Kurzreferat

Versuch 5: Spannungsoptische Untersuchung von Kerben

An Flachstäben aus spannungsoptischem Material wird der Einfluss von unterschiedlich großen Kerben auf den Formfaktor untersucht. Die hierfür erforderlichen theoretischen Grundlagen sind mit den ausgegebenen Vorlagen zu erarbeiten. Die Versuchsergebnisse sind qualitativ und (soweit möglich) quantitativ darzustellen.

Inhalt

Seite

Verzeichnis der Bilder 3
Verzeichnis der Tabellen 3
Liste der Symbole 3

1 Einleitung 4

2 Licht 5

3 Diffuslichtpolariskop 6

4 Werkstoffe 7

5 Versuche 7
5.1 Eichversuch 7
5.1.1 Probenabmessungen 8
5.1.2 Durchführung 8
5.1.3 Auswertung 12
5.2 Versuch zur Bestimmung der Formzahl 13
5.2.1 Probenabmessungen 14
5.1.2 Durchführung 15
5.1.3 Versuchsauswertung 17

Literaturverzeichnis 18

Verzeichnis der Bilder

Bild 1 Sichtbarmachen von Spannungen 4
Bild 2 spannungsoptische Apparatur 6
Bild 3 Eichvorrichtung 7
Bild 4 Araldit probe im Diffuslicht-Polariskops 11
Bild 5 Diffuslicht-Polariskops mit Ringkraftmesser 13
Bild 6 Zugstäbe im Diffuslicht-Polariskops 14

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1 Eichtabelle für Ringkraftmesser T787 15

Liste der Symbole

A_{Rest}	Restquerschnitt des Stabes
αK	Formzahl
C	Materialkonstante
c0	Vakuumlichtgeschwindigkeit
d	Durchmesser der Bohrung
d,t	Stabdicke
E	Elastizitätsmodul
ε	Dehnung
f	Durchbiegung
h	Stabhöhe
I	Flächenträgheitsmoment
λ	Wellenlänge im Vakuum
l	Stablänge
M	Biegemoment
n	Ordnung (Anzahl Isochromaten von 0te Ordnung bis zum Rand)
S	spannungsoptische Konstante
σ	Spannung
υ	Frequenz
υ	Querdehnung des Materials
Wb	Widerstandsmoment bei Biegung
z	Ordnung (Anzahl aller Isochromaten ohne 0te Ordnung)

1 Einleitung

Die Spannungsoptik ist ein Verfahren der experimentellen Spannungsanalyse und ist eines der zurzeit wichtigsten Verfahren zur Spannungsermittlung.
In der Spannungsoptik wird ein durchsichtiges Modell des zu untersuchenden Bauteils oder ein Schnitt daraus mit polarisiertem Licht durchstrahlt. Die dabei durch die mechanischen Spannungen hervorgerufenen optischen Effekte können unmittelbar mit dem Auge beobachtet werden. Der Spannungszustand ist daher im ganzen Objekt leicht überschaubar.
Zu dem wichtigen Vorteil der Überschaubarkeit des Spannungszustandes kommt ein zweiter, nämlich der Umstand, dass beim spannungsoptischen Modellversuch der Spannungszustand überall in kleinsten Bezirken, nahezu infinitesimal, erfasst wird. Dies ist besonders wichtig bei örtlich konzentrierten Spannungen. Mit endlichen Elementen kann eine Spannungskonzentration nur erfasst werden, wenn sehr fein unterteilt wird. Um diese Unterteilung vorzusehen, muss man aber den Ort der Spannungskonzentration schon vorher kennen, was durchaus nicht immer der Fall ist. Dagegen ergibt sich in der Spannungsoptik der Ort der Maximalspannung von selbst durch bloße Inaugenscheinnahme, und die Auswertung kann dann, weil die modellmäßige Wiedergabe der Spannungen überall praktisch infinitesimal ist, zuverlässig und genau vorgenommen werden.

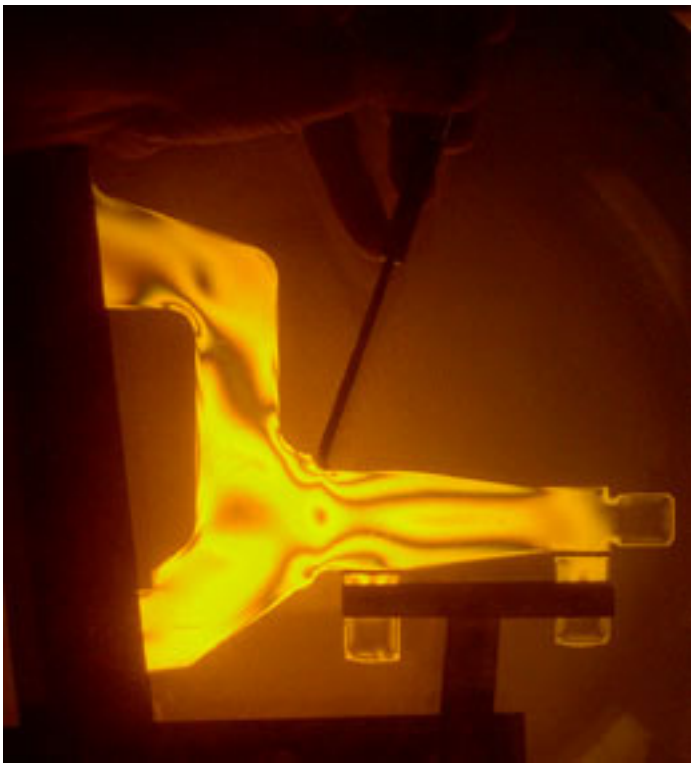


Bild 1: Sichtbarmachen von Spannungen

2. Licht

Als (sichtbares) Licht bezeichnet man die elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von ca. $\upsilon = 3{,}8 \times 10^{14}$ Hz bis $\upsilon = 7{,}7 \times 10^{14}$ Hz, was einem Vakuumwellenlängenbereich von $\lambda = 390$ nm bis $\lambda = 790$ nm entspricht (Umrechnung $\lambda = c/\upsilon$). Bei diesen elektromagnetischen Wellen schwingen der elektrische und der magnetische Feldvektor und ändern dabei periodisch Betrag und Richtung. Die Schwingungsrichtungen von elektrischem und magnetischem Feldvektor stehen dabei stets aufeinander senkrecht und jeweils senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls.
Die Ausbreitung des Lichts erfolgt im Vakuum mit der für alle Wellenlängen gültigen Vakuumlichtgeschwindigkeit $c_o = 2{,}99793 \times 10^8$ m/s. In Medien ist die Lichtgeschwindigkeit um den Faktor *n*, den Brechungsindex, verringert. Diese Tatsache ist nach den Gesetzen der Wellenoptik für viele Phänomene der Optik, wie z.B. der Brechung an Mediengrenzen verantwortlich. Der Brechungsindex hängt von zahlreichen Parametern ab, z.B. von der Frequenz und der Polarisationsrichtung des verwendeten Lichts und dem Spannungszustand des Materials.
Das natürliche, „weiße“ Licht ist eine Überlagerung verschiedener Wellenzüge ohne feste Phasenbeziehung. Es kommen alle Wellenlängen und Schwingungsrichtungen vor. Durch die Überlagerung aller Wellenlängen („Farben“) entsteht im Auge der Eindruck weißen Lichts.
Von *monochromatischem* („einfarbigem“) Licht spricht man, wenn alle Wellenzüge eines Strahlenbündels mit der gleichen Frequenz schwingen, (bzw. in einem Medium die gleiche Wellenlänge haben).
Im Licht der Natriumdampflampe kommen praktisch nur die beiden sehr dicht beieinanderliegenden (Vakuum-)Wellenlängen $\lambda = 589$ nm und $\lambda = 589{,}6$ nm vor. Es kann so in sehr guter Näherung als monochromatisch aufgefasst werden, und wird im Versuch als monochromatische Lichtquelle verwendet.

3. Diffuslichtpolariskop

Die spannungsoptische Apparatur, auch Polariskop genannt, hat die Aufgabe, den auf ein durchsichtiges Modell aus Kunststoff aufgebrachten ebenen Spannungszustand mittels polarisierten Lichts sichtbar zu machen

Die spannungsoptische Apparatur besteht aus einem Lampenkasten für weißes und monochromatisches Licht (meist Natriumdampflampe mit λ = 589 nm) und 2 Filterträger mit Polarisationsfiltern (Polarisator und Analysator). Der Lampenkasten erzeugt durch eine Milchglasscheibe diffuses Licht und der Polarisator ist ein Filter zur Erzeugung von Licht, dessen Wellen nur in einer Ebene (meist der vertikalen) schwingen. Der Analysator ist ebenso wie der Polarisator ein Filter zur Erzeugung von polarisiertem Licht.

Die Intensität des Lichtes hinter dem Analysator wird zu Null für φ = 0°; 90°;… . Das bedeutet, dass dunkle Linien (Isoklinen) an den Stellen zu beobachten sind, an denen Polarisationsrichtungen mit den Richtungen der Hauptnormalspannungen übereinstimmen.

Treten dagegen Linien in den Spektralfarben auf, da keine einheitliche Wellenlänge λ vorliegt, handelt es sich um Isochromaten.

In unserem spannungsoptischen Versuch genügte es, die Isochromaten auszuwerten. Die Isoklinen würden bei einer Auswertung nur stören. Deshalb wurden die Isoklinen durch Verwendung von zirkular polarisiertem Licht „ausgeschaltet“. Zirkular polarisiertes Licht stellt man durch Verwendung von Viertelwellenplatten.

Die sogenannten Viertelwellenplatten sind hinter den Polarisator und vor den Analysator zu setzen. Durch einfaches Vertauschen der beiden so entstehenden Filterkombinationen erhält man dann wahlweise zirkular oder linear polarisiertes Licht, wenn die Schwingungsrichtung dese polarisierten Lichtes unter 45° zu den Polarisationsrichtungen der λ/4-Platte steht.

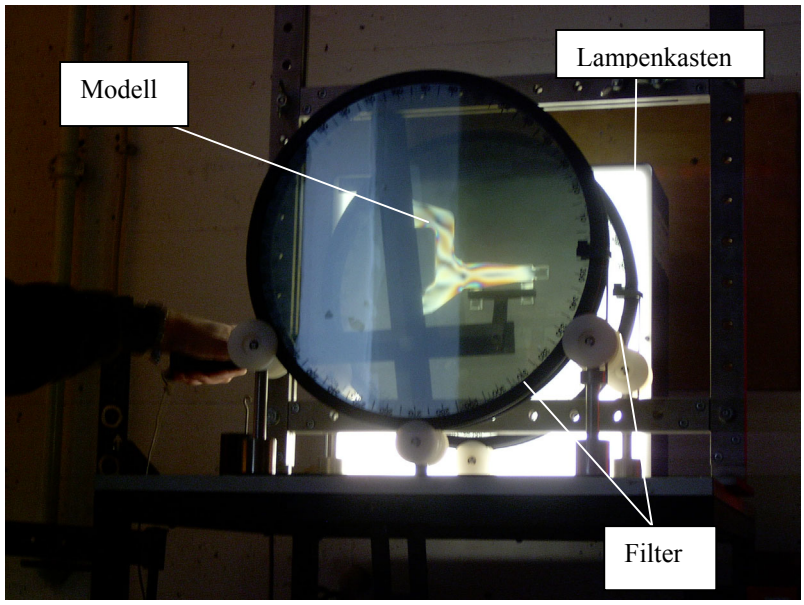


Bild2: spannungsoptische Apparatur

4. Werkstoffe

Für die Versuchdurchführung wurden Plexiglas und Araldit verwendet.
Bei dem Werkstoff mit der Bezeichnung Plexiglas handelt es sich um einen Polymetacrylsäureester (Acrylharz). Plexiglas ist sehr klar und fast völlig frei von Eigenspannungen. Es ist also spannungsoptisch nicht so „aktiv“ und wird daher im Eichversuch eine geringere spannungsoptische Konstante S aufweisen.
Araldit ist ein Epoxidharz und ist in seiner Färbung leicht gelblich. Es weist ein hohen dehnungsoptischen Effekt auf und daher sind heute Epoxidharze die auf der ganzen Welt am meisten verwendeten Modellwerkstoffe für Isochromatenversuche.

5. Versuche

Mit Hilfe des Eichversuchs wurden im 1.Versuch dieser Leichtbaulaborveranstaltung die spannungsoptische Konstante und der Elastizitätsmodul E von Plexiglas und Araldit ermittelt.
An Zugstäben mit unterschiedlich großen zentrischen Bohrungen wurden dann in einem 2.Versuch die Spannungen experimentell ermittelt und daraus die Formzahl α_K errechnet.

5.1 Eichversuch

Anhand des Eichversuchs sollten wie vorher schon bereits erwähnt die spannungsoptische Konstante S und der Elastizitätsmodul E von Plexiglas und Araldit bestimmt werden. Zur Bestimmung wurde ein auf reine Biegung beanspruchter prismatischer Stab mit Rechteckquerschnitt verwendet.

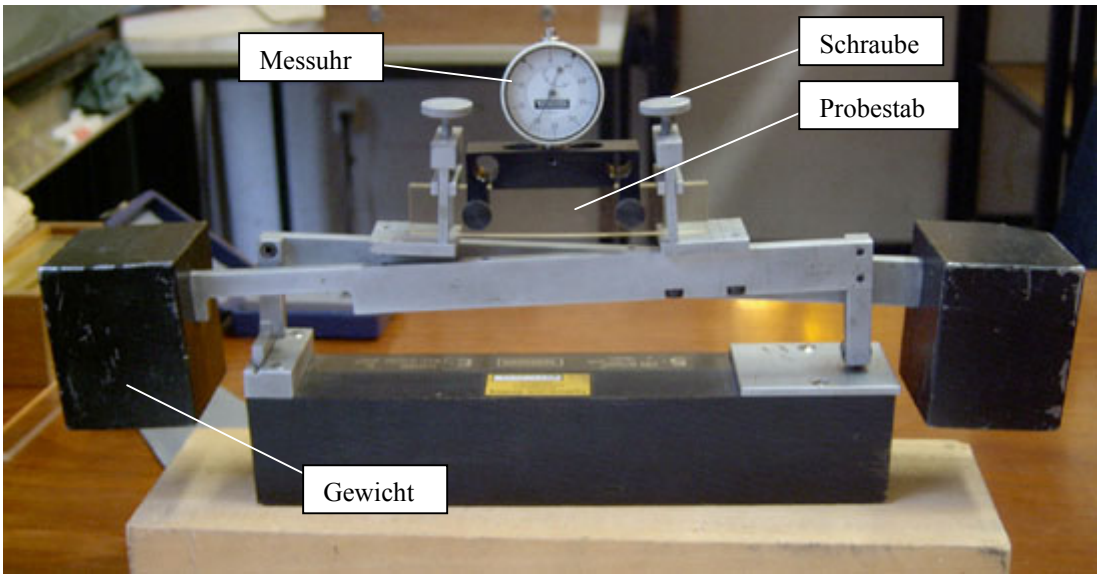
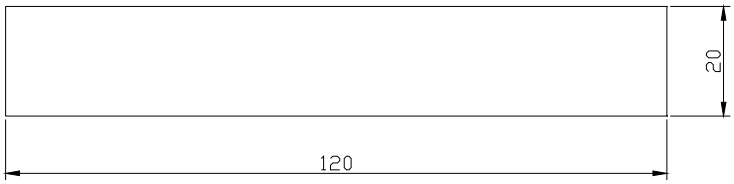


Bild 3: Eichvorrichtung

Der rechteckige flache Probestab wurde hochkant in die Vorrichtung eingesetzt und mit Hilfe zweier Schrauben fixiert. Die Messuhr, die mit Hilfe eines Bügels auf dem Probestab gesetzt wurde, diente zur Ermittlung der Durchbiegung, die zur Berechnung des Elastizitätsmodul benötigt wurde. Die an den Seiten befestigten Gewichte dienen zur Einleitung der Biegebelastung.

5.1.1 Probenabmessungen

Die für den Eichversuch benutzten Probestäbe hatten folgende Abmessungen:



Dicke: Plexiglas: 4,5mm
Araldit: 5mm

5.1.2 Durchführung

Mit Hilfe der Messuhr wurde die Durchbiegung der belasteten Probestäbe ermittelt.
Die Durchbiegung betrug bei dem aus Plexiglas bestehenden Stab f `= 0,36 mm
und bei dem Araldit stab f `= 0,32 mm.

Die maximale Durchbiegung eines Stabes unter konstantem Biegemoment beträgt

$$f = \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot I}$$

Mit $I = \frac{d \cdot h^3}{12}$ ergibt sich dann $f = \frac{3}{2} \cdot \frac{M \cdot l^2}{E \cdot d \cdot h^3}$

Da der Taststift der Messuhr an der Staboberkante und nicht in der Stabmitte aufliegt, wird wegen der Querdehnung ein um Δf zu kleiner Wert gemessen. Deshalb gilt

$$f = f' + \Delta f$$

und $\Delta f = \varepsilon_{quer} \cdot \frac{h}{2} = \upsilon \cdot \varepsilon_{längs} \cdot \frac{h}{2} = \upsilon \cdot \frac{\sigma_{max}}{2E} \cdot \frac{h}{2}$

Für σ_{max} kann gesetzt werden

$$\sigma_{max} = \sigma_b = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{6Mh}{dh^3}$$

Damit erhält man die Gleichung

$$\Delta f = \upsilon \cdot \frac{3M}{2dhE}$$

und schließlich ergibt sich daraus

$$E = \frac{3}{2} \cdot \frac{M}{f`dh} \cdot \left(\frac{l^2}{h^2} - \upsilon \right)$$

mit M = 8000Nm (durch Eichvorrichtung gegeben)

d = 6mm
h = 20mm
l = 60mm
} Eichkörperabmessung

υ = 0,38 (Querdehnung des Materials)

erhält man die Gleichung $E = \frac{5172}{d \cdot f`} \frac{N}{mm^2}$

für Plexiglas folgt daraus: $E_{Plexi} = 3192{,}59\ N/mm^2$
und für Araldit: $E_{Araldit} = 3232{,}5\ N/mm^2$

Würde man die Querdehnung nicht berücksichtigen, hätte man einen Fehler bei der E-Modul Bestimmung. Dieser Fehler soll im nachfolgenden bestimmt werden.

Der Elastizitätsmodul würde, ohne Berücksichtigung der Querdehnung, die Form

$$E = \frac{3}{2} \cdot \frac{M \cdot l^2}{fdh^3}$$

annehmen und mit den gleichen Zahlenwerten wie oben bereits bestimmt, würde man die Gleichung

$$E = \frac{5400}{d \cdot f} \frac{N}{mm^2}$$

erhalten.
Daraus folgt, dass der Elastizitätsmodul die Werte
für Plexiglas: $E_{Plexi} = 3333{,}33\ N/mm^2$
und für Araldit: $E_{Araldit} = 3375\ N/mm^2$
annehmen würde.

Man hätte also bei der Ermittlung des Elastizitätsmoduls von Plexiglas und Araldit eine Abweichung von 4,4 % oder ein relativer Fehler von 0,044.

Durch Sichtbarmachen der Isochromen mit Hilfe eines Diffuslicht-Polariskops kann schließlich noch die spannungsoptische Konstante bestimmt werden. Die Isochromaten sind Linien gleicher Phasenverschiebung. Indem man die Hauptgleichung der Spannungsoptik

$$n = \frac{C}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot d$$

nach der Hauptspannungsdifferenz auflöst und λ/C zu einer einzigen Materialkonstanten, der sogenannten „spannungsoptischen Konstanten S“ zusammenfasst, ergibt sich folgende Beziehung zur Auswertung des Isochromatenbildes:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{S}{d} n$$

Setzt man nun für σ1-σ2 = σ und für n = z/2 bekommt man eine Gleichung für die spannungsoptische Konstante, die wie folgt aussieht:

$$S = \frac{\sigma \cdot d}{z/2}$$

Weiterhin kann man für σ = M/Wb einsetzen wobei Wb = (dh²)/6 ist.
Setzt man dieses wiederum in die Gleichung der spannungsoptischen Konstante ein und wählt M = 80 cm/kg und h = 2cm bekommt man folgende Gleichung:

$$S = \frac{240}{z} \frac{N}{mm}$$

Nun zählt man die durch das Licht sichtbar gewordenen Linien (auch Ordnungen genannt) und zwar vom oberen und unterem Rand zur Mitte (ohne die mittlere Linie (0te Ordnung)). Oder man zählt alle Linien und zieht hinterher 1 ab.

Bei der Plexiglasprobe wurden 3 Linien gezählt. Man erhält daraus die Ordnung z = 3-1 = 2.
Und bei der Araldit probe wurden 23 Linien ermittelt und z beträgt somit z =23-1 = 22.

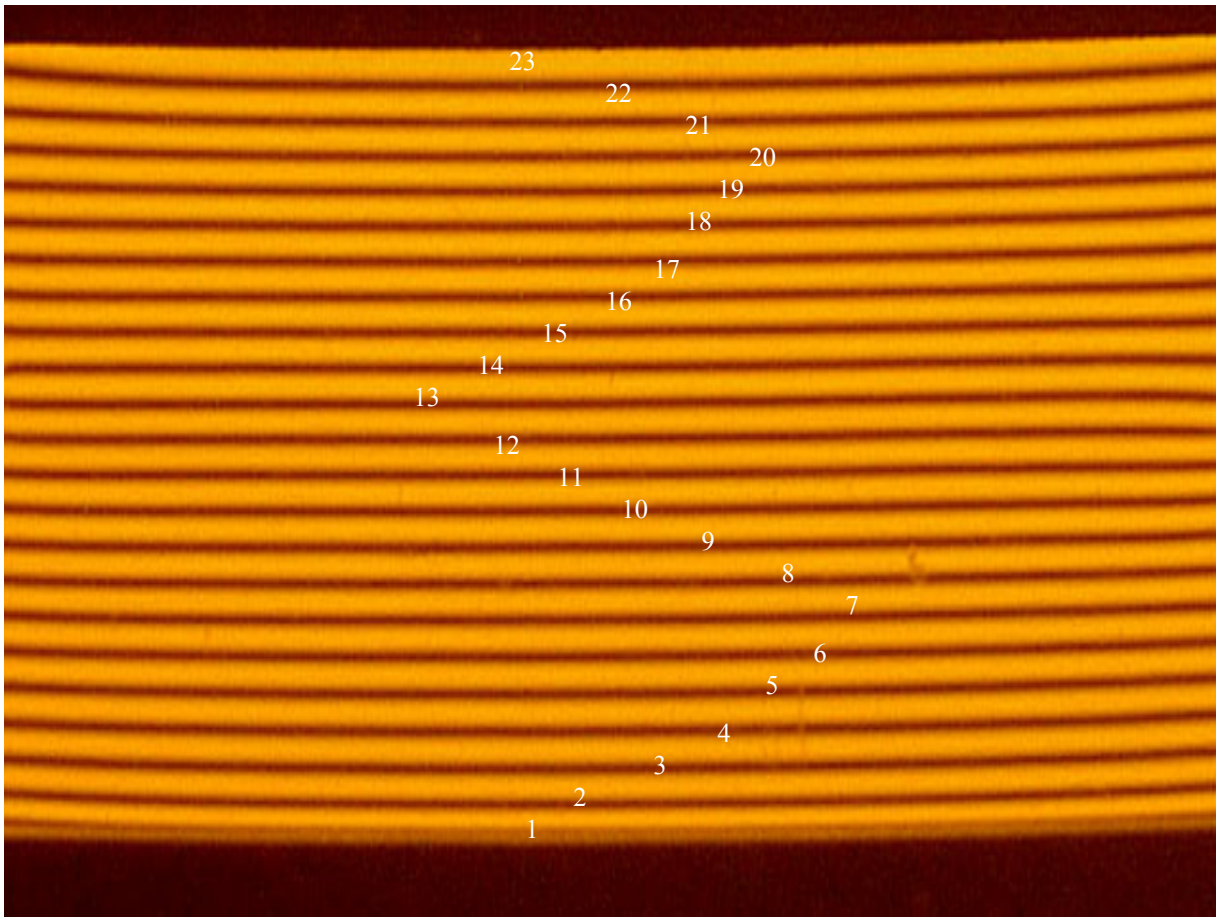


Bild 4: Araldit probe im Diffuslicht-Polariskops

Durch einsetzen in die Formel:

$$S = \frac{240}{z} \frac{N}{mm}$$

erhält man die spannungsoptische Konstante

für Plexiglas	$S_{Plexi} = 120$ N/mm
für Araldit	$S_{Araldit} = 10{,}91$ N/mm

5.1.3 Auswertung

Es wurden der Elastizitätsmodul E und die spannungsoptische Konstante S bestimmt.

E_{Plexi} = 3192,59 N/mm²
$E_{Araldit}$ = 3232,5 N/mm²

S_{Plexi} = 120 N/mm
$S_{Araldit}$ = 10,91 N/mm

In der Literatur werden die Elastizitätsmodule von Plexiglas und Araldit mit folgenden Werten angegeben:

E_{Plexi} = 32000 kp/cm² = 3137,25 N/mm²
$E_{Araldit}$ = 34000 kp/cm² = 3333,33 N/mm²

Die mit Hilfe des Eichversuchs bestimmten Werte des Elastizitätsmoduls kommen demnach denen in der Literatur angegebenen Werte verhältnismäßig nahe. Bei der Ermittlung des Elastizitätsmoduls des Plexiglasstabes bekommt man eine Abweichung von 1,76 % und bei dem Aralditstab erhält man eine Abweichung von 3,02 %.

Die spannungsoptische Konstante S von Araldit ist höher als die von Plexiglas, weil Araldit spannungsoptischer aktiver ist. In der Literatur werden die Werte für die spannungsoptische Konstante S für Plexiglas und Araldit folgendermaßen angegeben:

S_{Plexi} = 235 kp/cm = 230,39 N/mm
$S_{Araldit}$ = 10,6 kp/cm = 10,39 N/mm

5.2 Versuch zur Bestimmung der Formzahl α_K

Es soll die Formzahl α_K für Zugstäbe aus Araldit mit unterschiedlich großen zentrischen Bohrungen bestimmt werden.

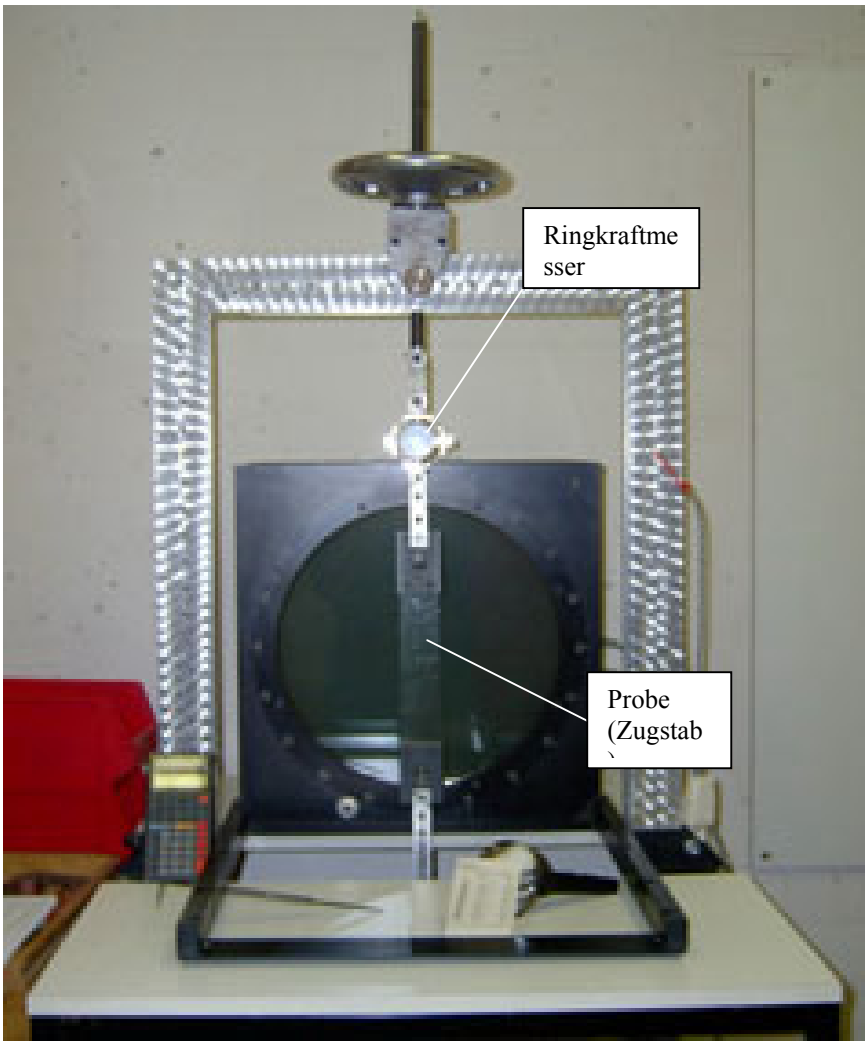


Bild 5: Diffuslicht-Polariskops mit Ringkraftmesser

Der Zugstab aus Araldit wurde dazu in den Ringkraftmesser T787 gespannt und in einem Diffuslicht-Polariskop wurden die Ordnungen ermittelt. Bei den Zugstäben mit den größeren Bohrungen wurde der Ringkraftmesser soweit belastet bis es möglich war 8 Linien/Ordnungen im Zugstab zu zählen und bei den Zugstäben mit den kleineren Bohrungen wurde er soweit belastet, bis 6 bzw. 4 Ordnungen erkennbar waren.

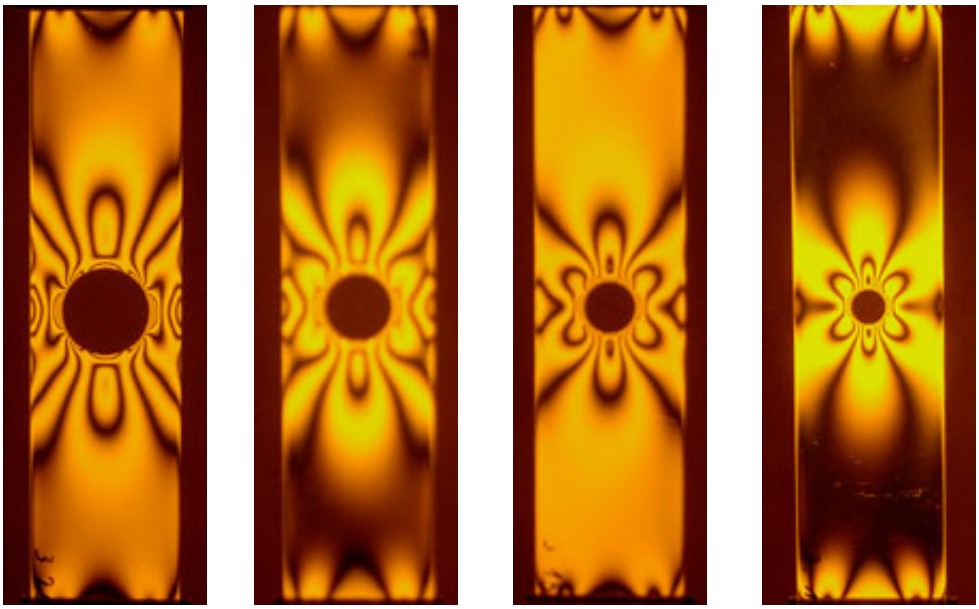
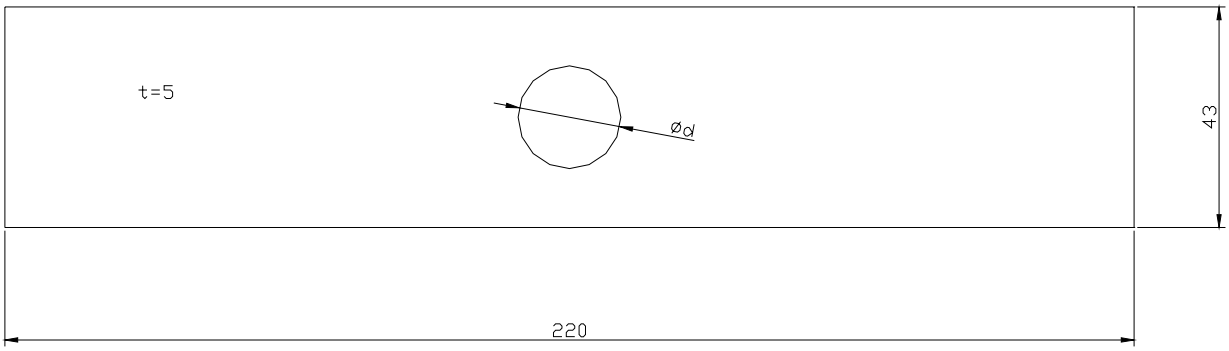


Bild 6: Zugstäbe im Diffuslicht-Polariskop

5.2.1 Probenabmessungen

Die Araldit-Zugstäbe hatten folgende Abmessungen:



Der Durchmesser d betrug: 25mm; 20mm; 15mm; 10mm; 5mm; 3mm

5.2.2 Durchführung

Die Zugstäbe mit den unterschiedlich großen zentrischen Bohrungen wurden in den Ringkraftmesser gespannt, auf Zug belastet und auf der Messuhr des Ringkraftmessers wurden die Skalenteile abgelesen. Die Skalenteile konnten mit Hilfe der Eichtabelle für den Ringkraftmesser durch Interpolation in eine Last in N umgerechnet werden.

Last in N	Zeigerausschlag in Skalenteilen bei Zug
0	0
200	28,4
400	56,7
600	85,1
800	113,4
1000	141,6
1200	169,9
1400	198,1
1600	226,0
1800	253,9
2000	281,8

Tabelle 1: Eichtabelle für Ringkraftmesser T787

Es wurden folgende Werte zur Bestimmung der Formzahl α_K für die Zugstäbe bestimmt:

Probe	Durchmesser d	Ordnung / Linien	Skalenteile	Last
1	25 mm	8	111	783,04 N
2	20 mm	8	135	953,19 N
3	15 mm	8	161	1137,10 N
4	10 mm	8	182	1285,82 N
5	5 mm	6	156	1101,77 N
6	3 mm	4	121	853,90 N

Aus den ermittelten Werten können nun die maximale Spannung und die Nennspannung mit Hilfe des Restquerschnitts, die am Zugstab auftreten bestimmt werden.

Die maximale Spannung kann aus der Formel $\sigma_{max} = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n \cdot S}{t}$ errechnet werden, wobei n für die Ordnung, S für die spannungsoptische Konstante und t für die Dicke des Zugstabs steht.

Die Nennspannung kann mit der Formel $\sigma_n = \frac{F}{A_{Rest}}$ berechnet werden. F steht für die ermittelte Last und A_{Rest} für den Restquerschnitt des Zugstabs.

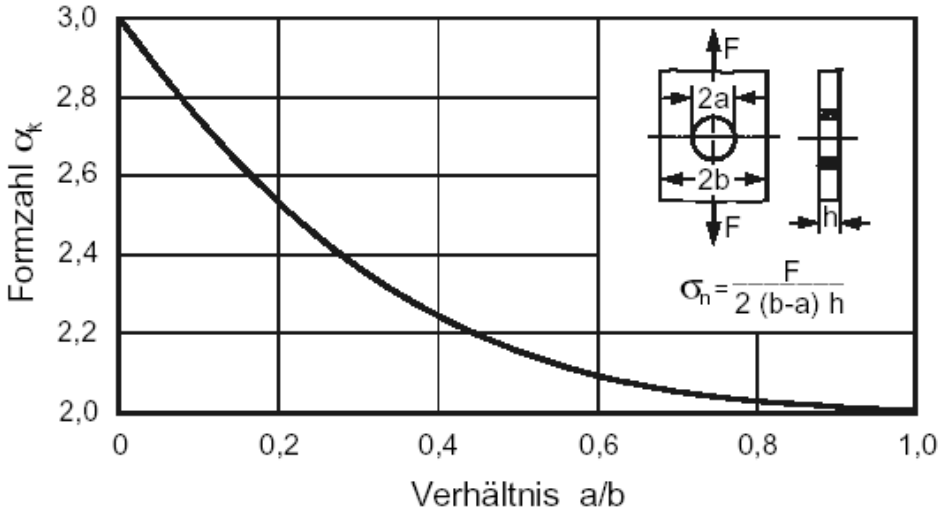
Probe	n	S	t	F	A_{Rest}	σ_{max}	σ_n
1	8	10,91 N/mm	5 mm	783,04 N	90mm²	17,456 N/mm²	8,7 N/mm²
2	8	10,91 N/mm	5 mm	953,19 N	115mm²	17,456 N/mm²	8,29 N/mm²
3	8	10,91 N/mm	5 mm	1137,10 N	140mm²	17,456 N/mm²	8,12 N/mm²
4	8	10,91 N/mm	5 mm	1285,82 N	165mm²	17,456 N/mm²	7,79 N/mm²
5	6	10,91 N/mm	5 mm	1101,77 N	190mm²	13,092 N/mm²	5,79 N/mm²
6	4	10,91 N/mm	5 mm	853,90 N	200mm²	8,736 N/mm²	4,27 N/mm²

Die Formzahl α_K für die Zugstäbe kann nun aus der maximalen Spannung σ_{max} und der Nennspannung σ_n bestimmt werden.

$$\alpha_K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$$

Probe	σ_{max}	σ_n	d/b	α_K
1	17,456 N/mm²	8,7 N/mm²	0,58	2,01
2	17,456 N/mm²	8,29 N/mm²	0,47	2,11
3	17,456 N/mm²	8,12 N/mm²	0,35	2,15
4	17,456 N/mm²	7,79 N/mm²	0,23	2,24
5	13,092 N/mm²	5,79 N/mm²	0,12	2,26
6	8,736 N/mm²	4,27 N/mm²	0,07	2,05

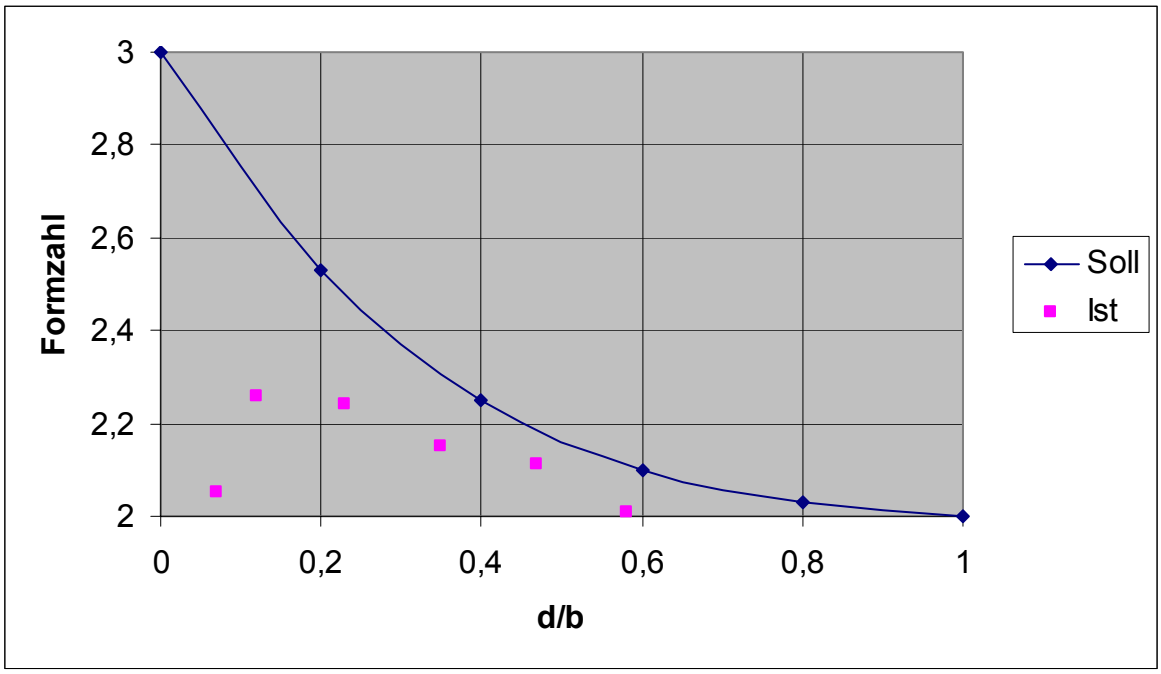
5.2.3 Versuchsauswertung



Je größer das Verhältnis aus Durchmesser zu Breite d/b (a/b) desto kleiner ist die Formzahl α_K.

Das mit unserem im Versuch ermittelten Werten erstellt Diagramm weicht ein wenig von dem Original-Diagramm ab. Besonders bei den Zugstäben mit den kleineren Bohrungen weicht die Formzahl etwas stärker ab, da das Erkennen der Isochromen mit dem bloßen Auge immer schwieriger wurde, je kleiner die Bohrung wurde.

Es sind alle ermittelten Werte etwas zu klein, aber bei den Zugstäben mit den Bohrungen d = 10 mm bis 25 mm kann jedoch auch bei unseren Werten die Feststellungen getroffen werden, dass je größer das Verhältnis aus Durchmesser zu Breite d/b ist, desto kleiner wird die Formzahl α_K.



Literaturverzeichnis

Kuske KUSKE, A.: Einführung in die Spannungsoptik

Müller MÜLLER, H.W.: Kompendium Maschinenelemente

Schwarz PROF.DR.-ING.L.SCHWARZ: Spannungsoptik – Grundlagen - Versuche

Springer Verlag FÖPPEL, MÖNCH: Praktische Spannungsoptik

MPA Stuttgart MPA STUTTGART: www.mpa.uni-stuttgart.de

TU München TU München: www.physik.tu-muenchen.de