

# Lichtleitsysteme für das ultraviolette Spektralgebiet

Von Helmut Dislich und Alfred Jacobsen<sup>[\*]</sup>

Während für die Leitung des sichtbaren Lichtes vielfältige und technisch sehr verfeinerte Faseroptiken seit Jahren im technischen Einsatz sind, blieb der Stand der Technik beim Übertragen von ultraviolettem Licht bei den altbekannten, jedoch aufwendigen Linsen und Prismen aus Quarzglas stehen. Die Ursache dafür war das Fehlen geeigneter Materialien. Weder mit reinen Glas-Glas-Lichtleitern – gemeint ist damit das Kern- und Mantelmaterial – noch mit Kunststoff-Kunststoff-Lichtleitern lässt sich UV-Licht in technisch verwertbarem Ausmaß transportieren. – Durch Kombination eines Kieselglasses als Kernmaterial mit einem Mantelmaterial aus Tetrafluoräthylen-Hexafluorpropylen-Copolymerisat oder aus Methylpolysiloxan lassen sich UV-Lichtleiter für Wellenlängen bis hinunter zu 200 nm herstellen. Faseroptiken dieser Art sind für die medizinische Technik, die Medizin und für viele technische und wissenschaftliche Gebiete ein neues Werkzeug, über dessen Anwendungsbreite heute noch keine erschöpfende Aussagen möglich sind.

## 1. Das Prinzip der Lichtleitung

Versucht man einen Stab oder eine Faser aus transparentem Material von hohem Brechwert  $n_1$  mit einem ebenfalls transparenten Mantel aus einem Material von kleinerem Brechwert  $n_2$ , so wird Licht, das auf die Stirnfläche einfällt, infolge Totalreflexion weitergeleitet. Das Licht wird an der Grenzfläche dieser Medien verlustlos (total) reflektiert (bei Reflexion an einer Spiegelfläche tritt demgegenüber ein Verlust ein) und wird zickzackförmig durch das System geführt, bis es am Ende wieder austritt. Wichtige Kenndaten für solche Systeme sind:

1. die Lichtdurchlässigkeit
2. der Öffnungswinkel.

Beide sollen möglichst groß sein. Um das zu erreichen, muß vor allem das Kernmaterial vorzüglich durchlässig sein

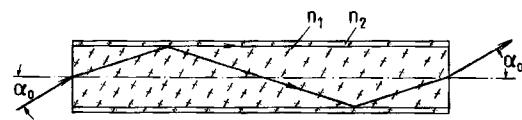


Abb. 1. Prinzip der Lichtleitung.

und die ebenfalls durchlässige Mantelschicht einen ausgezeichneten optischen Kontakt zum Kern haben. Das heißt, der Mantel muß überall glatt und gleichmäßig aufliegen, um verlustlose Totalreflexion zu ermöglichen. Die Differenz der Brechwerte  $n_1 - n_2$  soll möglichst groß sein, denn diese bestimmt nach

$$n_0 \cdot \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

den Öffnungswinkel  $2\alpha_0$  ( $n_0$  ist der Brechwert des umgebenden Mediums), unter dem Licht fortgeleitet werden kann (siehe Abb. 1).

[\*] Dr. H. Dislich und Dipl.-Phys. A. Jacobsen  
Laboratorien des Jenaer Glaswerk Schott & Gen.  
65 Mainz, Postfach 2480

### 1.1. Bekannte Systeme

Der einfachste Fall einer Lichtleitung liegt dann vor, wenn Licht auf geradem oder nur wenig gekrümmtem Wege (Biegeradius  $> 20$  Durchmesser) durch einen nicht ummantelten Stab aus Glas oder Kunststoff übertragen wird. Dabei übernimmt die umgebende Luft die Rolle des niedrigbrechenden Mantels. Solche Systeme bringen große Nachteile mit sich, da die optisch wirksame Mantelfläche frei liegt und Kratzer und Staubansammlungen zu Lichtstreuung und damit zu Lichtverlust führen. In der Praxis gibt es daher ganz überwiegend nur ummantelte Lichtleiter.

Die ummantelten Systeme entsprechen der Abbildung 1 und bedürfen, soweit es sich um massive starre Stäbe handelt, keiner weiteren Erläuterung. Wesentlich bekannter geworden sind jedoch die „flexiblen Lichtleitfaserbündel“, schon allein des Effektes wegen, daß man mit ihnen „Licht um Ecken leiten kann“, ja sogar im Falle „geordneter Faserbündel“ um die Ecke gucken kann, welche Möglichkeit auch den optischen Laien fasziniert. Das Licht wird hier durch biegsame optisch isolierte Fasern – analog Abbildung 1 – geleitet. Eine Vielzahl dieser Fasern sind zu einem Bündel vereinigt, wobei die Fasern nur in der Nähe der Enden miteinander verkittet sind; die Enden selbst sind poliert. Die Bündel stecken in einem Metall- oder PVC-Schutzschlauch und lassen sich in der Medizinoptik (Endoskopie) und der Technik vielseitig verwenden. Entspricht die Anordnung der Fasern zueinander an der Stelle des Lichteintrittes derjenigen an der Stelle des Lichtaustrettes, so ist eine Bildübertragung möglich. Sind die Fasern ungeordnet, dienen sie nur der Lichtübertragung.

Letztlich sollen noch die Faserstäbe erwähnt werden, die ebenfalls aus einer Vielzahl von optisch isolierten Fasern bestehen, die in der ganzen Länge miteinander verschmolzen und demzufolge starr sind. Sie sind geordnet, also bildübertragend, und können nachträglich um relativ scharfe Ecken gebogen werden.

Auf diesen Grundtypen aufbauend, gibt es eine Vielzahl von interessanten Variationen, die die bisherigen Möglichkeiten in der Optik entscheidend erweitern. Es ist jedoch

nicht Sinn dieses Fortschrittsberichtes, den Stand der Technik in dieser Hinsicht umfassend darzustellen. Dies ist an anderer Stelle geschehen<sup>[1]</sup>.

## 2. Materialien

Zum eigentlichen Thema leitet die Frage nach den verwendbaren Materialien über. Entscheidend ist, wie oben erwähnt, die Lichtdurchlässigkeit. Das klassische Material der Optik ist das Glas. Die gesamte Faseroptik-Entwicklung im Jenaer Glaswerk Schott & Gen. ist mit hochwertigen optischen Gläsern durchgeführt worden, so daß die im Handel erhältlichen Produkte<sup>[2]</sup> sowohl im Kern als auch im Mantel aus Glas bestehen.

Die Verwendungsmöglichkeit von reinen Kunststoff-Systemen ist seit langem diskutiert worden. So stellte Kapany<sup>[3]</sup> fest, daß die faserbildenden Polymeren im gezogenen Zustand, ihrer auf teilweiser Kristallinität beruhenden Anisotropie wegen, der Glasfaser gegenüber Nachteile aufweisen. Gleicher bemerkte er bezüglich der Oberflächenqualität. Tatsächlich sind jedoch von Du Pont entwickelte flexible Systeme aus Kunststoff<sup>[4, 5]</sup> hergestellt worden. Sie bestehen aus einem Kern von Polymethylmethacrylat und einem niedrig brechenden Mantel aus partiell fluorierten Kunststoffen.

Uns interessierte der Kunststoff lediglich als Mantelmaterial, um die hervorragenden Eigenschaften des Glases als Kernmaterial zu erhalten, insbesondere die gute optische Durchlässigkeit (Lichtdurchlässigkeit), die Exaktheit der Oberfläche und die gute Polierbarkeit der Stirnflächen, an denen das Licht aus- und eintritt.

### 2.1. Das Kernmaterial der UV-Leiter

Alle bis jetzt besprochenen Möglichkeiten befassen sich mit der Leitung des sichtbaren Lichtes, zum Teil bis in das nahe infrarote Gebiet hinein. Ultraviolette Licht kürzerer Wellenlängen ließ sich nicht leiten, weil die Kernmaterialien nicht über eine hinreichende Durchlässigkeit verfügen. Beziiglich der Auswahl eines Kernmaterials für Licht mit Wellenlängen bis hinunter zu 200 nm entfällt die Qual der Wahl; man kann praktisch nur mit hochreinem Kieselglas arbeiten, das in optisch hervorragender Qualität (insbesondere blasenfrei) vorliegen muß und das zu Fasern verarbeitbar ist. Wir verwendeten Suprasil® der Fa. Heraeus-Schott, Quarzschmelze GmbH. Für Licht von 365 nm und nicht zu großer Weglänge ist gelegentlich der Einsatz spezieller UV-durchlässiger Gläser noch begrenzt möglich. Da dies jedoch nicht von prinzipieller Bedeutung ist, sei es nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

### 2.2. Das Mantelmaterial der UV-Leiter

Kiegelglas hat bei verschiedenen Wellenlängen folgende Brechwerte:  $n_{546} = 1.460$ ;  $n_{365} = 1.475$ ;  $n_{155} = 1.506$ .

Ein optisch isolierender Mantel für Kieselglas muß also aus einem bei allen Wellenlängen hinreichend niedriger

brechenden und für Licht der betreffenden Wellenlänge durchlässigen Material bestehen.

Der erste Blick richtet sich natürlich auf die große Palette der optischen Gläser, die in Abbildung 2 in der üblichen Art des  $n_d$ - $v_d$ -Diagramms aufgetragen ist.

Dabei ist  $n_d$  der Brechwert für die d-Linie (587.6 nm) und  $v_d$  die Abbésche Zahl, ein Maß für die Dispersion.

Obwohl der Optik-Katalog des Jenaer Glaswerk Schott & Gen. einige hundert Arten optischer Gläser aufweist, erkennt man gleich, daß sich kein geeignetes Mantelmaterial mit hinreichend niedrigem Brechwert darunter befindet. Wir sind hier an eine Grenze der derzeitigen optischen Möglichkeiten der Gläser gestoßen. In Abbildung 2 ist durch eine gestrichelte Linie die derzeitige Grenze des Glasgebietes in Richtung kleiner Brechwerte bezeichnet. Die ausgezogenen Linien sind die Grenzen der einzelnen Glastypen. Die strichpunktuierte Linie umfaßt das Gebiet der transparenten Kunststoffe. Nach oben in Richtung hoher Brechwerte reicht das Glasgebiet weit über das Diagramm hinaus.

Da bezüglich eines geeigneten Mantelmaterials die Gläser nicht weiterhelfen, stellt sich zunächst die Frage nach anderen anorganischen, UV-durchlässigen Materialien von extrem kleinem Brechwert. Geläufig ist hier das Magnesiumfluorid als transparente Aufdampfschicht, wie es z. B. als Entspiegelungsschicht auf optischen Linsen benutzt wird.

Während die Materialeigenschaften erfolgversprechend sind, setzen die technischen Schwierigkeiten des Aufdampfens solcher Schichten in der Dicke von einigen  $\mu\text{m}$  auf Fasern so enge Grenzen, daß keine technisch brauchbaren Produkte resultieren<sup>[6]</sup>.

### 2.3. Optische Eigenschaften von Kunststoffen

Eine weitere noch verbleibende Alternative zu den klassischen Materialien der Optik, den Gläsern, bieten die transparenten Kunststoffe, deren Gebiet im  $n_d$ - $v_d$ -Diagramm (Abb. 2) schraffiert gekennzeichnet ist. Zunächst ist grundsätzlich interessant, daß das Gebiet der transparenten Kunststoffe beträchtlich über das der Gläser hinausgeht und sich nur teilweise mit ihm überschneidet<sup>[7]</sup>. Vergleicht man generell die Lagen im  $n_d$ - $v_d$ -Diagramm (optische Lagen) mit dem chemischen Bau der Polymeren, so ergeben sich einfache, im Grunde längst bekannte Prinzipien<sup>[8]</sup>, die durch neu entwickelte Kunststoffe nur bestätigt oder ergänzt werden.

Hocharomatische Kunststoffe wie Polystyrol, Polyaryl-carbonate oder gar Poly-N-vinylcarbazol haben hohe Brechwerte und kleine Abbésche Zahlen; fluorierte, insbesondere perfluorierte Polymere zeichnen sich durch kleine Brechwerte und hohe Abbésche Zahlen aus.

Mit der Lorentz-Lorenzschen Beziehung

$$R_M = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{d}$$

$R_M$  = Molrefraktion,  $M$  = Molekulargewicht,  $d$  = Dichte,  $n$  = Brechwert

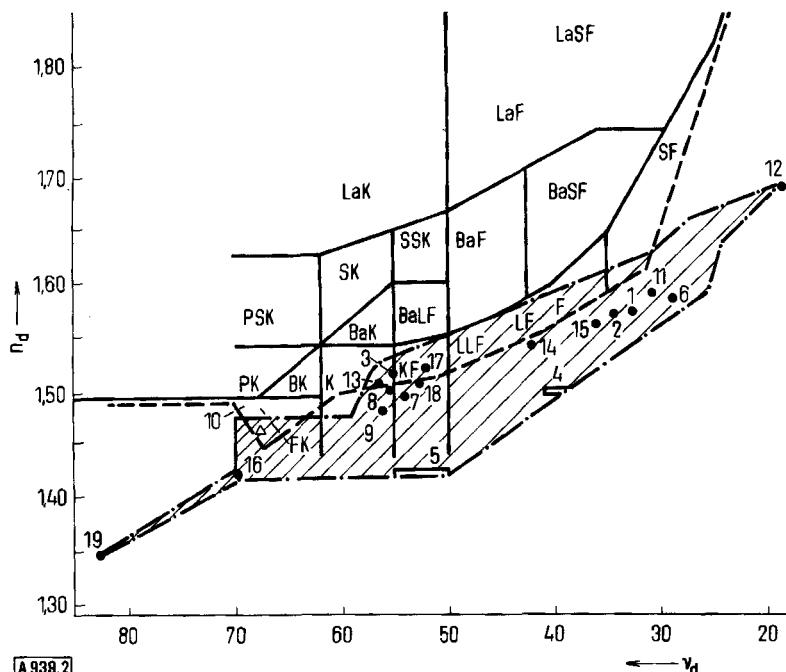


Abb. 2. Glasgebiet und Kunststoffgebiet im  $n_d$ - $v_d$ -Diagramm.  $v_d = (n_d - 1)/(n_F - n_C)$  (Abbesche Zahl).  $n_F$ ,  $n_C$ : Brechwerte für die Linien F bzw. C. ——: Derzeitige Grenze des Glasgebietes; - - -: derzeitige Grenze des Gebietes der transparenten Kunststoffe mit bekannten  $n_d$ - $v_d$ -Werten. Δ: Quarzglas; ●: Kunststoffe 1–19. 1 = Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat; 2 = Poly- $\alpha$ -diallylphthalat; 3 = Polymethyl- $\alpha$ -chloracrylat; 4 = Methyl-phenyl-polysiloxan; 5 = Methyl-polysiloxan; 6 = Poly- $\alpha$ , $\alpha$ -dimethyl- $p$ -( $p$ -hydroxyphenylmethyl)-phenyl-hydrogencarbonat; 7 = Polymethylmethacrylat; 8 = Poly-diäthylenglykol-diallyl-carbonat; 9 = Celluloseacetat; 10 = Cellulosepropionat; 11 = Polystyrol; 12 = Poly-*N*-vinylcarbazol; 13 = Polycyclohexylmethacrylat; 14 = Polyvinylchlorid; 15 = Epoxidharz (Araldit Cy 206); 16 = Poly-(2,2,2-trifluoroisopropyl)methacrylat; 17 = Methylmethacrylat- $\alpha$ -Methylstyrol-Copolymerisat; 18 = Methylmethacrylat-Acrylnitril-Copolymerisat; 19 = Tetrafluoräthylen-Hexafluorpropyl-Copolymerisat (Teflon FEP).

kann man abschätzen – bei bekannter Dichte mit Atom-, Gruppen- und Bindungsrefraktionen auch einigermaßen befriedigend berechnen – welche mutmaßlichen Grenzen bezüglich der optischen Lage den Kunststoffen gesetzt werden<sup>[18]</sup>. Schließt man hypothetische Polymere einmal spekulativ in diese Kalkulation ein, so kommt man zu dem Ergebnis, daß es aus heutiger Sicht vermutlich keine Polymere mit Brechwerten wesentlich über  $n_d = 1.73$  und unter  $n_d = 1.33$  geben wird und daß der Kern des Glasgebietes von Kunststoffen nicht erreicht werden kann.

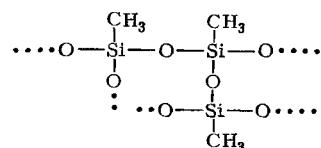
Am Rande sei vermerkt, daß dies der mitunter zitierten Konkurrenzsituation zwischen optischen Gläsern und Kunststoffen Grenzen setzt. Die Konkurrenzsituation ist gegeben im Überlappungsgebiet der Gläser und Kunststoffe. Interessanter sind jedoch für die Optik in aller Regel die Glas-Kunststoff-Kombinationen, so speziell auch hier im Falle der UV-Lichtleiter.

Es gibt seit jüngerer Zeit Kunststoffe, deren chemischer Aufbau gemäß der hier erläuterten Beziehungen optische Eigenschaften erwarten ließ, wie sie für ein Mantelmaterial für UV-Lichtleiter zu fordern sind. Dies sind Methylpolysiloxan und Tetrafluoräthylen-Hexafluorpropyl-Copolymerisat (Nr. 5 bzw. 19 in Abb. 2).

#### 2.4. Methylpolysiloxan

Wie kann nun für ein Mantelmaterial der Brechwert des Quarzglases unter Erhaltung der UV-Durchlässigkeit

unterboten werden? Dies gelingt mit einem Mitte der sechziger Jahre in optischer Qualität bekannt gewordenen Methylpolysiloxan<sup>[19]</sup>, in welchem das Si—O-Gerüst des



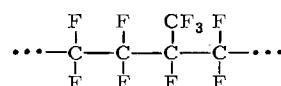
Quarzglases pro Silicium-Atom eine Methyl-Gruppe trägt. Es ist im Prinzip erhältlich durch Hydrolyse und Polykondensation eines Methyltrialkoxilsilans  $\text{CH}_3\text{—Si}(\text{OR})_3$ <sup>[19]</sup> und ist im ausgehärteten Zustand trifunktionell vernetzt. Das optisch völlig klare Material hat bei sehr guter UV-Durchlässigkeit durch den  $\text{CH}_3$ -Einbau hinreichend erniedrigte Brechwerte: Bei 546 nm ist der Brechwert von 1.460 auf 1.418 und bei 365 nm von 1.475 auf 1.453 gesunken.

Ein Kieselglasstab wird in eine 50-proz. alkoholische Lösung des ankondensierten Methyltriäthoxilsilans getaucht und mit konstanter Geschwindigkeit – diese bestimmt neben anderen Parametern wesentlich die Schichtdicke – herausgezogen und auf maximal 135 °C erhitzt. Der Kieselstab wird dadurch mit einem Mantel in sehr guter optischer Qualität versehen und weist bei 365 nm einen Öffnungswinkel von  $2\alpha_0 = 29^\circ$  auf.

Mit diesen starren Lichtleitern<sup>[10, 11]</sup> konnten zwar einige Probleme beim Transport von UV-Licht gelöst werden, doch blieb als wesentliches Ziel die flexible UV-Faseroptik. Prinzipiell läßt sich – was hier erforderlich ist – eine Kieselglasfaser kontinuierlich beschichten. Jedoch sind die Aushärtezeiten bei der oben erwähnten Polykondensation, insbesondere wenn eine gute optische Qualität resultieren muß, für eine Fertigung zu lang. Ziel der weiteren Untersuchungen war daher ein Kunststoff mit noch kleinem Brechwert und schnellerer Verfestigung.

## 2.5. Tetrafluoräthylen-Hexafluorpropylen-Copolymerisat

Punkt 19 in Abbildung 2 gibt die extreme optische Lage des unter dem Handelsnamen Teflon FEP® bekannten Materials an. Mit  $n_{546} = 1.347$ ,  $n_{365} = 1.356$  und  $n_{255} = 1.376$  hat es den niedrigsten Brechwert unter den heute bekannten Kunststoffen. Aufgrund seiner verzweigten Struktur als Copolymerisat aus Tetrafluoräthylen und Hexafluorpropylen unterliegt es nicht der starken Kristallisationstendenz wie das Polytetrafluoräthylen und bleibt daher hinreichend transparent. Aus wässriger Dispersion lassen sich Schichten aus feinsten Partikeln aufbringen, die nach Entfernen des Wassers und der Dispergierhilfsmittel durch Erhitzen zu einem zusammenhängenden, optisch einwandfreien Film zusammengeschmolzen werden können. Diese Eigenschaft weist ebenfalls nur das Copolymerisat und nicht das Polytetrafluoräthylen auf.



Es sei darauf verzichtet, die technisch sowohl interessante als auch mühevolle Entwicklung der kontinuierlichen Beschichtung einer 100 µm dicken Kieselglasfaser im Detail zu schildern<sup>[12]</sup>. Es war zunächst erforderlich, eine blasen-, schlieren- und kratzfreie Faser gleichmäßiger Dicke aus Kieselglas kontinuierlich zu ziehen. Diese Faser wurde durch das Bad der wässrigen Teflon-FEP-Dispersion und anschließend durch einen langen Ofen geführt. Die sich

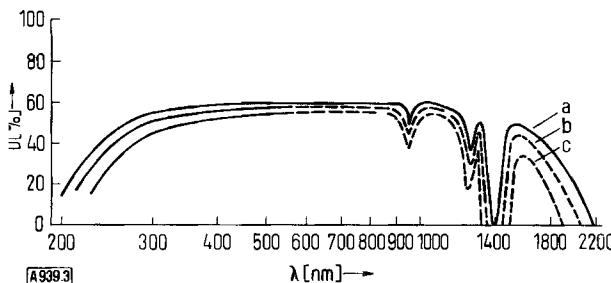


Abb. 3. Spektrale Durchlässigkeit (D) flexibler UV-Lichtleiter aus Teflon-FEP-beschichtetem Kieselglas. Lichtleiterlänge: a 500 mm, b 1000 mm, c 1800 mm.

dabei abspielenden Vorgänge des Trocknens, des Verdampfens der Dispergierhilfsmittel und des Zusammenschmelzens der verbleibenden Teflon-FEP-Partikeln erforderten

ein genaues Abstimmen eines Temperaturgradienten und der Zeit, vor allem, weil die thermische Zersetzung des Copolymerisats vermieden werden mußte. Es war besondere Sorgfalt erforderlich, um die relativ bruchempfindliche Faser über viele Umlenkrollen zu führen, ohne die Oberfläche zu verletzen<sup>[1]</sup>.

Wesentlich erscheint, daß durch und nur durch Kombination der hervorragenden UV-Durchlässigkeit des Kieselglases und seiner Verarbeitbarkeit zu Fasern mit der guten UV-Durchlässigkeit und dem extrem kleinen Brechwert eines Polyperfluoralkans<sup>[13]</sup> das Problem der Leitung von UV-Licht auf beliebigem Wege und an beliebige Stellen gelöst werden konnte<sup>[12]</sup>.

Abbildung 3 zeigt die spektrale Durchlässigkeit der zu einem Faserbündel zusammengefaßten flexiblen UV-Lichtleiter.

## 3. Aufbau und Anwendungen der UV-Lichtleiter

Aus den beschichteten Kieselglasfasern wurden in jüngster Zeit, im wesentlichen innerhalb des letzten Jahres, viele UV-durchleitende Bauteile entwickelt, denen der Industrial Research Council in USA (Chicago) einen Platz unter den hundert bedeutendsten technischen Neuentwicklungen des Jahres 1972 einräumte. Die Produkte sollten in erster Linie als ein neues Werkzeug für die medizinische Technik, Medizin, Physik, Materialprüfung, Photochemie und viele andere Gebiete bis hin zur Genetik betrachtet werden.

### 3.1. Eigenschaften

Das System ist zwischen 200 und 2200 nm optisch durchlässig; dieses Gebiet wird nur durch eine Absorptionsbande bei 1400 nm und weitere kleinere Oberschwingungen der OH-Absorptionen unterbrochen. Die optische Durchlässigkeit wurde unter Verwendung von Licht gemessen, das unter einem Öffnungswinkel von 5° in den Lichtleiter eingestrahlt wurde. Bedeutsam ist die relativ hohe gleiche Durchlässigkeit im sichtbaren und nahen UV-Gebiet (Abb. 3). Lichtleiter von 1800 mm Länge erreichen im Gebiet zwischen 280 und 1300 nm Werte von mehr als 40%.

Die zweite wichtige Eigenschaft der UV-Lichtleiter ist ihr Öffnungswinkel. Je besser der optische Kontakt (Lichtdurchlässigkeit) zwischen Faserkern und Fasermantel ist, desto geringer sind die Verluste bei den vielen Totalreflexionen.

Lichtstrahlen, die im wesentlichen parallel zur optischen Achse verlaufen, haben dementsprechend wenig Verluste. Lichtstrahlen, die nahe am kritischen Einfallswinkel  $\alpha_0$  in die Faser eindringen, erleiden um so höhere Verluste, je länger die Faser ist. Da die Winkelverhältnisse zwischen den einfallenden Lichtstrahlen und der optischen Achse im wesentlichen erhalten bleiben, wird in der Praxis eine Ab-

[\*] Für die Überleitung zur Fertigung haben wir insbesondere Herrn Dr. Buyken sehr zu danken.

hängigkeit des Öffnungswinkels von der Lichtleiterlänge beobachtet. In Abbildung 4 sind die Meßergebnisse dieser Untersuchung dargestellt.

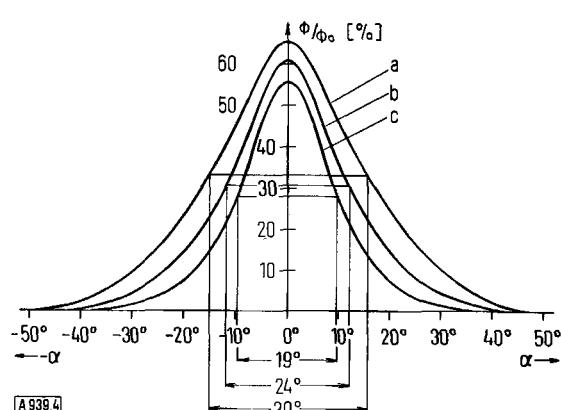


Abb. 4. Winkelverteilung der Abstrahlungscharakteristik bei 546 nm für Teflon-FEP-beschichtetes Kieselglas. Lichtleiterlänge: a 500 mm, b 1000 mm, c 1800 mm. Die Werte in der Mitte zwischen den Pfeilen bedeuten  $2\alpha$  (50%).

Flexible UV-Lichtleiter wurden am Eingang aus allen Richtungen gleichmäßig beleuchtet. Die Intensitätsverteilung des vom Lichtleiter abgestrahlten Lichtes als Funktion des Winkels gegen die optische Achse weist auf unterschiedliche Öffnungswinkel für verschiedene Längen hin, wenn man den Halbwert der Glockenkurve zugrunde legt. Bei Glas-Glas-Lichtleitern entspricht dieser Wert dem theoretisch berechneten Öffnungswinkel  $2\alpha_0$  und ist von der Lichtleiterlänge unabhängig. Das ist ein Hinweis auf den hervorragenden optischen Kontakt zwischen verschmolzenen Gläsern. Der Übergang zwischen Kieselglas und dem hier verwendeten Kunststoff ist nicht so vollkommen – daher die Abhängigkeit des Öffnungswinkels von der Länge. Theoretisch ist mit  $2\alpha_0 \approx 68^\circ$  zu rechnen. Die gemessene Apertur aus Abbildung 4 reicht für die Praxis aus.

Flexible UV-Lichtleiter haben eine gute Beständigkeit gegen UV-Strahlung. Während einer Dauerbestrahlung mit Licht der Wellenlänge 254 nm und einer Leuchtdichte von 1 mW pro  $4 \text{ mm}^2$  Bündelquerschnitt über einen Zeitraum von mehreren tausend Stunden änderte sich die optische Durchlässigkeit nicht.

Bei großen Wellenlängen, beispielsweise 320 nm, sind wesentlich größere Lichtintensitäten übertragbar, da Solarisationseffekte mit zunehmender Wellenlänge exponentiell abnehmen. Röntgen-Strahlung einer Dosis von ca.  $10^5 \text{ r}$  bewirkt lediglich im kurzwelligen Bereich einen Rückgang der Durchlässigkeit, während im sichtbaren Spektralbereich keine Schädigung erkennbar ist.

Die Wärmebeständigkeit von flexiblen UV-Lichtleitern wird im wesentlichen durch ihren Schutzschlauch sowie den Kitt, mit dem die Fasern am Bündelende miteinander verklebt sind, bestimmt. Während die Lichtleiterfasern selbst Dauertemperaturen von  $250^\circ\text{C}$  ohne Durchlässigkeitsverluste ertragen, dürfen die Bündelenden nur  $150\text{--}180^\circ\text{C}$  ausgesetzt werden. Bei Abkühlung auf  $-200^\circ\text{C}$  wurden keine Durchlässigkeitsänderungen festgestellt.

Flexible UV-Lichtleiter sind wasserbeständig auch bei Temperaturen bis  $90^\circ\text{C}$ . Lediglich in kochendem Wasser tritt ein geringfügiger Rückgang der optischen Durchlässigkeit ein.

### 3.2. Anwendungen

Die Anwendungen von UV-Faseroptik sind vielfältig und in vollem Umfang noch nicht zu übersehen. Sie gestalten das Arbeiten mit UV-Licht elegant. Die auf dem Markt befindlichen UV-Lichtquellen und die dazu erforderlichen Netzgeräte sind relativ voluminös. UV-Lichtleiter erlauben, UV-Licht an enge Stellen zu führen, wodurch es auch im Inneren von komplizierten Geräten verwendet werden kann (Abb. 5). Flexible Lichtleiter können wie elektrische Leitungen um viele Ecken ohne Lichtverlust gebogen werden. Bei Relativbewegungen zwischen der UV-Lichtquelle und dem Empfänger bilden die UV-Lichtleiter eine flexible Verbindung. Sie dienen in explosionsgeschützten Räumen oder Faradayschen Käfigen als Sekundärlichtquelle, indem sie die Strahlung der außerhalb angeordneten UV-Lichtquelle einfach und mit geringen Verlusten hinleiten.

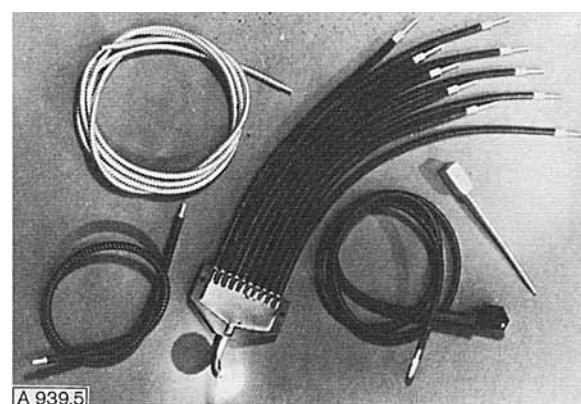


Abb. 5. Verschiedenartige Lichtleiter.

Flexible UV-Lichtleiter helfen in mannigfacher Weise bei der Gestaltung von rationellen automatischen Analysengeräten für die Medizin, Chemie und Biochemie. Die Transportwege der zu untersuchenden Flüssigkeiten können wesentlich verkürzt werden, weil das Licht zur Untersuchungsstelle geführt und die Geometrie der UV-Lichtquellen bedeutungslos wird. Bisher mußte man die zu untersuchende Flüssigkeit zur Lichtquelle führen.

In der Medizin, Biochemie, Mikroskopie und Physiologie eröffnen sich weite Anwendungsgebiete durch definierte Beleuchtung oder Bestrahlung von Objekten mit UV-Licht. Bestimmte Medikamente, die sich in tierischen Organen und Geweben ansammeln, fluoreszieren bei Anregung durch UV-Licht (Abb. 6). Die Fluoreszenz im sichtbaren Spektralbereich kann dann mit anderen Lichtleitern, Endoskopen oder unter dem Mikroskop sichtbar gemacht werden.

Es sei angemerkt, daß bereits 1964–1966<sup>[14]</sup> eine spezifische Absorption gewisser Antibiotika (Tetracycline) an Krebs-

geschwulsten beobachtet wurde, wobei – und das ist hier entscheidend – die adsorbierten Antibiotika bei UV-Anregung fluoreszieren. Für diese Versuche genügten die damals vorhandenen, begrenzt UV-durchlässigen Faseroptiken. Daran anknüpfend ist der Schritt zur Krebserkennung mit UV-Faseroptiken zumindest vorstellbar geworden.

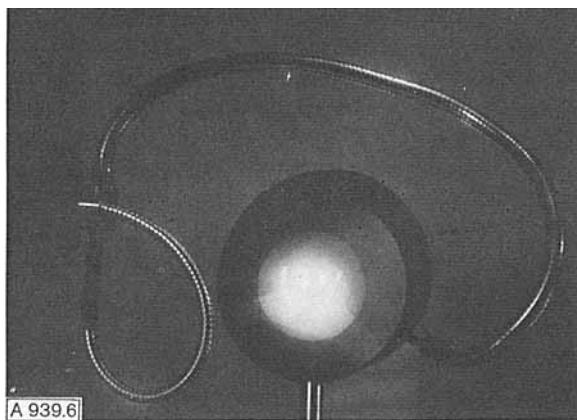


Abb. 6. Ein flexibler Lichtleiter überträgt UV-Licht und regt Fluoreszenz an.

Es gibt Anwendungsmöglichkeiten für UV-Lichtleiter im Bereich der Kunststoffe, die unter UV-Licht polymerisieren und aushärten. Lacke und Klebstoffe lassen sich mit flexiblen Faseroptiken sehr einfach bearbeiten. Für die Dentalmedizin wurden Kunststoffe entwickelt, die als Schutzlack auf Zähnen jahrelang gegen Karies schützen. Mit UV-Lichtleitern kann in jeder Zahnarztpraxis der Lack auf den Zähnen bestrahlt und ausgehärtet werden.

Flexible UV-Lichtleiter bilden gemeinsam mit Lichtleitern für das sichtbare Spektralgebiet als zweiarmige Systeme ideale Fluoreszenzlichtschranken. Durch einen Arm wird UV-Licht zur Untersuchungsstelle geführt. Das sichtbare Fluoreszenzlicht erreicht einen lichtempfindlichen Empfänger durch den anderen Arm, der aufgrund seiner spektralen Durchlässigkeit kein reflektiertes UV-Falsch-

licht übertragen kann. Bei Etikettiermaschinen wird hiervon Gebrauch gemacht, indem die Bezeichnung mit Fluoreszenzfärbung codiert aufgedruckt ist und automatisch gelesen wird. Auch Postsortierautomaten und Maschinen zum Entwerten von Briefmarken arbeiten mit bestem Erfolg mit zweiarmigen UV-Lichtleitern. Die eigentliche UV-Lichtquelle befindet sich weit außerhalb der Lesestation und ist an der Maschine dort untergebracht, wo genügend Platz vorhanden ist. Zahlreiche UV-lichtleitende Bauteile werden in Spektrographen eingesetzt, in denen das Licht, das durch einen Spalt hindurchtritt, durch einen Querschnittswandler zu einem Detektor geleitet wird. Die Querschnitte des Lichtleiters können den geometrischen Verhältnissen der anderen optischen und elektrooptischen Bauteile angepaßt werden (vgl. Abb. 5).

Die Möglichkeiten der UV-Faseroptik sind noch nicht ausgeschöpft. Dieses neue Werkzeug für Industrie und Wissenschaft wird die Anwendungsmöglichkeiten von UV-Licht noch wesentlich erweitern. Zahlreiche Lichtleitsysteme mit speziellen Abmessungen und Formen stehen dafür zur Verfügung.

Eingegangen am 21. Dezember 1972 [A 939]

- [1] *A. Jacobsen u. W. Rimkus*, *Feinwerktechnik* **71**, 111 (1967).
- [2] *Informationsschrift* Nr. 7000, Jenaer Glaswerk Schott & Gen.
- [3] *N. S. Kapani*: *Fiber Optics*. Academic Press, New York 1967.
- [4] *T. Hager, R. G. Brown u. B. N. Berick*, *SPE (Soc. Plast. Eng.) J.*, Sept. 1967, S. 36.
- [5] *A. L. Breen u. J. R. Breen*, DOS 1494721 (1965), Du Pont.
- [6] *P. C. Li, D. A. Pontarelli, O. H. Olson u. M. A. Schwartz*, *Amer. Ceram. Soc. Bull.* **48**, 214 (1969).
- [7] *H. Dislich*, Vortrag, *Macromolecular Symposium*, Helsinki 1972.
- [8] *H. Dislich u. W. Grimm*, unveröffentlicht.
- [9] *A. J. Burzynski u. M. R. Eliot*, DOS 1595062 (1965), Owens-Illinois Inc.
- [10] *H. Dislich u. A. Jacobsen*, DBP 1494872 (1965), Jenaer Glaswerk Schott & Gen.
- [11] *H. Dislich u. A. Jacobsen*, *Glastech. Ber.* **39**, 164 (1966).
- [12] *H. Dislich u. A. Jacobsen*, US-Pat. 3623903 (1966), Jenaer Glaswerk Schott & Gen.
- [13] *Properties of UV-Fibers*, *SPIE-16th Annual Technical Meeting*, Okt. 1972, San Francisco.
- [14] *I. M. Busch u. W. F. Whitmore jr.*, *Urol.* **97**, 156, 201 (1967).