

Kunststoffe in der Optik

Von Helmut Dislich^[*]

Der Hauptwerkstoff der Optik ist das Glas. Kunststoffe haben nur dann eine Chance, in die Optik einzudringen, wenn sie Eigenschaften haben, die bei Glas nicht realisierbar sind, oder wenn ein gewünschter Artikel sich aus Kunststoff rationeller fertigen läßt. Ein Beispiel für den ersten Fall sind UV-Lichtleiter, die aus Quarzglas mit Kunststoffmantel bestehen – ein Glas mit hinreichend niedrigem Brechwert steht nicht zur Verfügung. Beispiele für den zweiten Fall sind Sucheroptiken für Kameras sowie Linsen für Sonnenbrillen und Schutzbrillen.

1. Einleitung

„Kunststoffe in der Optik“ – dies ist ein Thema, bei dem man nicht mit den jährlich produzierten 1000 Tonnen beginnen sollte, weil selbst der zunächst geneigte Leser Gefahr liefe, sich von derart ungewohnt kleinen Zahlen abzuwenden. Wesentlich interessanter wäre schon der Umsatz an hochwertigen Produkten, die durch neue Kunststoffe und Kunststofftechnologien ermöglicht wurden. Oft ist dem Anwender der Einsatz von Kunststoffen nicht bewußt; es sei denn, er merkt es am Preis, der sowohl sehr niedrig (Beispiel: eine leistungsfähige Sucheroptik) als auch sehr hoch sein kann (Beispiel: eine Starbrille oder eine UV-Faseroptik). Im ersten Falle wird die Anwendung des Kunststoffes vom Markt diktiert, im zweiten Falle von den optischen und sonstigen Eigenschaften des Kunststoffes.

Der wohl umfassendste Bericht über Kunststoffe für optische Zwecke stammt schon aus dem Jahr 1945^[1]. Allerdings war ein großer Teil der heute interessierenden Kunststoffe damals noch nicht bekannt. Viel beachtete Zusammenfassungen gab Schreyer^[2–4]. Optische Daten sind im Landolt-Börnstein zusammengestellt^[5,6]. Torbin und Daminov zitierten in ihrer Übersicht in außergewöhnlichem Maße auch Details^[7].

Soweit irgend möglich, werden im folgenden die optischen Eigenschaften von Kunststoffen in Beziehung zur chemischen Struktur gestellt. Insbesondere interessieren Kunststoff-Exoten, die außerhalb der Optik wenig beachtet werden. Die Massenkunststoffe – im Sinne der Optik sind das bereits Polymethylmethacrylat oder Polycarbonat – verdienen wegen ihrer Verarbeitungsmöglichkeiten Beachtung. Kombinationen von Kunststoffen mit Gläsern waren in vielen Fällen die logische Konsequenz aus dem Studium der optischen Möglichkeiten von Kunststoffen.

Über Optik zu sprechen bedeutet zwangsweise auf Glas einzugehen, denn Glas war und ist der klassische Werkstoff der Optik, und jeder in dieses Gebiet eindringende Kunststoff wird an den Möglichkeiten der Gläser gemessen. Angesichts der etablierten Stellung des Glases muß ernsthaft gefragt werden: „Woher denn nun noch die Motivation zur intensiven Beschäftigung mit Kunststoffen für optische Zwecke?“, insbesondere beim Autor, der im Glashauss sitzt, aus dem man ja bekanntlich nicht ungestraft mit Steinen werfen darf. Es gibt zwei einfache Antworten:

1. Ein gewünschter Artikel läßt sich aus Kunststoff rationeller fertigen;

2. einige Kunststoffe haben – dringend gewünschte – Eigenschaften, die bei Gläsern nicht realisierbar sind.

2. Gläser und Kunststoffe

Glas wird hier als anorganisches Schmelzprodukt verstanden, Kunststoff als organisches Hochpolymer, hergestellt beispielsweise durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition niedermolekularer Ausgangsstoffe. Die Betrachtung beschränkt sich auf glasklare, vorzugsweise neuere Kunststoffe.

2.1. Vergleich der optischen Eigenschaften

Wesentlich und stets zunächst als Auswahlkriterien herangezogen werden die spektrale Durchlässigkeit (Transmission), der Brechwert n_d und die Abbesche Zahl

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

n_F , n_C = Brechwerte für die Linien F bzw. C.

2.1.1. Durchlässigkeit

Bei den Gläsern reichen die Gebiete hoher Durchlässigkeit vom Ultraviolett (Kieselglas) über das Sichtbare (viele optische Gläser mit zum Teil sehr hoher Transmission aufgrund extremer Homogenität und Reinheit) bis zum Infraroten (Chalkogenidgläser)^[8].

Bei den Kunststoffen sind die Gebiete etwas begrenzter. Erwähnenswert ist neben der guten Durchlässigkeit im Sichtbaren die UV-Durchlässigkeit von Polymethylmethacrylat, Methylpolysiloxanen und perfluorierten Polymeren; einige

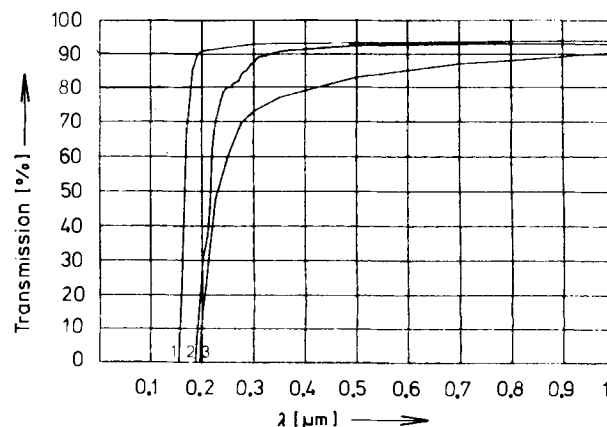


Abb. 1. Spektrale Transmission von (1) Kieselglas (Suprasil W), 1.0 mm; (2) Methylpolysiloxan (Glass Resin 650), 1.04 mm; (3) Polytetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer (Teflon FEP[®]), 0.02 mm.

[*] Dr. H. Dislich
JENAer Glaswerk Schott & Gen., Mainz
Postfach 2480, D-6500 Mainz

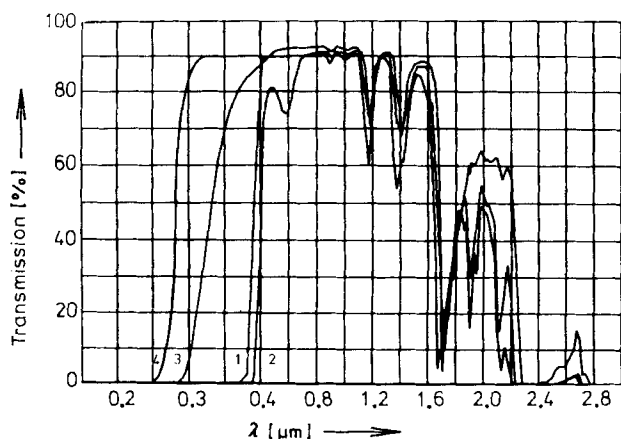
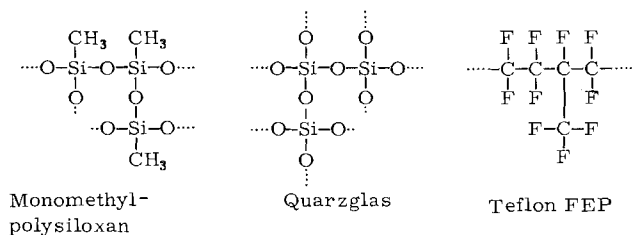


Abb. 2. Spektrale Transmission von (1) Polymethylmethacrylat (Plexiglas® 201 mit UV-Absorber, 3 mm; (2) Poly-*p*-(*p*-hydroxy- α,α -dimethylbenzyl)phenyl-hydrogencarbonat (Makrolon, Lexan®), 3 mm; (3) Poly-diethylenglykol-diallyl-biscarbonat (CR 39), 3 mm; (4) Polymethylmethacrylat (rein), 3 mm.

perfluorierte Polymere, z. B. das Copolymer aus Tetrafluoräthylen und Hexafluorpropylen (Teflon FEP®), sind auch bis etwa 6 μm IR-durchlässig (Abb. 1 und 2).

Ein Monomethylpolysiloxan („Glass Resin 650“), im wesentlichen aus Methyl-trialkoxysilan hergestellt^[9], kann als „monomethyliertes Quarzglas“ bezeichnet werden, was auf die hohe, quarzglasähnliche Durchlässigkeit hinweist.



Dank ihrer hohen IR-Durchlässigkeit können Fluorpolymere als Einbettmittel in der IR-Spektroskopie verwendet werden. Das in dünnen Folien glasklare Teflon FEP® verdankt seine Sonderstellung als wenig kristallines und damit streulichtarmes perfluoriertes Polymer – im Gegensatz zu Polytetrafluoräthylen – der durch die Copolymerisation eingebrachten Verzweigung, die kristallisationshemmend wirkt.

Bei höher brechenden Kunststoffen wie Polystyrol oder Polycarbonat kann der Reflexionsverlust durch Belegen mit einer niedriger brechenden Schicht, z. B. MgF_2 , vermindert und damit die Transmission erhöht werden^[10], wie es auch bei Gläsern üblich ist.

2.1.2. Das n_d - v_d -Diagramm

Die „optische Lage“ transparenter Kunststoffe und Gläser^[11] wird üblicherweise durch das n_d - v_d -Diagramm dargestellt. Abbildung 3 zeigt Beispiele.

Das Kunststoffgebiet überlappt sich mit dem Glasgebiet, ist aber nach unten hin größer. Die äußerst kleinen Brechwerte von Teflon FEP® (Punkt 19) und Methylpolysiloxan (Punkt 5) ermöglichen deren Anwendung als optische Mäntel auf Kieselglasfasern und -stäben^[12, 13]; eine „Glasalternative“ bietet sich nicht.

Ein Vergleich der optischen Lagen mit der chemischen Struktur von Polymeren führt zu einfachen Beziehungen, in die sich neu hinzukommende Kunststoffe stets einfügen. Eine

gezielte Synthese nach „optischem Maß“ wäre ohne weiteres möglich. Praktisch verfährt man allerdings so, daß man

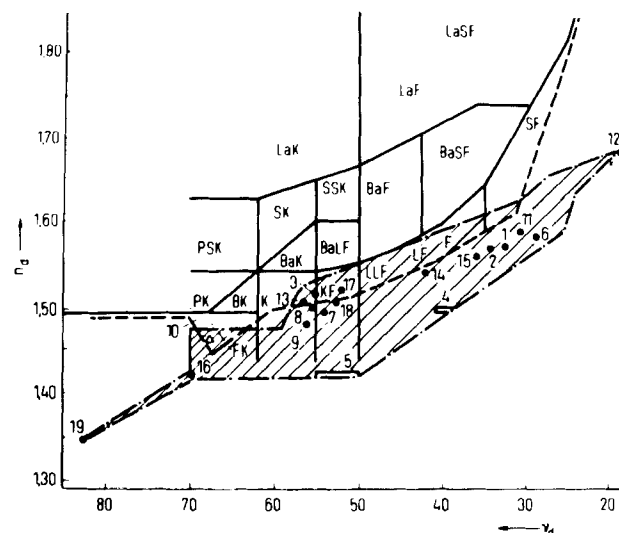


Abb. 3. Glasgebiet und Kunststoffgebiet im n_d - v_d -Diagramm. ---: Derzeitige Grenze des Glasgebietes; - - -: derzeitige Grenze des Gebietes der transparenten Kunststoffe. Δ Quarzglas, \bullet Kunststoffe 1–19. 1 = Styrol-Acrylnitril-Copolymer, 2 = Poly-*o*-diallylphthalat, 3 = Polymethyl- α -chloracrylat, 4 = Methylphenyl-polysiloxan, 5 = Methylpolysiloxan, 6 = Poly-*p*-(*p*-hydroxy- α,α -dimethylbenzyl)phenyl-hydrogencarbonat, 7 = Polymethylmethacrylat, 8 = Poly-diethylenglykol-diallyl-biscarbonat, 9 = Celluloseacetat, 10 = Cellulosepropionat, 11 = Polystyrol, 12 = Poly-*N*-vinylcarbazol, 13 = Polycyclohexylmethacrylat, 14 = Polyvinylchlorid, 15 = Epoxidharz (Araldit Cy 206), 16 = Poly(2,2,2-trifluoropropyl)methacrylat, 17 = Methylmethacrylat- α -Methylstyrol-Copolymer, 18 = Methylmethacrylat-Acrylnitril-Copolymer, 19 = Tetrafluoräthylen-Hexafluorpropylen-Copolymer (Teflon FEP).

Vorhandenes sieht und allenfalls durch Copolymerisation korrigiert.

Hocharomatische Kunststoffe wie Polystyrol, Polyarylcarbonate oder gar Poly-*N*-vinylcarbazol haben hohe Brechwerte und kleine Abbesche Zahlen; fluorierte, insbesondere perfluorierte Kunststoffe haben kleine Brechwerte und hohe Abbesche Zahlen. Mit der Lorentz-Lorenz-Gleichung^[12, 11]

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

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

lassen sich die Grenzen der Kunststoffe einschließlich hypothetischer Polymere abschätzen: Soweit man heute sehen kann, wird es keine Polymere mit Brechwerten wesentlich über $n_d = 1.73$ und unter $n_d = 1.33$ geben. Das Zentrum des Glasgebietes wird von Kunststoffen nicht erreicht werden. Damit sind die Grenzen für die Konkurrenz zwischen optischen Gläsern und transparenten Kunststoffen und auch für deren Kombination gesteckt.

2.1.3. Auswirkungen thermischer und mechanischer Eigenschaften der Kunststoffe auf die optischen Eigenschaften

Das geringere spezifische Gewicht der Kunststoffe (≈ 1.0 bis 1.5) gereicht diesen gegenüber Gläsern (≈ 2.2 bis >3) oft zum Vorteil. Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient der Kunststoffe ist ganz grob um den Faktor 10 höher als bei Gläsern; dies wirkt sich nachteilig aus, denn die optischen Eigenschaften werden stark temperaturabhängig. Der

Brechungsindex eines Kunststoffes nimmt mit steigender Temperatur ab^[14]. Nicht ganz so gravierend ist der Nachteil der geringeren Härte oder Abriebfestigkeit der Kunststoffe, da eine geschützte Anordnung oder eine Beschichtung zumindest teilweise Abhilfe schaffen kann.

Die höhere Schlagzähigkeit der Kunststoffe kann vorteilhaft sein, da die Bruchgefahr kleiner wird. Die niedrigere Wärmeleitfähigkeit kann zu Deformationen bei schnellen Temperaturänderungen führen.

Die Auswirkungen dieser Eigenschaften sind genau bekannt^[4], so daß für jede Anforderung vorausgesagt werden kann, ob die erforderlichen Toleranzen eingehalten werden können oder nicht.

In erster Linie werden Polymere und Mischpolymere des Methylmethacrylats, Styrols, Diethylenglykol-diallyl-biscarbonats und Acrylnitrils sowie Polycarbonat, Celluloseacetat und Celluloseacetobutyrat verwendet. Am Rande sei noch Polymethylpenten TPX erwähnt. Greifen wir aus dieser vergleichsweise spärlichen Auswahl nur Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polystyrol heraus! Ihre optischen Lagen (siehe Abb. 3) sind hinreichend verschieden, um in einem optischen System Achromasie herbeizuführen. Dabei entspricht PMMA den Krongläsern, Polystyrol den Flintgläsern.

2.2. Vergleich der Herstellungstechniken

2.2.1. Gläser

Glas ist nach der technischen ASTM-Definition „ein anorganisches Schmelzprodukt, das abgekühlt und erstarrt ist, ohne zu kristallisieren“, und so wird Glas seit nunmehr 4000 Jahren hergestellt. Die Bestandteile des Glases, oft Oxide, werden gemischt und bis zum Schmelzen (meist über 1000°C) erhitzt, wobei Reaktionen zwischen den Bestandteilen des Gemenges zur Bildung der Glasschmelze führen. Beim Abkühlen erstarrt die Schmelze ohne zu kristallisieren zum Glas. Diese Abkühlung kann bereits in einer Rohform erfolgen. Aus dem Rohling entsteht der optische Formkörper (Linse, Prisma, Scheibe, usw.) durch Schleifen und Polieren.

2.2.2. Kunststoffe

Ausgangsstoffe sind die Monomere, die durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition in die Polymere überführt werden. Diese Reaktionen finden bei relativ niedrigen Temperaturen statt. Wesentlich ist, daß die Überführung in den polymeren Zustand in der Form erfolgen kann (Gießverfahren), wobei der endgültige Formkörper resultiert. Ein Beispiel dafür, die Polymerisation des Diethylenglykol-diallyl-biscarbonats zu Brillenlinsen, wird in Abschnitt 3.1.2 beschrieben. Dieses „Einstufen-Verfahren“ ist keineswegs sehr rationell, denn um einen homogenen und in seiner Geometrie reproduzierbaren optischen Formkörper zu erhalten, muß die Polymerisation langsam und sorgfältig kontrolliert verlaufen. Während dieser Zeit ist die – in aller Regel aufwendige – Form blockiert.

Die relativ kurze Behandlung der spritzgegossenen oder nach ähnlichen Verfahren hergestellten Kunststoffoptiken soll nicht darüber hinwegtäuschen, daß dies der größte Markt ist. Hierüber ist schon häufiger berichtet worden. Pionier auf diesem Gebiet war Combined Optical Industries Ltd. in England.

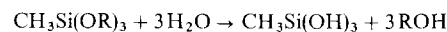
Das Polymer wird möglichst in ein Granulat überführt; die Formgebung erfolgt im bekannten Spritzgießverfahren. So werden z. B. Linsen und Prismen für die Sucheroptik einer Kamera aus Polymethylmethacrylat gespritzt, weiterhin Rückstrahler, Fresnellinsen und vieles mehr. Zweifellos ist und bleibt dies das rationellste Verfahren zur Herstellung großer Stückzahlen.

Das Spritzgießen von Linsen erfordert eine hohe, aber heute erreichte Präzision; die Formgenauigkeit geschliffener und polierter Glaslinsen ist allerdings höher. Das Material der Spritzgießform und seine Oberflächenqualität spielen neben anderen Parametern (Prozeßführung) eine wesentliche Rolle. Hier zeichnet sich eine neue Entwicklung durch Spritzen in Glasformen ab^[17].

Spritzpressen, Prägen und Extrudieren seien als im weitesten Sinne ähnliche Verfahren, ausgehend von einem fertigen Polymer, hier mit eingeordnet. So werden z. B. durch Preß- und Prägeverfahren dickwandige Linsen von großem Durchmesser, Rückstrahlroptiken, Verkehrssignale, Spiegel und asphärische Optiken hergestellt.

Die spanabhebende Bearbeitung von Kunststoffblöcken wird neben dem Spritzprägen zur Herstellung von großen Fresnellinsen herangezogen, die aus Glas kaum herstellbar sind.

Gebräuchlich sind noch Klebeschichten aus Epoxidharzen, die aus Harz und Härter (Amin- oder Anhydridhärter) bestehen und zwischen zwei Formhälften sich zu einem verklebenden Polyaddukt verfestigen. Alkylpolysiloxane werden vorwiegend als Schichten auf Substraten verwendet. Man geht oft von Methyl-trialkoxysilan aus, das mit Luftfeuchtigkeit nach



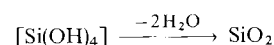
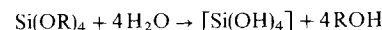
hydrolysiert. Mit steigender Temperatur entstehen Methylpolysiloxane durch Polykondensation.

Die Auswahl des Herstellungsverfahrens für ein Produkt hängt neben den technischen Möglichkeiten und Erfordernissen auch von der Stückzahl ab^[15].

2.2.3. Glassynthese durch Polykondensation

Während die Fertigungstechniken von Gläsern und Kunststoffen immerhin gewisse Ähnlichkeiten zeigen (thermoplastische Verarbeitung), scheint das bei der Synthese der Werkstoffe Glas und Kunststoff nicht der Fall zu sein. Es war daher eine Aufgabe von hohem präparativen Reiz, eine Glassynthese nach einem Prinzip der Kunststoffsynthese, der Polykondensation, durchzuführen.

Eine Analogie lag hierzu vor in der Synthese eines Kieselglases^[18] nach



die über Polyorgano(hydroxy)siloxane abläuft.

Tatsächlich lassen sich viele Oxidgläser – und auch Kristalle – mit vielen Elementen quer durch das Periodensystem ohne Durchlaufen der Schmelzphase auf diese Weise herstellen, wenn man anstelle der Oxide die hochreaktiven und stets hydrolysierbaren Alkoxide mehrerer Elemente in Alkohol miteinander reagieren läßt. Hydrolyse und Polykondensation füh-

ren schließlich bis zur Stufe des reinen Vielkomponentenoxids, eines Glases^[19]. Diese Reaktion ist für das bekannte Duran 50 in Abbildung 4 formuliert^[20]. Das Prinzip läßt sich technisch besonders bei der Herstellung dünner Oxidschichten nach dem Tauchverfahren nutzen^[21].

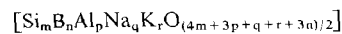
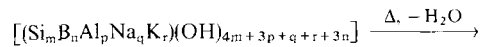
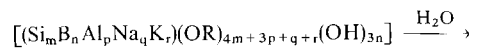
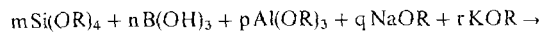


Abb. 4. Synthese des Borosilicatglases Duran 50 durch Polykondensation (schematisch).

3. Kunststoffe für optische Anwendungen

Tatsächlich ist Glas dominierend und wird es auch bleiben. Nichtsdestoweniger gibt es schmale, jedoch interessante Gebiete, in die Kunststoffe eingedrungen sind und eindringen werden. Ergänzend zu den Zitaten^[11–7] sei auf^[22–24] verwiesen.

Im folgenden werden Beispiele gegeben, bei denen die Kunststoffe wegen ihrer optischen Eigenschaften wie Transmission oder Brechwert oder wegen der rationelleren Herstellbarkeit oder aber auch wegen nicht-optischer Eigenschaften gewählt wurden, z. B. spezifisches Gewicht, Unzerbrechlichkeit, Einfärbbarkeit.

Auch hier sei zuvor erwähnt, daß Polymethylmethacrylat unter den Kunststoffen eine dominierende Rolle spielt, ja mitunter schlechtweg als „das organische Glas“ bezeichnet wird. Doch ist dies so bekannt (siehe z. B.^[25]), daß Polymethylmethacrylat hier zugunsten neuerer Entwicklungen nur gestreift wird.

3.1. Brillenlinsen

3.1.1. Thermoplaste

Vielen – hautnah – bekannt sind Brillenlinsen aus Kunststoffen wie Polymethylmethacrylat, Celluloseacetat oder Polycarbonat in Sonnenschutz- und Industrieschutzbrillen. Ihr Vorteil ist neben der rationellen Fertigung die geringere oder fehlende Stoßempfindlichkeit. Der Nachteil der Thermoplaste ist ihre Kratz- und Wischempfindlichkeit. In den letzten fünf Jahren hat man sich bemüht, die Wischempfindlichkeit durch Nachbehandlung zu verringern. Dies wurde zum einen durch Vakuumbedampfung mit anorganischen Stoffen – oft Glas – versucht^[26], zum anderen durch Tauchbeschichtungen vorzugsweise mit Methylpolysiloxanen. Viele dieser Entwicklungen wurden offenbar durch das Glass Resin 650 von Owens Illinois angeregt^[9] und führten bei vielen Firmen (u. a. Degussa, Toray, Daicel, Resart, Röhm) zu den spezifischen „Formulierungen“.

Dupont benutzt für die Abcite®-Schichten ein Copolymer aus teilweise verseiftem Vinylacetat und Tetrafluorethylen, das mit einem Kieselsäureester vernetzt wird. Die Aushärtung erfolgt thermisch oder auch mit harter Strahlung^[27]. Motivierend auf diesem intensiv bearbeiteten Gebiet wirkt auch der Drang nach neuen Märkten für große, transparente Kunststoffscheiben als Substitut für Glasscheiben, z. B. in Autobus-

sen, eine Anwendung, die in den USA durch den Gesetzgeber mit der Begründung der Unzerbrechlichkeit gefördert wird.

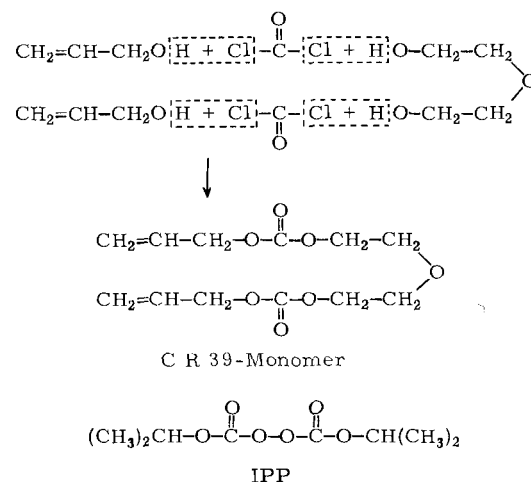
Interessant erscheint auch die Aussicht^[28], mit in einem Stück – Gestell + Linse – gespritzten Brillen die Bedürfnisse derjenigen Länder zu befriedigen, deren fehlende Infrastruktur eine Versorgung in üblicher Art noch auf Jahre nicht gestattet. Eine Linse, die ungefähr dem Erfordernis entspricht, soll immer noch sehr viel besser sein als gar keine Sehhilfe.

3.1.2. Duroplaste

Für Brillenlinsen – korrigierend und nicht-korrigierend – sind die Eigenschaften von Poly-diethylenglykol-diallyl-biscarbonat optimal. Neben der sehr guten optischen Qualität hat es die beste Wischfestigkeit der bisher als massive Festkörper gefertigten, transparenten Kunststoffe. Die optische Lage (siehe 8 in Abb. 3) dieses Polymers im Glasgebiet ermöglicht einen echten Substitutions-Wettbewerb Glas-Kunststoff. Der Brechwert von $n_d = 1.499$ kann auf Wunsch durch Copolymerisation verändert werden. Das spezifische Gewicht ist mit 1.32 ganz grob etwa halb so hoch wie bei Gläsern, was sich bei Brillenlinsen mit hohen Dioptrien sehr günstig auswirkt; die Zerbrechlichkeit ist deutlich geringer als bei üblichen Gläsern. Das bereits in den vierziger Jahren von Pittsburgh Plate Glass^[29] entwickelte Material (CR 39, Abkürzung für „Columbia Resin 39“) hat seine Marktbewährung längst hinter sich und wurde in den letzten Jahren in den USA sicherlich durch die Gesetzgebung gefördert. Andererseits hat die Brillen-„Glas“-Industrie die Herausforderung angenommen und thermisch und durch Ionenaustausch gehärtete Silicatgläser auf den Markt gebracht, die den gesetzlichen Forderungen – definiert in einem Kugelfall-Test – entsprechen.

Entscheidender ist jedoch beim Kunststoff der negative kosmetische Effekt. Linsen aus dem niedrig brechenden CR 39 müssen stärker gekrümmt sein als Linsen aus einem hoch brechenden Glas. Neuerdings stehen hoch brechende, aber leichtere Gläser zur Verfügung^[30], in denen das schwere Blei durch das leichtere Titan ersetzt wurde, die die Markchancen von CR 39 in einigen Gebieten verringern dürften^[31].

Überdies spielen modische Trends auf dem Brillenmarkt eine Rolle. Hier profiliert sich das Allylcarbonat (entsprechend der Vielfalt der Herstellerfirmen gibt es viele Handelsnamen) durch die vielfältigen Möglichkeiten der Massiv- und auch Oberflächen-Einfärbbarkeit im Diffusionsverfahren. Nach dem Diffusionsverfahren werden auch „verlaufende Farben“



(Degradée-Brille) hergestellt. Glas zeichnet sich in erster Linie durch die Photochromie aus, bei der sich die Transmission der Gläser der Helligkeit anpaßt. – Trotz aller Verbesserungen bei CR 39 (z. B. aufgedampfte SiO₂-Schicht) bleibt Glas entschieden kratzfester, und das geringere Gewicht ist erst bei sehr dicken Brillenlinsen von Bedeutung. Auf den Komfort der Photochromie müssen Kunststoffbrillenränder bis heute verzichten. Nur für eine sehr begrenzte Zeit erwiesen sich photochrome Kunststoffe als reversibel.

Das CR 39-Monomer wird aus Allylalkohol, Phosgen und Diethylenglykol synthetisiert und mit einem Dialkylperoxydicarbonat, z. B. Diisopropyl- (IPP) oder Dicyclohexylperoxydicarbonat, an den beiden Allylgruppen vernetzend polymerisiert.

Dabei wird das Monomer mit 3–4 % Peroxid in eine Form eingebracht, die aus zwei Glas-Formhälften mit optisch perfekten Innen-Oberflächen besteht, die durch einen elastischen Zwischenring auf Distanz gehalten werden. Bei der durch Erhitzen in Gang gebrachten Polymerisation schrumpft die Masse um 14 %; die beiden Formhälften, an denen das Polymerisat begrenzt haftet, – ein Problem für sich –, folgen der sich zusammenziehenden Masse. Es resultiert eine Linse, die keiner Nachbehandlung bedarf, wenn ihre optische Wirkung im Bereich kleiner Dioptrien liegt. Im Bereich mittlerer Dioptrien gelingt es wegen der Schrumpfung nur, einer Seite die endgültige „Kurve“ zu verleihen. Die zweite Seite wird durch Schleifen und Polieren in die endgültige Form gebracht. Bei hohen Dioptrien werden die Abweichungen von der vorgegebenen Form so groß, daß nur ein Rohling durch die Polymerisation hergestellt werden kann. Auch Mehrstärkengläser lassen sich durch Polymerisation produzieren^[32].

Analog werden hochwertige Sonnenschutzgläser aus CR 39 gefertigt. Die Polymerisationszeiten liegen im Bereich von Stunden. Da während dieser Zeit die Form blockiert ist, entstehen wesentliche Kosten. Aus diesem Grunde wird bei „Nullscheiben“, d. h. Linsen ohne Korrekturwirkung, die Polymerisation von großen, etwa 2 mm dicken CR 39-Planscheiben bevorzugt, die dann gesägt und nach Art einer Glasverarbeitung „gesenkt“ werden. Die durch Erhitzen erweichte Scheibe wird in eine gewölbte Form gedrückt oder gesaugt; der Formling behält nach Abkühlung die so erzwungene Form, wobei

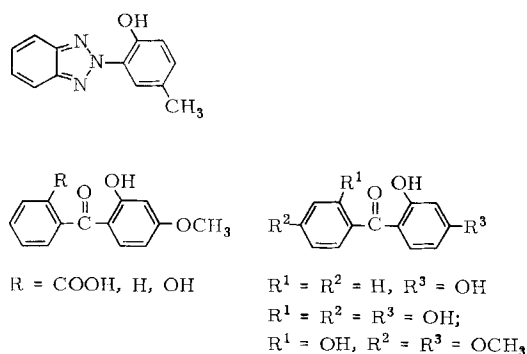


Abb. 5. Beispiele für UV-Absorber auf der Basis Hydroxyphenylbenzotriazol und Hydroxybenzophenon.

wichtig ist, daß er auch während des Gebrauches nicht so heiß wird, daß Rückverformung eintreten kann.

Die UV-Stabilität von CR 39 und die UV-Undurchlässigkeit einer Brillenlinse lassen sich am fertigen Produkt durch ein wenige Minuten dauerndes Eintauchen in eine siedende wäßrige Dispersion eines UV-Absorbers einstellen (Abb. 5).

Dabei diffundiert der Absorber einige µm tief in die Oberfläche ein und sitzt dort so fest, daß er mit Wasser nicht entfernt werden kann^[33]. Die Eindringtiefe wird durch die Art des (der) Substituenten an C-4 (und C-4') gesteuert, die Lage der UV-Absorptionskante wird durch Zahl und Stellung der OH-Gruppen bestimmt. Dies ist ein Musterbeispiel für „zweifach maßgeschneiderte Moleküle“.

Der Vorteil dieser Methode liegt in ihrer Vielseitigkeit, Schnelligkeit und guten Schutzwirkung im Sinne einer UV-Barriere und darin, daß man sowohl am teuren UV-Absorber spart als auch eine gewisse Gelbfärbung vermeidet, wie sie bei der UV-Stabilisierung in der Masse des Formkörpers auftritt. Das Verfahren läßt sich auf andere Kunststoffe übertragen. Kritisch ist die Auswahl eines inerten Lösungsmittels, das keine Quellung des Kunststoffes hervorrufen darf; oft ist Wasser ideal^[34].

CR 39 dürfte seine singuläre Rolle vor allem bei der Korrekturbrille behalten, wobei Variationen über Copolymerisate eingeschlossen seien. Erste Versuche mit Epoxidharzen haben einige Vorteile hinsichtlich der Geschwindigkeit von Aushärtung und Einfärbung ergeben, aber als gravierenden Nachteil die gegenüber CR 39 wischempfindlichere Oberfläche, die eine Beschichtung erzwingen dürfte^[35]. Epoxidharzlinen können vorzugsweise in Kunststoff-Formen gegossen werden, an denen sie nicht haften^[36].

3.2. Weitere Produkte^[22, 24, 37, 38]

3.2.1. Photo-Optik

In der abbildenden Optik einer Kamera ist die Anwendung von Kunststoffen – Polymethylmethacrylat, Polycarbonat (das Polystyrol neuerdings mehr und mehr verdrängt) und Polystyrol-Acrylnitril-Copolymere – auf einfachere Kameras beschränkt. Die abbildenden Elemente in sehr hochwertigen Kameras bleiben in erster Linie wegen der Temperaturabhängigkeit der optischen Eigenschaften eine Domäne des Glases. Die Sucheroptik auch hochwertiger Geräte besteht jedoch heute fast vollständig aus Kunststoffteilen (Linsen, Fresnellinsen, usw.). Nahezu einzige Ausnahme ist das großvolumige kompakte Dachkantprisma einäugiger Spiegelreflexkameras. Die engen Toleranzen der Winkel und die Planität der Flächen werden bei Kunststoff nicht erreicht. Es zeichnen sich jedoch technische Lösungen durch ein Hohlprisma ab.

Beim Produkt „Kamera“ werden, wohl abgewogen, Kunststoff und Glas nebeneinander verwendet. Eine Tendenz zum Kunststoff hin ist jedoch nicht zu verkennen, insbesondere durch die „integrale Kunststoffoptik“, bei der optische Elemente sowie Befestigungs- und Zentrierelemente in einem Stück hergestellt werden. Ein Paradebeispiel ist die „Polaroid Land Super Swinger Camera“, bei der der Übergang auf Kunststoff eine Kostenersparnis des optischen Systems um 95 % erbracht haben soll^[16]. Im Mittel kann bei realistischer Betrachtungsweise wohl mit einer Ersparnis von 30 % gerechnet werden. Wesentlich ist, daß asphärische Kunststoff-Linsen leicht angefertigt werden können; eine dieser Linsen soll oft mehrere sphärische Glaslinsen substituieren können. (In ^[23] sind Pro- und Contra-Argumente aufgelistet.)

3.2.2. Beleuchtungsoptik

Die Beleuchtungsoptik ist zum Teil ein Feld der Kunststoffe, sofern nicht, wie z. B. bei Atelierbeleuchtungen, hohe Temperaturen ins Spiel kommen^[4].

3.2.3. Spannungsoptik

Transparente Kunststoffe mit verschiedenen spannungsoptischen Konstanten haben sich bewährt^[11].

3.2.4. Signaloptik

Kunststoffe – der oft erforderlichen Witterungsbeständigkeit wegen häufig PMMA – haben sich klar durchgesetzt und Glas verdrängt (z. B. Autorückstrahler, Warnzeichen, Verkehrszeichen). Auch Ampelscheiben können aus Polycarbonat im Spritzgießverfahren hergestellt werden. Gut fließfähige Kunststoffe erlauben eine sehr rationelle Fertigung.

3.2.5. Polarisationsoptik

Polyvinylalkohol- und Polyvinylacetatfolien, mit Iod eingefärbt und gereckt, sind seit langem bewährt^[1]. Auch für das infrarote und ultraviolette Spektralgebiet sind Flächenpolarisatoren aus Kunststoff beschrieben^[39].

3.2.6. Filteroptik

Neben gefärbten transparenten Scheiben aus Kunststoff sind in der Photofilteroptik im Sandwich zwischen Glas gepackte gefärbte Gelatine- und Celluloseacetat-Filter im Gebrauch, z. B. Kodak-Wratten-Filter^[40]. Die Vielfalt der spektralen Transmission und die Exaktheit der Einstellung ist groß (neue Verbesserungen siehe Abschnitt 4).

In dieses Gebiet gehören auch die Schweißerschutzbrillen mit der erforderlichen hohen IR-Absorption. Auch hier versuchen Kunststoffe in eine Domäne des Glases einzudringen. Für Brillen zum Elektroschweißen wird gegossenes PMMA, für Brillen zum autogenen Schweißen gespritztes Cellulosepropionat verwendet. Es hat den Anschein, daß lediglich die Firma American Cyanamid über – begrenzt – technisch einsetzbare organische IR-Absorber verfügt. Oft werden Schweißerschutzscheiben zur Reflexion starker IR-Strahlung durch Bedampfen transparent vergoldet.

Laserschutzbrillen werden von der Firma Glendale Optical Corp., USA, aus Kunststoff hergestellt. Dabei werden Farbstoffe mit extrem hohen Extinktionskoeffizienten in den Kunststoff eingearbeitet^[41].

Für das Gebiet zwischen 2000 und 3000 Å sind schmale Bandpaßfilter entwickelt worden^[42]. Dazu werden organische Absorber in ankondensiertem Methylpolysiloxan gelöst, und anschließend wird ausgehärtet. Dieser Kunststoff wurde wegen seiner hohen UV-Durchlässigkeit als „Wirtmaterial“ ausgewählt.

3.2.7. Gitteroptik

Originalbeugungsgitter werden durch Ritzen von Glas und Metall mit äußerster Präzision hergestellt und können bis zu einige tausend Furchen pro Millimeter enthalten. Von diesen kostbaren Originalen werden Kunststoffabzüge hergestellt, z. B. Gelatineabdrücke, die ihrerseits wieder als Master zur Herstellung von Polyesterabzügen dienen. Ebenso wird Styrol oder Methylmethacrylat in Kontakt mit dem Original-

gitter polymerisiert. Die Wiedergabetreue ist ausgezeichnet (siehe auch Abschnitt 4).

3.2.8. Fresneloptik

Fresnellinsen, -prismen und -spiegel werden sowohl gespritzt als auch durch spangebende Bearbeitung hergestellt; diese Techniken sind kunststoffgemäß. Hauptwerkstoff ist Polymethylmethacrylat.

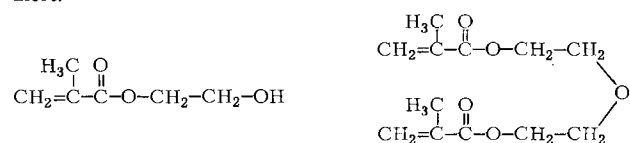
3.2.9. Optikkitt

Der klassische Optikkitt „Kanadabalsam“ ist durch Kunststoffe ersetzbar. Vermutlich werden sich hier die schon angewendeten Epoxidharze weiter verbreiten. Beispiele sind verkitete Glasfilterpakete. Gerade bei diesen aus einer großen Zahl von Harz-Härter-Kombinationen nach Maß herstellbaren Kitten ist die Vielfalt beachtlich. Die an sich schon gute Haftung auf Glas, die einer chemischen Reaktion der Si—OH-Gruppen der Glasoberfläche mit den Epoxid- oder OH-Gruppen des Harzes zuzuschreiben ist, läßt sich durch Zusatz spezieller Haftvermittler – Siliciumverbindungen mit „glasfunktionellen“ und „harzfunktionellen“ Gruppen – weiter steigern. Bei Linsenverkitungen mit nicht thermoplastischen Kitten entfällt jedoch die elegante Möglichkeit des „Nachjustierens“ in erhitztem Zustand.

3.2.10. Kontaktlinsen

Neben harten Kunststoffen, die als Kontaktlinsen verwendet werden, interessieren besonders die von *Wichterle*^[43] entwickelten Hydrogele, die die Herstellung weicher Kontaktlinsen ermöglichen^[44].

Hierbei wird durch vernetzende Copolymerisation von Hydroxyethylmethacrylat mit z. B. Diethylenglykoldimethacrylat dessen Wasserlöslichkeit auf eine Wasserquellbarkeit reduziert.



Auch Siliconkautschuk mit hydrophiler Oberfläche ist in jüngster Zeit als Kontaktlinsenmaterial verwendet worden^[45]. Ein wesentlicher Vorteil besteht in der hohen Sauerstoffdurchlässigkeit.

3.2.11. Laseroptik

Wenn man auch zahlreiche Lasereffekte von Chelaten der Seltenerdmetalle in fester Lösung, z. B. in PMMA, kennt, und ebenso andere laseraktive organische Verbindungen (Metallphthalocyanine und -farbstoffe), muß doch angenommen werden, daß so hergestellte „Kunststoff-Laser“ in ihrer Bedeutung auf spezielle wissenschaftliche Fragen beschränkt bleiben. Rund 50 organische Farbstoffe überdecken überlappend den Bereich von 3900 bis 10000 Å mit Laserlinien, und in dieser Variationsbreite liegt ihre Bedeutung. Immerhin haben sich Kunststoffe als „Wirtmaterial“ für Laserfarbstoffe, z. B. Rhodamin G in Polyurethan-Filmen^[46, 47], bewährt.

3.2.12. Asphärische Optik

Während die Herstellung von asphärischen Glaslinsen eine mühsame Bearbeitung von Einzelstücken erfordert, liefert eine

einmal hergestellte asphärische Stahlform große Mengen asphärischer Kunststofflinsen. Besonders bei sehr großen Linsen, z. B. mit 680 mm Durchmesser, fallen die wirtschaftlichen Vorteile von Kunststofflinsen stark ins Gewicht^[16, 28].

3.3. Lichtleitoptik

In der Lichtleitoptik wird ein Stab oder eine Faser aus transparentem Material von hohem Brechwert (n_1) mit einem ebenfalls transparenten Mantel von kleinerem Brechwert (n_2) umgeben. Auf die Stirnfläche einfallendes Licht wird infolge Totalreflexion weitergeleitet (Abb. 6).

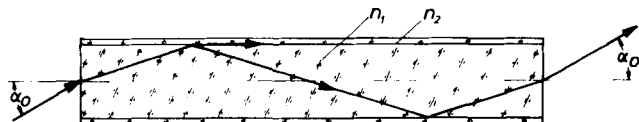


Abb. 6. Prinzip einer Lichtleitoptik.

Um Lichtdurchlässigkeit und Öffnungswinkel groß zu halten, muß vor allem das Kernmaterial vorzüglich durchlässig sein, die ebenfalls durchlässige Mantelschicht muß einen ausgezeichneten optischen Kontakt zum Mantel haben, und die Differenz der Brechwerte $n_1 - n_2$ soll möglichst groß sein, denn sie bestimmt nach

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

den Öffnungswinkel $2\alpha_0$ (n_0 = Brechwert des umgebenden Mediums).

Obschon die Lichtleitoptik, vorzugsweise Faseroptik, eine starke Domäne des Glases ist, kann doch der Anteil der Kunststoffe nicht mehr übersehen werden.

Es ergibt sich bereits aus dem $n_d - v_d$ -Diagramm (Abb. 3), daß mehrere geeignete, auch technisch erhältliche „Kunststoffpaare“ zur Verfügung stehen. So sind z. B. Polystyrol-Kernfasern ($n_d = 1.59$) mit Polymethylmethacrylat ($n_d = 1.49$) ummantelt worden.

Bekannter sind die Crofon[®]-Lichtleitfasern von Du Pont^[48], die aus Polymethylmethacrylat-Kernfasern durch Extrusion und Recken hergestellt werden. Der Mantel wird kontinuierlich in einem Beschichtungsbad aufgebracht. Da das aus optischen Gründen wohl bevorzugte PMMA bereits einen relativ niedrigen Brechwert hat, steht kein Massenkunststoff als Mantelmaterial (mit notwendigerweise deutlich kleinerem Brechwert) mehr zur Verfügung. Verwendet werden daher fluoridierte Ester von Acryl- und Methacrylsäure^[49] (siehe auch Abschnitt 4.1).

Mantel- und Kernmaterialien müssen wenig absorbierend und wenig streuend, d. h. nicht oder wenig kristallin sein. Nach Schreyer^[4] haben die Streuverluste den größten Anteil am Verlust bei Kunststoff-Lichtleitern. Die Absorptionsverluste wirken sich vor allem im ultravioletten und infraroten Spektralbereich aus. Der optische Kontakt soll bei Crofon[®] gut sein.

Bei der Entwicklung von Fasern für die Nachrichtenübertragung über größere Strecken hat man die Kunststoff-Lichtleiter weiter optimiert. Inzwischen gibt es Glas-Glas-Nachrichtenfasern mit extrem kleinen Verlusten von nur einigen dB/km^[50].

Kunststoffe haben für diese extremen Anforderungen, zumindest als Kernmaterial, keine Chance. Über Kunststoff nur

als Mantelmaterial wird in Abschnitt 4.1 berichtet. Während die Crofon[®]-Kabel Verluste von 1100 dB/km aufweisen, sind mit der neuen PFX-Faser von Du Pont^[51] 470 dB/km erreicht worden.

Kunststoff-Lichtleitoptiken werden vor allem zur Kontrolle und Beleuchtung verwendet.

Für integrierte Optiken haben planare Wellenleiter aus Kunststoffen Interesse gefunden^[46]. Dabei werden dünne Filme aus der Lösung oder auch durch Plasma-Polymerisation hergestellt. Obschon die Energien im Plasma so hoch sind, daß nur wenig reaktive Strukturen Überlebenschancen haben, scheinen auf diesem bisher nur wenig bearbeiteten Gebiet viele Möglichkeiten offen zu sein. Unter anderem sind Alkylpolysiloxane und Fluorpolymere hier intensiver untersucht worden; sie liefern glasklare Filme von niedriger Porenzahl.

4. Glas-Kunststoff-Kombinationen für optische Anwendungen

4.1. Lichtleitoptik

4.1.1. UV-Lichtleitfasern

Die Prinzipien sind in Abschnitt 3.3 geschildert worden. Für die Leitung des sichtbaren Lichtes werden seit langem technisch ausgereifte Faseroptiken verwendet; die Übertragung von UV-Licht blieb jedoch bis vor wenigen Jahren auf den klassischen Weg der aufwendigen Linsen und Prismen aus Kieselglas beschränkt. Eine UV-Faseroptik ist aus Glas-Glas- oder Kunststoff-Kunststoff-Lichtleitern nicht aufzubauen; erst die Kombination bietet diese Möglichkeit.

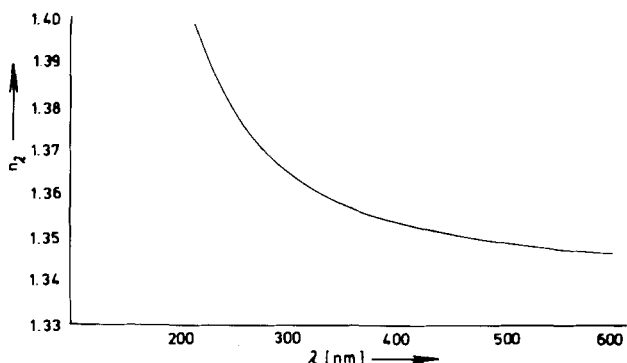


Abb. 7. Lichtbrechung einer Teflonfolie als Funktion der Wellenlänge.

Das einzige bis hinunter zu Wellenlängen von 200 nm durchlässige und zu Fasern ausziehbares Material ist Kieselglas mit den Brechwerten $n_{546} = 1.460$; $n_{365} = 1.475$ und $n_{255} = 1.506$. Ein Blick auf Abbildung 3 lehrt, daß kein hinreichend niedriger brechendes Glas als mögliches Mantelmaterial existiert, Kunststoffe jedoch diese niedrigen Brechwerte bieten. Da dieses Mantelmaterial weiterhin ebenfalls UV-durchlässig und nicht streuend sein muß, profilieren sich nach Abbildung 1 zwei gut zugängliche Materialien, Methylpolysiloxan und Teflon FEP, allgemeiner ausgedrückt die Klassen der Alkylpolysiloxane und der weitgehend, möglichst vollständig fluorierten Polymere, soweit sie glasklar durchsichtig sind. Abbildung 7 zeigt die Wellenlängenabhängigkeit der Brechwerte von Teflon FEP^[52].

Auf dieser Basis wurden im JENAer Glaswerk Schott & Gen., Mainz, UV-Faseroptiken hergestellt^[11-13], die das UV-

Licht erstmals bequem hantierbar machten und ein neues Werkzeug für die medizinische Technik, die Medizin und viele technische und wissenschaftliche Gebiete sind. Abbildung 8 zeigt als wesentliche Eigenschaft die spektrale Durchlässigkeit. Weiteres ist Prospekten^[53, 11] zu entnehmen, worin auch auf Entwicklungsdetails eingegangen wird.

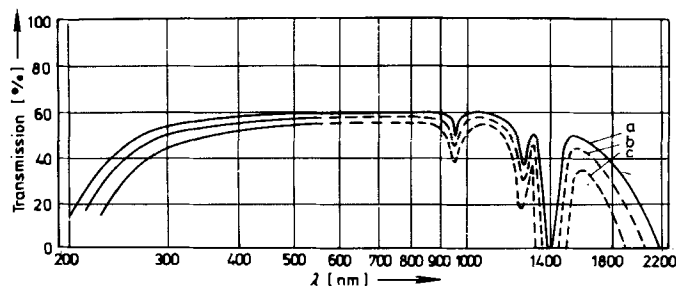


Abb. 8. Spektrale Transmission flexibler UV-Lichtleiter aus Teflon-FEP-beschichtetem Kieselglas. Lichtleiterlänge: (a) 500 mm, (b) 1000 mm, (c) 1800 mm.

4.1.2. Nachrichtenfasern

Nach diesem unseres Wissens ersten Einsatz von Mänteln aus durchsichtigem Kunststoff auf Glas-Kernmaterialien^[12, 13] sind Entwicklungen bekannt geworden, die nach gleichem Prinzip „low loss“-Fasern für die Nachrichtenübermittlung zum Ziel haben^[54–58]. Hier geht es meist um die Leitung von 800- bis 1060-nm-Strahlung aus einer Laserquelle, wobei die hervorragende Durchlässigkeit bestimmter Kieselglassorten ausgenutzt wird und ein niedriger brechendes Mantelmaterial ausgewählt werden muß – im Grunde also das gleiche Problem, wie es bei der UV-Lichtleitfaser bereits gelöst war. Entsprechend werden für diese Stufenindexfasern auch die

$\text{CF}_2=\text{CF}_2$	Tetrafluorethylen
$\text{CF}_2=\text{CF}-\text{CF}_3$	Hexafluorpropylen
$\text{CH}_2=\text{CHF}$	Vinylfluorid
$\text{CH}_2=\text{CF}_2$	Vinylidenfluorid
$\text{CF}_3-\text{O}-\text{CF}=\text{CF}_2$	Perfluorvinylmethylether
$\text{CF}_2=\text{CClF}$	Monochlortrifluorethylen
$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}(\text{CF}_3)_2$	Hexafluorisopropylmethacrylat
$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}(\text{CF}_3)\text{CH}_3$	Trifluorisopropylmethacrylat

Abb. 9. Fluorhaltige Monomere für optische Mäntel.

gleichen Kunststoffe (Fluorpolymere und Alkylpolysiloxane) als Mäntel beschrieben. Andere Kunststoffe sind nicht geeignet. Abbildung 9 zeigt Beispiele.

Die so erhaltenen Fasern mit den äußerst geringen Verlusten von wenigen dB/km werden unseres Wissens allerdings nicht technisch verwendet. Es ist anzunehmen, daß auf diesem „heiß umkämpften“ Gebiet in nächster Zukunft viel in die wissenschaftliche und technische Entwicklung investiert wird. Die beiden erwähnten Stoffgruppen sind fixiert; Variationen innerhalb der Stoffgruppen sind aber möglich.

Abschließend sei erwähnt, daß die Glas-Kunststoff-Kombinationen hier nicht zwingend notwendig sind. Die besten Chancen haben Glas-Glas-Systeme in Form der Gradientenfaser. Interessant ist, daß z.B. Du Pont nach Erreichen von 470 dB/km mit der PFX-Faser^[51] auch auf das Glas-Kunststoff-Gebiet gewechselt ist und bisher 80 dB/km erreicht hat^[59]. Bei diesen Fasern besteht der Kern aus nicht dotiertem Kieselglas, der Mantel aus einem nicht genannten Polymer. Der Preis dieses „PFX-S-108-RO2“-Kabels liegt derzeit bei 5 Dollar pro Meter.

4.2. Gitteroptik

Verwiesen sei auf die in Abschnitt 3.2.7 beschriebene Herstellung von Kunststoffgittern. Wegen der hohen thermischen Ausdehnung der Kunststoffe sind die Gitterabstände temperaturabhängig. Manche Glaskeramiken haben in weiten Temperaturbereichen praktisch keine thermische Ausdehnung. Polymerisiert man nun einen Tropfen monomeres Diethylenglykol-

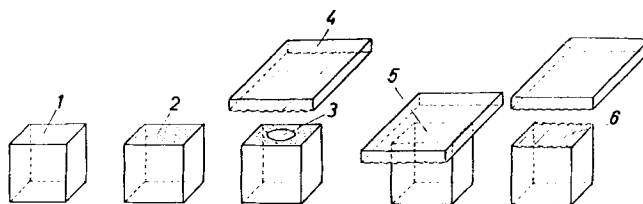


Abb. 10. Fixierung eines Gitters aus polymerem Diethylenglykol-diallyl-biscarbonat auf einem Trägerglas. 1 = Glasblock, 2 = Vinylierung der Oberfläche, 3 = ein Tropfen Diethylenglykol-diallyl-biscarbonat, 4 = Originalgitter aus Glas mit methylierter Oberfläche, 5 = Polymerisation des ausgebreiteten Tropfens, 6 = Kunststoff-Gitter, auf dem Glasblock fixiert.

diallyl-biscarbonat zwischen einem Glaskeramik-Block und einem originalgeritzten Glasgitter, so entsteht ein Kunststoff-

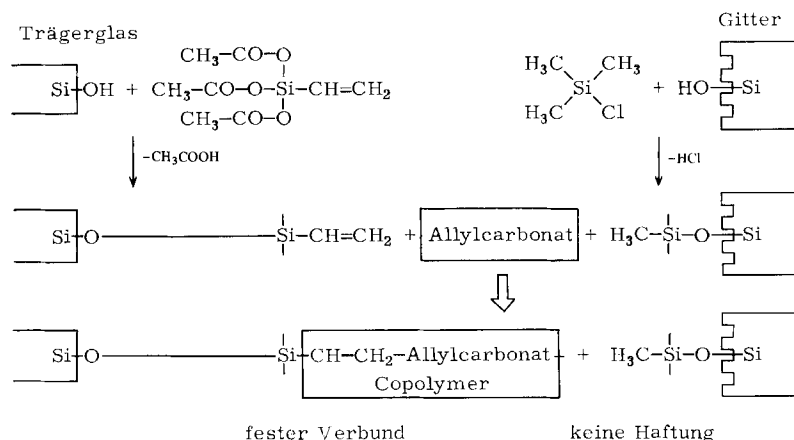


Abb. 11. Polymerisation von Diethylenglykol-diallyl-biscarbonat („Allylcarbonat“) zwischen der vinylierten Oberfläche eines Trägerglases und der methylierten Oberfläche eines Gitters aus Glas (schematisch).

gitter (Abb. 10), das sich thermisch ebenfalls praktisch nicht ausdehnt. Um das Originalgitter anschließend abheben zu können, wird es vorher „siliconisiert“, d. h. mit Methylchlor-silanen umgesetzt (Abb. 11). Dieses Verfahren wird durch die reaktiven Si—OH-Gruppen des Glases ermöglicht. Diesen Gruppen ist es andererseits aber auch zu verdanken, daß eine extrem feste Haftung des Kunststoffes auf der Glaskeramik durch Copolymerisation „aufgepfropfter“ Vinylgruppen zustandekommt (Abb. 11)^[60]. Es resultiert ein wenige μm dickes, chemisch auf der Unterlage fixiertes Kunststoffgitter.

Dieses nicht in der Praxis angewendete Beispiel^[61] veranschaulicht die Chemie eines Glas-Kunststoff-Verbundes und ihre Auswirkung.

4.3. Filteroptik

Optische Filter für photographische oder wissenschaftliche Zwecke können aus Glas oder aus Kunststoff hergestellt werden. Glasfilter entsprechen im allgemeinen allen an sie gestellten optischen Anforderungen und Anforderungen an die Beständigkeit. Eine gewisse Beschränkung besteht in den spektralen Möglichkeiten, vor allem dann, wenn gleichzeitig andere Eigenschaften, z. B. Fluoreszenzarmut, gewünscht werden.

Kunststoffe haben in spektraler Hinsicht fast unbegrenzte Möglichkeiten, sind aber weniger beständig im Gebrauch und kratzempfindlicher. Außerdem können Kunststoff-Filter nicht in der oft erforderlichen hohen Planität wie geschliffene und polierte Glasfilter hergestellt werden.

Ein Glas-Kunststoff-Verbundfilter, wie es Abbildung 12 zeigt, vereinigt Vorzüge beider Materialien. Dazu wird Methyl-

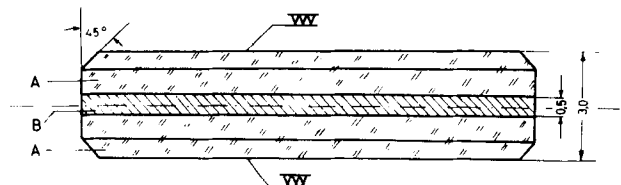


Abb. 12. Glas-Kunststoff-Verbundfilter. A = Deckglas, B = Kunststoff-Verbandschicht. VVV = Feinpolitur.

methacrylat mit löslichen Farbstoffen, Silanhaltvermittlern der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Art sowie Katalysatoren versetzt und zwischen zwei Glasplatten, getrennt durch Distanzierungstreifen, polymerisiert. Wegen der Oxidationsempfindlichkeit vieler Farbstoffe wird Azodiisobutyronitril als Initiator anstelle der sonst üblichen Peroxide eingesetzt. Diese in großen Scheiben hergestellten Verbunde sind so fest, daß aus ihnen mit üblichen Glasbearbeitungsmaschinen Filter hergestellt werden können^[62]. Damit ist höchste Planität und Kratzfestigkeit gegeben, ebenfalls Klimabeständigkeit bis hin zur Tropenfestigkeit^[63] – Eigenschaften, die Kunststoff-Filter nicht aufweisen.

Andererseits bietet der Kunststoff ideale Möglichkeiten der Einbringung absorbierender Stoffe, die in Glas nicht gegeben sind. So lassen sich z. B. eine Reihe extrem steilkantiger UV-Sperrfilter in äußerst enger Fertigungstoleranz hinsichtlich der Lage der Absorptionskanten herstellen, deren Eigenfluoreszenz äußerst schwach ist (Abb. 13)^[64].

Solche Kombinationen eignen sich demgemäß z. B. als photographische UV-Sperrfilter, Fluoreszenz-Sperrfilter, Filter für die Untersuchung von Anregungsbedingungen und als Konversionsfilter^[65].

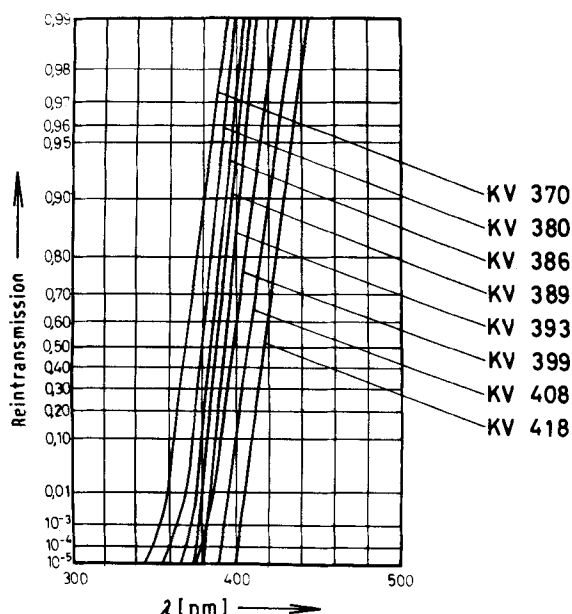


Abb. 13. UV-Sperrfilter. Die Bezeichnungen KV 370 bis KV 418 geben den Wert der Reintransmission = 0.50 an.

Während bei diesen Filtern das Glas den Kunststoff schützt, sei im folgenden auf Fälle verwiesen, bei denen das anorganische Material eines Schutzes durch Kunststoff bedarf. Dies ist bei IR-durchlässigen Materialien der Fall, z. B. bei Einkristallen oder auch Polykristallen aus Alkali- oder Erdalkalimetallhalogeniden. Diese oft recht teuren Produkte sind feuchtigkeitsempfindlich. Sie können durch Überzüge geschützt werden, die jedoch IR-durchlässig sein müssen.

So wird z. B. eine polykristalline Lithiumfluorid-Scheibe, die bis zu etwa $5\text{--}6\mu\text{m}$ gut durchlässig ist, durch einen aus Dispersion aufgetragenen Film aus Teflon FEP von wenigen μm Dicke hervorragend gegen Wasser geschützt, ohne daß die IR-Durchlässigkeit eingeschränkt wird^[66]. So aufgetragene Filme umschließen die LiF-Scheiben so fest, daß sie jahrelang unter Wasser stabil bleiben.

Die Schutzschichten aus Teflon FEP können auch durch Sputtern aufgebracht werden (siehe z. B. ^[67]). Das bedeutet jedoch in der Regel tiefgreifende Strukturänderungen.

4.4. Isolierglasfenster

Es mag zunächst erstaunen, Fenster in einem Artikel über Optik-Werkstoffe erwähnt zu finden. Jedoch erfüllt ein Fenster, insbesondere in einer Zeit der schnell steigenden Energiepreise, durchaus nicht nur die Funktion einer mechanischen Schutzvorrichtung vor den Unbilden der Natur, durch die Licht hereinfällt und der Mensch herausgucken kann. Die Schutzfunktion ist inzwischen auch eine durchaus optische, z. B. in Sonnenschutzfenstern, die im Sommer bei Sonnenschein die Klimaanlage in Hochhäusern wesentlich entlasten oder umgekehrt im Winter weniger langwellige IR-Strahlung entweichen lassen. Beides geschieht am günstigsten durch reflektierende Schichten, z. B. aus TiO_2 in Interferenzschichtdicke oder aus Metallen wie Au, Ag, Cu^[68]. Selbstverständlich ist dies eine Domäne des Glases. Einen sehr kleinen Wärmedurchgang (k-Wert) haben Dreischeibenisoliergläser, wobei auch eine der Scheiben mit reflektierenden Schichten belegt sein

kann. An die Stelle der dritten Scheibe, die zu erheblich höheren Gewichten und zu größerer Dicke des Gesamtsystems führt, könnte eine bedampfte Kunststoff-Folie treten. Damit würde aus einem Zweischeibenisolierverglas ohne nennenswerte Gewichtserhöhung ein Dreischeibenisolierverglas, das durch die Belegung der Folie und durch sorgfältig abgestimmte Gasfüllungen der Halbräume einen sehr kleinen Wärmedurchgang und – wenn gewünscht – einen Sonnenschutz aufweist^[69]. In welchem erheblichem Ausmaß der k-Wert durch ein solches „Folienfenster“ erniedrigt werden kann, veranschaulicht Tabelle 1. Der k-Wert von $0.65 \text{ kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ K}^{-1}$ entspricht einer Vollziegelwand von 0.5 m Dicke. Solche Fenster sind versuchsweise hergestellt worden, jedoch sind für die Praxis noch viele Fragen offen.

Tabelle 1. k-Werte von Fenster-Verglasungen.

Art der Verglasung	k [$\text{kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ K}^{-1}$]
Einscheibenverglasung	5.0
Zweischeiben-Isolierverglasung (12 mm Luft)	2.6
Dreischeiben-Isolierverglasung (2 × 12 mm Luft)	1.8
Zweischeiben-Isolierverglasung (12 mm Luft), Gold	1.55
Zweischeiben-Isolierverglasung (12 mm Krypton), Gold	1.06
Folienfenster (Metall) (2 × 6 mm Luft)	1.46
Folienfenster (Metall) (2 × 12 mm Luft)	0.95
Folienfenster (Metall) (2 × 6 mm Krypton)	0.79
Folienfenster (Metall) (2 × 8 mm Krypton)	0.65

Mit Absicht wurde der nüchternen Betrachtung über Kunststoffe in der Optik ein leicht futuristisches Kapitel angefügt – dies um zu zeigen, daß Kunststoff trotz aller seiner Grenzen oft Lösungen für neu auftauchende Probleme bieten kann. Nicht der Werkstoff sollte daher im Vordergrund zu sehen sein, sondern die Problemlösung. Die Frage nach dem Werkstoff – Kunststoff oder Glas – bleibt wichtig, aber sekundär.

Neben dem Dank an viele Kollegen für stets gern gewährte Unterstützung seien zwei Mitarbeiter hervorgehoben. Herr Karl-Heinz Wiesner hat mit großem Engagement und Verständnis die gesamte Kunststoff-Entwicklung vorangetrieben, Herr Paul Hinz in gleicher Weise die unorthodoxe Glassynthese und die Beschichtungen. Ihnen und ihren jeweiligen Mitarbeitern gilt für die mehr als zehnjährige Zusammenarbeit der besondere Dank des Autors.

Eingegangen am 23. Januar 1978 [A 254]

- [1] Polaroid Corporation, OSRD-Report No. 4417, PB 28553 (1945).
- [2] G. Schreyer, *Kunststoffe* 51, 569 (1961).
- [3] G. Schreyer, *Umschau Wiss. Tech.* 9, 269 (1962).
- [4] G. Schreyer in: *Konstruieren mit Kunststoffen*. Hanser, München 1972.
- [5] W. Geffcken in *Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik*. 6. Aufl. Springer, Berlin 1957, 4. Bd., 3. Teil, S. 925ff.
- [6] O. Lindig in *Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik*. 6. Aufl. Springer, Berlin 1962, 2. Bd., 8. Teil, S. 465ff.
- [7] J. D. Torbin, Yu. F. Daminov, *Sov. J. Opt. Technol.* 41, 492 (1974).
- [8] H. Schröder, N. Neuroth, *Optik* 26, 381 (1967).
- [9] A. J. Burzinski, M. R. Eliot, DOS 1595062 (1965), Owens-Illinois.
- [10] H. Dislich, Vortrag, *Macromolecular Symposium*, Budapest 1969, Preprints Vol. 1.
- [11] H. Dislich, A. Jacobsen, *Angew. Chem.* 85, 468 (1973); *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 12, 439 (1973).
- [12] H. Dislich, A. Jacobsen, DBP 1494872 (1965), JENAer Glaswerk Schott & Gen.

- [13] H. Dislich, A. Jacobsen, DBP 1494874 (1966), JENAer Glaswerk Schott & Gen.
- [14] R. H. Wiley, G. M. Brauer, *J. Polym. Sci.* 3, 455 (1948).
- [15] R. F. Weeks, *Optics News* 5 (Sept. 1975).
- [16] VDI-Nachr. 44, 24 (Okt. 75).
- [17] H. Fricke, DBP 2501991 (1975), DBP 2204830 (1972), Deutsche Spiegelglas AG.
- [18] H. Schröder, *Opt. Acta* 9, 249 (1962).
- [19] H. Dislich, *Angew. Chem.* 83, 428 (1971); *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 10, 363 (1971).
- [20] H. Dislich, *Glastech. Ber.* 44, 1 (1971).
- [21] H. Dislich, P. Hinz, R. Kaufmann, DBP 1941191 (1969), JENAer Glaswerk Schott & Gen.; H. Schroeder, *Phys. Thin Films* 5, 87 (1969).
- [22] L. D. Bronson, *Mod. Plast.* 35, 118 (1957).
- [23] *Pop. Photogr.* 1972, 52.
- [24] P. J. Wernicke, *Feinwerktech. Meßtech.* 84, 74 (1976).
- [25] H. Lucke, *Kunstst.-Rundschr.* 9, 273 (1962); Prospektmappe von Combined Optical Industries Ltd., Slough, Buckinghamshire.
- [26] H. O. Mulfinger, H. Dutz, H. G. Krolla, DBP 1696110 (1968), JENAer Glaswerk Schott & Gen.
- [27] I. Kaetsu, A. Ito, Y. Maeda, *Plast. Ind. News Jpn.* 20, 81 (1974).
- [28] L. Wray, *Manuf. Opt. Int.* 1976, 331.
- [29] I. E. Muskat, F. Strain, US-Pat. 2370565 (1945), Pittsburgh Plate Glass.
- [30] M. Faulstich, V. Geiler, G. Gliemerth, L. Meckel, US-Pat. 3898093 (1975), JENAer Glaswerk Schott & Gen.
- [31] B. Kratzer, H. Gottlob: *Schwerflint 64*, ein neues Brillenrohrglas. Firmenschrift Carl Zeiss, Oberkochen.
- [32] E. Crundall, *Manuf. Opt. Int.* 1976, 629.
- [33] H. Dislich, Vortrag Internat. Symp. on Degradation and Stabilization of Polymers, Brüssel 1974.
- [34] H. Dislich, DBP 1569046 (1964), JENAer Glaswerk Schott & Gen.
- [35] J. Reiner, O. Hinterhofer, *SOZ* 11, 778 (1974).
- [36] H. Fricke, H. Dislich, DBP 2416830 (1974), Deutsche Spiegelglas AG.
- [37] H. J. Lorkowski, *Plaste Kautsch.* 23, 318 (1976).
- [38] H. Zscheck, *Plaste Kautsch.* 23, 321 (1976).
- [39] L. Drechsel, Vortrag *Macromolecular Symposium Prag 1965*, Preprint 342.
- [40] Kodak Wratten Filter, Firmenprospekt Kodak AG, Stuttgart-Wangen.
- [41] A. E. Sherr et al., AD-A009511, National Technical Information Service, U. S. Department of Commerce.
- [42] S. F. Pellicori, C. A. Johnson, F. T. King, *Appl. Opt.* 5, No. 12, S. 1916 (1966).
- [43] O. Wichterle, DBP 1084920 (1956).
- [44] M. Smetana, *Außenhandel der Tschechoslowakei* 2, Nr. 8, S. 28 (1962).
- [45] P. Feneberg, *Süddtsch. Optiker-Ztg.* 2, 1 (1976).
- [46] H. P. Weber, W. J. Tomlinson, E. A. Chandross, *Opt. Quant. Electronics* 7, 465 (1975).
- [47] J. Schubert, *Bull. Schweiz. Elektrotech.* 61, 657 (1970).
- [48] Du Pont de Nemours International AS, Genf, Firmenprospekt Crofon®.
- [49] A. L. Breen, J. R. Green, DBP 1494721 (1965), Du Pont.
- [50] W. G. French, J. B. MacChesnay, A. D. Pearson, *Annu. Rev. Mater. Sci.* 5, 373 (1975).
- [51] Du Pont de Nemours & Co., Wilmington, Datenblatt PFX Fiberoptic.
- [52] W. Geffcken, persönliche Mitteilung.
- [53] JENAer Glaswerk Schott & Gen., Mainz, Firmenprospekt UV-Lichtleiter.
- [54] D. A. Pinnow, L. G. van Uiter, Br. Pat. 1389263 (1972), Western Electric.
- [55] S. Shiraishi, Y. Kumagai, S. Kurosaki, DOS 2333873 (1973), Sumitomo Electric Industries.
- [56] L. L. Blyler, A. C. Hart, R. F. Jaeger, P. Kaiser, T. J. Miller, Vortrag Topical Meeting on Optical Fiber Transmission, Williamsburg 1975, Preprint.
- [57] Y. Suzuki, H. Kashiwagi, *Appl. Opt.* 13, 1 (1974).
- [58] H. Kashiwagi, Vortrag Topical Meeting on Optical Fiber Transmission, Williamsburg 1975, Preprint.
- [59] Genschow Technischer Informationsdienst, Auslandsschnellbericht 31-1976.
- [60] H. Dislich, E. Hildebrandt, *Optik* 28, 126 (1968/69).
- [61] H. Dislich, E. W. Deeg, DBP 1214864 (1962), JENAer Glaswerk Schott & Gen.
- [62] H. Dislich, K. H. Wiesner, DBP 1704743 (1967), JENAer Glaswerk Schott & Gen.
- [63] H. Dislich, K. H. Wiesner, *Optik* 30, Heft 4, S. 1 (1970).
- [64] JENAer Glaswerk Schott & Gen., Mainz, Firmenprospekt Glas-Kunststoff-Verbundfilter.
- [65] Deutsche Spiegelglas AG, Grünenplan, Firmenprospekte Konversionsfilter-Daylight-Verbundfilter und Skylight-Filter.
- [66] H. Dislich, K. Warnach, DBP 1604572 (1966), JENAer Glaswerk Schott & Gen.
- [67] R. H. Hopkins, R. A. Hoffmann, W. E. Kramer, *Appl. Opt.* 14, 2631 (1975).
- [68] W. Klein, *Glaswelt* 25, 217 (1972).
- [69] H. Dislich, H. Fußmann, P. Hinz, DAS 2263353 (1972), JENAer Glaswerk Schott & Gen.