenüberliegend angeordnet)  
 $b \times h \times e$

Beulform B u. C:

Ringbeulen (umlaufend; innen und außen liegend)  
 $2 \pi \cdot r \times h \times e$

Hierin sind:

- $b$  = Breite der Beule (Umfangsrichtung)
- $h$  = Höhe der Beule (Achsrichtung)
- $e$  = Tiefe der Beule
- $r$  = Radius der Schale.

Die einzelnen Abmessungen sind in Abb. 2b angegeben. Die Festlegung erfolgte nach den Abmessungen der Primärbeulen, die sich aus den Vorversuchen ergaben.

Die Herstellung der Beule erfolgte durch vorheriges Aufkleben eines entsprechenden der Beulgeometrie geformten Elementes. Bei der innenliegenden Ringbeule wurde der Kern um die Tiefe der Ringbeule aufgedickt, d.h. der Radius vergrößert, und die Beulenform in die Aufdickung eingearbeitet. Bei dieser Beulenform war eine genaue Arbeit nur mit erheblichem Aufwand möglich.

Für jede gefahrene Serie wurden mindestens 8 Schalen, von denen 2 ohne Vorbeulen waren, hergestellt.

### 2.3 Vermessung der Zylinder

Um die Größe der Vorbeulen und die Güte bzw. Genauigkeit der Geometrie abschätzen zu können, wurden alle Zylinder auf ihre radiale Abweichung der Wandkontur von der Ideallinie vermessen. Die Abb. 3 zeigt die Meßapparatur und einen Meßschrieb dieser Vermessung.

Die maximalen Abweichungen von der idealen Zylinderkontur betragen im glatten Bereich ca. 1-2 mm. Örtliche Aufdickungen durch den Klappkern sind dabei nicht berücksichtigt. Diese Abweichungen stellen im strengen Sinne keine Vorbeule dar, sondern bedeuten eine Veränderung der Radien, die großwellig über den Umfang und die Krümmung mal verkleinert und mal vergrößert.

Diese Ungenauigkeit aber ist in der Praxis ebenfalls festzustellen, wobei die relativen Werte in der Regel kleiner sind.

### 2.4 Versuchsdurchführung Kurzzeitversuche

#### 2.4.1 Versuchsdurchführung bei zentrischer Längskraftbeanspruchung

Unter Verwendung einer Weggesteuerten 400 kN-Hydropulsmaschine und einer Kraftgesteuerten 600 kN-Prüfmaschine wurden die Zylinderschalen zusammengedrückt.

Bei diesen Versuchen wurde immer ein Kraftweg-Diagramm aufgenommen (Abb. 12 und 13). Bis zum Einspringen der Primärbeule war bei allen Laminaten und Vorbeulformen ein fast linearer Zusammenhang zwischen der Kraft und dem aufgezeichneten Weg. Nach Auftreten der Primärbeule war fast immer ein starker Abfall der Last auf ca. 1/3 der maximalen Last festzustellen. Bei der kraftgesteuerten Maschine war der Wert etwas größer.

Das Beulbild war stark vom Laminataufbau abhängig, obwohl die Primärbeule immer ein Gemisch aus Ring und Rautenbeule war (Abb. 12 und 13). Beim Laminat II entstand in der Regel nach dem Einspringen der Primärbeule und weiterer Belastung ein Laminatbruch und die Zylinderwandungen konnten aneinander vorbeigleiten. Bei den Laminaten I und III erfolgte ein Versagen häufig nicht nur an einer Stelle, sondern es traten für den Betrachter gleichzeitig mehrere Beulen auf. Beim Nachfahren der Maschine konnte dann zwar keine Laststeigerung erzielt werden, wohl aber eine Vermehrung der Beulen und Umlagerung kleinerer Beulen zu größeren. Bruch trat erst bei größeren Deformationen auf.

Das Versagen der Schalen bzw. die Primärbeulen traten bei Zylinderschalen mit Vorbeulen immer in der Nähe der Vorbeule im glatten Bereich ein, gleichgültig ob die Beule nach innen oder außen gerichtet war.

#### 2.4.2 Ermittlung der Beullasten infolge Biegebeanspruchung

Die Ermittlung der Beullasten unter Biegebelastung wurde nur mit Hilfe der Querkraftbiegung vorgenommen (Abb. 4). Die Last wurde durch kraftgesteuerte Hydraulikzylinder aufgebracht. Für diese Versuche wurden die Vorbeulen in unmittelbarer Nähe der Einspannung so angeordnet, daß sie im Bereich der maximalen Druckspannungen lagen. Beul- und Versagensbild waren praktisch ähnlich denen beim axialen Druck.

Die Streuungen der Versuchswerte waren umso größer, je näher die Beule an der Einspannung lag, denn je nach Laminataufbau und  $r/t$ -Verhältnis hatten die Randmomente einen versteifenden oder abschwächenden Einfluß auf die Schale.

### 2.5 Versuchsdurchführung Langzeitversuche

#### 2.5.1 Zentrische Längskraftbeanspruchung

Die langzeitige Belastung für die Längskraftbeanspruchung wurde durch die 600 kN-Prüfmaschine oder durch eine Vorrichtung aufgebracht, wie sie in Abb. 5 dargestellt ist. Die Versuchsdauer und Höhe der Dauerbelastung war unterschiedlich. Aufgrund der begrenzten Prüfstände konnte nur 1 Versuch über einen Zeitraum von  $10^4$  h gefahren werden. Versuche über einen Zeitraum von 24 h - 1000 h wurden an mehreren Zylindern durchgeführt. Die Belastung bei den einzelnen Versuchen lag zwischen 50 % und 75% der kurzzeitig gemessenen Beullastwerte für den Vergleichszylinder.

Nach Ende der Belastungsdauer wurden die Zylinder im anschließenden Kurzzeitversuch zu Bruch gefahren.

Während der ganzen Versuchsdauer wurden, wie auch bei den Kurzzeitversuchen, an ausgezeichneten Stellen Dehnungsmessungen durchgeführt.

### 2.5.2 Biegebeanspruchung

Bei der Langzeitprüfung infolge Querkraftbiegung sind die Lasten durch angehängte Gewichte bzw. mit dem im Kurzzeitversuch beschriebenen Hydraulikzylinder aufgebracht worden. Die Belastungszeiten und Höhe der Lasten waren ähnlich denen bei der axialen Druckbelastung. Im Gegensatz zu den axialgedrückten Schalen sind hier im Langzeitversuch keine Schalen mit Ringbeulen untersucht worden, da hier der Einfluß einer Ringbeule nicht wesentlich anders ist als der einer Einzelbeule im maximalen Lastbereich. Nach Versuchsende wurden diese Schalen ebenfalls im Kurzzeitversuch zu Bruch gefahren.

An einigen Schalen sind nach Ende der Belastungszeit die Lasten auf null gesetzt und Retardationsversuche über 200 h durchgeführt worden. Im Anschluß daran wurde auch für diese Versuchskörper die Bruchlast ermittelt.

## 3. Zusammenstellung und Auswertung der Versuche

Im folgenden werden nun die Meßergebnisse aufgeführt, aus den sich einfache Gesetzmäßigkeiten für das Beulen von Schalen mit Vorbeulen unter kurzzeitiger und langzeitiger Last ableiten lassen. So wurde bewußt darauf verzichtet, alle Dehnungsmessungen, Vermessungsprotokolle usw. aufzuführen. Die durchgeführten Versuche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sind in der Tabelle 1 mit ihren allgemeinen Daten dargestellt. Desweiteren sind noch einige andere Versuche aufgelistet (Tabelle 4a und b). In den Tabellen 2a und 3a sind die Auswertung der ungestörten Schalen aufgeführt, in den Tabellen 2b und 3b die Schalen mit Vorbeulen. In der Auflistung sind auch die Versuchswerte der langfristig belasteten Schalen enthalten (K = kurzzeitig, L = langfristig).

### 3.1 Werkstoffkennwerte

Für die Ermittlung der theoretischen Beullasten unter kurz- und langzeitiger Belastung ist eine genaue Kenntnis der Werkstoffkennwerte, insbesondere der elastischen Werte, wichtig. Aus diesem Grunde sind an allen Proben und im Versuch gewesenen Schalen experimentell im Dreipunktbiegeversuch und Biegeschwingversuch und theoretisch über den Laminataufbau die E-Moduln für die beiden ausgezeichneten Richtungen der Schalen bestimmt worden.

In den Tabellen sind die gemessenen E-Moduln angegeben. Lediglich bei den Lamina-ten und Wicklungen von  $\pm 45^\circ$  sind die angegebenen Werte Rechenwerte, die mit Hilfe der Kontinuumstheorie ermittelt wurden.

Punktuell sind während des Bauteilversuchs durch Dehnungsmessungen mit Hilfe von DMS die E-Moduln überprüft worden. An einigen Proben sind im 1000 h Versuch die Kriechzahlen ermittelt worden.

### 3.2 Ermittlung der kritischen Spannungen

#### a) kritische Spannungen aus dem Experiment

Die kritischen Spannungen aus dem Experiment sind mit folgenden Gleichungen ermittelt worden

Axialdruck

$$\text{vorh } \sigma_k = \frac{F}{2\pi r \cdot t}$$

Querkraftbiegung

$$\text{vorh } \sigma_k = \frac{F \cdot l}{\pi r^2 \cdot t}$$

F = Bruchlast, d.h. die Last beim Einspringen der Primärbeule

l = Länge des Hebelarmes von der Lasteinleitung bis zur Primärbeule

r = mittlerer Radius der Schale

t = mittlere Wanddicke der Schale

b) theoretische Ermittlung der kritischen Spannungen

Bei der Bestimmung der kritischen Beulspannung geht man von der klassischen Beulgleichung

$$\sigma_k = \frac{1}{3(1-\nu^2)} E \cdot \frac{t}{r}$$

aus. Diese Gleichung gilt streng nur für Zylinder, deren Wandung isotrop und homogen ist. Hier liegt aber ein <sup>an</sup>isotroper oder bestenfalls ein orthotroper Wandaufbau vor. Für diesen gilt, wenn man die elastischen Größen der Hauptachsen einsetzt und dabei berücksichtigt, daß der Beulvorgang in erster Linie ein Biegeversagen in der Wandung darstellt, für das Ringbeulen mit

$$\nu_{xy} \cdot \nu_{yx} = 0,98$$

$$\sigma_{kRi} = 0,585 \sqrt{E_{ub} \cdot E_{1b}} \cdot t/r$$

Bei den hier zur Anwendung gekommenen Versuchsstücken kann, je nach Laminataufbau, auch ein recht kleiner Gleitmodul auftreten und als Versagensform tritt dann das sog. Rautenbeulen auf. Die kritische Beulspannung ist dann

$$\sigma_{kRau} = 0,585 \sqrt{2G_{u1} \sqrt{E_{ub} \cdot E_{1b}}} \cdot t/r$$

Eine Auswertung der Versuchsergebnisse mit der Gleichung für das Rautenbeulen ist teilweise erfolgt, denn aufgrund der Zusammenhänge bei den Laminaten ist der  $\sqrt{\quad}$ -Ausdruck bei der Rautenbeule immer kleiner als bei der Ringbeule. Hinzu kommt noch, daß der Gleitmodul an den Laminaten nur mit erheblichem Aufwand zu bestimmen ist, und in der Praxis in der Regel eine Bemessung mit der Gleichung für das Ringbeulen vorgenommen wird.

Einige vergleichende Werte sind in der Tabelle 4 dargestellt.

3.3 Einfluß der Vorbeulen

Um den Einfluß der Vorbeulen darzustellen, stellt sich die Frage, wie man die Beullasten, ob kurzzeitig oder langfristig, zusammenstellt, damit aus diesen Versuchen die Beullasten für andere Zylinder extrapoliert werden können.

Da bei den GFK-Zylindern, die bei der Primärbeule ertragene Last fast immer auch der maximal ertragenen Last entspricht, wurden alle Versuche mit der Last bei der die erste Beule auftritt ausgewertet. Die so ermittelten Beulspannungen sind mit den theoretisch ermittelten Beulspannungen für den glatten Zylinder zu vergleichen. Desweiteren werden die Versuchswerte der Schalen mit langzeitiger Belastung mit denen aus kurzzeitiger Belastung verglichen (Tabellen 5).

Aufbauend auf der Arbeit von Gienke /1/ wird analytisch versucht, für einen Teil der Schalen mit einer Kriechfunktion den Einfluß der Vorbeulen auf die Beullast rechnerisch zu erfassen.

Mit der Definition

$$\sigma_{kD} = \eta_0 \cdot \sigma_k$$

soll das vorzeitige Versagen der gestörten Schale durch den Korrekturfaktor  $\eta_0$  erfaßt werden. Hierin sind

$$\eta_0 = \sqrt{1 + \frac{s^2}{(1-\eta_0)^2}} - \frac{s}{1-\eta_0}$$

$$s = \frac{t}{\sqrt{12}} \frac{a_1 + a_2}{\sqrt{(1+k)(1+\theta)}}$$

$$k = \frac{b_{33} + b_{12}}{\sqrt{b_{11} b_{22}}}$$

$$\theta = \frac{\frac{1}{d_{33}} + \frac{1}{d_{12}}}{\sqrt{\frac{1}{d_{11} d_{22}}}}$$

$$\sigma_k = 0,585 \sqrt{E_{uB}(\bar{t}) \cdot E_{lB}(t)} \cdot t/r$$

$b_{ij}$  = Biegesteifigkeiten

$d_{ij}$  = Dehnsteifigkeiten

(t) = Zeitabhängige Werte

$a_1$  = Vorbeultiefe

$a_2$  = 0,6 ( Vorbeule in Achsrichtung durch Klappkern )

Mit dem Ansatz für die Kriechfunktion  $\bar{\Phi}_H$  bei freier Kriechdehnung

$$\bar{\Phi}_H(t) = \frac{\varepsilon_H(t)}{\varepsilon_H(0)} = \frac{E_H(0)}{E_H(t)} = 1 + F(t) = (1 + 4,3 \cdot t)^{0,084}$$

erhält man

$$E_{||}(t) = \frac{E_{||}}{\bar{\Phi}_{||}(t)} \quad \text{mit } \bar{\Phi}_{||}(t) = 1 + \frac{1}{1 + \frac{\nu}{1-\nu} \frac{EG}{EH} (1+F(t))} \cdot F(t)$$

für parallele Schaltung und freie Querdehnung

$$E_{\perp}(t) = \frac{E_{\perp}}{\bar{\Phi}_{\perp}(t)} \quad \text{mit } \bar{\Phi}_{\perp}(t) = 1 + \frac{1}{1 + \frac{\nu}{(1-\nu)} 1,25 \frac{EH}{EG}} \cdot F(t)$$

für Reihenschaltung und Vernachlässigung der der Querdehnung  
( $EH^0 = EH \rightarrow$  einfache Rechnung)

$$G_{\#}(t) = \frac{G_{\#}}{\bar{\Phi}_{\#}(t)} \quad \text{mit } \bar{\Phi}_{\#}(t) = 1 + \frac{k}{1 + \frac{\nu}{(1-\nu)} 1,25 \frac{GH}{GG}} \cdot F(t)$$

für freie Querdehnung

Eine Auswertung dieser Gleichungen ist mit einem Programm vorgenommen worden. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in den Tabellen 5b dargestellt. Ein Vergleich zwischen Versuch und Rechnung ist in der Tabelle 5a zu finden.

### 3.4 Auswertung

Bei allen Versuchen, kurzzeitig und langfristig, sind entsprechend dem Meßstellenplan, Abb.6, Dehnungsmessungen mit Hilfe von DMS durchgeführt worden und zwar so, daß jeder DMS seine absolute Dehnung (Messung mit Halbbrücken) anzeigte. Aus diesen Werten ließen sich dann die Normaldehnungen und Biegedehnungen ermitteln. Einige Dehnungsverläufe sind in der Abb. 7 dargestellt.

#### 3.4.1 Kurzzeitversuche

Der Einfluß einer Vorbeule auf die ertragbare Last bzw. Beulspannung ist weniger von ihrer Breite und Höhe abhängig als von der Tiefe bzw. Tiefe/Wanddicke. Trotz der Streuung der k-Werte in Tabelle 2b und 3b kann festgestellt werden, daß bei Vorbeulen mit  $e/t \geq 1$  ein deutlicher Abfall auf 60 - 70% der Last stattfindet, die sich bei einer "intakten" Schale einstellt. Ist die Vorbeule unter  $e/t \leq 0,5$ , so kann nicht mehr von einem meßbaren Einfluß gesprochen werden. Ein Einfluß der Vorbeulenform konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Eine Tendenz ist dahingehend zu erkennen, daß die Versuchsergebnisse mit Einzelbeulen, vor allem im Biegeversuch, kleinere Werte liefern als mit Ringbeulen. Ein Unterschied zwischen innen oder außen liegenden Vorbeulen ist nicht auszumachen.

Trägt man die ermittelten k-Werte in ein Diagramm ein, so ist deutlich zu sehen, daß diese Werte auf bzw. unter der eingezeichneten Wahrscheinlichkeitskurve liegen. Die großen Vorbeulen liegen nahe der Zylinder die einen Ausschnitt,  $B \times H$ , entsprechend der Einzelbeule hatten.

Eine Wertung der Lamine aus den Kurzzeitversuchen ist nur bedingt möglich. Eines kann aber sicher festgestellt werden, daß Lamine mit UD-Gelegen eine schlechtere Materialausnutzung darstellen als die beiden anderen Laminattypen.

An dieser Stelle sei noch eine generelle Bemerkung zur Auswertung erlaubt. - Die in den Tabellen angegebenen Materialwerte sind für jedes Bauteil bestensfalls Mittelwerte und mit denen in der Praxis gebräuchlichen Fraktile-Werten nicht vergleichbar. Würden hier für die Auswertung der einzelnen Lamine Fraktile-Werte angesetzt, so ist ein deutliches Ansteigen der k-Werte gegeben.

### 3.4.2 Langzeitversuche

Die an vielen Zylindern durchgeführten Langzeitversuche zeigen ein eindeutiges Bild. Entgegen dem bislang angenommenen großen Abfall der Beullast mit  $A_{1I}$ , d.h. Veränderung der E-Moduln mit der Zeit, ist hier zwar ein Abfall nach langzeitiger Last zu bestimmen gewesen, aber in einer Größe, die nicht mit  $A_{1I}$  übereinstimmt. Langzeitversuche über 8000 bzw. 10000 h bei 70% bis 50% der Last, die der Vergleichszylinder ertragen hat, führten nicht zum Versagen des Bauteils.

Die im anschließenden Kurzzeitversuch festgestellten Beulspannungen lagen immer noch bei mehr als 76% der Vergleichsspannung. Bei vielen Zylindern war die ertragene Spannung nach einer Langzeitbelastung größer als im Kurzzeitversuch. Dieser Effekt trat vor allem bei dem Laminat II auf. Einige Vergleichswerte sind in der Tabelle 5c dargelegt.

Für einige ausgezeichnete Meßstellen sind in den Abb. 10 und 11 die Kriechkurven dargestellt (Laminat III). Es sind die Absolutwerte der Dehnungen enthalten sowie Biege- und Normaldehnanteile. Ermittelt man aus diesen Werten ein  $A_{1I}$ , so ist in beiden Fällen

$$A_{1I} 10^4 h \approx 1,7$$

Extrapoliert man die Kurven mit den Kriechfunktionen, da mit diesen Funktionen eine gute Übereinstimmung mit den Versuchswerten gegeben ist, Abb. 8,

$$\bar{\epsilon}_{Ln} = 1 + a \ln^b (1 + t)$$

oder

$$\bar{\epsilon}_p = 1 + c \cdot t^d$$

so ist

$$A_{1I} 10^5 h \approx 2,1$$

Der Abfall der Beullast war in einem Fall 30 % (Axialdruck Zyl. 16) und 0 % (Querkraftbiegung Zyl. 4).

Wertet man die anderen Versuche mit aus, so liegen die gemessenen Beullasten für alle Schalen im normalen Streubereich. D.h., ein Abfall der Beullast infolge langzeitiger Last bei Vorbeulen ist nicht eindeutig feststellbar. Sucht man nach Ursachen für dieses Verhalten, so kann man aus den Kriechkurven folgendes herauslesen: Die Kriechkurven verlaufen praktisch alle parallel. D.h., daß der Biegeanteil abnimmt und die Normaldehnung zunimmt. Daraus kann der Schluß gezogen werden, daß die Vorbeulen nicht weiter wachsen und damit einen Abfall der Beullast verhindern. Diese Eigenschaft ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die geringe Kriechneigung der Umfangswicklungen zurückzuführen.

Langzeitversuche an Zylinderschalen unter Querkraftbiegung ohne Vorbeulen und an Zylinderschalen unter äußerem Überdruck /4/ bei 50 % der Kurzzeitlast zeigten keinen meßbaren Abfall der ertragbaren Lasten gegenüber den Beullasten aus dem Kurzzeitversuch.

Diese Ergebnisse lassen den eindeutigen Schluß zu, daß das Stabilitätsversagen ein kurzzeitiger Vorgang ist und nur, wie bekannt, die Tiefe und bedingt die Größe der Vorbeule einen Einfluß auf den Abfall der ertragbaren Last hat. Dies ist auch deutlich aus den Tabellen 5a und b zu ersehen, in denen die rechnerisch ermittelten Lasten mit Vorbeulen und Zeiteinfluß aufgelistet sind und mit den gemessenen verglichen werden /6/. Die Berechnung der theoretischen Lasten erfolgte mit theoretischen Laminatkennwerten.

Im Rahmen der Langzeitversuche sind an einigen Zylindern nach 1000-stündiger Belastung Retardationsversuche durchgeführt worden, Abb. 9. In allen Fällen ist innerhalb von 200 h ein Abfall der Restdehnungen auf ca. 50 % und weniger gegeben. Die Abnahme war in jedem Falle stärker als die Zunahme der Dehnung bei Belastung. Versucht man die Kurven mit einem entsprechenden Potenzgesetz zu verlängern, ob das zulässig ist sei dahingestellt, so ist bei ca. 3000 - 4000 h die Restdehnung praktisch null. D.h., daß nach Entlastung praktisch eine vollkommene Erholung möglich ist.

Aus dem Langzeitversuch über  $10^4$  h bei Querkraftbiegung kann noch eine interessante Feststellung getroffen werden. Während der Versuchsdauer war infolge hoher sommerlicher Temperaturen die Raumtemperatur auf über 35 °C angestiegen. Dies zeigt sich im Kurvenverlauf durch einen deutlichen Anstieg der Dehnungen. Nach Abfall der Temperatur gingen die Dehnungen auf die normale Kriechkurve zurück. - Bei gezielten Temperaturbelastungen querkraftbelasteter Schalen mit  $t \approx 70$  °C wurde ähnliches festgestellt.

#### 4. Schlußfolgerungen

Aus den durchgeführten Untersuchungen mit den verschiedensten Vorbeulformen und -größen in Kurz- und Langzeitversuchen kann folgendes Resümee gezogen werden:

Der Einfluß der Vorbeulen auf die ertragbare Beullast ist stärker von der Tiefe als von der Größe,  $B \times H$ , der Beule abhängig. Voraussetzung für einen Einfluß ist generell, daß die Ausdehnung der Beule in einer Richtung größer ist als die Halbwellenlänge der sich einstellenden Beule für den ungestörten Zylinder.

Erreicht die Beultiefe ein Verhältnis von  $e/t \geq 0,5$ , so ist schon ein deutlicher Abfall feststellbar. Mit größerem  $e/t$  strebt der Abfall einem Grenzwert zu ( $e/t = \infty =$  Ausschnitt), der bei ca. 50 % der ungestörten Schale liegt.

Eine Abminderung der Beullasten infolge langzeitiger Lasten war nicht eindeutig feststellbar. Alle Ergebnisse liegen im üblichen Streubereich. Weder der von Gienke /7/ vorgeschlagene Wert von  $\sqrt{A_{1I}}$  noch ein anderer Wert können angenommen werden. Jede Berücksichtigung von  $A_{1I}$ , in welcher Form auch immer, liegt auf der sicheren Seite, d.h. aufgrund der Untersuchungen, vor allem an Schalen ohne größere Vorbeulen, die in der Praxis die Regel sind, kann auf eine Berücksichtigung von  $A_{1I}$  verzichtet werden.

Aus den Langzeitversuchen ergab sich ferner, daß nach Entlastung ein relativ schnelles Erholen des Werkstoffes gegeben war. Selbst Temperaturerhöhungen infolge Sonneneinwirkungen zeigten keine bleibende Dehnung.

Für die praktische Bemessung der Schalen sollte die in der DAST 013 angegebene Bemessungsgleichung für axialgedrückte Zylinderschalen

$$\sqrt{\sigma_k} = k E_V \cdot t/r$$

für die Ermittlung der Kurzzeitbeullast angesetzt werden. Mit

$$\begin{aligned} E_V &= \sqrt{E_{ub} \cdot E_{1b}} \\ k &= 0,585 \sqrt{\frac{0,52}{1+r/100 \cdot t}} \cdot \frac{2}{1,5} \\ &= \frac{0,406}{\sqrt{1+r/100 \cdot t}} \end{aligned}$$

$$2/1,5 = \text{Verhältnis von } S_{\text{GFK}}/S_{\text{Stahl}}$$

Bezieht man  $k$  auf  $S = 1,5$ , so stimmt die Kurve praktisch mit der im Diagramm 1 eingezeichneten überein.

Für biegebelastete Zylinderschalen darf der Wert auf

$$k_B = 1,2 \cdot k$$

erhöht werden.

Bei der Laminatauswahl sollte darauf geachtet werden, daß Lamine mit einer Umfangsverstärkung bei Vorbeulen ein günstigeres Verhalten zeigen als andere Lamine.

Literatur

- /1/ Gienke, E. Einfluß des Kriechens auf die Stabilität längs-  
gedrückter GFK-Zylinderschalen (Theoretische  
Untersuchungen)  
Forschungsbericht
- /2/ Gienke, E. Einfluß der verschiedenen Kriechmodelle auf die  
Spannungen und Verformungen in GFK-Konstruktionen  
14. AVK-Jahrestagung 1977
- /3/ Gienke, E., Sind zweidimensionale Kriechversuche notwendig?  
Meder, G. 15. AVK-Jahrestagung 1978
- /4/ Nonhoff, G. Ein Beitrag zur Stabilitätsberechnung und Prüfung  
von Zylinderschalen aus GFK unter gleichmäßigem  
Außendruck  
Dissertation TH Aachen 1972
- /5/ N.N. Graduierungsarbeiten an der FH Aachen,  
Abt. Flugzeugbau
- /6/ Klütsch Studienarbeit  
- nicht veröffentlicht -
- /7/ Gienke, E. Stabilität von langzeitbelasteten GFK-Zylinder-  
schalen bei Berücksichtigung des Schüttgutes.  
Forschungsbericht.

Wahrscheinlichkeitskurve für axial gedruckte Zylinderschalen<sup>1)</sup> (ungestört)  
 (5% Fraktile mit 50%-iger Wahrscheinlichkeit)

- △ Wickellaminat (Rovings-90°/Gewebe-0°-90°/Matten)
  - " " ( " -0°-90°/Matten)
  - ▽ " " ( " -90°/Gewebe-0°-90°)
  - ▲ " " ( " -90°/Matte)
  - Mattenlaminat (Gewebe-0°-90°/Matten)
- } Untersuchungen FH u. TH. Aachen / Versuche CWH

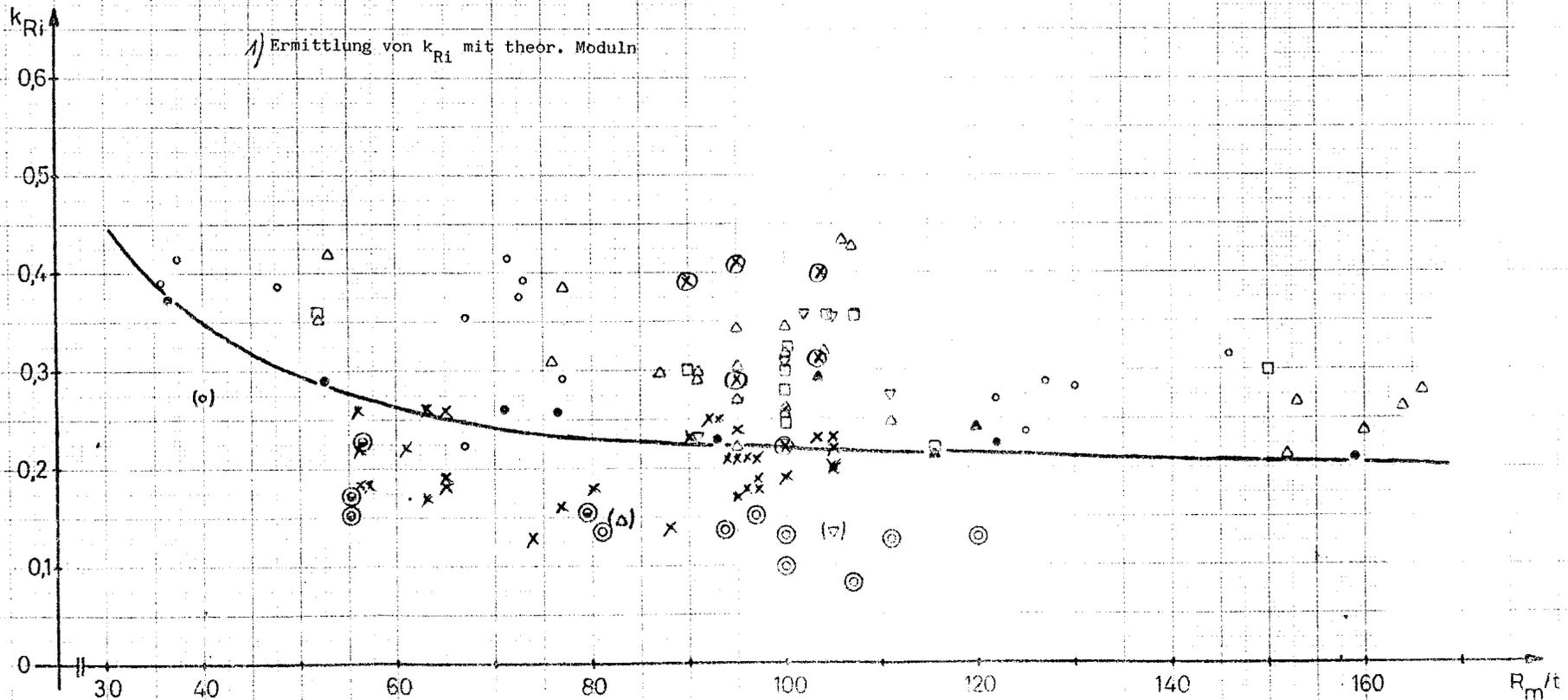
• Fraktile-Wert ( ) = Schalen mit Vordeformation bzw. schlechtes Laminat

- ⊙ Schalen mit Vorbeulen (Rovings-45°-90°/mit u. ohne(Matte))
  - ⊗ " " Ausschnitten ( " -90°/Matte)
- } FH Aachen (keine statistische Auswertung)

(Matte)=Matte nur als innere Schicht, d.h. als Schutzschicht

- x Schalen mit Vorbeulen ( E-Werte aus Versuchen )
- ⊗ Schalen ohne Vorbeulen " " " "

1) Ermittlung von  $k_{Ri}$  mit theor. Moduln



# ALLE ZYLINDER

NR	RADIUS MM	DICKE MM	R/T	EUR N/MM2	ELB N/MM2	F KN	H MM	LAMINAT	VB
2	200	2.60	76.92	30500	31500	22.80	760	III	K
3	200	2.50	80.00	30500	31500	25.00	730	III	L1
4	200	2.50	80.00	30500	31500	22.10	760	III	L2
5	200	2.50	80.00	30000	31200	22.60	728	III	K
6	200	2.50	80.00	30000	31200	22.00	700	III	L1
7	200	2.60	76.92	30000	31200	21.60	730	III	L3
8	200	4.90	40.82	18500	19400	56.40	720	III	K
9	200	5.00	40.00	18500	19400	47.10	710	III	L1
10	200	4.20	47.62	21200	22500	43.60	700	III	K
11	200	4.40	45.45	21200	22500	40.00	700	III	L1
12	200	4.10	48.78	22300	23000	41.70	730	III	K
13	200	4.30	46.51	22300	23000	38.00	700	III	L2
14	200	2.50	80.00	28300	30200	206.00	-----	III	K
15	200	2.60	76.92	28300	30200	195.00	-----	III	L1
16	200	2.70	74.07	28300	30200	180.00	-----	III	L3
17	200	3.60	55.56	18200	18500	328.00	-----	III	K
18	200	3.60	55.56	18200	18500	270.00	-----	III	L2
19	200	3.60	55.56	18500	19100	392.50	-----	III	K
20	200	3.60	55.56	18500	19100	330.00	-----	III	L2
21	200	3.60	55.56	21300	22000	323.60	-----	III	K
22	200	3.50	57.14	21300	22000	300.00	-----	III	L2
23	200	2.40	83.33	23200	19500	32.50	690	III	K
24	200	2.50	80.00	22500	20000	29.00	950	III	K
25	200	2.50	80.00	23300	21000	25.00	800	III	K
26	200	2.50	80.00	23300	21000	22.50	740	III	K
27	200	2.60	76.92	22500	20000	27.00	780	III	K
28	200	2.50	80.00	22500	20000	25.00	750	III	K
29	200	1.93	103.63	26300	14700	144.00	-----	I	K
30	200	2.00	100.00	26300	14700	108.80	-----	I	K
31	200	1.90	105.26	26400	14700	88.00	-----	I	K
32	200	1.93	103.63	24300	13600	96.00	-----	I	L1
33	200	1.90	105.26	26700	13700	98.40	-----	I	L1
34	200	2.11	94.79	24400	13800	108.00	-----	I	L2
35	200	1.90	105.26	24700	14500	93.60	-----	I	K
36	200	2.09	95.69	24400	12600	85.20	-----	I	L2
37	200	2.07	96.62	24400	14500	92.80	-----	I	L1
38	200	2.06	97.09	24700	14800	96.00	-----	I	L1
39	200	2.10	95.24	29900	12200	153.60	-----	II	K
40	200	1.93	103.63	29900	12200	180.00	-----	II	K
41	200	2.08	96.15	32200	9900	101.60	-----	II	K
42	200	2.12	94.34	28400	10600	104.80	-----	II	L1
43	200	2.10	95.24	30000	11200	85.60	-----	II	L2
44	200	2.07	96.62	31300	12000	112.00	-----	II	L1
45	200	2.16	92.59	24900	9500	113.60	-----	II	K
46	200	2.10	95.24	29300	11100	120.00	-----	II	L1

Tabelle 1a

# ALLE ZYLINDER

NR	RADIUS MM	DICKE MM	R/T	EUB N/MM2	ELB N/MM2	F KN	H MM	LAMINAT	VB
47	200	2.00	100.00	29800	11400	120.00	----	II	L1
48	200	2.00	100.00	24800	11800	80.00	----	II	L2
49	200	3.10	64.52	26400	8500	171.00	----	IA	K
50	200	3.20	62.50	28000	9100	170.00	----	IA	L2
51	200	3.10	64.52	25300	9500	168.00	----	IA	K
52	200	3.10	64.52	26400	8500	234.00	----	IA	K
53	200	3.20	62.50	24300	8700	240.00	----	IA	K
54	200	3.30	60.61	25500	9100	238.00	----	IA	K
55	200	3.20	62.50	25200	8400	22.00	1000	IA	K
56	200	3.10	64.52	30600	8800	22.40	1000	IA	K
57	200	3.80	52.63	26100	7500	22.00	1000	IA	L1
58	200	3.10	64.52	29100	9000	25.00	1000	IA	K
59	200	3.00	66.67	27900	9600	25.00	1000	IA	K
60	200	3.50	57.14	26600	7500	22.40	1000	IA	L1
61	200	2.21	90.50	20200	8100	154.00	----	II	K
62	200	2.10	95.24	20200	8100	144.80	----	II	K
63	203	2.20	92.27	16600	6600	80.00	----	II	K
64	203	2.20	92.27	16600	6600	80.00	----	II	K
65	203	2.25	90.22	16400	6500	76.80	----	II	K
66	203	2.30	88.26	11600	6500	40.00	----	II	K

Tabelle 1b

LAMINAT I # 0/90 - VERSTAERKUNG

LAMINAT II # WIRRFASER/90 - VERSTAERKUNG

LAMINAT III # +- 45/90 - VERSTAERKUNG

LAMINAT IA # LAM. I ABER 2400 TEX ROVING

K = KURZZEITVERSUCH

L1 = LANGZEITVERS. T < 200 h ; L2 = LANGZEITVERS. T < 1000 h

L3 = LANGZEITVERSUCH 8000 h <= T <= 10000 h

AXIALDRUCK GLATTER ZYLINDER

NR	RADIUS MM	R/T	E-V N/MM2	BRUCHL KN	VORH-S N/MM2	THEO-S N/MM2	K	VD
29	200	104	19662	144.00	59.37	110.05	0.31	K
30	200	100	19662	108.80	43.29	114.04	0.22	K
39	200	95	19099	153.60	58.21	116.31	0.29	K
40	200	104	19099	180.00	74.22	106.90	0.40	K
61	200	90	12791	154.00	55.45	81.98	0.39	K
62	200	95	12791	144.80	54.87	77.90	0.41	K

Tabelle 2a

AXIALDRUCK ZYLINDER MIT VORBEULE

NR	RADIUS MM	R/T	E MM	E/T	§	BRUCHL KN	VORH-S N/MM2	THEO-S N/MM2	K	VD
14	200	80	3.40	1.4	A	206.00	65.57	211.95	0.10	K
15	200	77	3.50	1.3	A	195.00	59.68	220.43	0.16	L1
16	200	74	3.30	1.2	A	180.00	53.05	228.91	0.13	L3
17	200	56	3.20	0.9	A	328.00	72.50	191.57	0.22	K
18	200	56	3.40	0.9	A	270.00	59.68	191.57	0.18	L2
19	200	56	3.30	0.9	A	392.50	86.76	196.25	0.26	K
20	200	56	3.50	1.0	A	330.00	72.95	196.25	0.22	L2
21	200	56	3.30	0.9	A	323.60	71.53	226.00	0.18	K
22	200	57	3.80	1.1	A	300.00	68.21	219.72	0.18	L2
31	200	105	3.50	1.8	B	88.00	36.86	108.55	0.20	K
32	200	104	3.50	1.8	B	96.00	39.58	101.75	0.23	L1
33	200	105	3.50	1.8	B	98.40	41.21	105.38	0.23	L1
34	200	95	3.50	1.7	B	105.00	40.73	112.28	0.21	L2
35	200	105	2.50	1.3	B	93.60	39.20	104.28	0.22	K
36	200	96	2.50	1.2	B	85.20	32.44	106.27	0.18	L2
37	200	97	2.50	1.2	B	92.80	35.68	112.91	0.18	L1
38	200	97	2.50	1.2	B	96.00	37.08	114.22	0.19	L1
41	200	96	3.50	1.7	B	101.60	38.87	107.70	0.21	K
42	200	94	3.50	1.7	B	104.80	39.34	106.67	0.21	L1
43	200	95	3.50	1.7	B	85.60	32.44	111.63	0.17	L2
44	200	97	3.50	1.7	B	112.00	43.06	116.34	0.21	L1
45	200	93	2.50	1.2	B	113.60	41.85	96.34	0.25	K
46	200	95	2.50	1.2	B	120.00	45.47	109.83	0.24	L1
47	200	100	2.50	1.3	B	120.00	47.75	106.90	0.26	L1
48	200	100	2.50	1.3	B	80.00	31.63	99.22	0.19	L2
49	200	65	2.00	0.6	B	171.00	43.90	134.67	0.19	K
50	200	63	2.00	0.6	B	170.00	42.28	146.13	0.17	L2
51	200	65	2.00	0.6	B	168.00	43.13	139.37	0.18	K
52	200	65	1.00	0.3	B	234.00	60.07	134.67	0.26	K
53	200	63	1.00	0.3	B	240.00	59.68	134.93	0.26	K
54	200	61	1.00	0.3	B	238.00	57.39	148.17	0.22	K
63	203	92	3.00	1.4	C	80.00	28.51	65.79	0.25	K
64	203	92	3.00	1.4	C	80.00	28.51	65.79	0.25	K
65	203	90	3.00	1.3	C	76.80	26.76	66.37	0.23	K
66	203	88	3.00	1.3	C	40.00	13.64	57.06	0.14	K

Tabelle 2a

Q-K-BIEGUNG FLATTER ZYLINDER

NR	RADIUS MM	R/T	E-V N/MM2	BRUCHM KNM	VORH-S N/MM2	THED-S N/MM2	K	VD
23	200	83	20806	28.93	95.91	144.81	0.38	K
24	200	80	21213	27.55	87.69	153.80	0.33	K

Tabelle 3a

Q-K-BIEGUNG ZYLINDER MIT VORBEULE

NR	RADIUS MM	R/T	E MM	E/T	Ø	BRUCHM KNM	VORH-S N/MM2	THED-S N/MM2	K	VD
2	200	77	3.50	1.3	A	17.33	53.04	233.71	0.13	K
3	200	80	3.30	1.3	A	18.25	58.09	224.72	0.15	L1
4	200	80	3.50	1.4	A	16.80	53.46	224.72	0.14	L2
5	200	80	3.40	1.4	A	16.45	52.37	221.81	0.14	K
6	200	80	3.60	1.4	A	15.40	49.02	221.81	0.13	L1
7	200	77	3.80	1.5	A	15.77	48.26	230.68	0.12	L3
8	200	41	4.20	0.9	A	40.61	65.95	269.20	0.14	K
9	200	40	4.00	0.8	A	33.44	53.22	274.70	0.11	L1
10	200	48	3.40	0.8	A	30.52	57.83	266.02	0.13	K
11	200	45	3.00	0.7	A	28.00	50.64	278.68	0.11	L1
12	200	49	3.90	1.0	A	30.44	59.08	269.28	0.13	K
13	200	47	4.10	1.0	A	26.60	49.23	282.41	0.10	L2
25	200	80	2.50	1.0	A	20.00	63.66	160.37	0.23	K
26	200	80	3.50	1.4	A	16.65	53.00	160.37	0.19	K
27	200	77	2.50	1.0	A	21.06	64.46	159.95	0.23	K
28	200	80	3.50	1.4	A	18.75	59.68	153.80	0.23	K
55	200	63	2.00	0.6	B	22.00	54.71	135.02	0.24	K
56	200	65	2.00	0.6	B	22.40	57.50	147.52	0.23	K
57	200	53	2.00	0.5	B	22.00	46.07	154.18	0.17	L1
58	200	65	1.00	0.3	B	25.00	64.18	145.49	0.26	K
59	200	67	1.00	0.3	B	25.00	66.31	142.38	0.27	K
60	200	57	1.00	0.3	B	22.40	50.93	143.36	0.21	L1

Tabelle 3b

Ird. Nr.	Zylinder	(Axialdruck)		V/V	StBzng	Vorbeu- lentiefe a/mm	n/t	h <sub>a</sub> 2·√(t·E)	h <sub>a</sub> 2·√(R·E)	E <sub>x,th</sub> /N/mm <sup>2</sup>	E <sub>y,th</sub> /N/mm <sup>2</sup>	G <sub>xy</sub> /N/mm <sup>2</sup>	G <sub>xz,th</sub> /N/mm <sup>2</sup>	G <sub>yz,th</sub> /N/mm <sup>2</sup>	G <sub>xm</sub> /N/mm <sup>2</sup>	G <sub>ym</sub> /N/mm <sup>2</sup>	G <sub>zm</sub> /N/mm <sup>2</sup>	k <sub>Re</sub>	k <sub>01</sub>	Laminat besteht aus :	Ird. Nr.
		R <sub>m</sub> /mm	t/mm																		
1	S a	200	7,53	79,55	61,05	2 V	3,4	4,201	5,6	11911,5	11602,2	7062,5	162,9	249,6	62,99	0,1099	0,256	0,2366	0,1593	1200-tex-Rowings (45°-90°)	1
2	Z a	200	3,66	55,14	49,03	2 V	3,2	4,205	5,14	22546,0	22747,2	6120,5	185,9	248,7	70,37	0,120	0,203	0,2294	0,1715	Matte/1200-tex-Rowings (45°-90°)	7
3	B a	200	3,57	56,52	46,56	2 V	3,3	0,925	4,22	21510,1	21491,8	6090,8	173,1	229,5	86,59	0,101	0,1775	0,1705	0,229	" / " ( " )	3
4	B a	200	3,66	55,14	54,05	2 V	3,3	0,905	4,22	21440,7	21579,1	6228,2	203,6	200,3	69,75	0,1419	0,2076	0,2076	0,1508	" / " ( " )	4
5	1	200	2,5	120,0	44,9	2 A	-	-	3,86	18330,0	26980,0	5117,4	70,0	95,4	25,8	0,1254	0,267	0,214	0,11	Matte/1200-tex-Rowings (90°)	5
6	2	200	3,7	81,05	47,2	2 A	-	-	3,46	14573,4	21062,8	3998,9	86,5	111,0	23,5	0,1268	0,249	0,2235	" / " ( " )	6	
7	3	200	3,0	100,0	46,0	2 A	-	-	5,73	14061,9	26205,3	5588,8	87,0	116,2	18,8	0,1216	0,162	0,171	0,0985	" / " ( " )	7
8	4	200	2,9	103,5	39,8	-	-	-	-	12656,8	21256,1	4838,2	74,2	76,6	46,6	0,1528	0,141	0,181	0,282	" / " ( " )	8
9	5	200	3,1	95,9	39,8	2 A	-	-	3,36	12797,0	21178,9	4086,7	78,5	103,4	25,9	0,126	0,252	0,198	0,152	" / " ( " )	9
10	6	200	3,0	100,0	43,9	2 A	-	-	5,64	11691,1	24593,1	5247,1	84,1	111,5	24,0	0,226	0,145	0,173	0,1295	" / " ( " )	10
11	7	200	2,5	120,0	48,3	-	-	-	-	14375,6	28484,3	5503,0	75,2	102,0	40,5	0,1539	0,197	0,187	0,241	" / " ( " )	11
12	8	200	3,2	93,0	44,9	2 A	-	-	5,25	14285,2	23893,2	5487,1	91,8	112,5	27,1	0,225	0,227	0,179	0,1275	" / " ( " )	12
13	9	200	2,6	115,5	42,0	-	-	-	-	14600,0	29200,0	2900,0	67,0	103,0	29,8	0,1594	0,160	0,16	0,283	" / " ( " )	13
14	10	200	2,8	107,0	45,0	2 A	-	-	5,3	19500,0	31000,0	4220,0	77,0	124,0	17,5	0,220	0,141	0,179	0,0835	" / " ( " )	14
15	11	200	2,7	111,0	37,0	2 A	-	-	3,85	13700,0	25200,0	3500,0	69,0	101,5	21,4	0,211	0,206	0,120	" / " ( " )	15	
16	A 1	200	2,2	91,0	45,0	-	-	-	-	13290,0	31350,0	3600,0	82,2	120,1	65,0	0,1	0,198	0,105	0,235	750-tex-Rowings (90°)/UD-Gewebe	16
17	A 2	200	1,95	102,0	43,9	-	-	-	-	14000,0	30000,0	3540,0	71,5	121,7	71,8	1,025	0,19	0,199	0,158	" ( " ) / " ( " )	17
18	A 3	200	2,0	100,0	41,8	-	-	-	-	14400,0	32090,0	3400,0	72,2	120,0	67,6	0,125	0,18	0,156	0,145	" ( " ) / " ( " )	18
19	B 1	200	2,0	100,0	45,0	-	-	-	-	17700,0	31390,0	3500,0	78,9	142,8	75,2	0,1964	0,196	0,177	0,139	Vlies/750-tex-Rowings (90°)/UD-Gewebe	19
20	B 2	200	2,0	100,0	45,0	-	-	-	-	19390,0	31950,0	3600,0	81,0	140,5	65,2	0,105	0,148	0,162	0,148	" / " ( " ) / " ( " )	20
21	B 3	200	2,1	95,0	45,0	-	-	-	-	17290,0	30850,0	3600,0	78,4	147,0	72,5	0,123	0,15	0,158	0,103	" / " ( " ) / " ( " )	21
22	C 1	200	2,0	100,0	43,9	-	-	-	-	20000,0	28300,0	3400,0	75,5	136,0	67,9	0,126	0,142	0,149	0,158	Vlies/750-tex-Rowings (90°)/	22
23	C 2	200	2,1	95,0	43,9	-	-	-	-	22000,0	28980,0	3500,0	80,3	150,9	67,6	0,163	0,147	0,151	0,171	" / " ( " ) / " ( " )	23
24	C 3	200	2,1	95,0	43,9	-	-	-	-	20900,0	28900,0	3540,0	82,0	149,4	64,5	0,163	0,145	0,149	0,121	" / " ( " ) / " ( " )	24
25	D 1	200	1,0	111,0	43,9	-	-	-	-	17000,0	34000,0	3500,0	70,0	126,0	51,2	0,123	0,107	0,145	0,147	Vlies/1200-tex-Rowings (10°)/ UD-Gewebe	25
26	D 2	200	2,4	83,0	46,1	-	-	-	-	11700,0	29300,0	3700,0	82,2	110,0	71,0	0,107	0,104	0,104	0,148	" / " ( " )	26
27	D 3	200	3,2	91,0	45,1	-	-	-	-	11500,0	27000,0	3700,0	77,4	121,4	59,0	0,105	0,105	0,109	0,109	" / " ( " )	27
28	E 1	200	1,9	105,0	43,9	-	-	-	-	15500,0	29770,0	3500,0	70,5	120,7	60,7	0,161	0,127	0,125	0,125	UD-Gewebe/1200-tex-Rowings (90°)	28
29	E 2	200	1,9	111,0	47,2	-	-	-	-	16420,0	29300,0	3780,0	69,8	114,7	62,1	0,126	0,104	0,105	0,1275	" / " ( " )	29
30	E 3	200	1,0	105,0	46,1	-	-	-	-	16000,0	26480,0	3700,0	70,9	117,7	76,0	0,167	0,100	0,100	0,1225	" / " ( " )	30
31	F a	200	1,2	125,0	32,1	-	-	-	-	10960,0	11710,0	3560,0	44,1	54,0	21,4	0,165	0,119	0,109	0,122	Matte/Rowings-Gewebe	31
32	III a	200	3,0	87,0	37,2	-	-	-	-	10000,0	12670,0	3800,0	66,0	107,0	67,0	0,1	0,107	0,107	0,126	Intenzivlinier	32
33	III b	200	2,6	77,0	37,2	-	-	-	-	11610,0	14000,0	3900,0	79,4	100,4	68,4	0,161	0,107	0,107	0,122	"	33
34	III c	200	3,0	87,0	37,2	-	-	-	-	10550,0	11200,0	3870,0	82,1	93,0	75,5	0,165	0,109	0,107	0,124	"	34
35	VL	200	5,0	40,0	39,0	-	-	-	-	9760,0	10000,0	3670,0	128,0	156,0	70,8	0,153	0,145	0,122	0,122	"	35
36	1 a	700	4,77	166,0	32,4	-	-	-	-	10690,0	10930,0	-	-	29,11	18,9	-	0,162	-	0,21	Matte/1200-tex-Rowings (90°)/Gewebe	36
37	1 b	700	4,59	163,0	32,4	-	-	-	-	10690,0	10930,0	-	-	42,77	19,0	-	0,144	-	0,269	" / " ( " ) / " ( " )	37
38	1 c	700	4,29	164,0	32,4	-	-	-	-	10690,0	10930,0	-	-	20,97	17,4	-	0,135	-	0,264	" / " ( " ) / " ( " )	38
39	2 a	700	6,64	107,0	36,7	-	-	-	-	11100,0	12000,0	-	-	66,27	44,8	-	0,126	-	0,108	" / " ( " ) / " ( " )	39
40	2 b	700	7,05	100,0	36,7	-	-	-	-	11100,0	12000,0	-	-	59,94	29,9	-	0,12	-	0,146	" / " ( " ) / " ( " )	40
41	2 c	700	6,66	106,0	36,7	-	-	-	-	11100,0	12000,0	-	-	66,07	47,3	-	0,116	-	0,132	" / " ( " ) / " ( " )	41
42	3 a	700	5,18	76,0	36,6	-	-	-	-	15330,0	11950,0	-	-	106,0	56,6	-	0,111	-	0,11	" / " ( " ) / " ( " )	42
43	3 b	700	9,1	77,0	36,6	-	-	-	-	15370,0	11950,0	-	-	102,2	62,5	-	0,164	-	0,188	" / " ( " ) / " ( " )	43
44	4 a	700	13,52	52,0	36,6	-	-	-	-	14840,0	9560,0	-	-	118,32	75,9	-	0,163	-	0,182	" / " ( " ) / " ( " )	44
45	4 b	700	13,42	53,0	36,6	-	-	-	-	14840,0	9560,0	-	-	117,2	95,1	-	0,163	-	0,182	" / " ( " ) / " ( " )	45
46	5 a	700	14,44	160,0	32,4	-	-	-	-	10260,0	16760,0	-	-	49,17	19,6	-	0,125	-	0,24	" / " ( " ) / " ( " )	46
47	5 b	700	14,62	162,0	32,4	-	-	-	-	10260,0	16660,0	-	-	51,12	10,1	-	0,104	-	0,215	" / " ( " ) / " ( " )	47
48	5 c	700	16,08	167,0	32,4	-	-	-	-	10260,0	16660,0	-	-	80,11	42,0	-	0,119	-	0,297	" / " ( " ) / " ( " )	48
49	5 d	700	16,12	167,0	32,4	-	-	-	-	10260,0	16660,0	-	-	89,96	44,0	-	0,108	-	0,102	" / " ( " ) / " ( " )	49
50	6 a	700	7,4	95,0	38,9	-	-	-	-	10610,0	10990,0	-	-	67,7	78,0	-	0,168	-	0,145	Matte/2400-tex-Rowings (90°)/Gewebe	50
51	6 b	700	6,73	104,0	38,9	-	-	-	-	10640,0	10990,0	-	-	61,2	22,6	-	0,121	-	0,121	" / " ( " ) / " ( " )	51
52	7	700	4,0	146,0	16,0	-	-	-	-	8220,0	8070,0	3120,0	30,2	74,0	17,0	0,100	0,152	0,158	0,116	Intensivlinier-Gewebe	52
53	8	700	5,5	127,0	14,4	-	-	-	-	7740,0	7780,0	3010,0	32,7	27,0	17,6	0,123	0,126	0,108	" / " ( " )	53	
54	9	700	5,4	120,0	16,7	-	-	-	-	7660,0	7680,0	3070,0	33,0	25,8	16,1	0,109	0,104	0,108	0,284	" / " ( " )	54
55	4	700	9,8	71,5	17,4	-	-	-	-	9740,0	8170,0	3740,0	65,9	76,2	62,0	0,123	0,165	0,148	0,145	" / " ( " )	55
56	5	700	9,6	73,0	17,1	-	-	-	-	9770,0	8020,0	3310,0	63,5	73,4	67,4	0,126	0,156	0,152	0,122	" / " ( " )	56
57	6	700	9,7	72,5	18,3	-	-	-	-	9700,0	8990,0	3440,0	67,1	77,9	68,4	0,121	0,121	0,127	0,126	" / " ( " )	57
58	7	700	10,7	47,7	17,5	-	-	-	-	9290,0	8170,0	3350,0	98,5	117,5	75,7	0,122	0,141	0,108	" / " ( " )	58	
59	8	700	10,7	47,5	17,1	-	-	-	-	10220,0	8460,0	3440,0	107,5	120,7	107,0	0,108	0,105	0,109	0,145	" / " ( " )	59
60	9	700	10,6	45,7	17,7	-	-	-	-	11110,0	8740,0	3470,0	119,1	129,9	109,0	0,123	0,145	0,121	" / " ( " )	60	
61	1	1450	4,85	300,0	-	-	-	-	-	10100,0	10100,0	7100,0	17,0	21,0	7,8	0,158	0,127	0,122	0,124	" / " ( " )	61
62	11	1320	10,1	127,0	-	-	-	-	-	8000,0	8000,0	7730,0	21,4	17,5	12,7	0,113	0,145	0,1			



Vergleich der theoretisch vorausgerechneten und der im Experiment praktisch ermittelten Durchschlaglasten.

Zyl.	$\frac{a_1}{\text{mm}}$	$\frac{zt}{h}$	$\bar{\sigma}_{Dth}$ N/mm <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_{Dth}$ N/mm <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_{Dp}$ N/mm <sup>2</sup>	$\bar{\sigma}_{Dp}$ N/mm <sup>2</sup>	$k = \frac{\bar{\sigma}_{Dp}}{\bar{\sigma}_{Dth}} \cdot 100$	$\bar{K} \pm s$
WK	2,8	1300	48,67	/	39,45	/	81,	
WG	3,7	115	46,36	/	36,15	/	78,	
WO K1	0,0	1	114,21		79,6		70,	73, ± 13,
WO bK1	0,0	1	116,03	115,	85,6	83,	74,	
WO 7Bo	0,0	1	97,62		57,09		58,	
WO 8Bo	0,0	1	80,53	89,	72,82	65,	90,	
W1ABo	3,7	1	45,85		38,12		83,	71, ± 15,
W3ABo	3,7	1	59,92		38,58		64,	
W4ABo	3,7	1	59,64	54,	31,81	38,	53,	
W6ABo	3,7	1	50,06		42,20		84,	
W1BBo	2,8	1	52,15		--		--	71, ± 10,
W4BBo	2,8	1	67,84		40,97		60,	
W5BBo	2,8	1	58,28	62,	44,60	44,	77,	
W6BBo	2,8	1	60,81		46,60		77,	
UDK	2,8	50	46,91	/	35,20	/	75,	
UDG	3,7	220	38,73	/	38,52	/	99,	
UD09Bo	0,0	1	130,16		58,26		45,	41, ± 6,
UD10Bo	0,0	1	116,88	124,	42,26	50,	36,	
UD1ABo	3,7	1	51,99		36,75		71,	80, ± 9,
UD4ABo	3,7	1	42,59		38,84		91,	
UD5ABo	3,7	1	55,03	49,	40,65	39,	74,	
UD6ABo	3,7	1	48,26		39,95		83,	
UD1BBo	2,8	1	45,31		38,26		84,	64, ± 17,
UD2BBo	2,8	1	46,01		31,82		69,	
UD4BBo	2,8	1	77,04	58,	34,99	35,	45,	
UD5BBo	2,8	1	64,20		36,37		57,	

$\bar{\sigma}_{Dth}$  = theor. ber. Spannung

$\bar{\sigma}_{Dp}$  = im Versuch gem. Spannung

LAMINAT-KENNWERTE UND -LASTEN ZUR ZEIT ZT=0

ZYLINDER	T	PSI	PHI	EA	EU	EAB	EUB	SIGV	A1	A2	RHO	ETA	SIGD
WK	2.05	.65	.47	16925	31742	16518	33235	145.52	2.80	.60	.54	.43	62.55
HG	2.03	.65	.47	16925	31742	16518	33235	144.11	3.70	.60	.68	.39	55.61
W0 KL	2.05	.69	.52	20461	34449	20294	36071	168.04	0.00	.60	.10	.72	120.43
W0B KL	2.09	.69	.52	20461	34449	20294	36071	171.30	0.00	.60	.10	.71	122.34
W07 B0	2.10	.64	.46	16231	31693	15785	32554	144.21	0.00	.60	.10	.71	103.07
W08 B0	1.93	.60	.42	13964	28601	13420	29938	117.24	0.00	.60	.09	.73	85.09
W1A B0	2.08	.63	.42	13964	28601	13420	29938	126.30	3.70	.60	.69	.38	48.26
W3A B0	2.12	.68	.51	19440	33755	19197	35344	167.27	3.70	.60	.71	.38	62.96
W4A B0	2.10	.68	.51	19440	33755	19197	35344	165.70	3.70	.60	.70	.38	62.68
W6A B0	2.07	.63	.45	15595	30455	15117	31884	137.68	3.70	.60	.69	.38	52.67
W19 B0	2.03	.61	.43	14467	29209	13940	30576	126.98	2.80	.60	.53	.43	54.93
W4B B0	2.16	.68	.51	19440	33755	19197	35344	170.41	2.80	.60	.57	.42	71.33
W5B B0	2.10	.64	.46	16231	31693	15785	32554	144.21	2.80	.60	.55	.43	61.34
W6B B0	2.01	.66	.48	17684	32401	17323	33926	147.64	2.80	.60	.53	.43	63.98

LAMINAT-KENNWERTE UND -LASTEN ZUR ZEIT ZT

ZYLINDER	ZEIT	T	PSI	PHI	EA	EU	EAB	EUB	SIGV	A1	A2	RHO	ETA	SIGD
WK	1300.00	2.05	.65	.47	10440	30202	9818	32098	110.26	2.80	.60	.51	.44	48.67
HG	115.00	2.03	.65	.47	11879	30535	11305	32343	117.61	3.70	.60	.65	.39	46.36
W0 KL	1.00	2.05	.69	.52	18574	34069	18322	35798	159.05	0.00	.60	.10	.72	114.21
W0B KL	1.00	2.09	.69	.52	18574	34069	18322	35798	162.15	0.00	.60	.10	.72	116.03
W07 B0	1.00	2.10	.64	.46	14719	30708	14229	32267	136.31	0.00	.60	.10	.72	97.62
W08 B0	1.00	1.93	.60	.42	12661	28211	12095	29640	110.75	0.00	.60	.09	.73	80.53
W1A B0	1.00	2.08	.60	.42	12661	28211	12095	29640	119.31	3.70	.60	.68	.38	45.85
W3A B0	1.00	2.12	.68	.51	17640	33374	17322	35068	158.29	3.70	.60	.70	.38	59.92
W4A B0	1.00	2.10	.68	.51	17640	33374	17322	35068	156.79	3.70	.60	.70	.38	59.64
W6A B0	1.00	2.07	.63	.45	14141	30069	13625	31595	130.12	3.70	.60	.68	.38	50.06
W19 B0	1.00	2.03	.61	.43	13117	28820	12564	30282	119.97	2.80	.60	.53	.43	52.15
W4B B0	1.00	2.16	.68	.51	17640	33374	17322	35068	161.25	2.80	.60	.57	.42	67.84
W5B B0	1.00	2.10	.64	.46	14719	30708	14229	32267	136.31	2.80	.60	.55	.43	53.28
W6B B0	1.00	2.01	.66	.48	16040	32019	15621	33645	139.62	2.80	.60	.53	.44	60.81

Zyl.Nr.	B.F.	VD	F <sub>L</sub> /F <sub>K</sub>	vorh. $\bar{\sigma}$	vorh. $\bar{\sigma}_{L/vorh.\bar{\sigma}_K}$	A <sub>I</sub>	K <sub>iK/K<sub>iL</sub></sub>
-	-	-	$\frac{\sigma}{\sigma}$	N/mm <sup>2</sup>	-	-	-
14	A	K	-	65,6	1,0	1,0	1,0
15	A	L1	60	59,7	0,91	1,1	1,13
16	A	L3	70	50,1	0,76	1,31	1,38
17	A	K	-	72,5	1,0	-	-
18	A	L2	50	59,7	0,82	1,21	1,22
19	A	K	-	86,8	1,0	-	-
20	A	L2	50	73,9	0,85	1,18	1,18
31	B	K	-	36,9	1,0	-	-
32	B	L1	77	39,6	1,07	-	-
33	B	L1	55	41,2	1,12	-	-
34	B	L2	50	40,7	1,1	-	-
35	B	K	-	39,2	1,0	-	-
36	B	L2	60	32,4	0,83	1,21	1,22
37	B	L1	60	35,7	0,91	1,10	1,22
38	B	L1	50	37,1	0,95	1,06	1,16
41	B	K	-	38,9	1,0	-	-
42	B	L1	50	39,3	1,01	-	1,0
43	B	L2	60	32,4	0,83	1,2	1,24
44	B	L1	50	43,6	1,12	-	1,0
45	B	K	-	41,9	1,0	-	-
46	B	L1	50	45,5	1,09	-	1,04
47	B	L1	50	47,8	1,14	-	-
48	B	L2	50	31,8	0,76	1,32	1,32
50	B	K	-	43,9	1,0	-	-
51	B	L2	60	42,3	0,96	1,04	1,12
52	B	K	-	43,1	0,98	1,02	-

Zyl.Nr.	B.F.	VD	F <sub>L</sub> /F <sub>K</sub>	vorh. $\bar{\sigma}$	vorh. $\bar{\sigma}_{L/vorh.\bar{\sigma}_K}$	A <sub>I</sub>	K <sub>iK/K<sub>iL</sub></sub>
-	-	-	$\frac{\sigma}{\sigma}$	N/mm <sup>2</sup>	-	-	-
2	A	K	-	53,0	1	-	-
3	A	L1	50	58,1	1,1	-	1,12
4	A	L3	50	53,5	1,01	-	1,38
5	A	K	-	52,4	1,0	-	-
6	A	L1	50	49,0	0,94	1,07	1,08
7	A	L2	50	48,3	0,92	1,08	1,17
8	A	K	-	66,0	1,0	-	-
9	A	L1	50	53,2	0,81	1,24	1,27
10	A	K	-	57,8	1,0	-	-
11	A	L1	50	50,6	0,88	1,14	1,18
12	A	K	-	59,1	1,0	-	-
13	A	L2	50	49,2	0,83	1,20	1,3
55	B	K	-	54,7	1,0	-	-
56	B	K	-	57,5	1,05	-	-
57	B	L1	50	46,1	0,84	1,19	1,4
58	B	K	-	64,2	1,0	-	-
59	B	K	-	66,3	1,03	-	-
60	B	L1	50	50,9	0,79	1,26	1,24

Vergleich der Beullasten Kurzzeitversuch/Langzeitversuch

Tabelle 5c

Zusammenstellung der Abbildungen

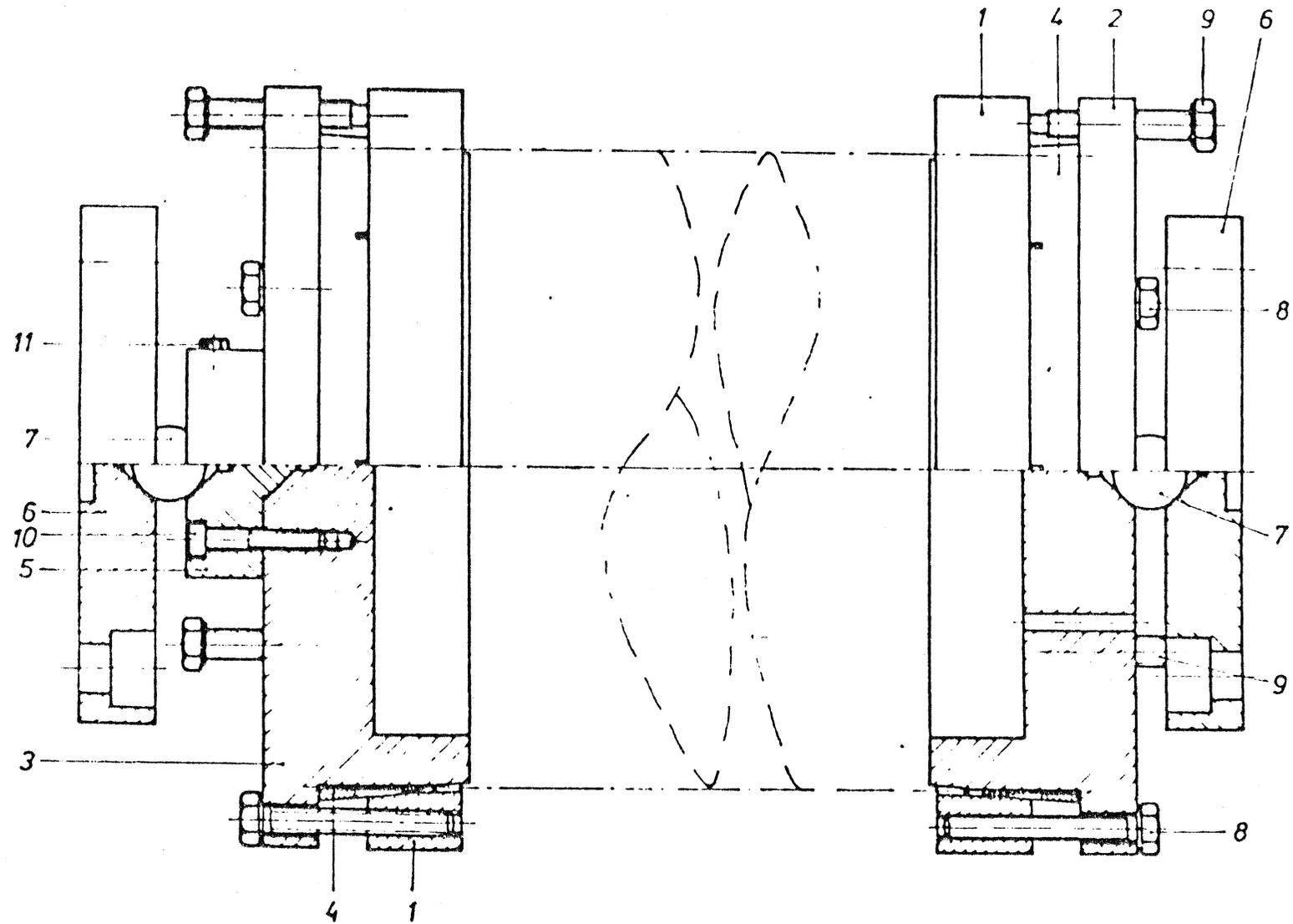
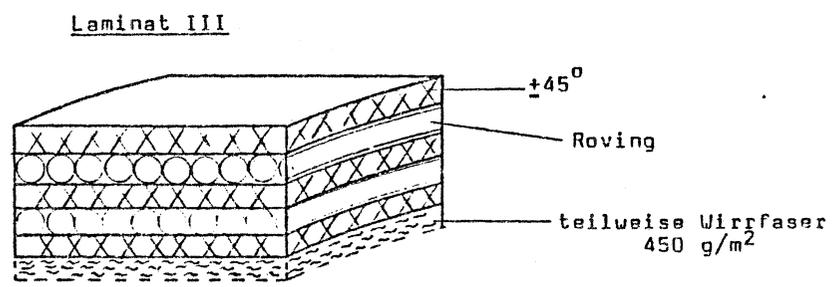
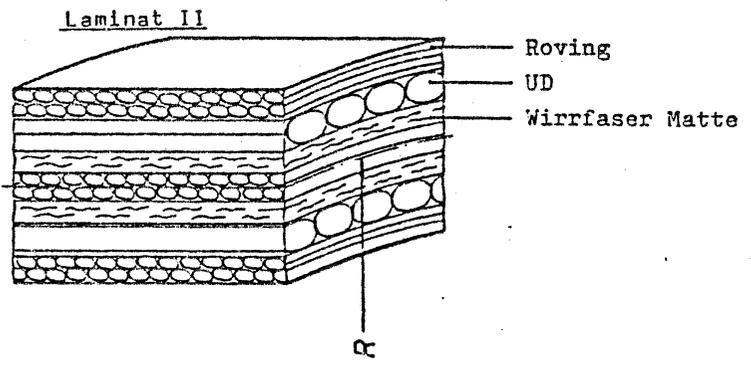
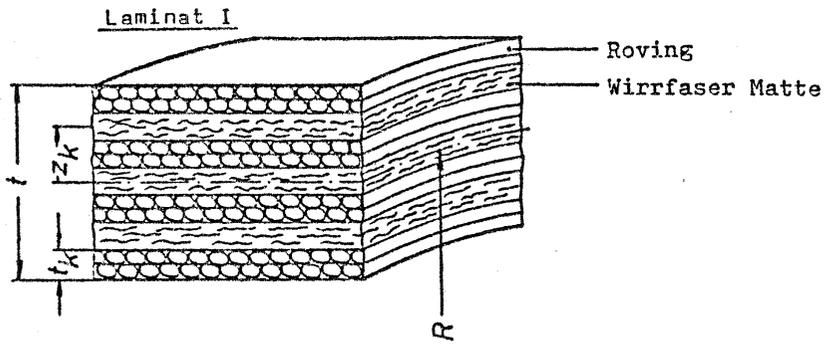


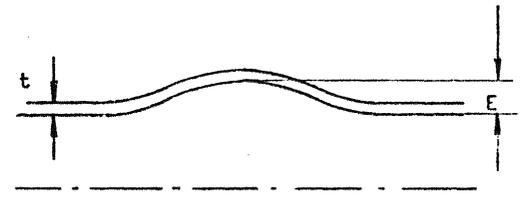
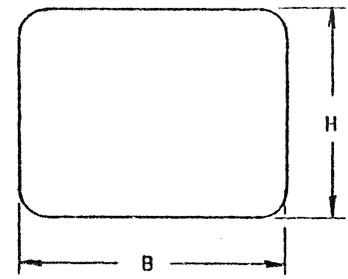
Abb. 1 Einspannvorrichtung für zentrische Druckbeanspruchung



Vorbeulformen

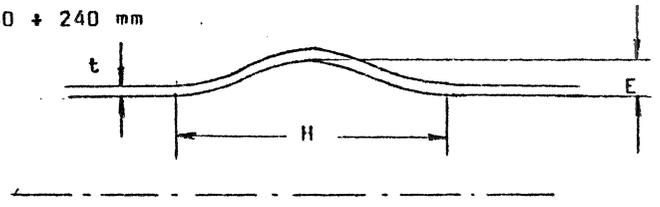
Beulenform A ( Einzelbeule )

$B \times H$   
250 x 140  
140 x 80  
 $E = 2 + 4 \text{ mm}$



Beulenform B ( Ringbeule nach außen )

$H = 80 + 240 \text{ mm}$



Beulenform C ( Ringbeule nach innen )

$H = 80 + 120 \text{ mm}$

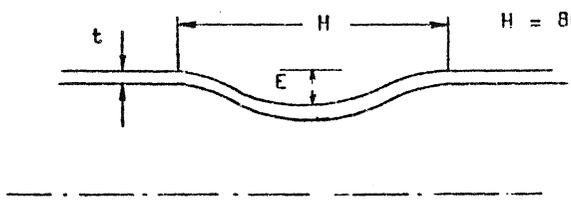
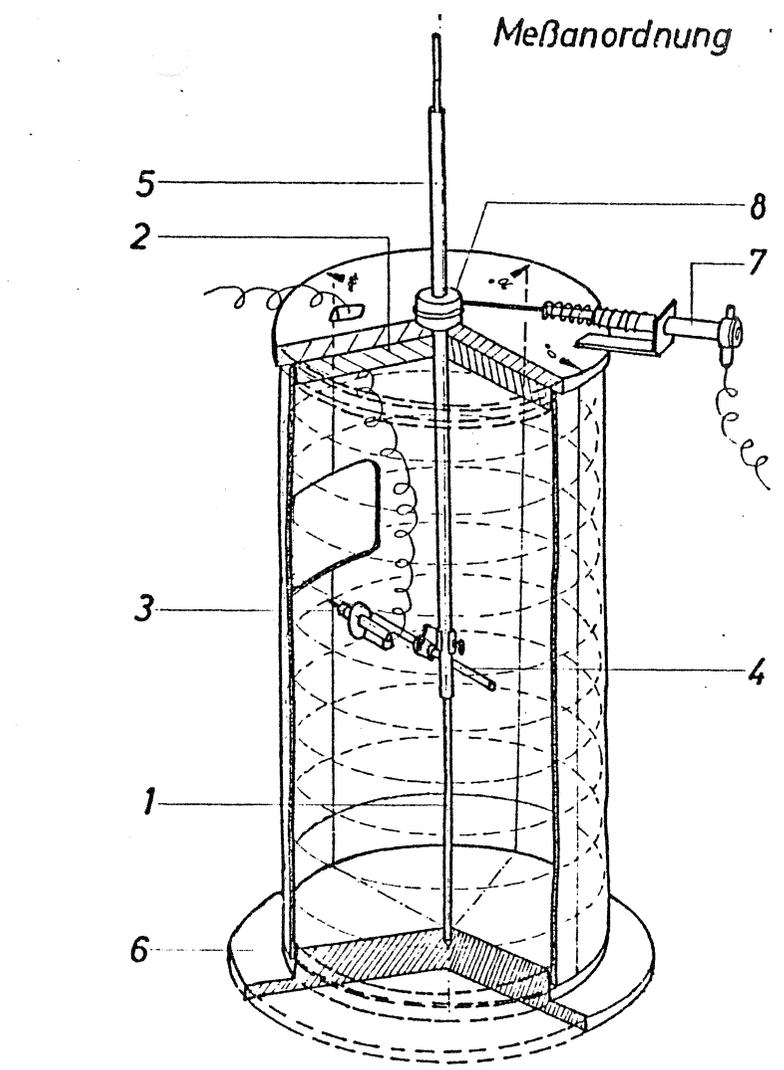
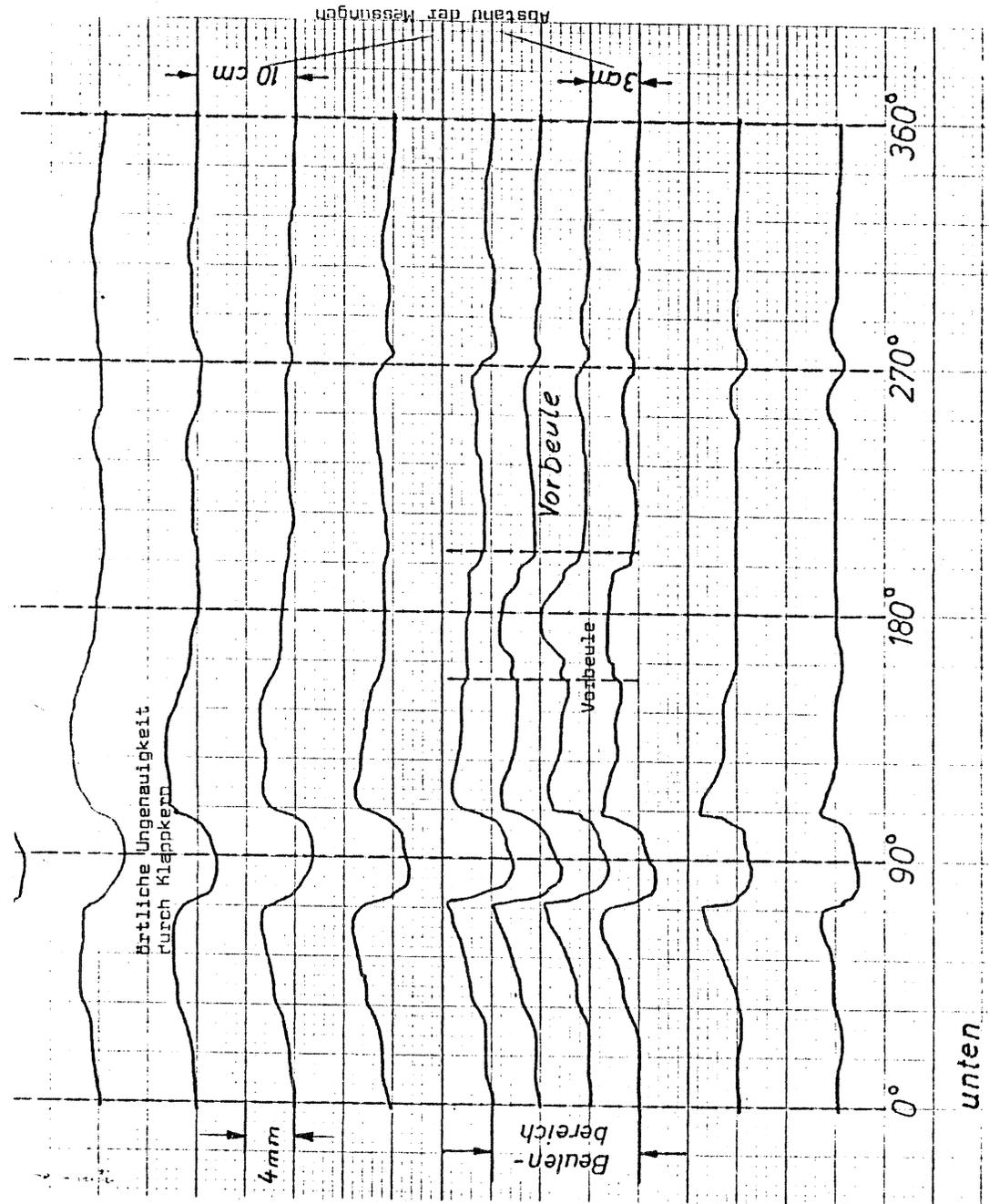


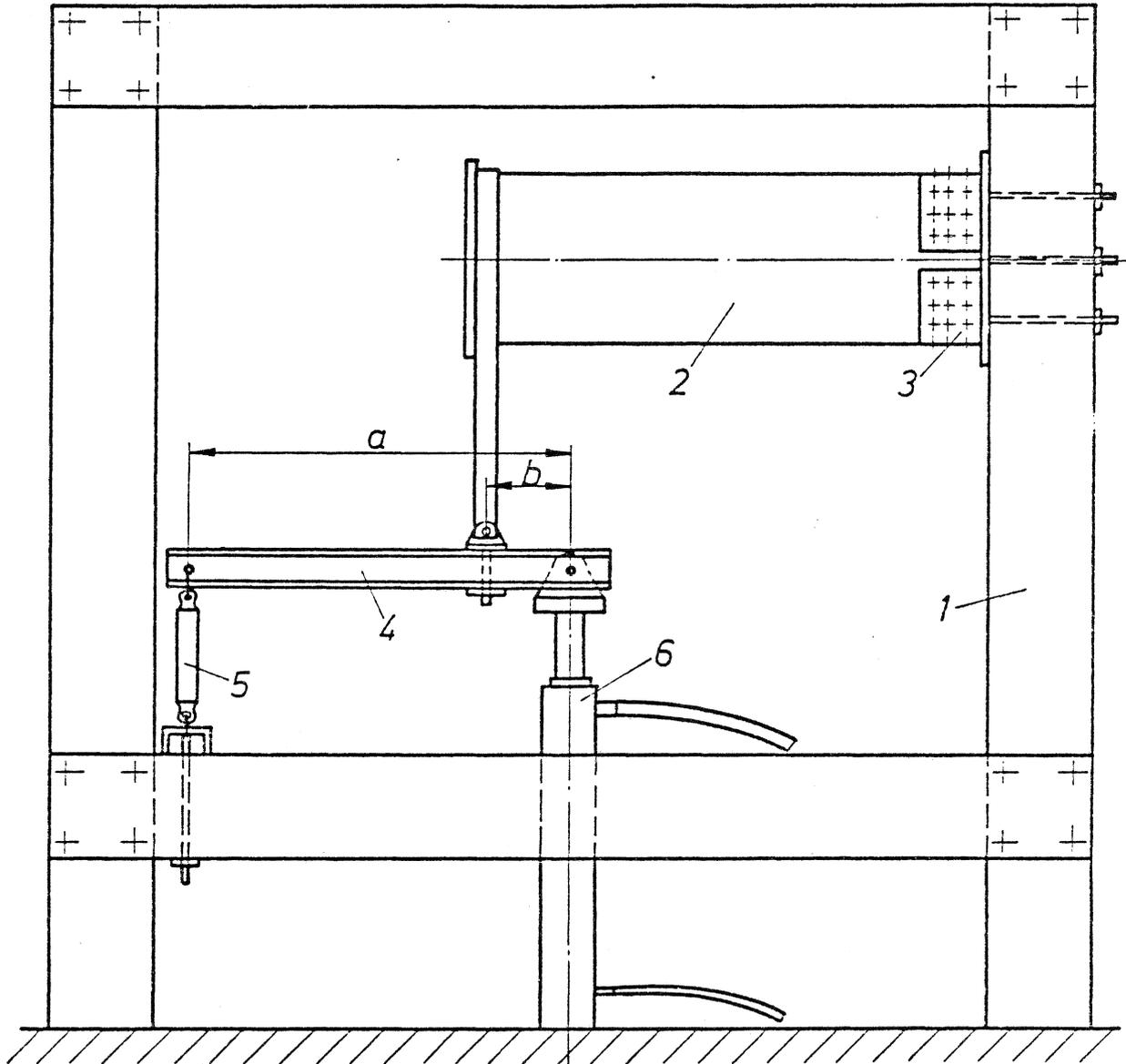
Abb. 2



- Pos.1 Zentrierstab
- Pos.2 Holzronde
- Pos.3 induktiver Wegaufnehmer
- Pos.4 Befestigungsgestänge
- Pos.5 Führungsrohr
- Pos.6 Stahlronde
- Pos.7 induktiver Wegaufnehmer
- Pos.8 Holztrommel

Abb. 3

Versuchsaufbau Querkraftbiegung



- 1 - Rahmen
- 2 - Zylinderschale
- 3 - Einspannung
- 4 - Belastungsgeschirr
- 5 - Kraftmeßdose
- 6 - Hydraulikzylinder mit Ölleitungen

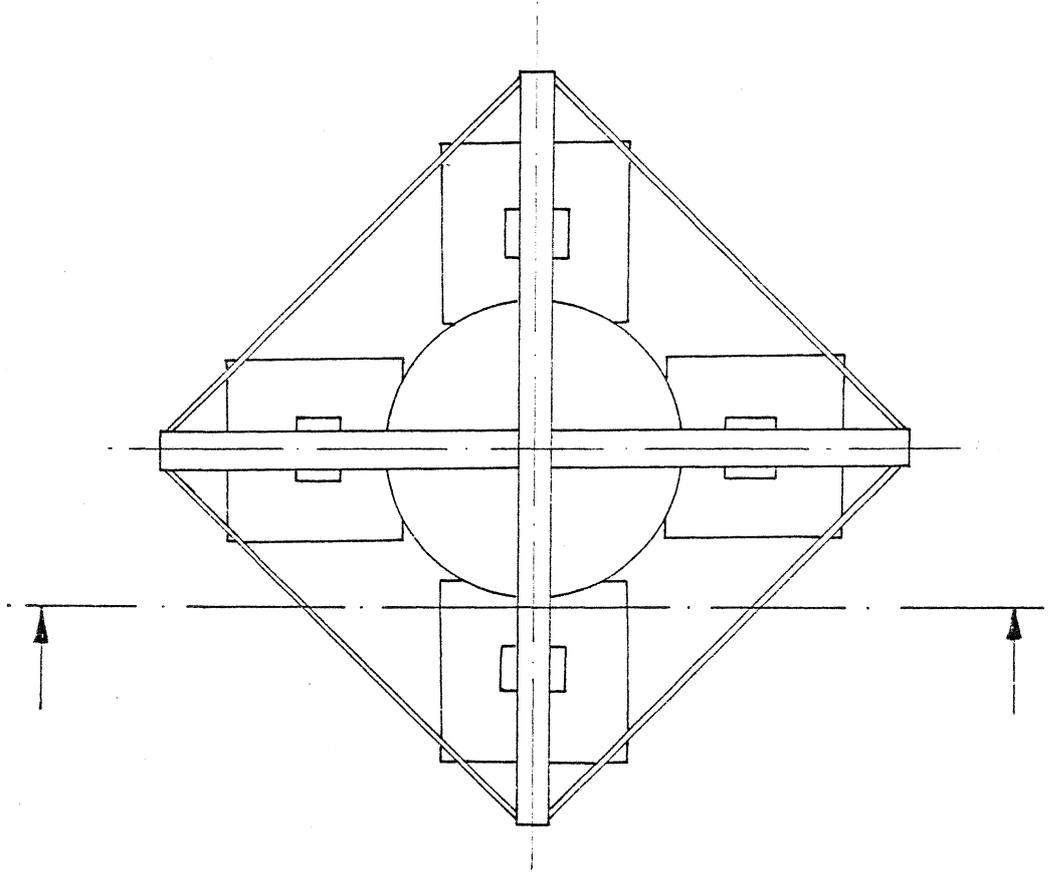
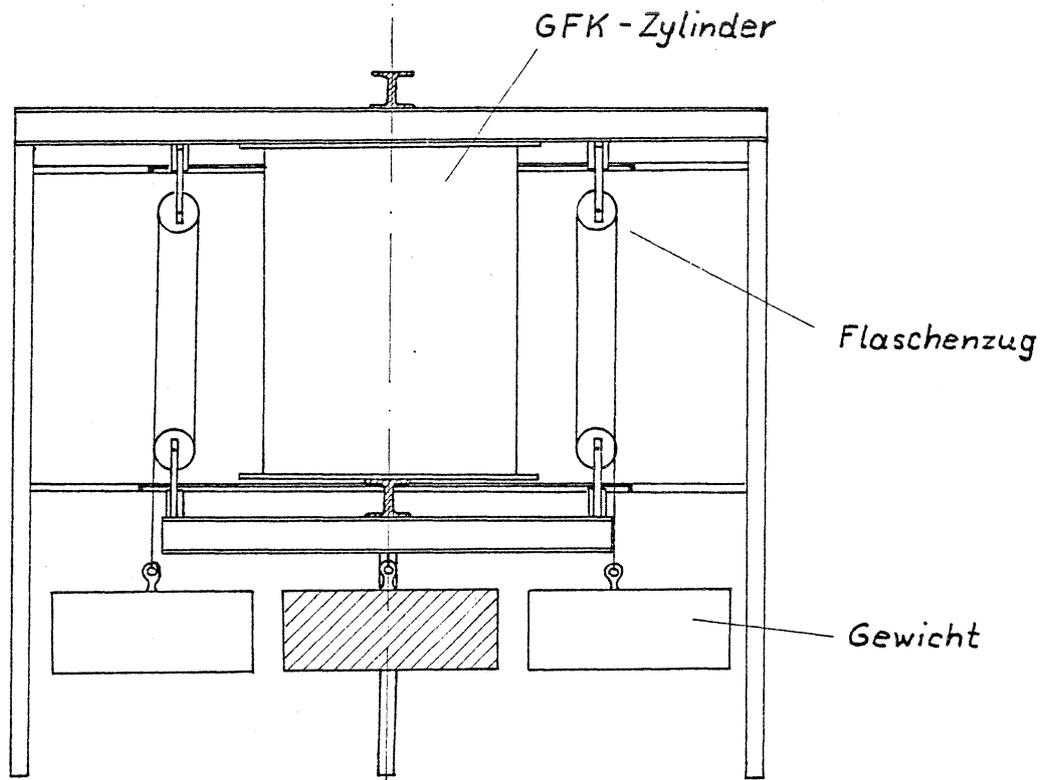
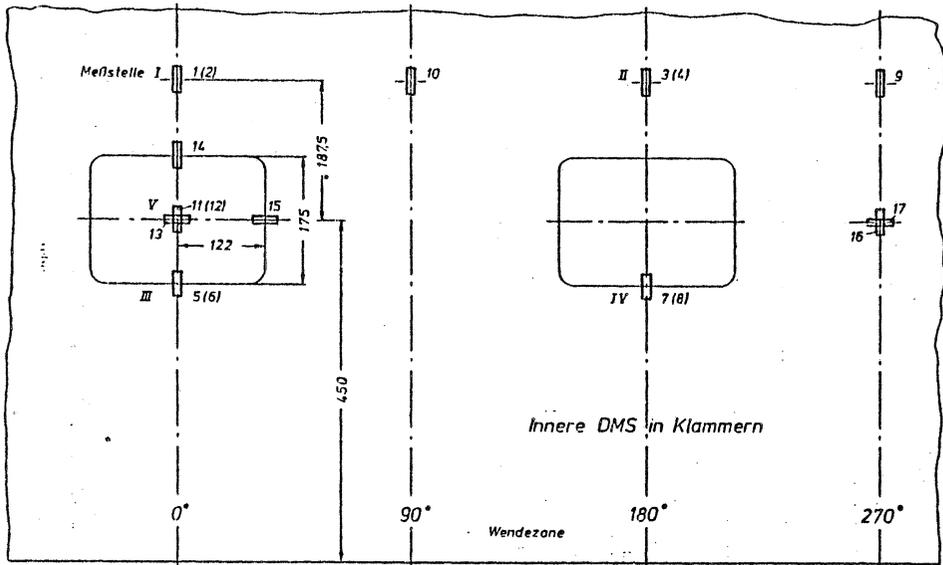
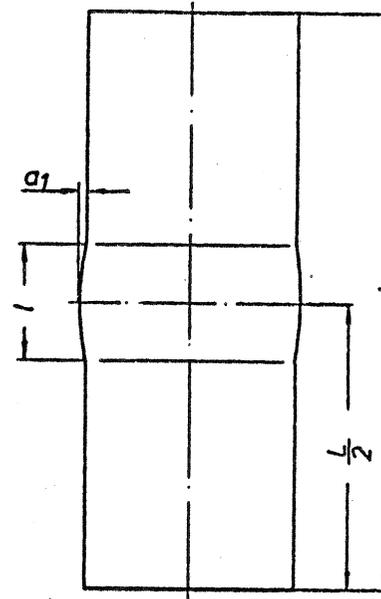


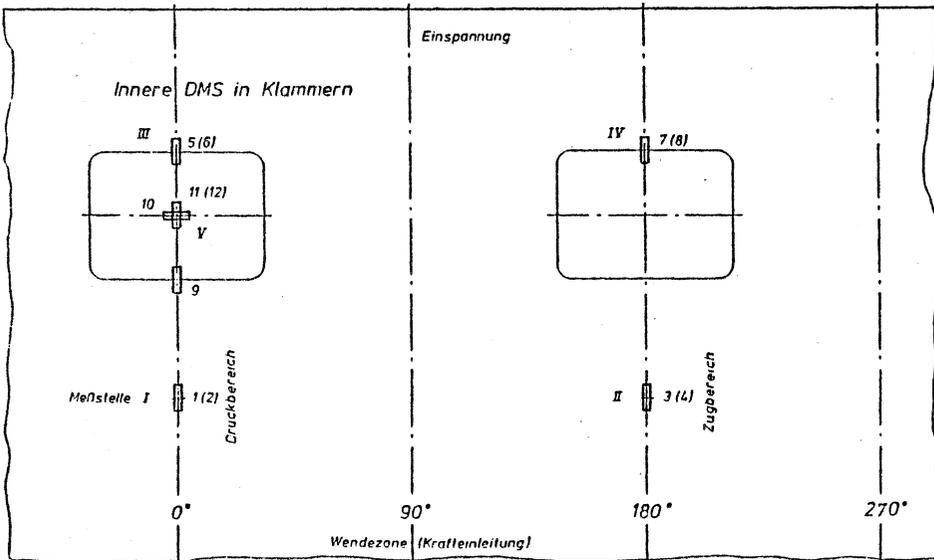
Abb. 5



Anordnung der DMS bei den axial gedrückten Zylindern

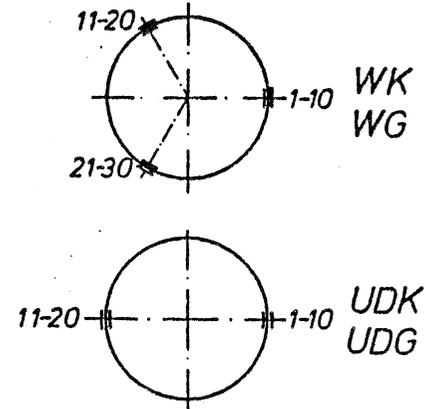


R = 200 mm  
 t = 2 mm  
 L = 1050 mm



Anordnung der DMS bei den auf Biegung beanspruchten Zylindern

Lage der DMS



Anordnung der DMS Axialdruck

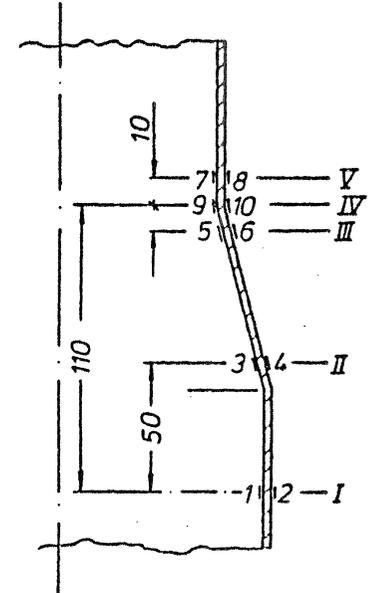
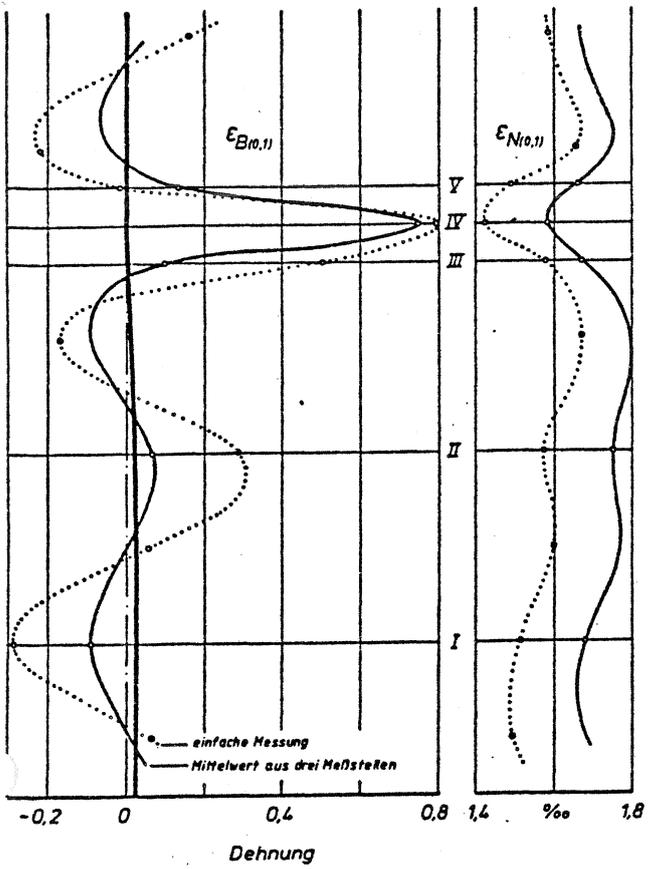
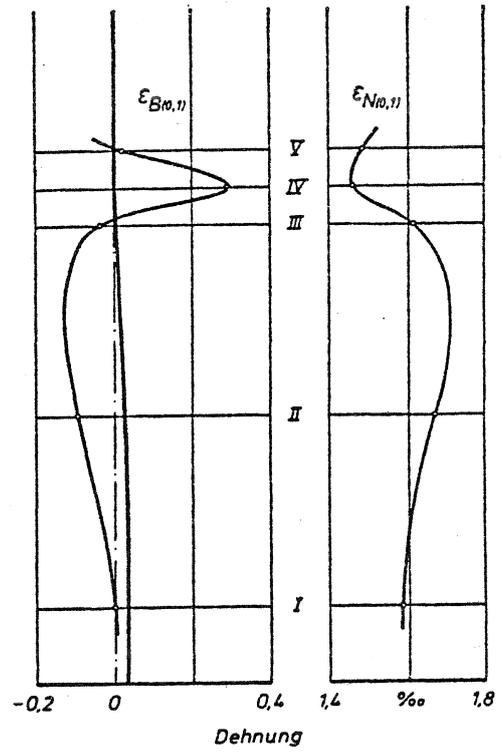


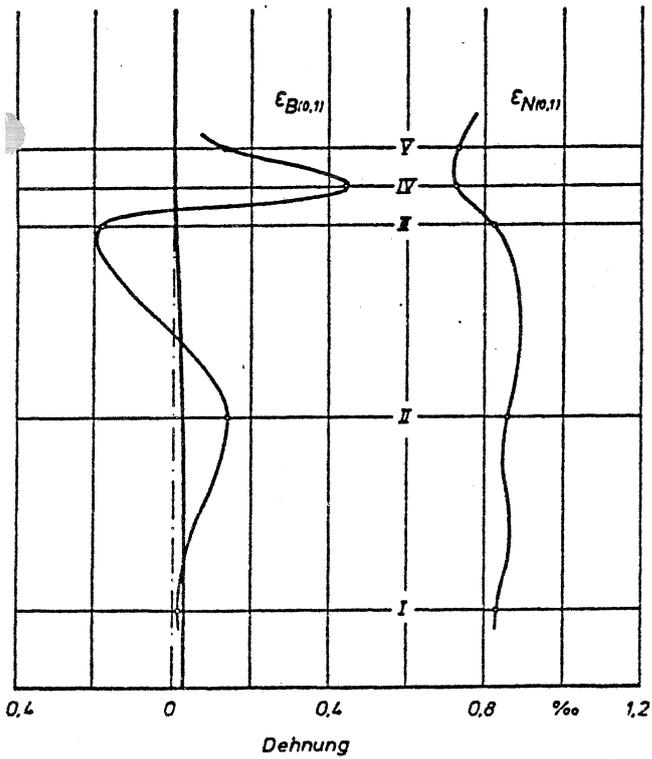
Abb. 6



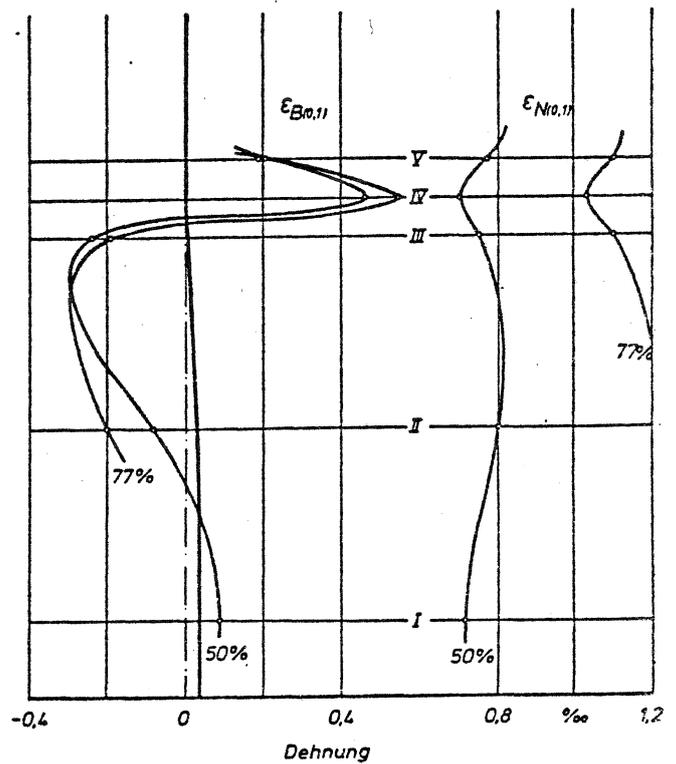
Dehnung entlang der Vorbeule WK  
 W = Laminat II K = klein



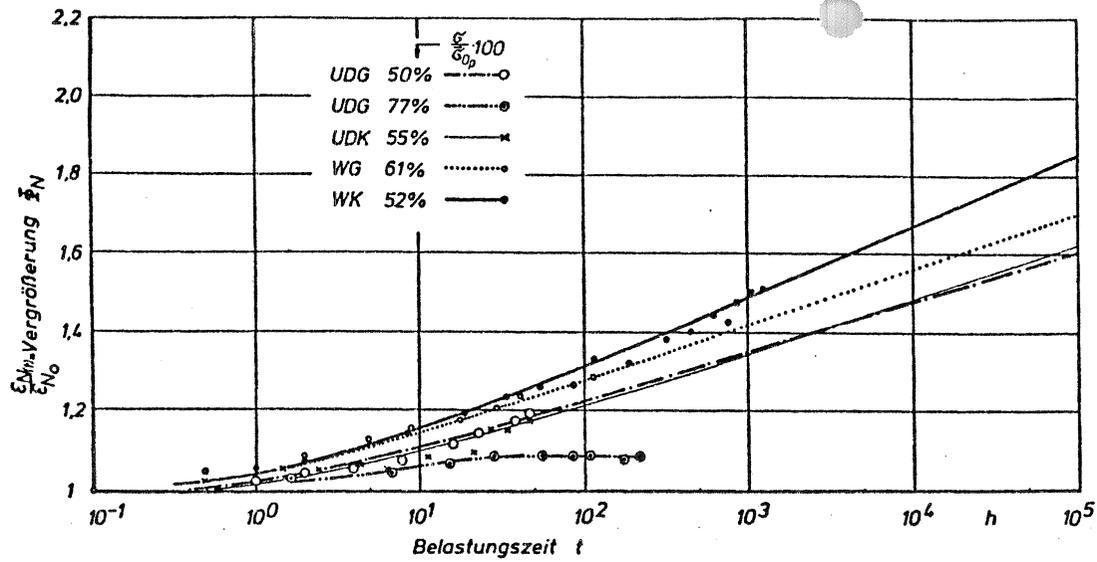
Dehnung entlang der Vorbeule WG  
 G = groß



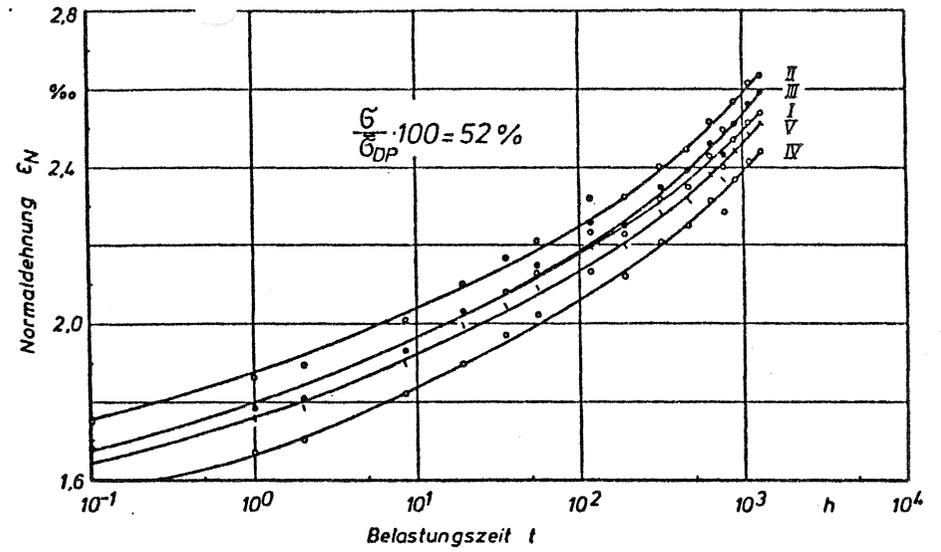
Dehnung entlang der Vorbeule UDK  
 UD = Laminat I



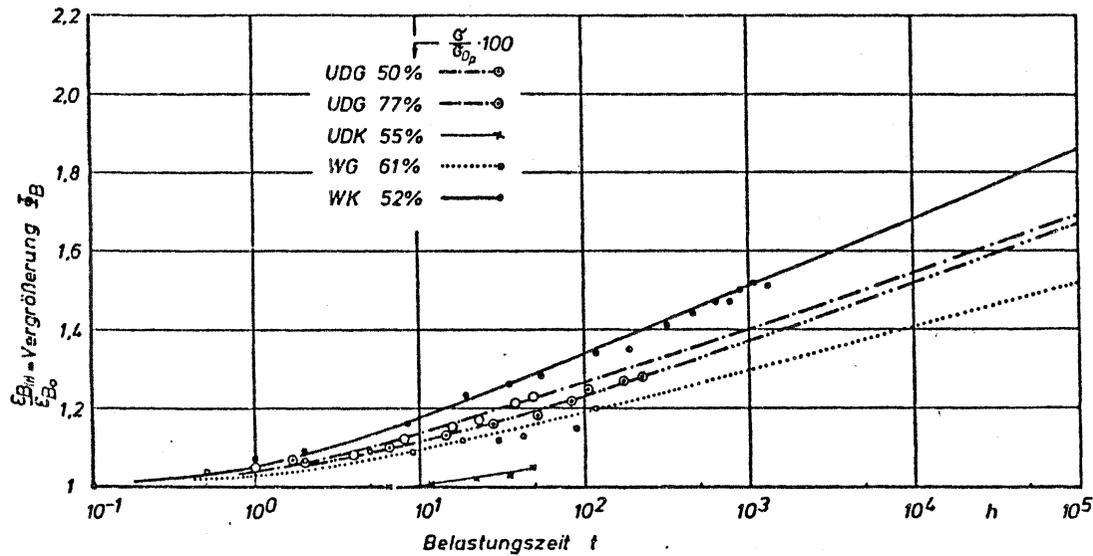
Dehnung entlang der Vorbeule UDG  
 Abb. 7



Kriechfunktion



Zeitdehnlinien WK



Kriechfunktion

WK:  $F = 6 \cdot 9,81 \text{ kN}$ ,  $\sigma = \frac{F}{A} = 22,85 \text{ N/mm}^2$ ,  $k' = \frac{22,85}{44} \cdot 100 = 52 \%$

$k'$  ist die aus  $F$  resultierende Spannung, bezogen auf die in 3.2.3 erwähnte Durchschlagnaast, ausgedrückt in Prozent.

zt/h	0,1	1	2	8,5	19	34,5	54,5	117	189
Meßst.				$\epsilon_N \cdot 10^6$	$\epsilon_B \cdot 10^6$				
I	1681	1786	1821	1933	2028	2087	2132	2238	2228
	-83	-113	-114	-128	-136	-146	-146	-150	-164
II	1753	1858	1893	2010	2104	2167	2211	2321	2316
	70	66	69	68	70	60	57	57	58
III	1671	1777	1809	1932	2026	2091	2145	2260	2251
	100	99	98	84	76	62	63	52	51
V	1662	1757	1786	1902	1996	2047	2089	2206	2196
	136	128	129	122	117	113	107	112	101
IV	1581	1672	1704	1817	1902	1974	2025	2137	2118
	750	801	819	867	919	944	957	1003	1016
$\bar{\epsilon}_N$	1,06	1,08	1,15	1,20	1,24	1,27	1,34	1,33	
$\bar{\epsilon}_B$	1,003	1,004	1,004	1,005	1,008	1,012	1,014	1,012	
$\bar{\epsilon}_{BIV}$	1,07	1,08	1,16	1,23	1,26	1,28	1,34	1,35	
zt/h	310	457	629	774	886	1076	1296		
I	2319	2352	2426	2395	2474	2515	2544		
	-170	-179	-180	-186	-187	-180	-178		
II	2405	2444	2515	2489	2568	2614	2631		
	55	55	54	50	47	48	49		
III	2347	2389	2461	2433	2514	2563	2591		
	40	33	36	24	19	20	17		
V	2286	2318	2392	2366	2449	2488	2519		
	94	90	85	83	88	93	86		
IV	2210	2249	2314	2287	2369	2413	2437		
	1054	1078	1105	1106	1126	1138	1135		
$\bar{\epsilon}_N$	1,39	1,41	1,45	1,43	1,48	1,51	1,52		
$\bar{\epsilon}_B$	1,014	1,017	1,017	1,016	1,018	1,020	1,021		
$\bar{\epsilon}_{BIV}$	1,41	1,44	1,47	1,47	1,50	1,52	1,51		

Abb. B

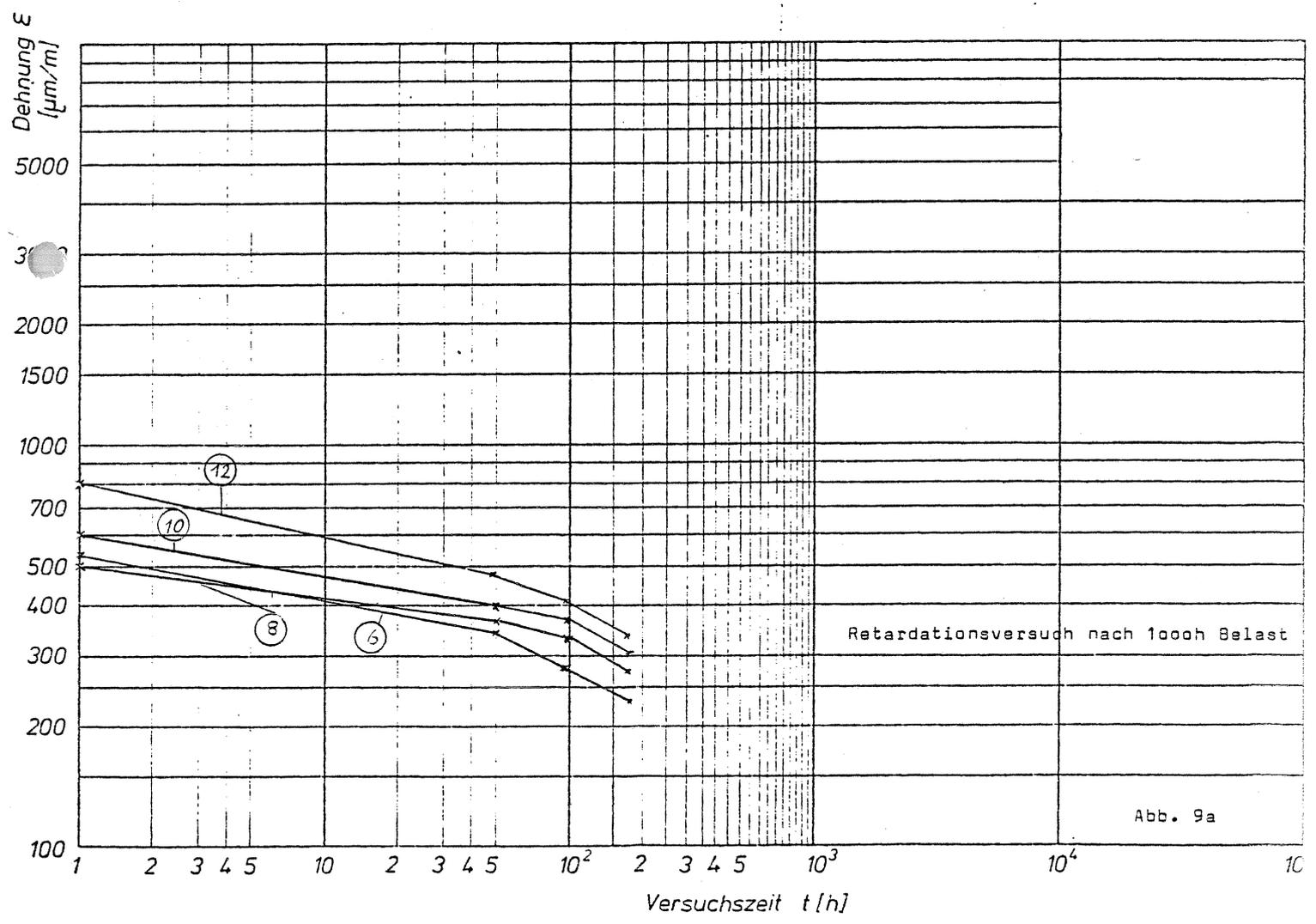
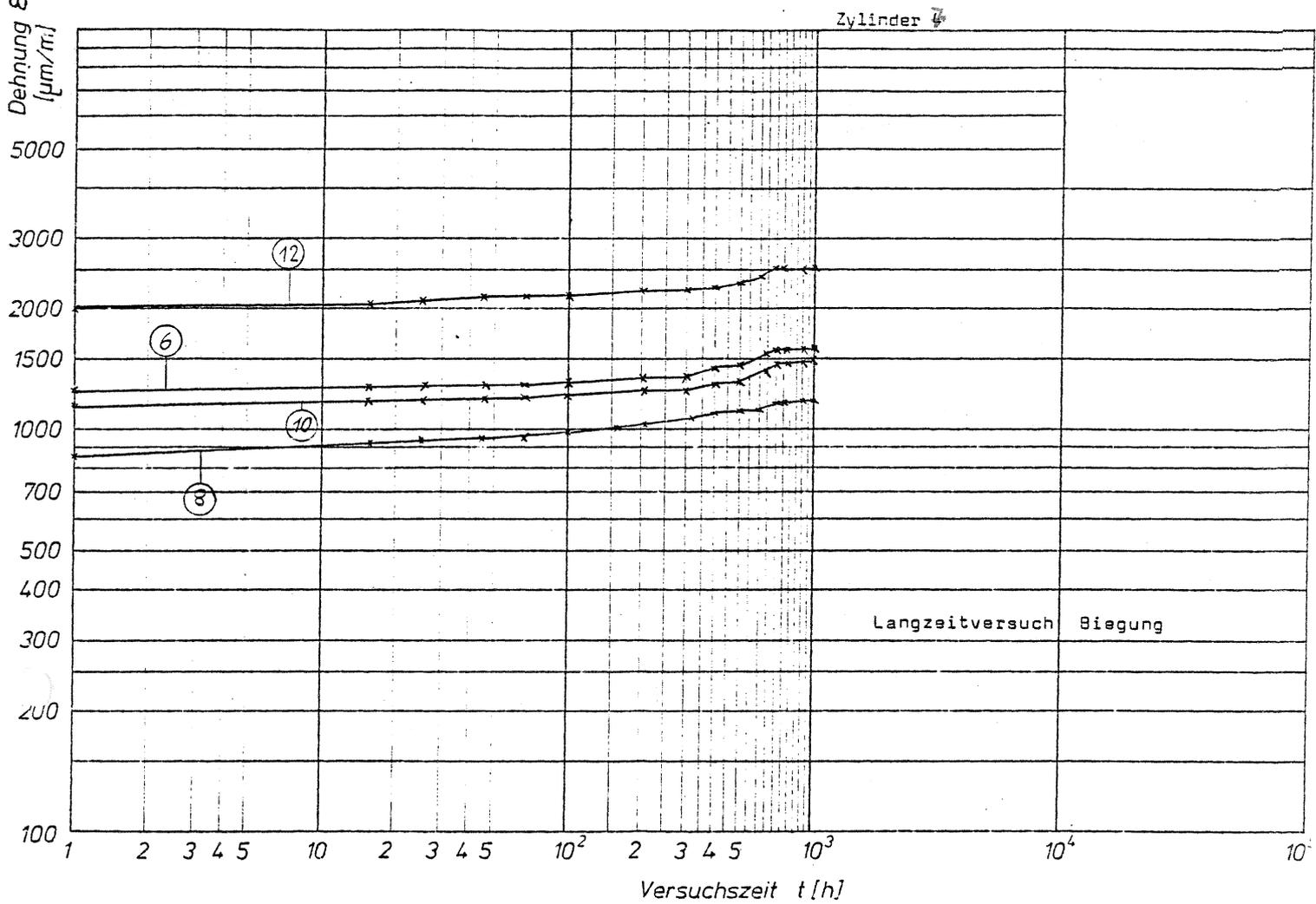


Abb. 9a

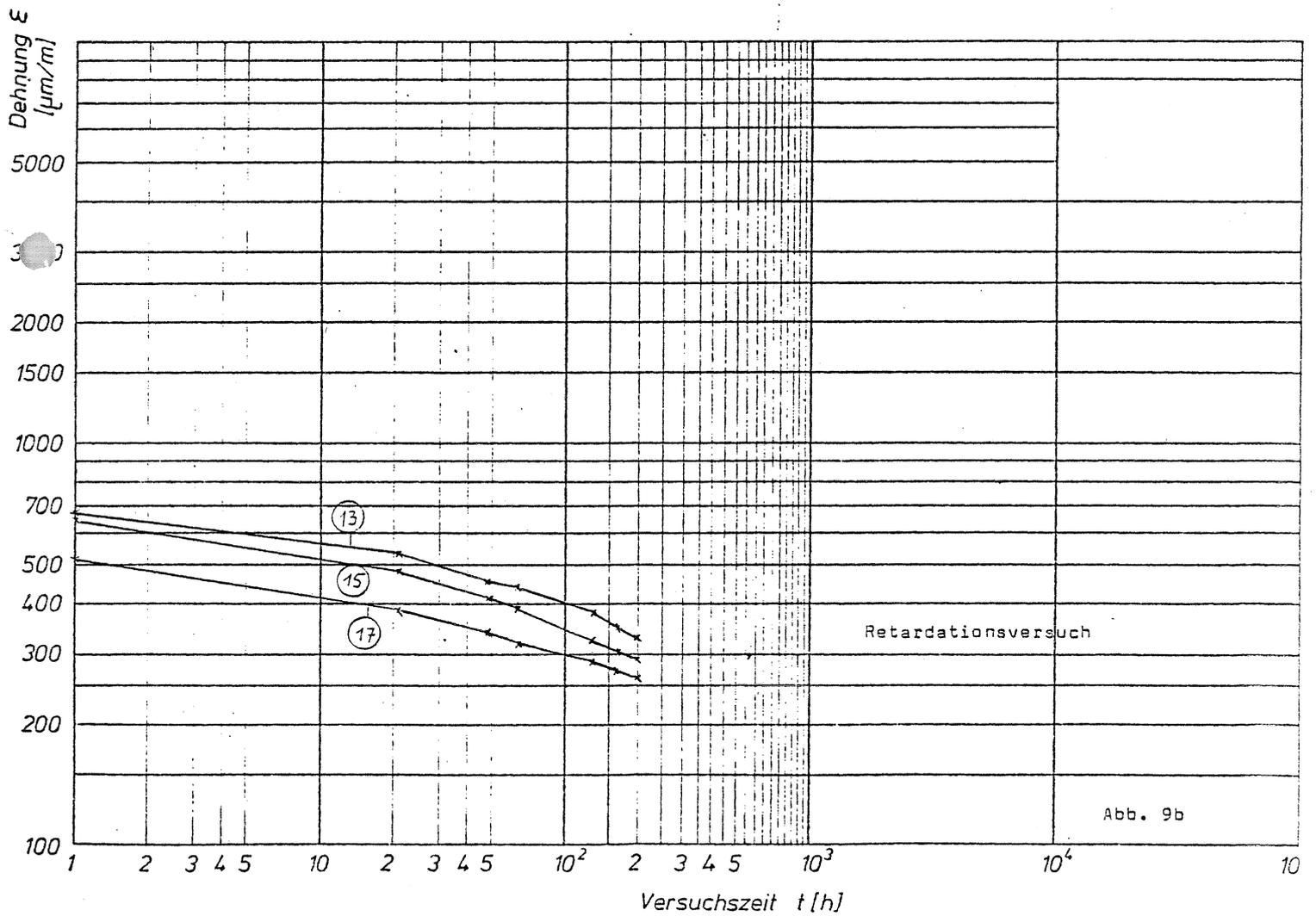
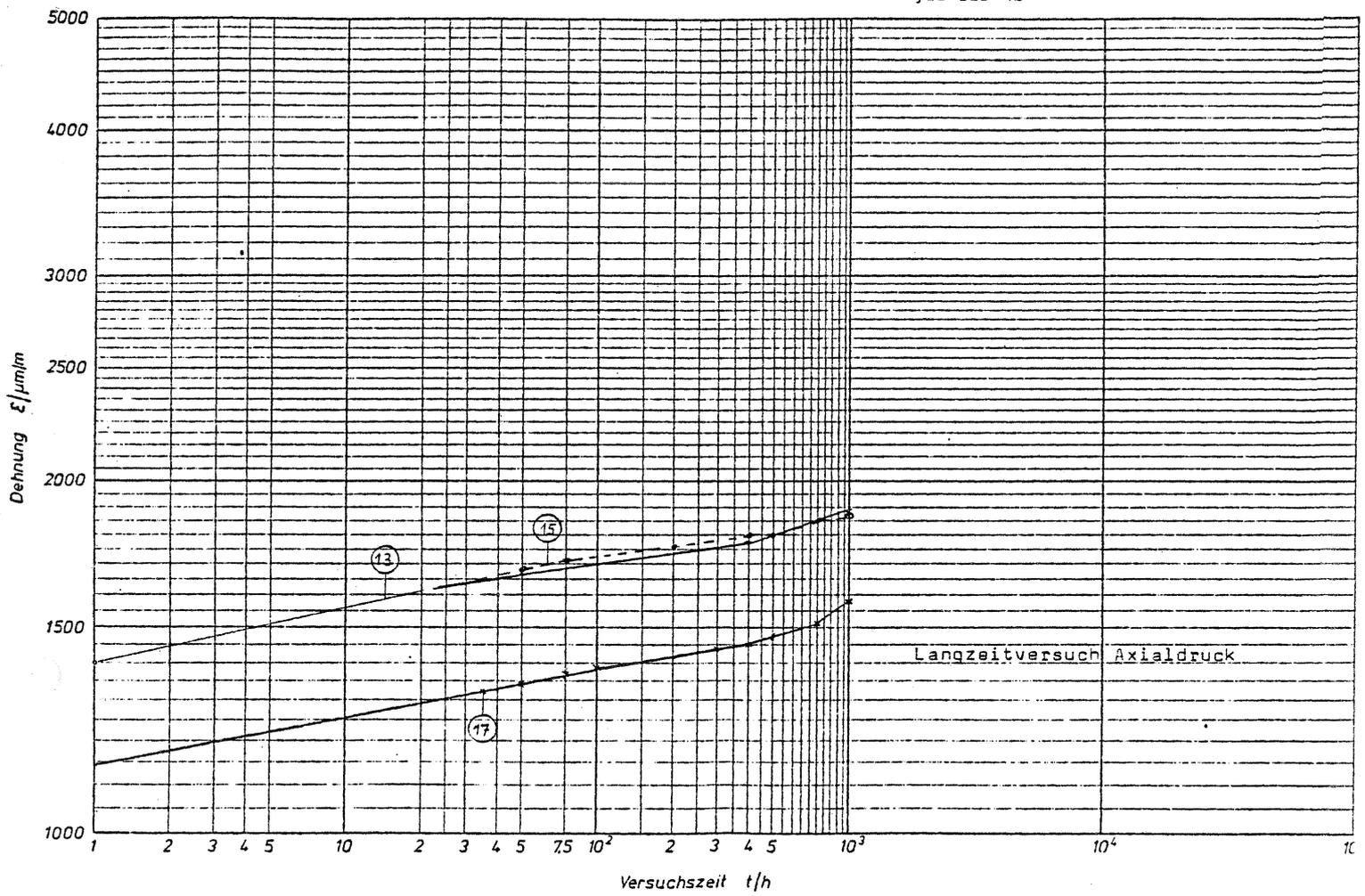


Abb. 9b

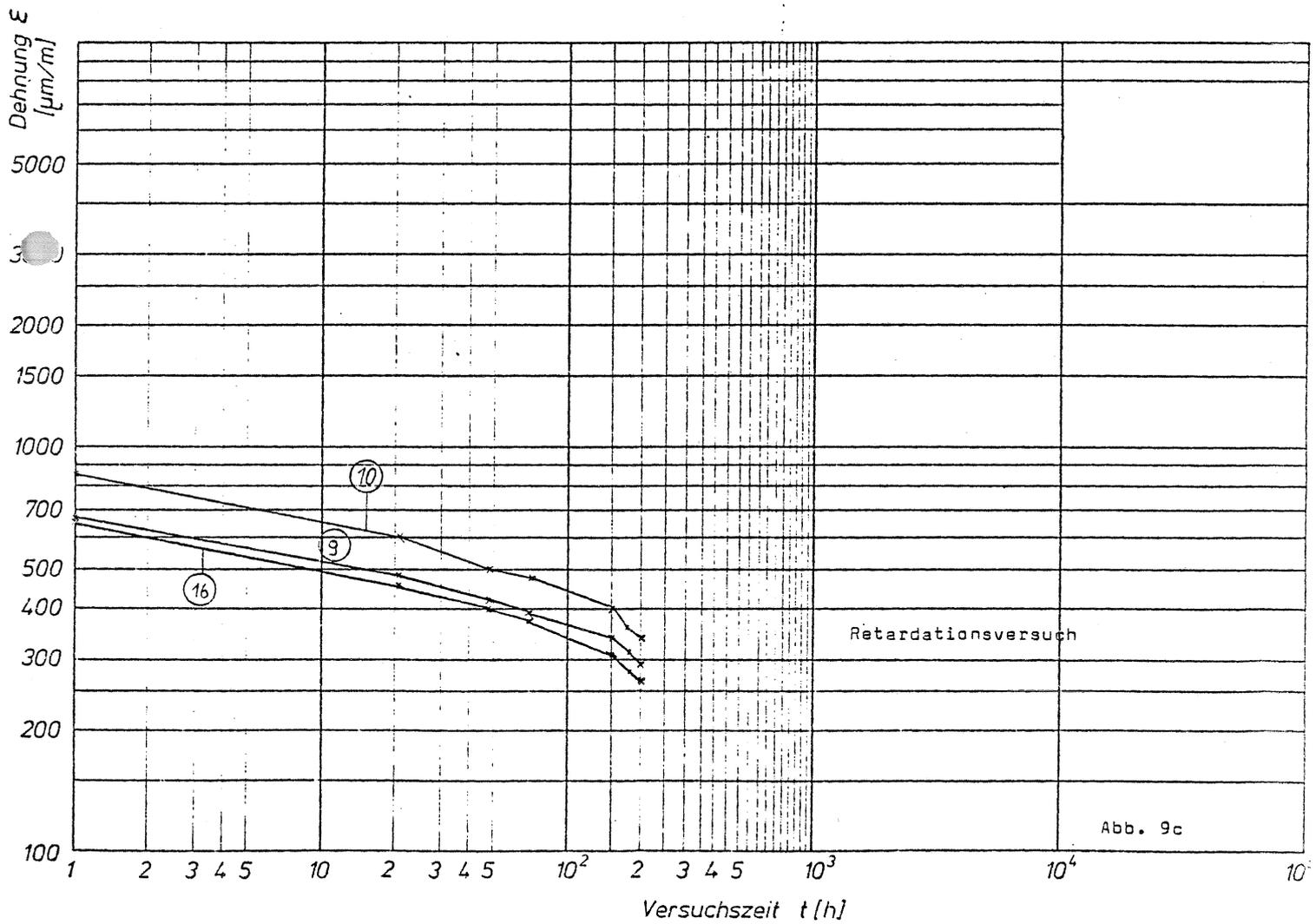
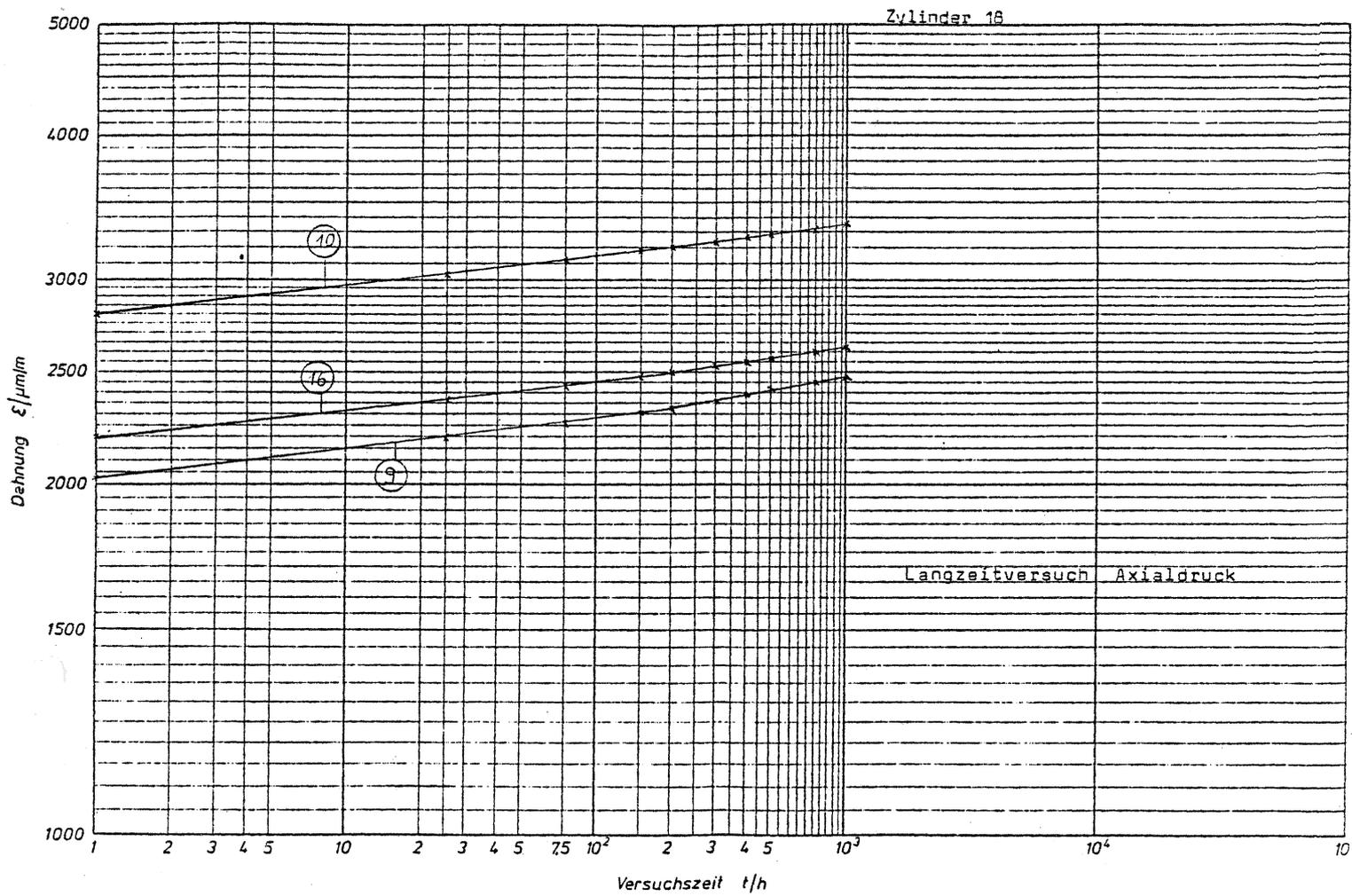
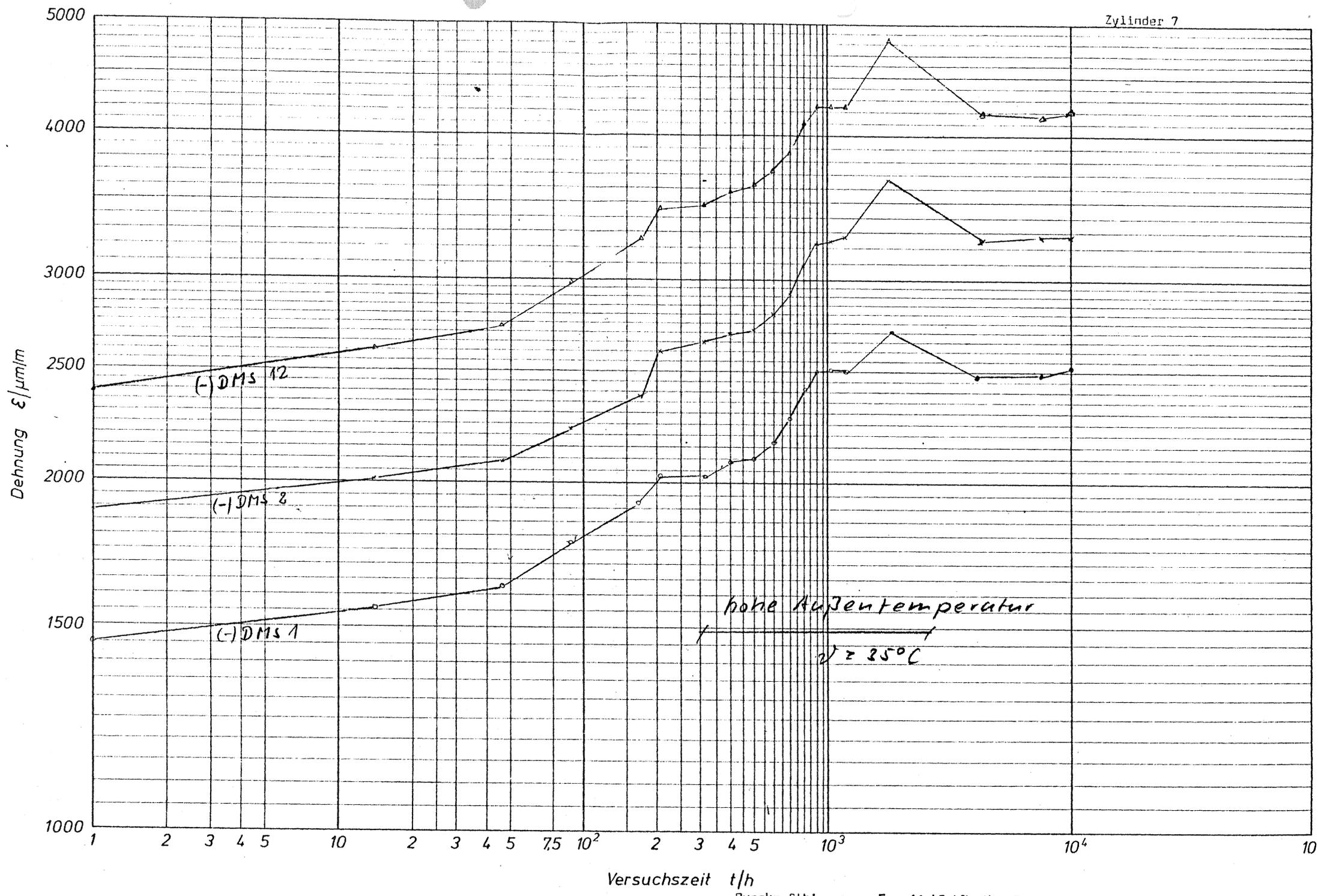


Abb. 9c



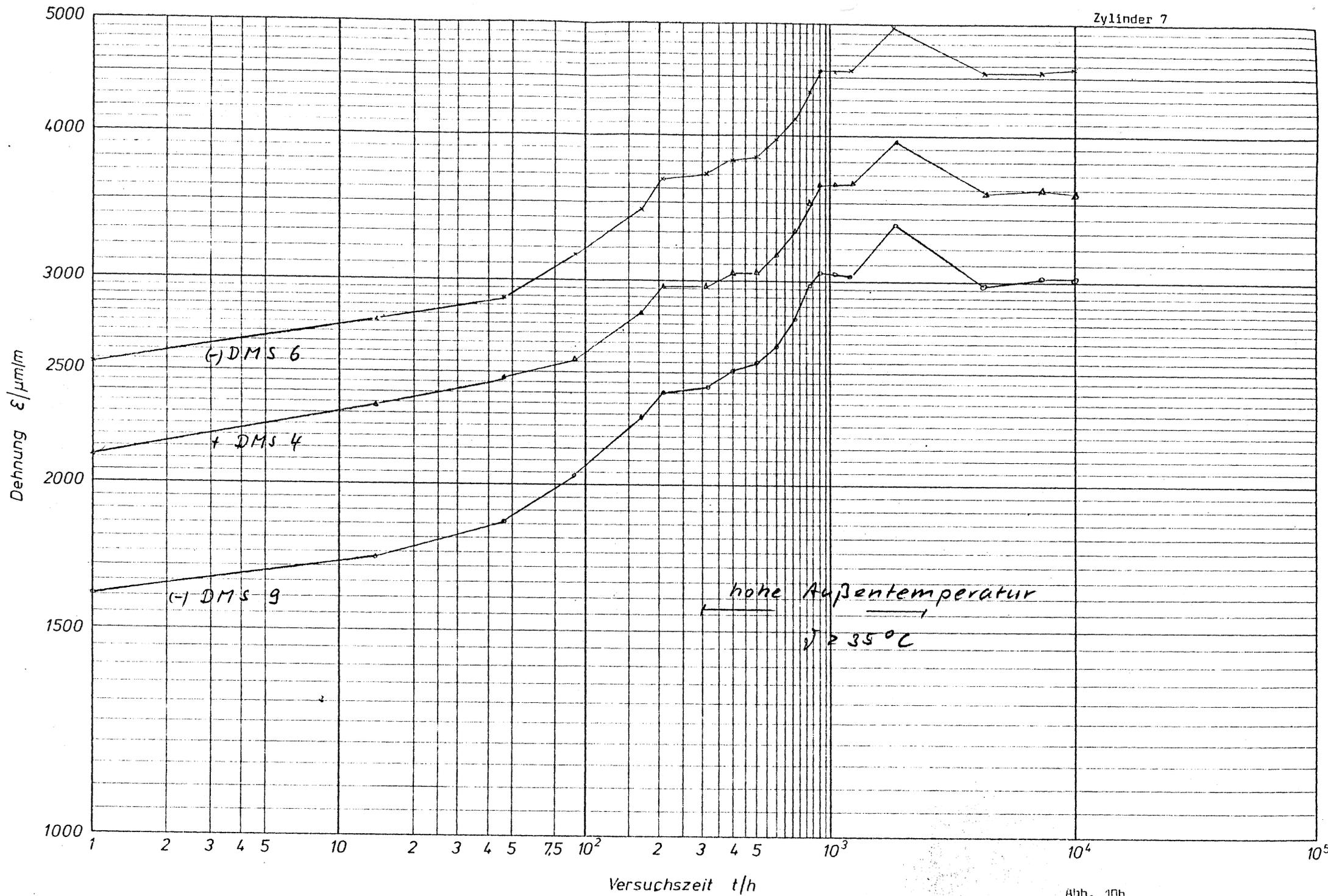
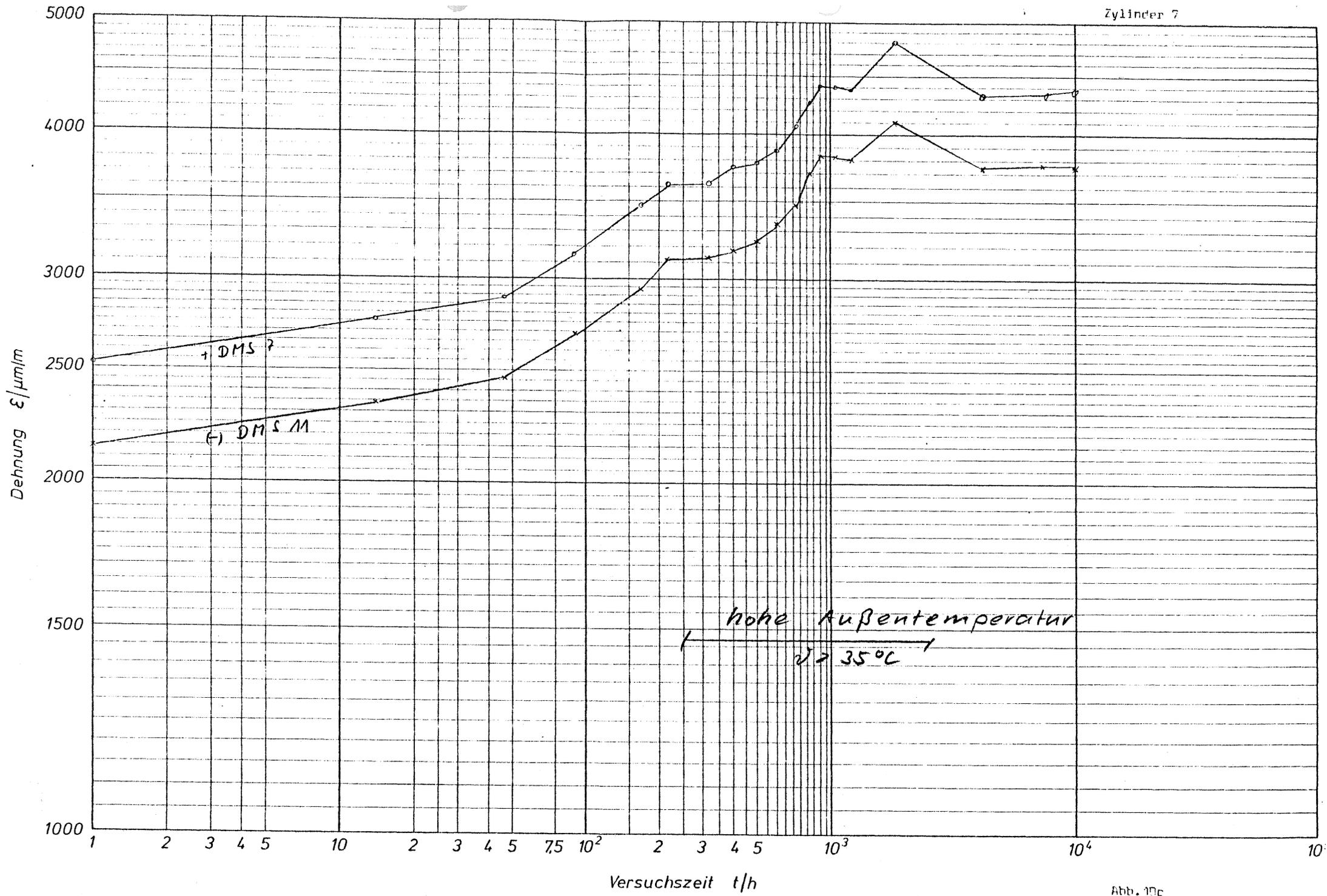
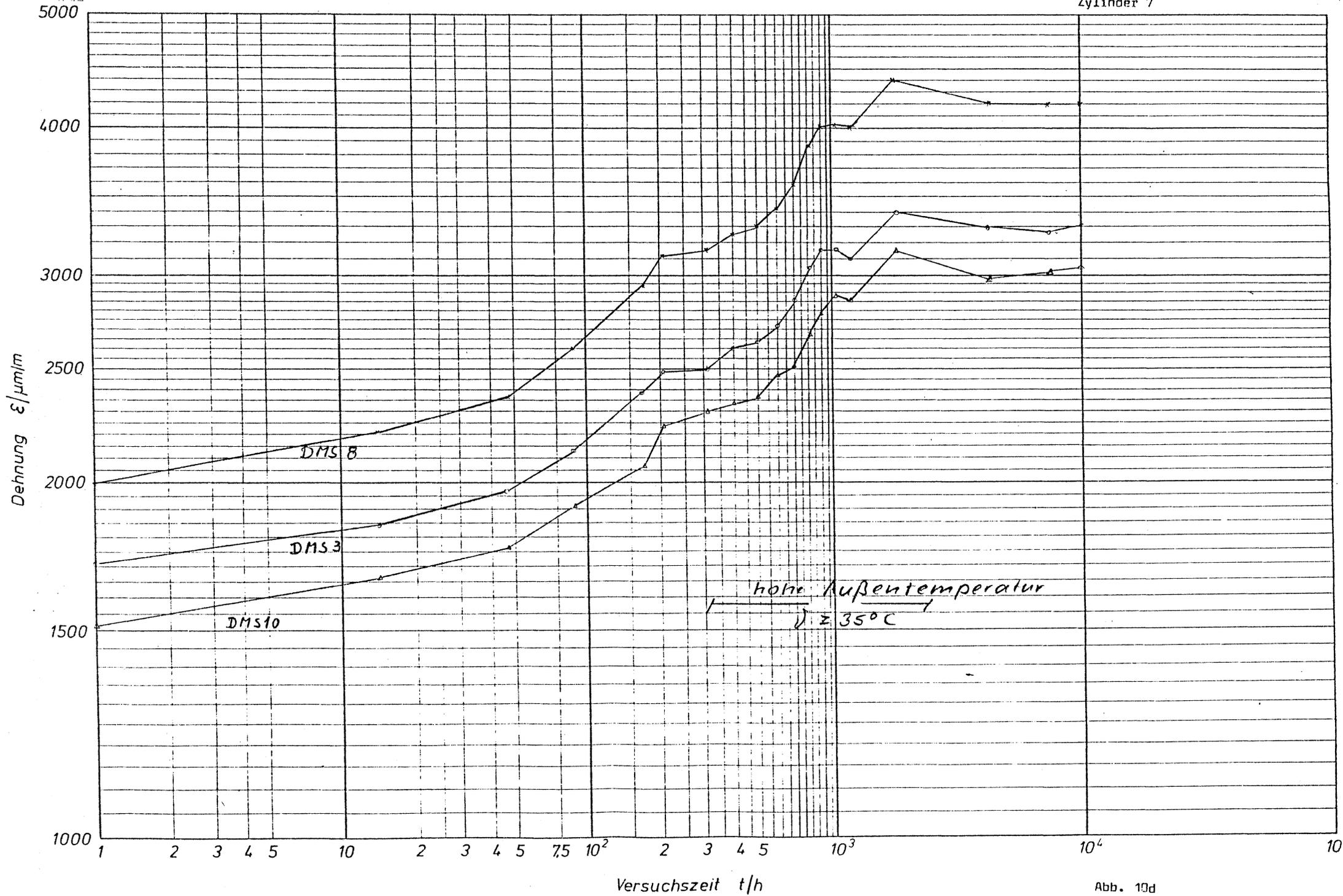
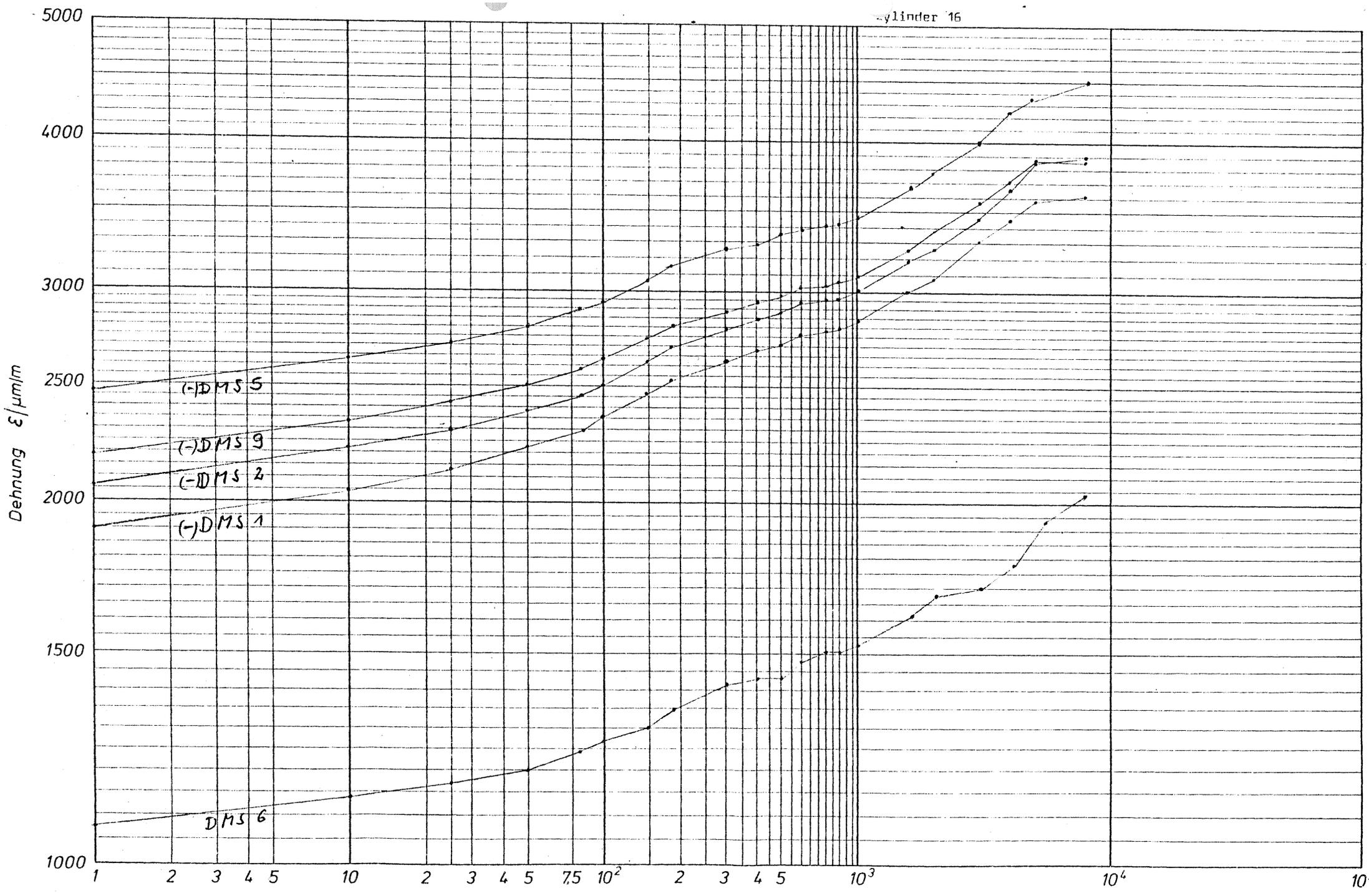


Abb. 10b







Versuchszeit t/h

Axialdruck F = 142,73 kN

Abb. 11a

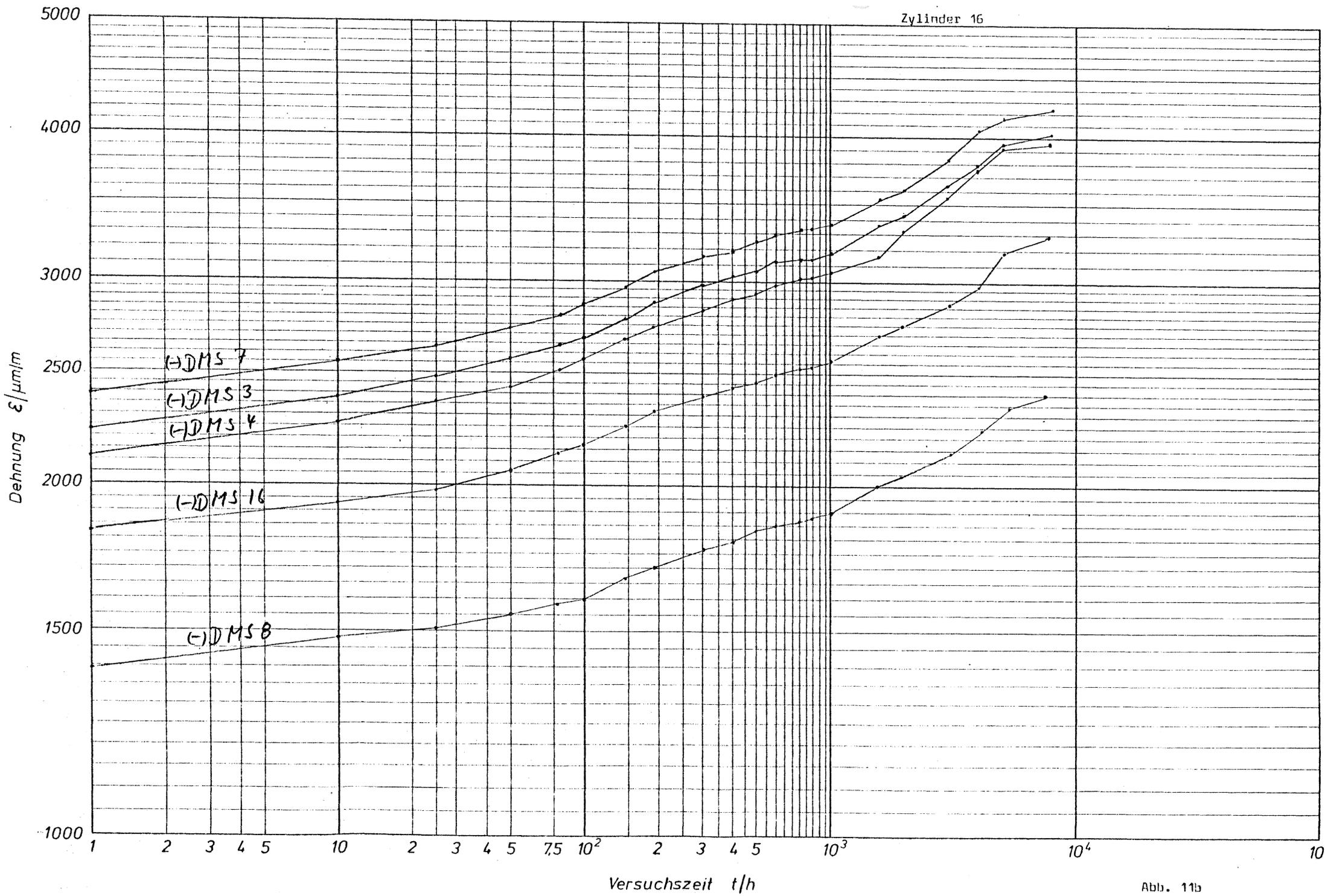
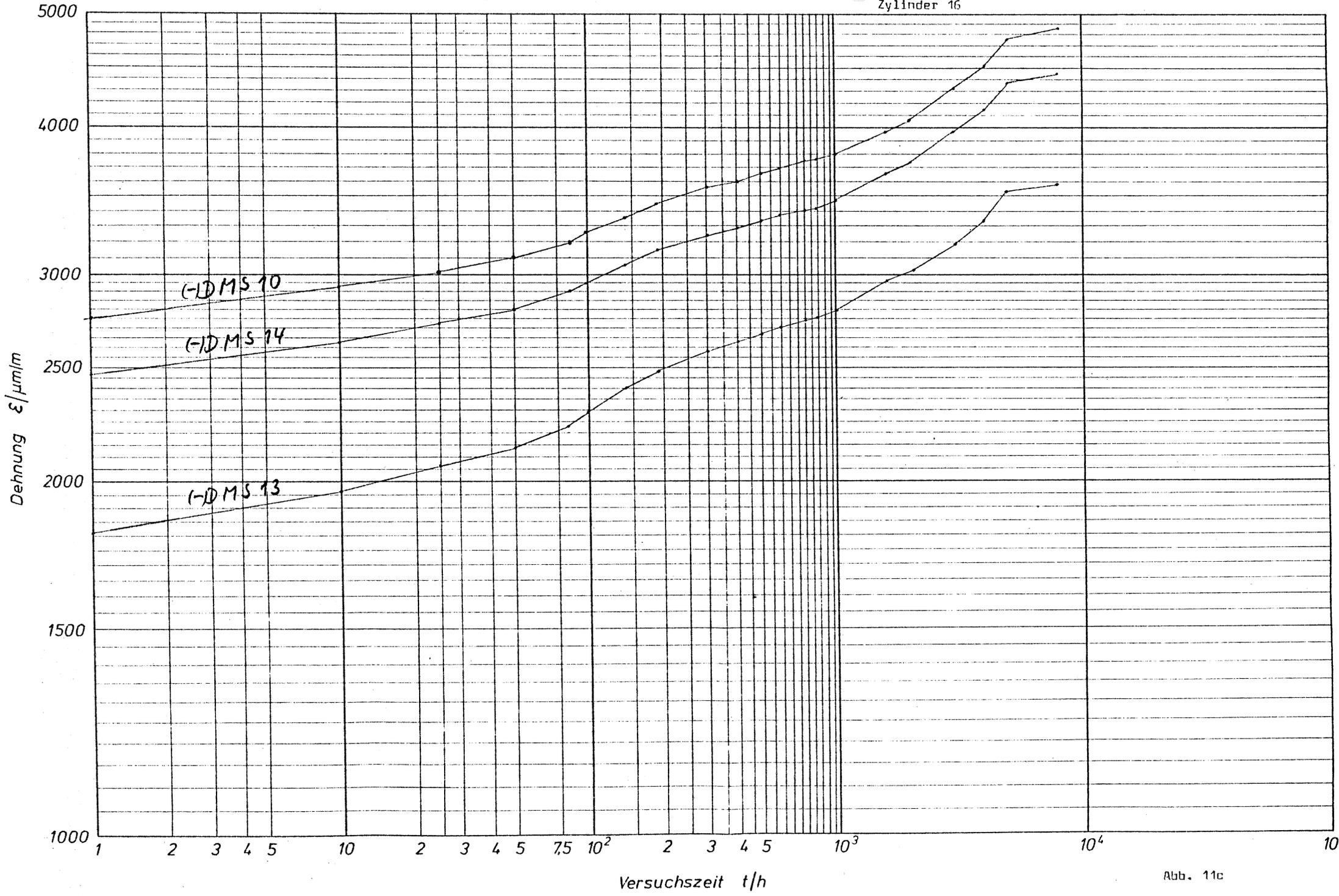


Abb. 11b



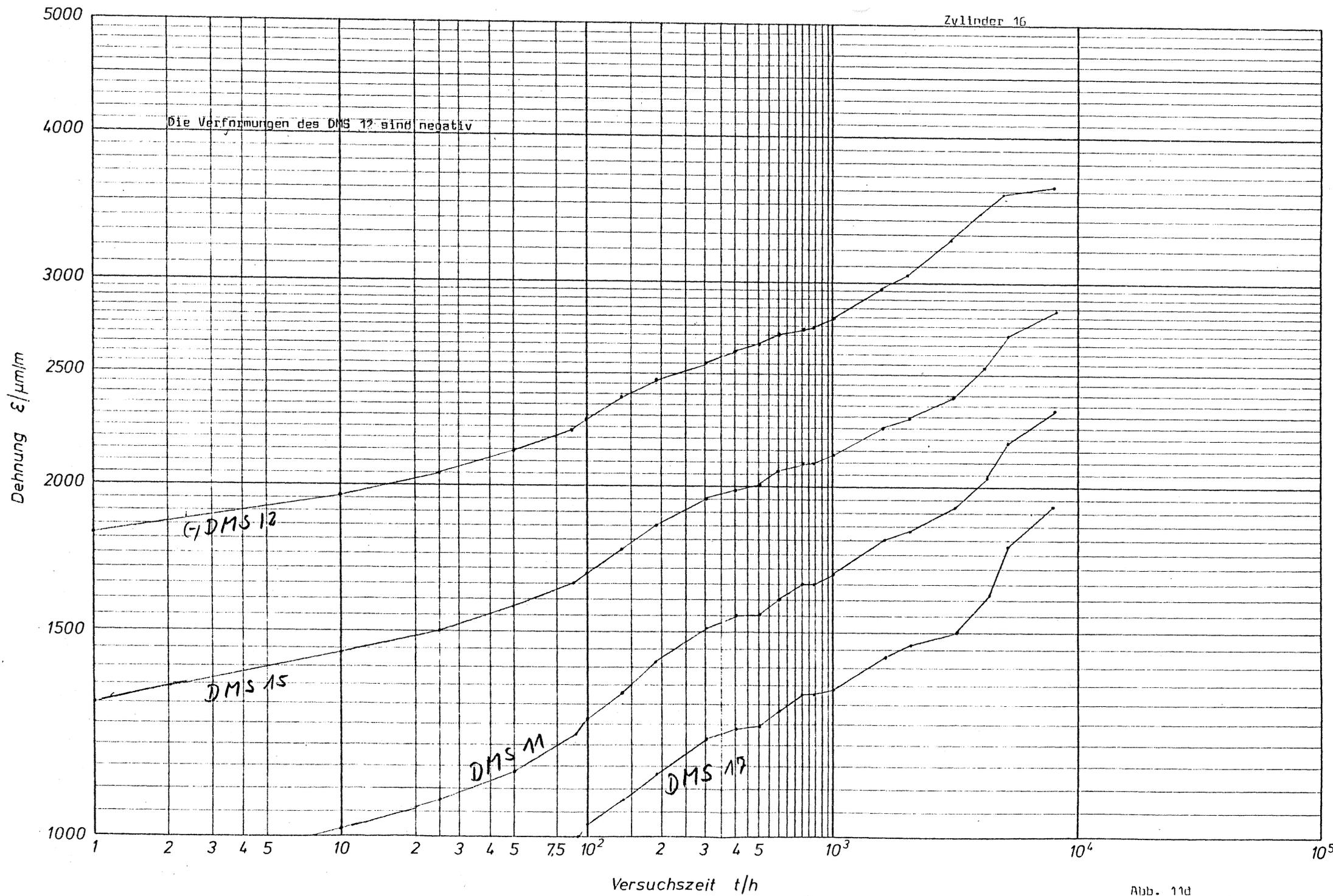


Abb. 11d

Kraft - Weg - Diagramm Zylinder 31

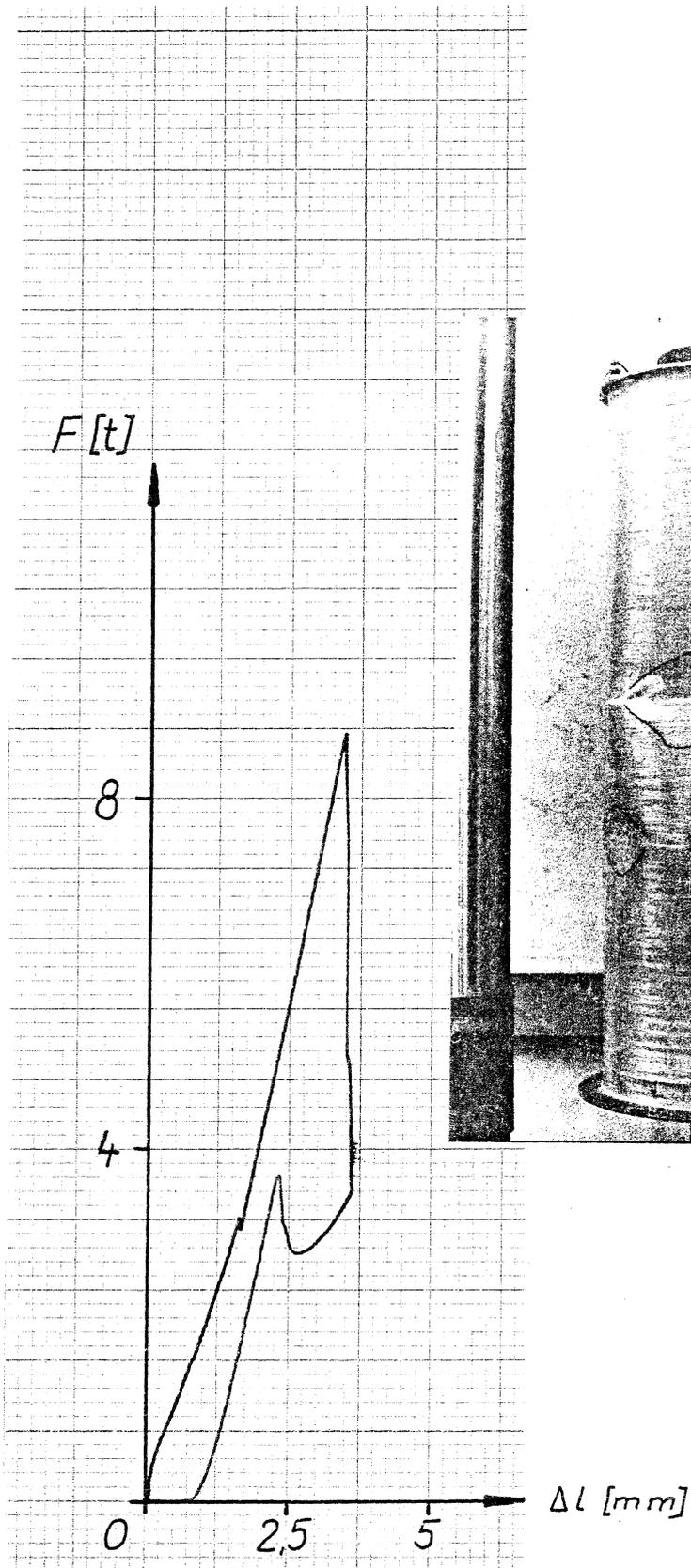


Abb. 12

