

Mechanische Eigenschaften und Dauerverhalten von Glasfasern für die optische Übertragungstechnik

Autor(en): **Staub, T. / Laeng, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **77 (1986)**

Heft 7

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904184>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Mechanische Eigenschaften und Dauerverhalten von Glasfasern für die optische Übertragungstechnik

Th. Staub und P. Laeng

Ausgehend von bruchmechanischen Betrachtungen wird gezeigt, wie auf experimentellem Weg Aussagen über die Zuverlässigkeit von Glasfasern für die optische Übertragung in Fernmeldenetzen gemacht werden können. Die bezüglich Bruchfestigkeit und Dauerverhalten relevanten Faserparameter werden erklärt. Zudem wird ein Verfahren für die Durchführung der Produktionskontrolle vorgestellt.

En partant de considérations de la mécanique de rupture, il est démontré qu'il est possible de déterminer la fiabilité des fibres optiques pour réseaux de télécommunication à l'aide de moyens expérimentaux. Les paramètres importants liés au comportement de rupture et de la durée de vie des fibres sont exposés. En plus une méthode de contrôle de production est discutée.

Adresse der Autoren

Th. Staub, Dr. phil. nat., Hauptabteilung Forschung und Entwicklung Generaldirektion PTT, 3029 Bern, und P. Laeng, Dr. ès sc., Cabloptic SA, 2016 Cortaillod.

1. Einleitung

Die Wirtschaftlichkeit von Telekommunikationssystemen hängt wesentlich von der Lebensdauer und der Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten ab. Im Falle optischer Übertragungssysteme gehören dazu neben den optoelektronischen Sender-, Zwischenverstärker- und Empfängerbauteilen auch die als Übertragungsmedium dienenden Lichtwellenleiterkabel. Die Lichtwellenleiter bestehen im allgemeinen aus Quarzglas (amorphes SiO_2), das nach speziellen Verfahren mit verschiedenen anderen Oxiden wie P_2O_5 und GeO_2 dotiert und im Faserziehprozess zu Glasfasern von mehreren Kilometern Länge ausgezogen wird. Die Herstellungstechnologie beherrscht man heute so weit, dass die Übertragungseigenschaften in den Wellenlängenbereichen des 1. und 2. optischen Fensters (850 nm und 1300 nm) optimiert sind.

Die mechanischen Eigenschaften und damit die Zuverlässigkeit und das Dauerverhalten der Glasfasern sind jedoch von ebenso grosser Wichtigkeit. Auch diesbezüglich konnten in den letzten Jahren grosse Fortschritte erzielt werden. Dieser Aufsatz soll einen Einblick in die Grundlagen des bruchmechanischen Verhaltens von Glasfasern vermitteln und diese am praktischen Beispiel der heute in der Produktionskontrolle üblichen Testmethode, des Durchlaufprüfverfahrens, erläutern.

2. Die mechanischen Eigenschaften von Glasfasern

2.1 Grundlegende Betrachtungen zur spröden Natur von Glas

Obwohl die inhärente mechanische Festigkeit von Glas theoretisch sehr

hoch ist, wird sie in der Praxis durch die spröde Natur des Materials stark eingeschränkt. Bei spröden Materialien tritt der Bruch bekanntlich praktisch ohne plastische Deformation ein und erfolgt bei Beanspruchungen, die in der Regel weit unterhalb der theoretischen Belastbarkeit liegen. Für die Zugfestigkeit von Quarzglas lässt sich aus den Si-O-Kovalentbindungen theoretisch ein Wert von 20 GPa ($20\,000\text{ N/mm}^2$) berechnen. Für eine Glasfaser mit einem Durchmesser von 0,125 mm ergäbe dies eine Bruchlast von etwa 245 N. Die bisher an Glasfasern experimentell bestimmten Werte liegen jedoch etwa um den Faktor 4 tiefer. Diese Diskrepanz wird allgemein mit der Existenz von Haarrissen erklärt. Sie treten in beliebiger Verteilung oberflächlich oder im Glasinnern auf und bewirken eine starke örtliche Konzentration der Stressbeanspruchung (Fig. 1).

Die bruchmechanischen Modelle zur Berechnung der Zugfestigkeit

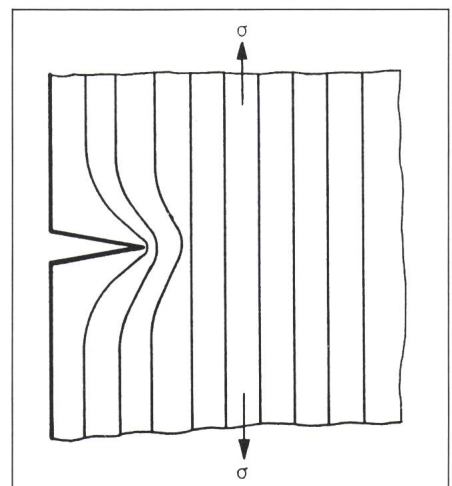


Fig. 1 Verlauf der Kraftlinien im Bereich einer Risspitze

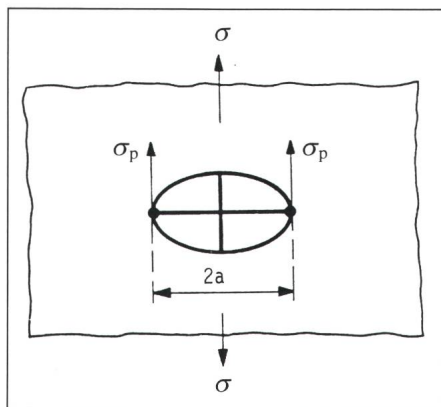


Fig. 2 Idealisierte Rissform nach Inglis

spröder Materialien gehen auf Arbeiten von Inglis [1] und Griffith [2] zurück. Inglis betrachtet den Fall eines ellipsenförmigen Risses, der sich im Innern eines Körpers befindet. Die an diesem Körper angreifende Kraft wirkt rechtwinklig zu der Ebene, in welcher der Riss liegt, d.h. senkrecht zur grossen Achse der Ellipse (Fig. 2). Die an der Risspitze wirkende Kraft σ_p kann dann berechnet werden mit:

$$\sigma_p = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{p}} \right) \quad (1)$$

Dabei ist σ die äusserlich angelegte Zugspannung, $2a$ die Länge der grossen Ellipsenachse und p der Kurvenradius an der Risspitze. Für sehr schmale, nadelförmige Risse gilt dann:

$$\sigma_p = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{p}} \quad (2)$$

Wenn die mechanische Beanspruchung an der Risspitze gleich gross oder grösser ist als die intrinsische Zugfestigkeit σ_t , kann der Riss sich ausbreiten und - falls sich die Risspitzen dabei nicht abrunden (d.h. falls das Verhältnis a/p sich nicht verkleinert) - zum Bruch führen. Unter diesen Bedingungen gilt für die Bruchfestigkeit σ_f :

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \sigma_t \cdot \sqrt{\frac{p}{a}} \quad (3)$$

Die Bruchfestigkeit hängt also nicht nur von der Risstiefe, sondern auch vom Rissspitzenradius p ab. Da es aber praktisch unmöglich ist, Risse und deren Entwicklung direkt zu betrachten, kann die Beziehung von Inglis nicht überprüft werden. Aus diesem Grunde haben andere Autoren nach Bruchkriterien gesucht, die den Einfluss des Rissspitzenradius nicht berücksichtigen. Ausgehend von der Gleichung von Inglis und unter Anwendung thermodynamischer Argumente berechnete Griffith die Bruchfestigkeit für amorphe Stoffe wie Glas, indem er das energetische Gleichgewicht eines elliptischen Risses in einer flachen Platte betrachtete. Diese Platte soll dann brechen, wenn die Energiezufuhr durch Dehnungsspannung jene Grösse annimmt, die zur Bildung neuer Oberfläche benötigt wird. Er fand für das Bruchkriterium die Beziehung:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (4)$$

Darin bedeuten E das Elastizitätsmodul des betrachteten Materials, γ die Oberflächenspannung und a die Risstiefe. Die Bruchspannung ist somit umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Rissgrösse. Die Zugfestigkeit eines Glaskörpers nimmt demnach mit zunehmender Haarrissgrösse ab.

Griffith definierte zudem einen Stressintensitätsfaktor K_I :

$$K_I = \sigma Y \sqrt{a} \quad (5)$$

wobei σ die am Prüfkörper angreifende Zugspannung, Y eine die Rissform charakterisierende Konstante ($Y = \sqrt{\pi}$ für elliptische Risse) und a die Risstiefe ist. Der Bruch tritt ein, wenn der Stressintensitätsfaktor einen kritischen Wert K_{Ic} annimmt:

$$K_{Ic} = \sqrt{2E\gamma} \quad (6)$$

Man stellt fest, dass K_I in der Analyse von Griffith ein Mass für die Intensität der Beanspruchung an der Risspitze σ_p und K_{Ic} ein Mass der intrinsischen Zugfestigkeit σ_t darstellt. Aus (5) und (6) kann für jede aussen angelegte

Zugspannung σ eine kritische Risstiefe a_c abgeleitet werden:

$$a_c = \frac{2E\gamma}{Y^2 \sigma^2} \quad (7)$$

Unter Verwendung der Materialkonstanten für Quarzglas ($E = 2 \text{ GPa}$, $\gamma = 5,2 \text{ J/m}^2$) lässt sich nun für eine Glasfaser von 0,125 mm Durchmesser voraussagen, dass bei einer Zuglast von etwa 10 N ein Riss von 0,36 μm Tiefe bereits ausreicht, um einen Bruch herbeizuführen.

2.2 Die Zugfestigkeit von Glasfasern

Kehren wir nun nach dieser theoretischen Betrachtung zurück zur Glasfaser, wie sie in Telekommunikationssystemen Verwendung findet. Bei der Herstellung, bei der Verlegung und während des Betriebs von Lichtwellenleiterkabeln spielt die Zugbeanspruchung der Glasfasern neben anderen denkbaren Beanspruchungsweisen (Biegung, Torsion, Stauchung, Quetschung) eine übergeordnete Rolle. Die Zugfestigkeit ist daher in Diskussionen über mechanische Eigenschaften von optischen Fasern ein üblicher Begriff. In der Praxis ist die maximale Dehnung, welcher eine Faser kurz- und langfristig standhält, eine kritische Grösse.

Wie eingangs erwähnt, muss man annehmen, dass bei Glasfasern das Auftreten oberflächlicher Haarrisse sehr wahrscheinlich ist. Als Begründung dafür wird die äusserst rasche Abkühlung des Glases von etwa 2000 °C auf Raumtemperatur während des Faserziehprozesses herangezogen. Man weiss, dass dabei im molekularen Bereich in der Fasermantelzone grosse Spannungen eingefroren werden, welche sich bereits bei geringer mechanischer Beanspruchung durch Rissbildung abzubauen suchen.

2.3 Risswachstum unter Stresskorrosion

An kurzen Längen juveniler, quasi rissfreier Glasfasern wurden kurzzeitig bereits Zugfestigkeiten bestimmt, die nahe an den theoretischen Wert für Quarzglas (20 GPa) herankommen. Solch hohe Zugfestigkeiten sind jedoch nur unter Ausschluss von Luftfeuchtigkeit - in hohem Vakuum oder in flüssigem Stickstoff - messbar. Bei Normalbedingungen erhält man wesentlich tiefere Werte. Es ist deshalb anzunehmen, dass in Gegenwart von

Feuchtigkeit und mechanischer Belastung ein Mechanismus spielt, der Glasfasern in Abhängigkeit von der Zeit mechanisch schwächt. Man bezeichnet diese Erscheinung als Stresskorrosion. Die befriedigendste Theorie zur Erklärung dieses Ermüdungsphänomens wurde durch Charles und Hillig [3; 4] formuliert. Sie nehmen an, dass das Quarzglas durch Wasser chemisch angegriffen wird. Die Reaktionsgeschwindigkeit (Risswachstum) nimmt mit der mechanischen Beanspruchung zu. Charles [5] verwendet ein Exponentialgesetz, um die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit als Funktion der Zugspannung auszudrücken:

$$v = k \sigma_p^n + k_{\text{kor}} \quad (8)$$

wobei n , k und k_{kor} materialabhängige Konstanten sind. Der Ausdruck k_{kor} (Risswachstum ohne Zugspannung, $\sigma_p = 0$) ist viel kleiner als das Risswachstum durch Stresskorrosion und kann somit vernachlässigt werden. Die Beziehung lautet dann vereinfacht:

$$v = k \sigma_p^n \quad (9)$$

Unter der Annahme, der durch Griffith eingeführte Faktor K_I sei ein Mass für die Stressintensität an der Rissspitze, kann man schreiben:

$$v = AK_I^n \quad (10)$$

Wobei A eine neue Materialkonstante ist. Der Exponent n wird Stresskorrosions-Suszeptibilität genannt, er ist umgebungsabhängig. Bei inerten Bedingungen (Ausschluss von Wasserdampf, sehr tiefe Temperaturen) gibt es kein Risswachstum. Damit sind die mathematischen Zusammenhänge für die Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Glasfasern unter Zugbeanspruchung bekannt. Anhand der Gleichungen (6) und (8) kann nun die Beziehung zwischen der Lebensdauer einer Glasfaser und der statischen Beanspruchung gefunden werden.

Im Prinzip lässt sich die Lebensdauer einer Faser bestimmen, indem man die Faser mit einer definierten Zugspannung belastet und die Zeit bis zum Bruch misst. Die Lebenserwartung der gleichen Faser in gleicher Umgebung (Versuchsbedingungen) kann dann in Funktion der Zugbeanspruchung extrapoliert werden.

Eine andere Methode für die Bestimmung der Lebensdauer von Glasfasern basiert auf dynamischen Belastungsversuchen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode stellt der Zeitgewinn gegenüber den unter Umständen sehr lange dauernden statischen Zugprüfversuchen dar. In einem weiteren Schritt sollen nun die Verhältnisse bei statischer und dynamischer Zugbeanspruchung betrachtet werden.

2.4 Statische Zugbeanspruchung von Glasfasern

Bei einer Faser, die statisch mit der Zugspannung σ_s beansprucht wird, kann die Zeit bis zum Bruch berechnet werden mit:

$$v = \frac{da}{dt} = AY^n \sigma_s^n a^{n/2} \quad (11)$$

Integration der Differentialgleichung ergibt

$$\int_{a_i}^{a(t)} a^{-n/2} da = \int_0^t AY^n \sigma_s^n dt' \quad (12)$$

wobei a_i die ursprüngliche Risstiefe ist; es gilt weiter:

$$a(t)^{-n/2+1} - a_i^{-n/2+1} = \left(-\frac{n}{2} + 1\right) AY^n \sigma_s^n t \quad (13)$$

Eine statisch mit σ_s belastete Faser bricht nach der Zeit t_s , wenn die Rissgrösse $a(t)$ einen kritischen Wert a_c angenommen hat. Für a_c gilt (Gl. 7):

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{Y\sigma_s}\right)^2 \quad (14)$$

mit K_{Ic} als kritischem Stressintensitätsfaktor (Gl. 6).

Die ursprüngliche Risstiefe a_i kann mit der Zugfestigkeit σ_i der Faser in inerter Umgebung (unter Ausschluss von Wasserdampf) in Beziehung gesetzt werden:

$$a_i = \left(\frac{K_{Ic}}{Y\sigma_i}\right)^2 \quad (15)$$

Substitution von (14) und (15) in (13) ergibt dann die Zeitdauer bis zum Brucheintritt:

$$t_s = B \frac{\sigma_i^{(n-2)} - \sigma_s^{(n-2)}}{\sigma_s^n} \quad (16)$$

worin

$$B = \frac{2}{(n-2) AY^2 K_{Ic}^{(n-2)}} \quad (16a)$$

Im Falle von Quarzglas ist n einiges grösser als 10, so dass bei Belastung einer Faser mit weniger als 90% ihrer inertten Zugfestigkeit gilt:

$$t_s = B \frac{\sigma_i^{n-2}}{\sigma_s^n} \quad (17)$$

und

$$\log t_s = -n \log \sigma_s + \log k_s \quad (17a)$$

wobei

$$k_s = B \sigma_i^{n-2} \quad (17b)$$

Gleichung (17) stellt nun die Grundgleichung dar, mit der die Lebensdauer t_s einer Glasfaser unter statischer Zugbeanspruchung σ_s beschrieben wird (vgl. Fig. 3). Allerdings müssen die Werte für n und B sowie für die inerte Zugfestigkeit σ_i der betreffenden Faser bekannt sein. Diese Parameter lassen sich, wie wir später sehen werden, anhand von dynamischen Zugprüfversuchen bestimmen. Nach bisher bekannten experimentellen Befunden variiert die Stresskorrosions-Suszeptibilität n , je nach Umgebungsbedingungen und Fasertyp, im Bereich von 14 bis 40, B von 1 bis 10^{-2} GPa²s.

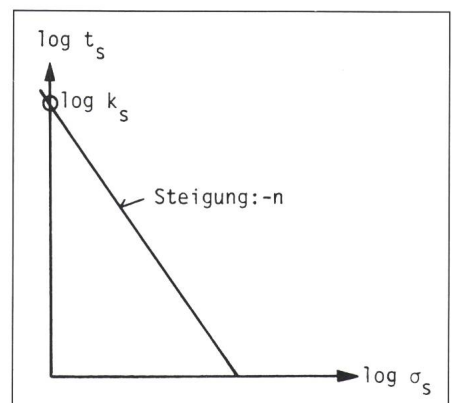


Fig. 3 Lebensdauer t_s einer Glasfaser unter statischer Zugbeanspruchung Gleichung (17)

2.5 Dynamische Zugbeanspruchung

Bei dynamischer Zugprüfung wird eine Glasfaser mit einer linear zunehmenden Zugspannung $\sigma(t)$ belastet:

$$\sigma = \beta t \quad (18)$$

wobei β die Abzugsgeschwindigkeit und t die Zeit ist. Die Differentialgleichung für die Rissgrösse a lautet dann:

$$v = \frac{da}{dt} = AY^n \beta^n t^n a^{n/2} \quad (19)$$

Integration ergibt

$$\int_{a_i}^{a(t)} \frac{da}{a^{n/2}} = AY^n \beta^n \cdot \int_0^t t^n \cdot dt \quad (20)$$

Somit gilt

$$a(t)^{1-n/2} - a_i^{1-n/2} = \frac{2-n}{2(n+1)} AY^n \frac{1}{\beta} (\beta t)^{n+1} \quad (21)$$

Eine dynamisch mit $\sigma = \beta t$ belastete Faser bricht nach der Zeit t_d , wenn die Rissgrösse $a(t)$ einen kritischen Wert a_c angenommen hat. Dabei ist t_d die Zeit, die zwischen dem Belastungsbeginn und dem Brucheintritt verstreicht. Man kann grundsätzlich zwei verschiedene Brucharten unterscheiden: Bei der einen nimmt die Risstiefe bis zum Brucheintritt praktisch nicht zu, $a(t_d) = a_i$, bei der anderen nimmt sie zu, $a(t_d) > a_i$. Die Bruchfestigkeit der ersten Sorte ist die sogenannte inerte Bruchfestigkeit σ_i :

$$\sigma_i = \beta t_d = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{a_i}} \quad (22)$$

Wenn ein Riss sich dagegen vor Brucheintritt ausdehnt und damit $a(t_d)$ im Vergleich zu a_i gross ist und n grösser als 14 ist, kann $a(t_d)$ in (21) vernachlässigt werden. Für die Zugfestigkeit gilt in diesem Falle die Beziehung:

$$\sigma_d = \beta t_d = \left[(\beta a_i^{1-n/2}) / \left(\frac{n-2}{2(n+1)} AY^n \right) \right]^{1/n+1} \quad (23)$$

und mit Hilfe von (16a)

$$\sigma_d = \beta t_d = \left[B\beta\sigma_i^{n-2} (n+1) \right]^{1/n+1} \quad (23a)$$

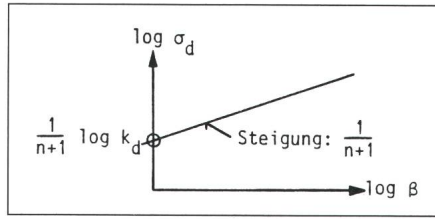


Fig. 4 Zugfestigkeit σ_d als Funktion der Abzugsgeschwindigkeit Gleichung (25)

Die Zuggeschwindigkeit β_d , bei welcher der Bruch ohne Risswachstum erfolgt, kann mit Hilfe der Gleichung (23a) annäherungsweise berechnet werden, indem $\sigma_i = \sigma_d$ gesetzt wird:

$$\beta_d = \frac{\sigma_i^3}{B(n+1)} \quad (24)$$

Soll nun experimentell die inerte Zugfestigkeit σ_i ermittelt werden, so muss die Abzugsgeschwindigkeit $\beta \gg \beta_d$ sein. Gleichung (23a) kann auch geschrieben werden als:

$$\log \sigma_d = \frac{1}{n+1} \log \beta + \frac{1}{n+1} \log k_d \quad (25)$$

wobei

$$k_d = (n+1) \cdot B \cdot \sigma_i^{n-2} \quad (25a)$$

und aus Gleichung (17b)

$$\log k_s = \log k_d - \log (n+1) \quad (26)$$

Da man nun die Zugfestigkeit σ_d als Funktion der Abzugsgeschwindigkeit β gemessen hat, kann man mit Hilfe der Gleichung (25) die Werte für n und mit Hilfe von Gleichung (25a) jene für $B\sigma_i^{n-2}$ bestimmen (Fig. 4). Somit stehen nun alle zur Bestimmung der Lebensdauer einer Faser (Gl. 17) notwendigen Parameter zur Verfügung.

3. Zugfestigkeitsverteilungen von Glasfasern

In den vorangehenden Abschnitten sind die mathematischen Zusammenhänge zwischen den für das mechanische Verhalten von Glasfasern massgeblichen Parametern aufgezeigt worden.

Führt man nun an Glasfasern mechanische Experimente durch, so stellt man sehr rasch fest, dass diese im Gegensatz etwa zu Stahldraht oder Kunststofffilamenten keine leicht definierbare, in einem engen Bereich variierende Zugfestigkeit aufweisen. Für die starke Streuung der Zugfestigkeit von Glasfasern ist, wie man ohne weiteres einsehen kann, das Phänomen der Stresskorrosion, das unter gewissen Voraussetzungen zum Anwachsen anfänglich vorhandener, kleinster Risse führt, mitverantwortlich. Es gibt jedoch noch andere Gründe dafür, auf die wir jetzt eingehen wollen.

Alle bisherigen Beobachtungen beziehen sich nur auf einen einzelnen, in einer gewissen Glasfaserlänge auftretenden Riss. In Wirklichkeit enthält ein bestimmter Faserabschnitt eine undefinierte Anzahl Defekte von unterschiedlicher Ausprägung, Grösse und Form, die in beliebiger Verteilung über die betrachtete Faserlänge verteilt auftreten. Die Zugfestigkeit eines Faserabschnitts wird durch den Einfluss des grössten, darin enthaltenen Defekts bestimmt. Sie wird damit von der geprüften Faserlänge abhängig, da die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines solchen mit zunehmender Faserlänge steigt. Zu der durch Stresskorrosion verursachten Zeit- und Umgebungsabhängigkeit tritt somit die Längenabhängigkeit der Zugfestigkeit von Glasfasern, ein Faktor, der die mechanische Prüfung von Glasfasern wesentlich kompliziert. Die Zugfestigkeit einer Glasfaser wird dadurch zu einer statistischen Grösse, die nur unter Zuhilfenahme statistischer Methoden erfasst werden kann.

In Fällen, bei denen Bruch zum Versagen von Komponenten führt, stellt die Weibull-Statistik ein geeignetes analytisches Instrument zur Verarbeitung und Interpretation experimenteller Werte dar. Die meisten Autoren verwenden sie denn auch zur Abschätzung der bei verschiedenen mechanischen Beanspruchungen, Expositionszeiten und Faserlängen zu erwartenden Fehlerraten.

Weibull [6] geht von der Annahme aus, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Prüflings bestimmter Länge durch Multiplikation der Überlebenswahrscheinlichkeit aller seiner (infinitesimalen) Elemente bestimmt werden kann. Die durch Weibull hergeleitete Beziehung zwischen der Bruchwahrscheinlichkeit F und der Bruchbeanspruchung σ lautet:

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \left(\frac{L}{L_0} \right) \right\} \quad (27)$$

Darin ist m der Weibull-Verteilungsformfaktor, er entspricht der Steigung der Weibull-Kurve. L ist die Prüflingslänge, σ_0 die Beanspruchung, welche bei einer Einheitsprüflingslänge L einer Bruchwahrscheinlichkeit von $F = 0,63$ entspricht ($F = 1 - \exp(-1) = 0,63$). Ein ähnlicher Ausdruck gibt die Beziehung zwischen Bruchwahrscheinlichkeit F und Expositionsdauer t wieder:

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{t_0} \right)^b \right\} \quad (27a)$$

wobei b ein mit der Stresskorrosions-suszeptibilität zusammenhängender Parameter ist. Die Kombination von (27) und (27a) ergibt dann:

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \left(\frac{t}{t_0} \right)^b \left(\frac{L}{L_0} \right) \right\} \quad (27b)$$

Für eine bestimmte Fehlerwahrscheinlichkeit lässt sich nun aus der Bruchbeanspruchung σ_1 , der Prüflingslänge L_1 und der Expositionsdauer t_1 die Beanspruchung σ_2 einer Prüflingslänge L_2 und einer Expositionsdauer t_2 berechnen:

$$\sigma_1^m t_1^b L_1 = \sigma_2^m t_2^b L_2 \quad (28)$$

Nach empirischer Ermittlung der Werte von m und b für einen bestimmten Fasertyp in experimentell praktikablen Belastungs-, Zeit- und Längenbereichen kann dann auf lange Faserlängen und Expositionzeiten extrapoliert werden. Für die Extrapolation über einige Größenordnungen darf angenommen werden, dass m und b echte Konstanten sind. Die experimentellen Daten lassen sich in sogenannten Weibull-Verteilungskurven darstellen, indem die kumulierte Bruchwahrscheinlichkeit gegen die Bruchlast beziehungsweise die Bruchdehnung aufgezeichnet wird. In Figur 5 ist der allgemeine Fall einer Weibull-Kurve wiedergegeben. Der Kurvenverlauf gibt indirekt die Verteilungscharakteristik der Rissgrößen wieder. Die Mehrheit der Proben

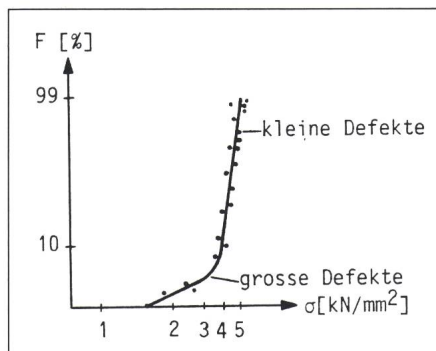


Fig. 5 Versuchsergebnisse in einer Weibull-Verteilungskurve

bricht bei hoher Beanspruchung infolge zahlreicher vorhandener kleiner und kleinster Risse. Eine kleine Anzahl der Prüflinge beinhaltet grosse Risse, die schon bei geringer Beanspruchung zum Bruch führen.

Für die Praxis ist naturgemäss das untere Ende einer Weibull-Kurve von Bedeutung, da die Wahrscheinlichkeit des Auftretens grosser Risse mit zunehmender Faserlänge ansteigt. Streng genommen müsste die Weibull-Verteilungskurve immer einer geraden Linie mit der Steigung m entsprechen (monomodale Verteilung). In Wirklichkeit ist dies meist nicht der Fall, da in der Regel mehrere Defektpopulationen unterschiedlicher Prägung auftreten, was zu bi- oder mehrmodalen Verteilungen führt.

4. Durchlaufprüfverfahren

Durchlaufprüfverfahren erlauben es, eine Garantie der mechanischen Festigkeit einer optischen Faser zu geben, wie sie handelsüblich verlangt wird. In diesen Verfahren wird die gesamte Faserlänge einer mechanischen Beanspruchung unterzogen, die grösser ist als jene, die während der Kabelherstellung, der Kabelverlegung und dem Anlagenbetrieb zu erwarten ist. Dadurch eliminiert man alle Faserabschnitte, deren mechanische Festigkeit dem im Prüfverfahren gewählten Beanspruchungsniveau nicht genügt.

Die Prüfbeanspruchung kann als Zugspannung, als Biegespannung oder als Biegezugspannung erfolgen. Die Figur 6 zeigt das Prinzip einer Durchlaufprüfanlage. Die Faser wird von der Spule a abgewickelt und auf die Spule b aufgewickelt. Die Zugspannung wird zwischen den Zylindern E und F der beiden Kapstanelemente e und f angelegt. Die Ab- und Aufwickelspannung der Faser wird durch zwei bewegliche Rollenspiele c

und d geregelt und durch Verwendung von Doppelkapstansystemen von der Prüfzugspannung unabhängig gemacht. Diese wird dadurch realisiert, dass die beiden Zylinder E und F mit leicht verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten angetrieben werden. Die momentane Zugspannung wird mit Hilfe einer auf der Achse der freien Rolle m montierten Kraftmesszelle kontrolliert. Dieses Signal dient gleichzeitig der Regelung der Drehgeschwindigkeit der beiden Zylinder E und F , so dass die gewünschte Zugspannung konstant gehalten werden kann. Die Zylinder E und F sind mit einer kautschukartigen Beschichtung versehen, welche den Haftreibungskoeffizienten zwischen Faser und Zylinderlaufflächen erhöht, um das Gleiten der Faser zu verhindern. Der Durchmesser der Messrolle m wird so gross gewählt, dass die Biegespannung gegenüber der angewendeten Zugspannung vernachlässigbar ist. Die Abwickelspannung beträgt maximal 10% der Prüfzugspannung, und die Aufwickelspannung entspricht dem minimalen, für die nachfolgende Verwendung der Faser (Lagerung, Versand, Bündelverseilung) geeigneten Wert. Die Versuchsdauer ist durch die Durchlaufgeschwindigkeit bestimmt.

Die Durchlaufprüfung wird gewöhnlich bei Normalbedingungen ($21 \pm 2^\circ\text{C}$, $55 \pm 10\%$ relative Feuchte) durchgeführt. Bei optischen Fasern für normale Anwendungen wird die Zugspannung mit 5 N (0,406 GPa) festgelegt, was etwa einer Faserdehnung von 0,56% entspricht. Ausgedrückt in Risstiefen garantiert dieses Beanspruchungsniveau laut (7), dass eine Faser, welche diese Prüfung bestanden hat, keine Risse enthält, deren Tiefe $0,2 \mu\text{m}$ übersteigt.

Falls die Werte von B und n bekannt sind, können die Beziehungen (16) und (17) verwendet werden, um die minimale Lebensdauer ohne Bruch einer derart geprüften Faser abzuschätzen, die im Betrieb ständig einer

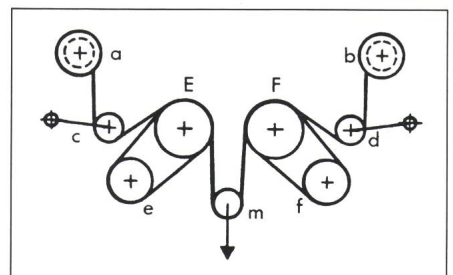


Fig. 6 Prinzipschema eines Durchlauftests

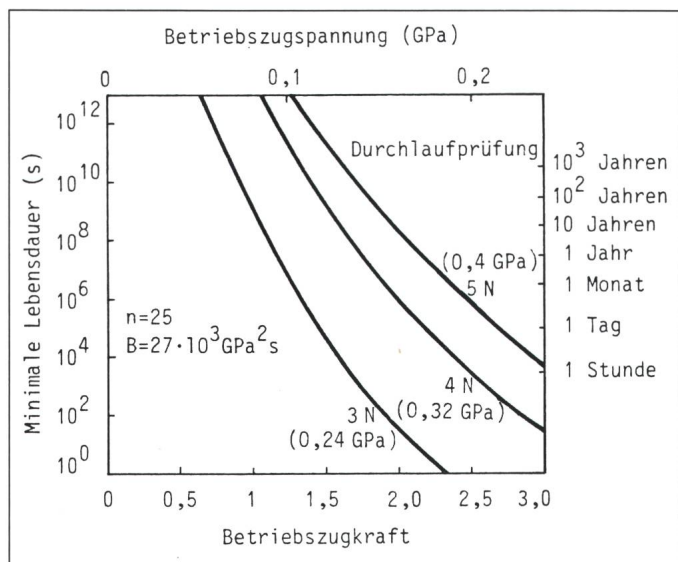


Fig. 7
Minimale Lebensdauer einer Faser, die den Durchlauftest bestanden hat, in Funktion der Durchlauftestbeanspruchung und der während des Anlagenbetriebs permanent wirkenden Zugkraft

bestimmten Zugbeanspruchung ausgesetzt ist. Für eine Faser, die der Durchlaufprüfung unterzogen wurde, gilt dann: $\sigma_i \geq \sigma_e$, wobei σ_i die anfängliche mechanische Festigkeit der Faser nach der Prüfung und σ_e die Prüfzugbeanspruchung ist. Unter diesen Bedingungen kann die Gleichung (16) formuliert werden als:

$$t_s \geq B \frac{\sigma_e^{n-2}}{\sigma_s^n} \quad (29)$$

Diese Beziehung ist nicht nur von der Länge der Faser, sondern auch von deren Bruchfestigkeit in inerter Umgebung sowie von der Dauer der Durchlaufprüfung und der Umgebung, in welcher diese durchgeführt wurde, unabhängig. Die Figur 7 zeigt Kurven der minimalen Lebensdauer ohne Faserbruch in Abhängigkeit der während des Betriebs wirkenden Zugkraft, die für drei verschiedene Prüfzugspannungen berechnet wurden. Der Wert der Stresskorrosions-Suszeptibilität $n = 25$, der für die Berechnungen verwendet wurde, konnte anhand von dynamischen Zugversuchen an einer Faser der Standardproduktion experimentell ermittelt werden. Die Mate-

rialkonstante B wurde unter Verwendung einer empirischen Beziehung berechnet, die aus Ergebnissen der Messung von B und n durch Kalish et al. [7] abgeleitet werden kann und B in Funktion von n wiedergibt:

$$B(n) = \frac{2,94 \cdot 10^{19}}{(n-2) \cdot 1,28^n} \text{ Pa}^2 \text{ s} \quad (30)$$

Man stellt fest, dass die minimale Lebensdauer einer Faser (ohne Bruch), welche die Durchlaufprüfung bei 5 N bestanden hat, über 1000 Jahre beträgt, falls die permanent auf die Faser wirkende Zugkraft 1,5 N nicht übersteigt, dass sie sich jedoch bei Verdoppelung der Zugbeanspruchung auf etwa 1 Stunde reduziert. Solche Informationen sind sehr nützlich für die Berechnung der Kabelstruktur und die Bestimmung der Fabrikations-, Verlegungs- und Betriebsspezifikationen eines Glasfaserkabels.

5. Schlussfolgerungen

In diesem Artikel sind alle theoretischen Grundlagen, die zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens

von Glasfasern für Fernmeldeanwendungen nötig sind, vorgestellt worden. Daraus geht hervor, dass wegen der statistischen und zeitabhängigen Natur des Bruchmechanismus von Quarzglas eine grosse Anzahl von Messungen erforderlich sind, um die mechanischen Eigenschaften eines bestimmten Fasertyps bei definierten Umgebungsbedingungen vollständig zu charakterisieren. Prüfmethode in der Art der vorgestellten Durchlaufprüfung ermöglichen es indessen, eine gewisse Lebenserwartung garantieren zu können.

Optische Fasern der heutigen Produktion weisen, gemessen an kurzen Prüflingen, Zugfestigkeiten von 60 bis 70 N auf und werden systematisch mit 5 N im Durchlauftest geprüft. Da die Kabelstrukturen und die Kabelherstellungsverfahren so ausgelegt sind, dass während der Produktion, der Kabelverlegung und des Anlagenbetriebs die maximalen Zugkräfte etwa 15% der Prüfzugbeanspruchung nicht überschreiten, ist die Zuverlässigkeit der Glasfaserkabel als Übertragungsmedium gewährleistet.

Literatur

- [1] C.E. Inglis: Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Transactions of the Institution of Naval Architects 55(1913)1, p. 219...241.
- [2] A.A. Griffith: The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, series A 221(1920)-, p. 163...198.
- [3] R.J. Charles and W.B. Hillig: Symposium on the mechanical strength of glass and ways of improving it. Charleroi/Belgium, Union Scientifique Continentale du Verre, 1962.
- [4] W.B. Hillig and R.J. Charles: Surfaces, stress-dependent surface reactions and strength. In: V.F. Zackay: High-strength materials. London/New York/Sydney, John Wiley; 1965; p. 682...705.
- [5] J.R. Charles: Static fatigue of glass. I and II. Journal of Applied Physics 29(1958)11, p. 1549...1560.
- [6] W. Weibull: Statistical theory of strength of materials. Ingeniors Vetenskaps Akademi Handlinger -(1939)151.
- [7] D. Kalish and B. Tariyal: Static and dynamic fatigue of a polymer-coated fused silica optical fiber, Journal of the American Ceramic Society 61(1978)11/12, p. 518...523.