DK 535.312:666.189.211:678.046.36:666.192

Glas-Kunststoff-Verbunde als Lichtleitsysteme

Von Helmut Dislich und Alfred Jacobsen, Mainz

(Mitteilung aus dem Laboratorium des Jenaer Glaswerks Schott & Gen., Mainz)

(Eingegangen am 2. Oktober 1965)

Einleitend werden die Möglichkeiten und Grenzen der nur aus Glas bestehenden Lichtleitsysteme angedeutet. Ein Vergleich der Brechwerte der Gläser und der transparenten Kunststoffe ergibt, daß eine Kombination beider die Möglichkeiten der Lichtleitung erweitert, wenn man Glas als Kern- und Kunststoff als Mantelmaterial verwendet.

Es wird über Systeme berichtet, die ultraviolettes Licht leiten, sowie über Systeme, die das sichtbare Licht leiten und sich durch einen extrem großen Öffnungswinkel auszeichnen.

1. Einleitung und Problemstellung

Zur Fortleitung von sichtbarem Licht über beliebige Wege sind starre und flexible Bündel von optisch isolierten Fasern bekannt. Diese Fasern bestehen aus einem hochbrechenden Kern eines ausgezeichnet lichtdurchlässigen Materials und einem niedrigbrechenden Mantel aus einem ebenfalls lichtdurchlässigen Material. Das durchtretende Licht erfährt an der Grenzfläche Kern—Mantel eine verlustlose Totalreflexion. Der Öffnungswinkel $2\alpha_0$ eines solchen Lichtleiters ergibt sich aus der Beziehung

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

wobei n_0, n_1 und n_2 die Brechwerte des umgebenden Mediums, des Kernes und des Mantels bedeuten. Je größer also der Unterschied der Brechwerte von Kern und Mantel, desto größer ist der Öffnungswinkel. Da Lichtleiter meist größere Wegstrecken überbrücken sollen, ist es notwendig, für den Kern Materialien von bestmöglicher Transmission auszuwählen. Für den Transport von sichtbarem Licht haben sich Systeme durchgesetzt, die aus Fasern hochwertiger optischer Gläser bestehen, die wiederum mit speziell ausgewählten niedrigbrechenden Gläsern ummantelt und daher optisch isoliert sind [1].

Die Verwendungsmöglichkeit von Kunststoff-Fasern zur Lichtleitung wird seit langem diskutiert. So stellte Kapany [2] fest, daß die faserbildenden Polymeren im gezogenen Zustand ihrer auf teilweiser Kristallinität beruhenden Anisotropie wegen der Glasfaser gegenüber Nachteile aufweisen. Gleiches bemerkt er bezüglich der Oberflächenqualität.

Um flexible Lichtleiter zu erhalten, nutzt man die elastische Flexibilität dünner Fasern aus, indem man dieselben an beiden Enden miteinander zu dichten Bündeln verkittet. Im flexiblen mittleren Teil kann das Licht um Ecken herum geführt werden, wenn der Faserdurchmesser (d) sehr viel kleiner als ihr Biegeradius (r) ist. Sind die optischen Fasern in der ganzen Länge miteinander verkittet oder verschmolzen, so können sie starre, um relativ scharfe Ecken gebogene Lichtleiter darstellen.

Bei einem Faserbündel besteht die optisch wirksame Fläche aus der Summe aller Faserkernquerschnitte. Die Ummantelung der einzelnen Fasern und die Hohlräume zwischen den Fasern sind Ballast.

Will man Licht auf geradem oder nur wenig gekrümmtem Wege ($r > 20\ d$) übertragen, so bietet ein massiver Glasstab Vorteile, da er ein Maximum an Licht überträgt. Die optische Isolierung eines Glasstabes durch Ummanteln mit einem Glas niedrigerer Brechung wird mit zunehmender Dicke des Glasstabes technisch erheblich schwieriger. Man hat sich in der Praxis bisher zum Teil so beholfen, daß nicht ummantelte Stäbe aus Glas, reinem Kieselglas oder transparentem Kunststoff verwendet wurden, wobei die umgebende Luft die Rolle des niedrigbrechenden Mantels übernimmt. Eine Behelfslösung ist dies insofern, weil einmal jeder mantelseitige optische Kontakt mit einem höherbrechenden Werkstoff (Kitt, Halterung) zu Lichtstreuung und Lichtverlust führt, zum anderen jede Verkratzung oder Verschmutzung des Stabes sich in gleicher Weise störend bemerkbar macht. Gleiche Einwirkungen auf eine Mantelschicht sind praktisch bedeutungslos, wenn sie einige Lichtwellenlängen von der inneren Schichtgrenze entfernt bleiben.

Die Aufbringung eines niedrigbrechenden Kunststoffmantels ist jedoch leicht möglich und in ihrer Durchführung von der Stabdicke unabhängig. Man benutzt nach wie vor ein optisches Glas von höherer Brechung und fehlerfreier, blanker Oberfläche als Kern und erzielt rein technisch einen Fortschritt durch die vereinfachte Art der Aufbringung einer Mantelschicht. Die Rolle der Kunststoffe für Lichtleitsysteme beschränkt sich jedoch nicht nur auf das eben Geschilderte. Die Kunststoffummantelung ist von besonderer Bedeutung für UV-Licht leitende Systeme, insbesondere dann, wenn man der maximalen Durchlässigkeit wegen auf Kieselglas als Kernmaterial angewiesen ist.

Nicht ummanteltes Kieselglas weist die oben erwähnten Nachteile auf. Eine noch nicht beschriebene Möglichkeit, die optische Isolierung durch metallische Verspiegelung, ist ebenfalls keine ideale Lösung, da die Reflexion an einer Metallspiegelschicht nicht verlustlos ist. Für die Ummantelung von Kieselglas stehen aber bisher noch keine Gläser von hinreichend niedrigerer Brechung als das Kernmaterial und ausreichender UV-Durchlässigkeit zur Verfügung. Unter den transparenten Kunststoffen dagegen gibt es Stoffe mit den geforderten Eigenschaften. Für die Praxis bedeutungsvoll sind auch die Fälle, in denen man anstelle von Kieselglas ein gut UV-durchlässiges Spezialglas als Kernmaterial verwendet. Da diese Gläser höhere Brechwerte als Kieselglas haben, führt die Ummantelung mit einem sehr niedrig brechenden Kunststoff zu großen Öffnungswinkeln.

2. Transparente Kunststoffe im n_d-ν_d-Diagramm

Bild 1 zeigt das n_d-ν_d-Diagramm der heute vorliegenden optischen Gläser. Der besseren Übersicht halber wird auf die Wiedergabe der einzelnen Gläser als Punkte in diesem Diagramm verzichtet und es werden nur die Grenzen der einzelnen Glastypen (nach der Bezeichnungsweise des Jenaer Glaswerks Schott & Gen., Mainz)

sowie die des gesamten Gebietes der optischen Gläser in Richtung niederer Brechwerte gekennzeichnet. Die Grenzen in Richtung höherer Brechwerte sind nicht eingezeichnet, da sie zum Teil über das hier verwendete Diagramm hinausgehen. Zusätzlich sind die Grenzen des Gebietes der transparenten Kunststoffe eingezeichnet (ausführliche Daten in [3], [4], [5]).

Bei Bild 1 gilt: n_d ist der Brechwert bei der Wellenlänge 587,6 nm, $\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$ die Abbé-Zahl.

Das Diagramm, in dem die Verbindungslinien der extremsten Gläser und Kunststoffe die Gebietsgrenzen anzeigen, macht deutlich, daß die Gläser ein weit größeres Gebiet überstreichen als die Kunststoffe. Es zeigt weiterhin, daß das Kunststoffgebiet das des Glases nur überlappt, sich jedoch zum Teil recht beträchtlich vom Glasgebiet hinweg ausdehnt, insbesondere in Richtung niederer Brechwerte, was für das hier zu behandelnde Problem wesentlich ist. Die dem Diagramm zu entnehmende Brechwertdifferenz zwischen Kieselglas und den niedrigst brechenden Kunststoffen ist hinreichend groß für eine Verwendung als Kern und Mantel eines Lichtleiters. Bei Verwendung höherbrechender optischer

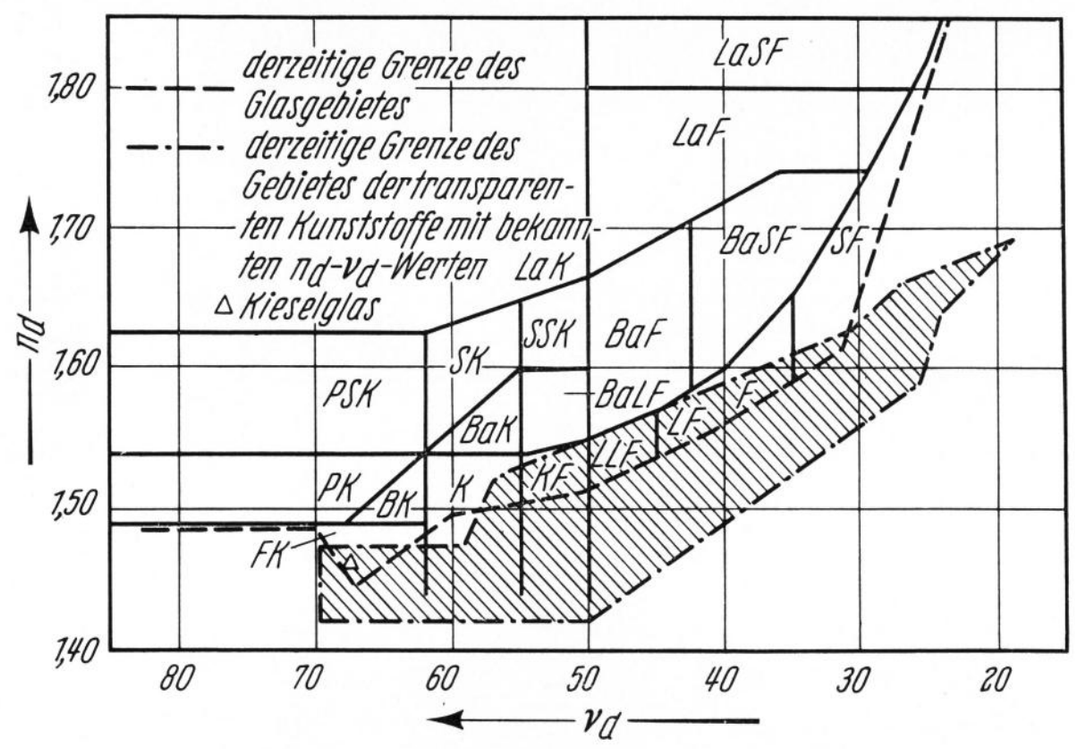

Bild 1. Übersichtsplan für die optischen Glasarten und für die transparenten Kunststoffe.

Gläser als Kern ergeben sich — zunächst rechnerisch — sehr große Öffnungswinkel. Zu erörtern bleibt die Frage der Haftung von Kunststoffen auf Glas.

3. Die Haftung von Kunststoffen auf Glas

Die Haftung von Kunststoffen auf Glas ist als zentrales Problem bei der Herstellung glasfaserverstärkter Kunststoffe hinreichend bekannt. Wenn auch der Mechanismus der Haftung noch umstritten ist, so hat man doch eine brauchbare Arbeitshypothese, wenn man davon ausgeht, daß die OH-Gruppen der Glasoberfläche mit funktionellen Gruppen des Kunststoffes reagieren und eine echte chemische Bindung geknüpft wird. Das mag in zahlreichen Fällen nicht bewiesen sein; nicht zu übersehen ist jedoch die Tatsache, daß alle auf Glas gut haftenden Systeme über solche Gruppen verfügen. Dazu einige Beispiele: Optisch klare und auf Glas festhaftende Oxidschichten mit bestimmter optischer Wirkung oder auch zum Schutz hydrolyseempfindlicher Phosphatgläser lassen sich herstellen, indem man die Gläser zum Beispiel in eine Lösung eines Metallalkoholates taucht, das Lösungsmittel abdampft und die Alkoholreste durch Hydrolyse bei erhöhter Temperatur entfernt. Prinzipiell besteht die Möglichkeit der Reaktion der Me-OR-Gruppe bzw. nach partieller Hydrolyse der Me-OH-Gruppe mit der Si-OH-Gruppe der Glasoberfläche unter Abspaltung von Wasser oder Alkohol und Knüpfung einer Bindung Si-O-Me (Me = Metall, R = Kohlenwasserstoffrest). Solche Schichten sind auf Glas unter gewissen Voraussetzungen bis zu einer Dicke von mehreren μm herstellbar [6].

In die gleiche Richtung geht das pyrolytische Verfahren der Titanisierung von Glasoberflächen mittels Titantetraisopropylat, um diese kratzfester, bzw. Gefäße druckfester zu machen, ebenso die bekannte Siliconisierung.

Unter den rein organischen Verbindungen findet man eine sehr schlechte Haftung auf Glas bei reinen Kohlen-

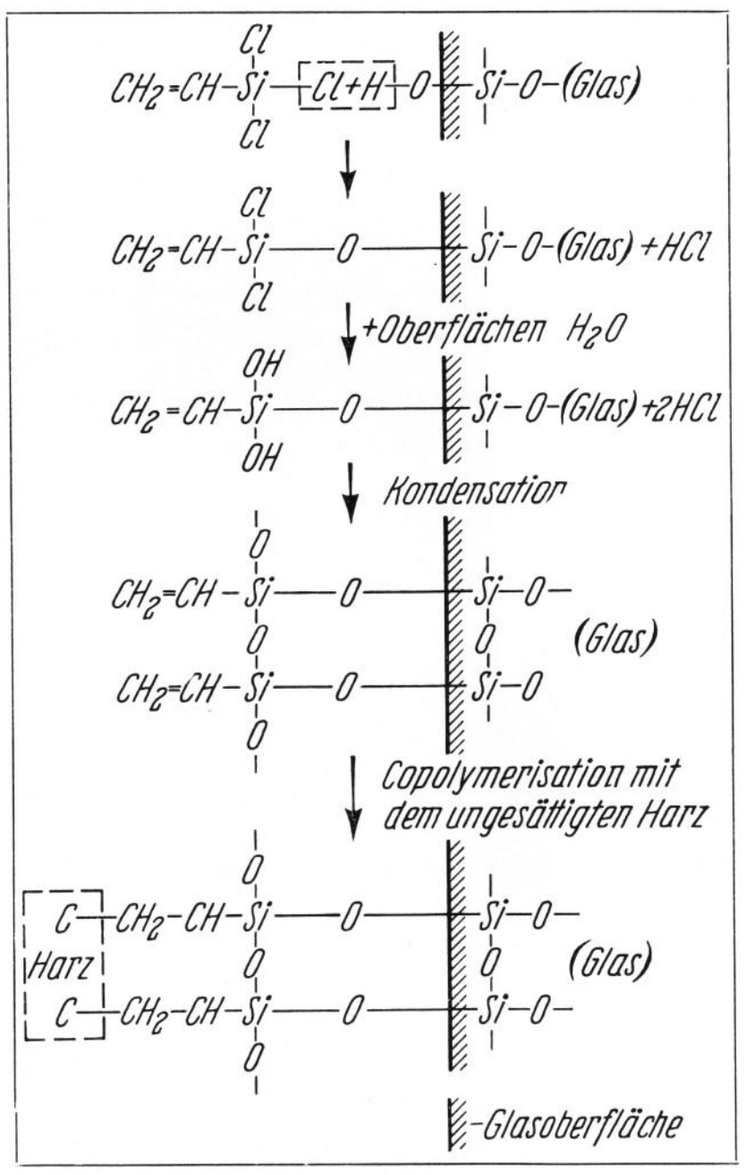

Bild 2. Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Haftvermittlers auf der Glasoberfläche.

wasserstoffharzen, eine etwas bessere bei den polareren Polyesterharzen und eine recht gute bei den Epoxidharzen. Insbesondere bei letzteren kann eine Reaktion der Epoxidgruppe mit der OH-Gruppe des Glases angenommen werden. Das gleiche gilt für die Isocyanatgruppe. So ist das Toluylendiisocyanat als Haftvermittler für glasfaserverstärkte Kunststoffe vorgeschlagen worden. Wenn der Kunststoff selbst keine oder keine hinreichend wirksamen mit den OH-Gruppen des Glases reagierenden funktionellen Gruppen besitzt, setzt man einen Haftvermittler zu, der über eine Gruppe verfügt, die mit der OH-Gruppe des Glases reagiert und über eine solche, die mit dem Harz reagiert. Als typischer Vertreter sei das Vinyltrichlorsilan genannt und der mutmaßliche Reaktionsablauf sehr schematisch dargestellt (Bild 2).

Eine ausführliche Zusammenstellung der Probleme der Grenzfläche Glas—Haftmittel—Harz gibt SCHMIDT [7]. Für den Zweck der Lichtleitung benötigt man eine auf Glas in optisch einwandfreier Weise haftende Schicht niederer Brechung. Eine solche Schicht kann unter Beachtung der oben erwähnten Prinzipien mittels verschiedener Polymeren aufgebracht werden.

4. Ultraviolettes Licht leitende Systeme

Aus eingangs erläuterten Gründen muß das Kernmaterial eines UV-Licht leitenden Systems dann aus Kieselglas bestehen, wenn maximale Durchlässigkeit bei kleinen Wellenlängen erforderlich ist. Der Brechwert des Kieselglases beträgt bei 546 nm n = 1,460, bei 365 nm n = 1,475 und bei 255 nm n = 1,506. Der Brechwert des Mantelmaterials muß — möglichst weit — unterhalb dieser Werte liegen. Als Beispiel sei die Verwendung niedrigbrechender Polysiloxane geschildert. Produkte dieser Art entsprechen allen Forderungen. Die Brechwerte liegen unterhalb derjenigen des Kieselglases und das Material ist in glasklaren optisch einwandfreien Schichten auf Kieselglas aufbringbar und gut haftend. Die Dicke der Schicht kann in weiten Grenzen beliebig variiert werden. Die Brechwerte des ausgehärteten Produktes betragen $n_{546nm} = 1{,}418$, $n_{365nm} = 1{,}453$ und $n_{255nm} = 1{,}485$.

An einem endseitig geschliffenen und polierten Stab des Durchmessers 11 mm und der Länge 110 mm — die Politur kann unter Einhaltung gewisser Vorsichtsmaßregeln ohne weiteres nach der Beschichtung erfolgen — betragen die gemessenen Öffnungswinkel

$$2\,\alpha_0 = 40{,}7^\circ \text{ für } \lambda = 546 \text{ nm}$$
$$2\,\alpha_0 = 29{,}4^\circ \text{ für } \lambda = 365 \text{ nm}$$
$$2\,\alpha_0 = 28{,}2^\circ \text{ für } \lambda = 255 \text{ nm.}$$

Diese Werte stimmen innerhalb der Fehlergrenze der Methode mit denen überein, die nach der Formel $n_0 \cdot \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ berechnet wurden. Der ummantelte Stab ist gegen Luftfeuchtigkeit und Wasser beständig. Siebenstündiges Kochen in Wasser und dreistündige Behandlung mit Wasser unter Druck bei 120 °C[1]) zeigen keine Einwirkung. Ein solcher Stab ist ein guter Leiter für ultraviolettes Licht auch noch von $\lambda = 255$ nm. Die Öffnungswinkel dürften für die meisten Verwendungszwecke hinreichend sein[2]).

Will man nun mit ultraviolettem Licht der Wellenlänge 365 nm oder größer arbeiten, so kann man ein gut durchlässiges Kronglas verwenden, beispielsweise vom Brechwert $n_{365nm} = 1{,}544$ ($n_{546nm} = 1{,}525$). Für Stäbe aus diesem Kernglas, die mit dem gleichen Polysiloxan ummantelt werden, errechnen sich folgende Öffnungswinkel:

$$2\,\alpha_0 = 68{,}4^\circ \text{ für } \lambda = 546 \text{ nm}$$
$$2\,\alpha_0 = 62{,}8^\circ \text{ für } \lambda = 365 \text{ nm.}$$

Die gemessenen Werte stimmen innerhalb der Fehlergrenze gut damit überein.

Gegenüber den vorzugsweise für UV-Licht kürzerer Wellenlänge geeigneten Systemen mit Kieselglaskern weisen diese Systeme den Vorteil größerer Öffnungswinkel auf.

5. Sichtbares Licht leitende Systeme

Für die Leitung eines Maximums an sichtbarem Licht werden ausgezeichnet durchlässige Stäbe aus optischem Glas verwendet. Diese Gläser können einen relativ hohen Brechwert haben, beispielsweise bei $\lambda = 546$ nm n = 1,624. Es ist daher nicht unbedingt nötig, einen Kunststoffmantel von extrem kleinem Brechwert aufzubringen. Als Beispiel sei die Aufbringung von Polymethylmethacrylat beschrieben. Ein Glasstab wird mit einer Chloroformlösung von Polymethylmethacrylat beschichtet und bei erhöhter Temperatur das Chloroform verdampft. Es bildet sich ein optisch einwandfreier, dem Glas gut anhaftender Film. In diesem Falle ist es empfehlenswert, einen bereits endseitig polierten Glasstab zu verwenden und das auf den Stirnflächen befindliche Polymethylmethacrylat mit einem chloroformfeuchten Filtrierpapier zu entfernen. Die Mantelschicht hat bei $\lambda = 546$ nm einen Brechwert von 1,491, woraus sich ein Öffnungswinkel von $2\,\alpha_0 = 79^\circ$ ergibt. Der so hergestellte Lichtleitstab ist zwar für viele Fälle recht brauchbar[3]), entspricht jedoch nicht allen Forderungen, die oben an eine Mantelschicht gestellt wurden. Häufig wird an Lichtleitsysteme, insbesondere bei Verwendung in Endoskopen, die Forderung nach Sterilisierbarkeit gestellt. Das System ist zwar trocken sterilisierbar, darf jedoch nicht in Wasser gekocht oder heißdampfsterilisiert werden, da das Wasser durch den Film diffundiert, sich zum geringen Teil auch in ihm löst und den Film vom Glaskern abhebt.

Das bei den UV-Lichtleitern benutzte Polysiloxan wurde daher auch hier eingesetzt. In Verbindung mit einem Kernglas vom Brechwert n = 1,624 bei $\lambda = 546$ nm ergibt sich ein extrem großer Öffnungswinkel von $2\,\alpha_0 = 103^\circ$. Dieses System[3]) ist nicht nur kochwasserfest, sterilisierbar und beständig gegen schnellen Temperaturwechsel, beispielsweise von 160 °C auf 20 °C, sondern auch beständig gegen die meisten organischen Lösungsmittel bei erhöhter Temperatur und gegen kalte verdünnte Säuren. Geschädigt wird es durch Alkalien und konzentrierte Schwefelsäure.

Die Wirkung der Totalreflexion läßt sich sehr gut demonstrieren, wenn man den endseitig polierten Lichtleitstab zentrisch mittels durchbohrter Stopfen in ein weiteres Glasrohr faßt, dieses mit Thoulet-Lösung (Kaliumtetrajodomercurat (II)-Lösung) vom Brechwert $n_d = 1{,}72$ füllt und das eine Stabende diffus beleuchtet. Am anderen Ende tritt das Licht in einem breiten, scharf begrenzten Kegel aus, während der Stab selbst weitgehend dunkel bleibt. Obwohl sich der lichtleitende Stab in einem Medium sehr hoher Lichtbrechung befindet, wirkt die Mantelschicht optisch isolierend und hindert das Licht am seitlichen Austritt. Nach diesem Prinzip wurde auch die Messung des Öffnungswinkels durchgeführt.

Während die Gläser in der Konstanz ihrer Eigenschaften, insbesondere auch der optischen, und in der Qualität der bearbeiteten Flächen den transparenten Kunststoffen weit überlegen sind, bieten letztere für das hier behandelte Problem neue Möglichkeiten durch ihre von den Gläsern deutlich abgesetzte optische Lage und durch ihre leichte Verarbeitbarkeit. Am Beispiel der Lichtleitsysteme sollte aufgezeigt werden, daß Glas-Kunststoff-Verbunde auch in der Optik von Nutzen sein können.

[1]) Für diese Prüfungen sei Herrn Dr. Hüskens, Institut für Biochemie, Universität Mainz, gedankt.

[2]) Patent und Gebrauchsmuster angemeldet.

[3]) Patent und Gebrauchsmuster angemeldet.

Die Experimente wurden mit Geschick und Umsicht von Herrn E. Hildebrandt ausgeführt, dem der Dank der Autoren gebührt.

6. Schrifttum

[1] JACOBSEN, A.: Die Lichtleitung durch Faseroptik. Naturwiss. u. Med. **1** (1964) Nr. 5, S. 31–35.

[2] KAPANY, N. S.: Fiber optics. Part I. Optical properties of certain dielectric cylinders. J. opt. Soc. Amer. **47** (1957) S. 413–422. [Ref. Glastechn. Ber. **31** (1958) S. 250.]

[3] LANDOLT-BÖRNSTEIN: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. 6. Aufl., Bd. 2, TW 8: Optische Konstanten. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1962.

[4] SCHREYER, G.: Kunststoffe in der Optik. Kunststoffe **51** (1961) S. 569–576.

[5] SCHREYER, G.: Kunststoffe in der optischen Industrie. Umschau **62** (1962) S. 269–272. [Ref. Glastechn. Ber. **37** (1964) S. 397.]

[6] SCHRÖDER, H.: Properties and applications of oxide layers deposited on glass from organic solutions. Optica Acta **9** (1962) S. 249–254.

[7] SCHMIDT, K. A. F.: Das Grenzflächenproblem bei glasfaserverstärkten Kunstharzen. Glastechn. Ber. **37** (1964) S. 1–15.

(42826)

DK 541.128.4:666.11.01:666.172.7

Die Vorzüge des Glases als Nichtkatalysator in Apparaten und Geräten

Von WILHELM FRANK und DIETER KUTSCHE, Mainz

(Mitteilung aus dem Laboratorium des Jenaer Glaswerks Schott & Gen., Mainz)

(Eingegangen am 2. Oktober 1965)

Die bisher wenig untersuchte günstige katalytische Unwirksamkeit des Glases ist bei Vorgängen in der organischen Chemie und der Biologie von wesentlicher Bedeutung, wenn labile Substanzen bei höheren Temperaturen behandelt werden sollen. Die hier ausgeführten Messungen geben quantitative Vergleiche der katalytischen Wirkungen verschiedener Metalle mit denen des Glases.

Die große Bedeutung, die der Werkstoff Glas für den Chemiker hat, resultiert aus einer Reihe von Vorzügen. Vor allem sind dies die Durchsichtigkeit zur Beobachtung der Vorgänge und die große chemische Widerstandsfähigkeit gegen saure und alkalische Medien. Die Tatsache, daß Glas Geruch und Geschmack weder besitzt noch annimmt, die günstigen Reinigungsmöglichkeiten und, im Vergleich mit Kunststoffen, die hohe Temperaturbelastbarkeit, sind weitere wesentliche Vorteile. Auch die leichte Formbarkeit, die bei höherer Temperatur mit einem Minimum an Werkzeugen durchgeführt werden kann, ist ein großer Vorzug im Forschungslabor.

Diese Eigenschaften des Glases sind allgemein anerkannt und geben den Ausschlag für die Verwendung dieses Werkstoffes. Dagegen sind die katalytischen Eigenschaften des Glases bisher wenig untersucht worden, obwohl auch sie bei vielen Vorgängen in der organischen Chemie, in der Biologie und selbst im Haushalt bedeutungsvoll und manchmal sogar ausschlaggebend sein können. Der Grund für die mangelnden Untersuchungen auf diesem Gebiet liegt vor allem darin, daß die qualitative und vor allem die quantitative Bestimmung nicht ohne weiteres möglich ist und daß definierte Maßeinheiten oder Testvorschriften nicht vorhanden sind.

Bei den folgenden Betrachtungen wurden die katalytischen Eigenschaften des Glases auf organische Stoffe mit denjenigen von Metallen aus weiten Gebieten der Spannungsreihe verglichen. Anlaß zu diesen Untersuchungen gab das Problem, einen Apparat zu erstellen, mit dessen Hilfe thermolabile organische Substanzen mit einem bisher nicht erreichbaren Maß an Schonung destilliert werden konnten. Man verwendet für solche Zwecke seit vielen Jahren Molekulardestillationsapparate, deren Konstruktionselemente bis zu einem hohen Maß an Vollkommenheit durchkonstruiert wurden. Die wesentlichen Grundelemente der Verdampfung im Hochvakuum, der Destillation auf kurzem Wege, der Verdampfung aus einer dünnen Schicht heraus sowie der Anwendung einer kurzen Verweilzeit sollen hier nicht besprochen werden. Sie sind lediglich die Voraussetzung für die im folgenden beschriebenen Messungen, weil durch ihre Konstanthaltung alle Nebeneinflüsse eliminiert werden konnten und nur noch die katalytische Wirkung des Materials als bestimmender Faktor auftrat. Die Molekulardestillation ist als Untersuchungsmethode für diese Vorgänge besonders gut geeignet, weil Cracksubstanzen sofort nach ihrer Bildung aus dem Prozeß abgezogen werden und keine unkontrollierbaren Folgereaktionen in der zu untersuchenden Substanz auslösen können.

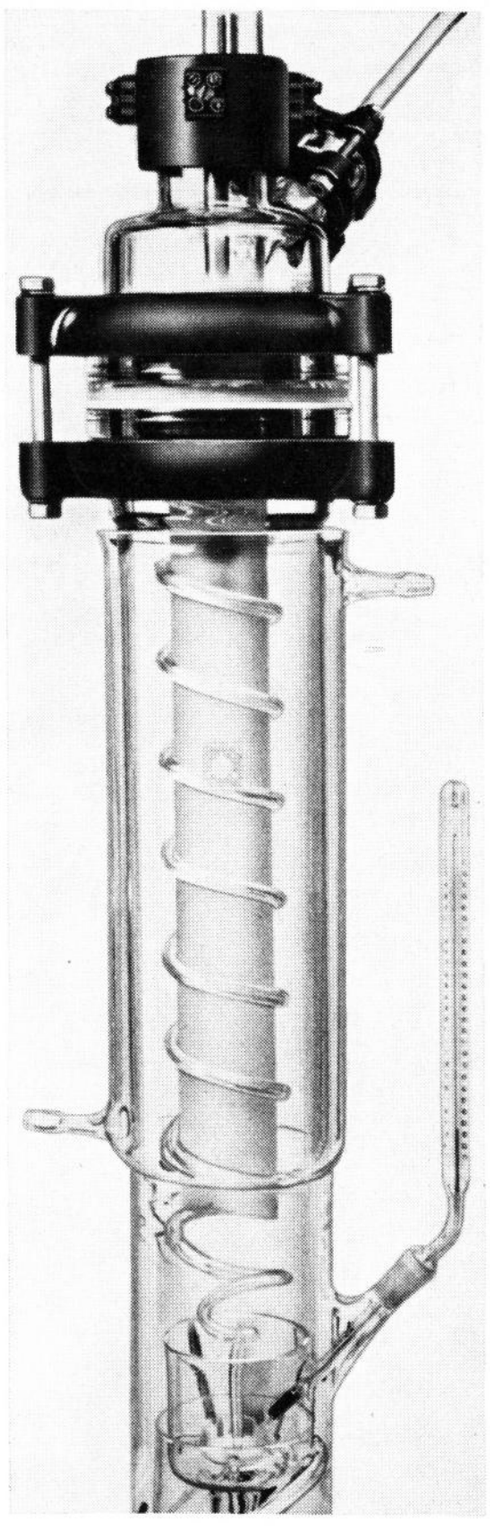

Bild 1. Verdampfer mit rotierender Spirale.

Der Hauptteil des für die Messungen benützten Apparates besteht, wie aus Bild 1 ersichtlich ist, aus einem Heizfinger aus Glas, der von einer langsam rotierenden Spirale, ebenfalls aus Glas, umgeben ist. Beides wird konzentrisch von einem Kondensator umschlossen. Der Zwischenraum steht unter Hochvakuum. Der Heizfinger wird von einem Siliconöl durchströmt, das in einem angeschlossenen Umlaufthermostaten auf konstanter Temperatur gehalten wird. Die zu destillierende Substanz durchläuft von oben nach unten die Oberfläche des Heizfingers in dünner Schicht. Die rotierende Spirale wälzt diese Schicht ständig um. Ein Höchstmaß an