Neuere Isolierstoffe der Elektrotechnik

Autor(en): **Hugi, L.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **58 (1967)**

Heft 20

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916285

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Neuere Isolierstoffe der Elektrotechnik

Von *L. Hugi*, Baden

621.315.61

Die rasche Entwicklung der Synthese künstlicher Werkstoffe hat auch der Elektroindustrie eine Reihe von Materialien zur Verfügung gestellt, welche die Technik der elektrischen Isolation mehr und mehr beeinflussen. Der vorliegende Beitrag vermittelt einen Überblick über die wichtigsten Neuheiten der letzten Jahre auf den Gebieten der gasförmigen, flüssigen und festen Isolierstoffe und versucht, die sich heute abzeichnenden Tendenzen in der Entwicklung neuer Materialien festzuhalten.

L'évolution rapide de la synthèse des matériaux artificiels a également fourni à l'industrie électrotechnique une série de matériaux influançant de manière diverse la technique de l'isolement électrique. Le présent article constitue un aperçu des principales nouveautés réalisées dans les domaines des isolants gazeux, liquides et solides au cours des années dernières et tente de dégager les tendances qui se précisent actuellement dans le développement des nouveaux matériaux.

1. Einleitung

In immer rascherem Rhythmus findet heute auf allen Gebieten der Wissenschaft und der Technik eine kaum zu überblickende Ausweitung des Könnens und Wissens statt. Neben der damit notwendigerweise voranschreitenden Spezialisierung macht sich aber auch eine gegenteilige Tendenz, eine immer stärker werdende Wechselwirkung zwischen allen Gebieten bemerkbar. Was z. B. die chemische Industrie an neuen Werkstoffen herausbringt, wird begierig von den verbrauchenden Industrien aufgegriffen, was die verarbeitende Industrie an neuen Bedürfnissen und immer höher gespannten Anforderungen anmeldet, führt zu zielbewusstem Forschen, wobei nicht selten — gewissermassen als Nebenprodukt zur Lösung des eigentlichen Problems — neue Ausblicke auf neue Möglichkeiten eröffnet werden.

Mitten in dieser Entwicklung steht auch der Elektromaschinen- und Apparatebau, und im besonderen das Gebiet der Isoliertechnik keineswegs allein: Impulse aussendend und Impulse empfangend ist die Verknüpfung gerade mit der chemischen Industrie heute stärker denn je. Für den Konstrukteur von elektrischen Apparaten und Maschinen wird es aber immer schwieriger, die Zusammenhänge zu überblicken und aus der Vielfalt von Neuheiten und Neuerungen das Interessanteste herauszufinden.

In den folgenden Ausführungen soll daher versucht werden, einen Überblick über die wichtigsten und am meisten versprechenden neueren Errungenschaften auf dem Gebiet der elektrischen Isolation zu vermitteln. Dass dabei eine gewisse Auswahl getroffen werden musste, war angesichts der Fülle des Materials eine Notwendigkeit.

Was den Begriff des «Neueren» anbelangt, wurde ein etwas flexibler Maßstab angelegt. Manchmal wird eine Entwicklung, die schon vor vielen Jahren begann, als «neuer» zu taxieren sein, weil sie noch in vollem Fluss steht, während eine andere, an sich jüngere, mehr oder weniger abgeschlossen ist und daher schon zum allgemein Bekannten gehört.

2. Gasförmige Isolierstoffe

Eine eigentliche Renaissance ist heute auf dem Gebiet der Gasisolation zu verzeichnen und viele Anzeichen sprechen dafür, dass dieser Isolationsart eine bedeutende Zukunft zukommt. Die Gründe dafür sind einerseits die Notwendigkeit, immer höhere Spannungen bis nahe an dicht besiedelte Gebiete heranzuführen, und sich daraus ergebend die Tendenz zu leichter, kompakter und gleichzeitig feuersicherer Bauweise der elektrischen Apparate, und anderseits die sich heute bietende Möglichkeit, diesen Forderungen durch Einsatz neuer gasförmiger Isolationsstoffe gerecht zu werden.

Eine grosse Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang den sog. elektronegativen Gasen, vor allem den fluorhaltigen Verbindungen, zu. Die Entwicklung setzte mit dem *Schwefelhexafluorid* (SF_6) ein, von dem heute schon eine ganze Reihe von Anwendungen bekannt sind (Transformatoren, Schalter, in denen das Gas gleichzeitig als Isolier-, Lösch- und Antriebsmedium eingesetzt wird, Koaxial-Kabel, Wellenleiter u. a. m.). Das wichtigste Einsatzgebiet dieses Gases wird aber ohne Zweifel die Isolation ganzer Schaltanlagen darstellen, welche, in gekapselter Bauart ausgeführt, eine Volumenreduktion auf etwa ⅕ gegenüber der herkömmlichen Bauart ermöglicht.

Dem Schwefelhexafluorid kommt vor allem deshalb eine so grosse Bedeutung zu, weil es hohe dielektrische Festigkeit, vorzügliches Löschvermögen, gute Kühleigenschaften mit einer erstaunlichen chemischen Beständigkeit, physiologischer Unbedenklichkeit und Unbrennbarkeit vereinigt (Tabelle I). Hinzu kommt, dass SF_6 im Vergleich mit den anderen elektronegativen Gasen einen verhältnismässig tiefen Siedepunkt besitzt und daher in einem weiten Temperaturbereich verwendet werden kann. Allerdings ist der Einsatz von SF_6 als Isoliermedium auf eine Temperatur von ca. 150 °C beschränkt, weil bei höheren Temperaturen unter dem Einfluss verschiedener Metalle Zersetzungserscheinungen auftreten können.

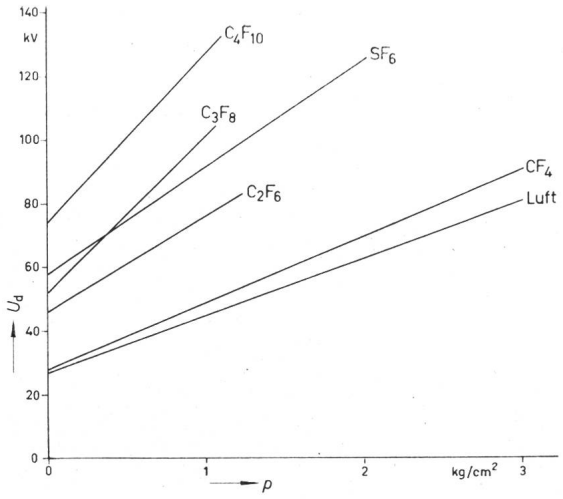


Fig. 1

Durchschlagspannung U_d verschiedener Gase in Funktion des Gasdruckes p
Homogenes Feld, Platte/Platte, Durchmesser 3 inch, Abstand 1/2 inch

In dieser Beziehung sind die *Fluorkarbone,* eine Gruppe von perfluorierten Abkömmlingen der Kohlewasserstoffe, günstiger. Spitzentemperaturen bis zu 220 °C sind bei dieser Stoffklasse zulässig. Da diese Gase sich zudem durch z. T. noch höhere Durchschlagfestigkeit auszeichnen (Fig. 1), nicht brennbar und ungiftig sind und über gute Kühleigenschaften verfügen, stellen sie geradezu das ideale gasförmige Isolationsmedium dar. Eingeschränkt wird ihre Verwendung heute allerdings noch durch die verhältnismässig hohen Preise, doch hat gerade die Entwicklung beim SF_6 gezeigt, dass durch vermehrten Verbrauch erhebliche Preissenkungen möglich sind. Nachteilig auf die allgemeine Verwendung der Fluorkarbone wirkt sich allerdings auch noch aus, dass sie wegen der Bildung von elementarem Kohlenstoff als Löschmedium weniger geeignet erscheinen und daher in kombinierten Anlagen (Schaltanlagen), in denen man sich gerne auf ein einziges Gasmedium beschränkt, hinter dem SF_6 zurückstehen. Als Hauptvertreter dieser Stoffklasse sind Hexafluoräthan (C_2F_6), Perfluorpropan (C_3F_8), Oktafluorcyclobutan (C_4F_8) und Perfluorbutan (C_4F_{10}) zu nennen (Tabelle I).

Durch ähnliche oder z. T. noch höhere Durchschlagfestigkeit zeichnen sich auch einige Abkömmlinge der reinen Fluorkarbone aus, wie z. B. die *Perfluoralkylnitrile,* von denen die zwei niedrigsten Glieder der Reihe $C_nF_{2n+1}CN$ ebenfalls Gase sind (Tabelle I). Als Vorteile dieser Verbindungen werden ausser den guten Isoliereigenschaften erhöhte thermische Stabilität (bis zu $\approx$ 230 °C) und eine Art Selbstreinigung durch Anlagerungsreaktionen etwaiger Zersetzungsprodukte (an die C $\equiv$ N Dreifachbindung) erwähnt. Praktische Anwendungen dieser Gase sind aber bisher nicht bekannt.

Trifluormethylschwefelpentafluorid (CF_3SF_5) ist ein weiteres Gas hohen Molekulargewichts, das in neuerer Zeit als Isoliermedium vorgeschlagen wurde. Die Durchschlagfestigkeit liegt sehr hoch (Tabelle I), das Gas ist chemisch relativ stabil und nicht brennbar. Nachteilig für die Praxis dürfte sich eine gewisse Toxizität auswirken; ausserdem liegt der Kondensationspunkt mit —20,4 °C im Vergleich zu SF_6 relativ hoch, sodass in der einführenden Patentschrift die Verwendung des SF_5CF_3 im Gemisch mit SF_6 vorgeschlagen wird. In ähnlicher Weise sucht man auch bei den Fluorkarbonen mit höherem Siedepunkt (C_4F_{10}, C_4F_8) diesen Nachteil durch Mischen mit leichten flüchtigen Komponenten zu umgehen.

Zuletzt sei noch kurz auf die *Chlorfluorkarbone* verwiesen, eine Gruppe von Gasen, welche im Kältemittelsektor und als Treibgas weite Verbreitung gefunden haben. Auch diese Gase besitzen recht gute dielektrische Eigenschaften und sind weder brennbar noch giftig. Da sie jedoch in der chemischen und thermischen Beständigkeit den Fluorkarbonen und dem SF_6 unterlegen sind und auch entweder bezüglich ihrer Siedepunkte oder bezüglich der dielektrischen Eigenschaften eher ungünstiger liegen, ist ihr Einsatz auf dem elektrischen Sektor beschränkt.

3. Flüssige Isolierstoffe

Auf dem Gebiet der Flüssigkeitsisolation nehmen auch heute noch die Mineralöle den ersten Platz ein. Die Hauptentwicklungstendenzen gehen dahin, teils durch eine ausgeklügelte Raffinationstechnik, teils durch Verwendung von *Inhibitoren,* d. h. oxydationsverzögernde Zusätze, das Alterungsverhalten der Öle immer mehr zu verbessern. Nach mehrjähriger Erfahrung kann heute festgestellt werden, dass solche inhibierte Systeme ihre Bewährungsprobe bestanden haben, und dass die Lebenserwartung des Öles mit derjenigen der Festisolation vergleichbar geworden ist. Als Weiterentwicklung der Inhibierung werden neuerdings in zunehmendem Masse auch *Metallpassivatoren* eingesetzt. Während die Wirkungsweise der Inhibitoren im wesentlichen darauf beruht, die bei Alterungsprozessen ablaufenden Ketten-

Eigenschaften einiger gasförmiger Isolierstoffe

Tabelle I

Bezeichnung	Chemische Formel	Molekular-Gewicht g/mol	Dichte bei Normalbedingungen 0 °C, 1 at g/l	Siedepunkt °C	Kritische Temperatur °C	Relative Durchschlagfestigkeit
Stickstoff	N_2	28,02	1,210	—195,8	—147,2	1
Schwefelhexafluorid	SF_6	146,1	6,39	— 63,8	45,55	2,3
Hexafluoraethan	C_2F_6	138,0	5,98	— 78,2	24,3	2,0
Perfluorpropan	C_3F_8	188,0	7,83[1])	— 36,7	70,5	2,2
Octafluorcyclobutan	C_4F_8	200,0	9,48	— 5,85	115,3	2,9
Perfluorbutan	C_4F_{10}	238,0		— 2,0	113,3	2,8
Difluordichlormethan	CF_2Cl_2	120,9	5,33	— 29,8	111,5	2,4
Trifluorchlormethan	CF_3Cl	104,5	4,51	— 81,5	28,8	1,4
Pentafluorchloraethan	C_2F_5Cl	154,5	6,57[2])	— 38,7	80,0	2,8
Perfluoracetonitril	CF_3CN	95,2		— 63		2,7
Perfluorpropionnitril	C_2F_5CN	145,0		— 35		3,5
Trifluormethyl-Schwefelpentafluorid	CF_3SF_5	196,1	8,48	— 20		3,0

[1]) bei 21,1 °C. [2]) bei 23,9 °C.

reaktionen zu unterbrechen, wird bei den Passivatoren durch Schichtbildung an den Metalloberflächen und Chelatbildung (d. h. durch Bildung «innerer» Komplexe) mit schon gelösten Metall-Ionen die katalytische Wirkung der Metalle unterbunden. Auch eine Kombination von Inhibitoren und Passivatoren ist natürlich möglich.

Für feuer- und explosionssichere Anlagen ist neben den chlorierten aromatischen Kohlenwasserstoffen (welche genügend bekannt sind und auf welche hier nicht näher eingegangen werden soll), in den letzten Jahren eine neue Gruppe von Isolierflüssigkeiten — die *Fluorkarbone* — bekannt geworden. Wie bei den Fluorkarbongasen wird unter diesem Sammelbegriff ebenfalls eine ganze Reihe von Flüssigkeiten verstanden, welche sich von organischen Verbindungen wie Kohlewasserstoffen, Aminen, Äthern usw. durch teilweisen oder vollständigen Ersatz von Wasserstoff durch Fluor ableiten lässt.

Von besonderer Bedeutung für elektrische Anwendungen sind die «perfluorierten» Verbindungen, da sie sich, abgesehen von der hohen Durchschlagfestigkeit und dem niedrigen Verlustfaktor, durch hervorragende chemische und thermische Stabilität und physiologische Unbedenklichkeit auszeichnen (Tabelle II). Fluorkarbonflüssigkeiten besitzen eine niedrige Viskosität, hohe Dichte und hohe Wärmeausdehnungskoeffizienten — Eigenschaften, welche die Kühlungswirkung günstig beeinflussen. Da jedoch die Preise dieser Verbindungen noch relativ hoch sind, und weil auch der Dampf dieser Verbindungen hohe Durchschlagfestigkeit besitzt, werden vor allem grössere Objekte (z. B. Leistungstransformatoren) bevorzugt mit Siedekühlung ausgelegt. Bei dieser sehr wirksamen Kühlmethode wird nur ein Sumpf der relativ flüchtigen Isolierflüssigkeit benötigt. Während des Betriebes tropft das an Kühlflächen kondensierte Kühlmittel auf die Aktivteile, wo es unter Aufnahme der Verdampfungswärme wieder verdampft. Infolge der starken Konvektion ist es bei zweckmässiger Gestaltung der Kühlflächen möglich, ohne erzwungenen Kreislauf auszukommen. Diese Art der Isolation wurde sowohl für reine Fluorkarbone und Fluorkarbonäther als auch für Verbindungen des Typs $C_x F_y SF_z$ empfohlen [$C_4 F_9 SF_5$, $(C_4 F_9)_2 SF_4$, $(C_3 F_7)_2 SF_4$].

Ähnliches wie für Fluorkarbone im engeren Sinn gilt auch für die flüssigen *Chlorfluorkarbone*. Verglichen mit den reinen C–F-Verbindungen sind die Preise dieser Gruppe verhältnismässig niedrig, anderseits ist aber ihre thermische und chemische Stabilität auch etwas geringer (120...150 °C). Immerhin handelt es sich — verglichen mit den schon länger bekannten chlorhaltigen Isolierflüssigkeiten (chlorierte Diphenyle und chlorierte Kohlewasserstoffe) — um recht stabile Verbindungen, die zudem bei der Zersetzung keine Wasserstoffsäuren bilden. Die ganze Gruppe besitzt sehr gute dielektrische Eigenschaften, ist unbrennbar und physiologisch inert.

Unter den flüssigen Chlorfluorkarbonen sind vor allem die beiden Verbindungen Trichlorfluoräthan (CCl_2FCClF_2), Siedepunkt 47,6 °C, und Dichlortetrafluoräthan ($CClF_2CClF_2$), Siedepunkt 3,8 °C, zu erwähnen.

Eine weitere Gruppe von interessanten Isolierflüssigkeiten sind die *Silikonöle,* welche sich durch ihren chemischen Aufbau (Ketten aus –Si–O–Si–Atomen mit Seitenketten aus Methyl- oder Phenylgruppen) grundlegend von den organischen –C–C–Verbindungen unterscheiden. Die Silikonflüssigkeiten sind durch eine sehr flache Viskositäts-Temperaturkurve und ein vorzügliches Alterungsverhalten bei höheren Temperaturen gekennzeichnet. Bei Anwesenheit von Luft machen sich leichte Oxydationserscheinungen erst bei Temperaturen über 150 °C bemerkbar; bei Sauerstofffreiheit sind Temperaturen bis 200 °C und darüber zulässig. Die Dielektrizitätskonstante ist über einen sehr weiten Frequenzbereich konstant, ebenso der niedrige Verlustfaktor. Mit steigender Temperatur verschlechtern sich die elektrischen Eigenschaften etwas (Ansteigen des Verlustfaktors, Absinken des Widerstandes), doch bleiben selbst bei höheren Temperaturen die Werte innerhalb eines brauchbaren Rahmens.

Die in einem grossen Viskositätsbereich erhältlichen Silikonflüssigkeiten sind heute verhältnismässig teuer, so dass als Anwendungen bis anhin nur kleinere Transformatoren, Kondensatoren und vor allem elektronische Geräte in Frage kamen.

Als Weiterentwicklung der Silikone sind auch die *Fluorsilikone* zu nennen, welche sich in ihrer chemischen Konstitution von den normalen Silikonen durch Ersatz der Methyl- und Phenylgruppen durch Fluoralkylgruppen unterscheiden. Im Gegensatz zu den als nur selbstlöschend zu bezeichnenden normalen Silikonen sind die Fluorsilikone wegen des Fehlens von Wasserstoff gänzlich unbrennbar. Auch diese Flüssigkeiten besitzen eine hohe Durchschlagfestigkeit. Begrenzend für gewisse Anwendungen, aber von Vorteil für andere, ist die hohe Dielektrizitätskonstante von 6,9...7,3. Hinsichtlich des Preises gilt das für die normalen Silikone

Eigenschaften einiger Isolierflüssigkeiten

Tabelle II

	Einheit	C_8F_{18}	$C_8F_{16}O$	$(C_4F_9)_3N$	Silikonöle		Butylstearat	Butylsebazat
Viskosität bei 25 °C	cSt	0,8	0,8	2,8	100	500	7	6
Flammpunkt	°C	nicht brennbar	nicht brennbar	nicht brennbar	> 30	> 325	168	175
Stockpunkt	°C	—85	—102	—36	—55	—50	—21,7	—10,0
Spezifisches Gewicht bei 25 °C		1,75	1,77	1,88	0,970	0,973		
Kubischer Wärmeausdehnungskoeffizient	1/°C		0,0016	0,0012	0,00097	0,00097		
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C	W/m °C		0,14	0,08	0,15	0,16		
Spezifische Wärme bei 20 °C	J/g °C		1,04	1,13	1,38	1,5		≈ 2,1
Siedepunkt bei 760 torr	°C	102	102,2	177,8				
Durchschlagfestigkeit	kV/cm		> 35	> 35	35	35		
Relative Dielektrizitätskonstant bei 60 Hz			1,86	1,90	2,75	2,75	3,3	4,4
Spezifischer Durchgangswiderstand	Ωcm		$6 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{12}$	
Verlustfaktor, tg δ bei 60 Hz			< 0,0005	< 0,0005			0,01	0,01
bei 10^3 Hz					< 0,0001	< 0,0001		

Gesagte natürlich in viel stärkerem Masse für die Fluorsilikone. Der Einsatz scheint daher heute noch vorwiegend auf militärische Projekte und Anwendungen der Raumfahrt beschränkt zu sein.

Organische Ester, wie z. B. Dibutylsebazat und Dioctyladipat, sind weitere Verbindungen, welche heute für gewisse spezielle Zwecke als Isolationsmedien eingesetzt werden. Wegen ihrer hohen Dielektrizitätskonstanten, ihrer sehr kleinen dielektrischen Verluste und ihrer geringen Abnahme der Durchschlagfestigkeit bei hohen Temperaturen sind sie besonders für den Einsatz in Hochfrequenz-Leistungskondensatoren prädestiniert. Sehr vorteilhaft wirkt sich dabei auch die hohe Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit aus. Ein gewisser Nachteil dieser Verbindungen besteht allerdings in der im Vergleich mit anderen Isolierflüssigkeiten grösseren Hydrolyse- und Oxydationsempfindlichkeit.

In zunehmendem Masse finden auch flüssige *Kohlenwasserstoff-Polymere,* wie Polybutylene und Polypropylene, welche in verschiedenen Viskositätsabstufungen erhältlich sind, Anwendung. Es handelt sich um farblose, geruchlose, licht- und weitgehend sauerstoff-unempfindliche Verbindungen mit ausgezeichneten elektrischen Eigenschaften.

4. Feste Isolierstoffe

Das Gebiet der festen Isolierstoffe ist auf das engste verknüpft mit dem Gebiet der synthetischen Werkstoffe, welche heute mehr und mehr die althergebrachten Isoliermaterialien auf der Basis von Naturstoffen verdrängen. Nach einer geradezu explosiven Entwicklung in den letzten 20 Jahren scheint sich heute eine Phase des Ausbauens anzubahnen, welche hauptsächlich durch zwei Tendenzen gekennzeichnet ist:

a) Variation der Eigenschaften bereits bestehender Typen;
b) Gezielte Synthese neuer Polymere mit ganz bestimmten, durch die Anforderungen der Technik diktierten Eigenschaften.

4.1 Variation der Eigenschaften bekannter Kunststoffe

Seit dem Bekanntwerden des Nylons, kurz vor dem 2. Weltkrieg, gehören die *Polyamide* wohl zu den populärsten Kunststoffen überhaupt. Seither sind durch das Heranzüchten bestimmter Eigenschaften (z. B. Herabsetzen der Wasseraufnahme durch Einbau längerer Kohlenwasserstoffketten, Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Verwendung bestimmter Füllstoffe, Entwicklung UV-stabilisierter Qualitäten, Flexibilisierung durch Copolymerisation) eine ganze Reihe verschiedener Typen entwickelt worden. Vor allem aber haben in letzter Zeit zwei wichtige Neuerscheinungen die Aufmerksamkeit auf sich gezogen: das sog. *Giessnylon* und die aromatische Polyamid-Faser «*Nomex*».

Während bei den herkömmlichen Polyamid-Typen als einzig anwendbare spanlose Formgebungsprozesse das Extrudieren und Spritzgiessen zur Verfügung standen, kann bei dem neuen Polyamid-Typ die Polymerisation wie bei einem Giessharz in der endgültigen Form durchgeführt werden. Die Eigenschaften entsprechen im wesentlichen denjenigen des Nylon-6, doch liegen die meisten Eigenschaften (Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Abriebfestigkeit, Kriechfestigkeit, Formbeständigkeit, Wasseraufnahme, Biegewechselfestigkeit, Verhalten gegen Witterung und Hydrolyse) etwas günstiger (Tabelle III). Dagegen sind die Werte für Schlag- und Kerbschlagzähigkeit etwas niedriger als beim konventionellen Nylon-6. Hauptvorteile des Verfahrens sind die Möglichkeit der Herstellung grosser Formkörper, welche im Spritzguss nicht mehr wirtschaftlich hergestellt werden können, die bei grösseren Serien niedrigeren Formgebungskosten und vor allem die damit erzielte Spannungsfreiheit.

Physikalische Eigenschaften von Polyamid-6, hergestellt durch «Blockpolymerisation» von Caprolactam [6] [1])

Tabelle III

Eigenschaft	gemessen nach ...	Einheit	Messwert
Dichte	Din 53479	g/cm³	1,150...1,165
Zugfestigkeit	Din 53455	kg/cm²	rd. 900
Bruchdehnung	Din 53455	%	rd. 25
Elastizitätsmodul aus Zugversuch	Din 53455	kg/cm²	rd. 35000
Grenzbiegespannung	Din 53452	kg/cm²	1400
Kugeldruckhärte nach 10 s	Din 53456	kg/cm²	1650
Shore-Härte	Skala D		82...84
Schlagzähigkeit	Din 53453	cm kg/cm²	nicht gebrochen
Kerbschlagzähigkeit	Din 53453	cm kg/cm²	3,2
Schmelzpunkt		°C	221
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient (bei 20...50 °C)	VDE 0304, Teil 1	10^{-6}/°C	70...80
Wärmeleitfähigkeit	VDE 0304, Teil 1	W/m °C	0,32
Entflammbarkeit	ASTM D 635		selbstlöschend
Spezifischer Übergangswiderstand	VDE 0303, Teil 3	Ωcm	$5 \cdot 10^{15}$
Durchschlagfestigkeit (kurzfristig; Prüfkörper 0,2 mm)	VDE 0303, Teil 2	kV/mm	20...24
Dielektrizitätskonstante bei 1000 Hz	VDE 0303, Teil 4	—	4,1
Verlustfaktor, tg δ, bei 1000 Hz	VDE 0303, Teil 4	—	0,02
Kriechstromfestigkeit	VDE 0303, Teil 1	—	T4...T5
Wasseraufnahme bei 20 °C und 65 % r.F.	—	%	rd. 2,2
bei 20 °C und 100 % r.F.	—	%	rd. 6,5
Schwund	—	%	≈ 15

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Das Verfahren lässt sich auf Schleuderguss ausdehnen, sodass auch die Möglichkeit der Herstellung von Rohren und Hohlkörpern besteht.

Von grösster Wichtigkeit für die Elektroindustrie war die Entwicklung der *Nomex-Faser.* Dieses Material steht heute schon in einer Vielzahl von Erscheinungsformen, als Stapelfaser, Vlies, kalandriertes und nicht kalandriertes Papier (Tabelle IV), in kartonartiger Form, als Schnur, Gewebe, selbstklebendes Band und als Verbundfolie mit Polyester, Polyamid und Glas zur Verfügung.

Obwohl ebenfalls auf der Basis von Polyamid, unterscheidet sich die Nomex-Faser von den herkömmlichen Nylon-Fasern vor allem durch die verbesserte Temperaturbeständigkeit. So behält Nomex bei der Schmelztemperatur des 6.6.-Nylons (250 °C) im Dauerversuch (500 h) noch ca. 60 % seiner Festigkeit. Es schmilzt nicht, zersetzt sich erst bei Temperaturen über 530 °C und ist selbstlöschend; seine Dauerwärmebeständigkeit liegt bei 220...230 °C.

Eigenschaften von «Nomex»-Papier (0,25 mm dick) [7]

Tabelle IV

	ASTM-Methode	Einheit	Messwert LM [1])	Messwert QM [2])
Zugfestigkeit	D 828	kg/cm	25	12
Dehnung	D 828	%	11	10
Einreissfestigkeit (Elmendorf)	D 689	g	530	930
Kantenreissfestigkeit (Finch)	D 827—47	kg/cm	23	6
Schrumpfung bei 140 °C	—	%	0,3	0,4
Wärmeleitfähigkeitskoeffizient	C 177—45	W/m °C	0,30	
Papiergewicht	D 828	g/cm²	248	
Durchschlagsfestigkeit	D 149	kV/mm	32	
Dielektrizitätskonstante bei 10^3 Hz	D 149	—	2,9	
Verlustfaktor, tg δ, bei 10^3 Hz	D 150	—	0,014	

[1]) LM = Zugrichtung längs zur Maschine.
[2]) QM = Zugrichtung quer zur Maschine.

Hervorragend ist die Maßstabilität in der Wärme und im Klimaversuch. Im kochenden Wasser beträgt die anfängliche Schrumpfung nur etwa 1,5 %, in trockener Luft bei 260 °C weniger als 1 %. Nomex zeichnet sich ebenfalls durch seine gute Beständigkeit gegenüber Oxydationsmitteln, Säuren, Basen und Lösungsmitteln sowie durch gute Strahlenbeständigkeit aus. Die Hydrolysebeständigkeit bei erhöhter Temperatur ist gegenüber Nylon erheblich verbessert.

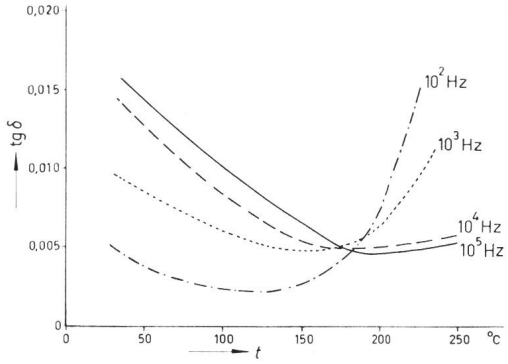


Fig. 2
Dielektrischer Verlustfaktor tg δ von Nomex-Papier in Funktion der Temperatur t

Interessant sind vor allem die elektrischen Eigenschaften. Während die Durchschlagfestigkeit von Nomexpapier bis 200 °C konstant bleibt, sinkt der Verlustfaktor, tg δ, sogar mit steigender Temperatur bis etwa 180 °C auf ein Minimum ab (Fig. 2). Der Übergangswiderstand verschlechtert sich etwas mit steigender Temperatur, erreicht bei 250 °C aber immerhin noch 10^{11} Ω/cm (Fig. 3). Von der Feuchtigkeit werden die elektrischen Eigenschaften des Materials, wie Tabelle V zeigt, wenig beeinflusst. Die Glimmfestigkeit ist für ein organisches Material recht gut. Die sich aus diesen Eigenschaften ergebenden Anwendungsmöglichkeiten

Elektrische Eigenschaften von Nomex-Papier (0,25 mm) in Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit [7]

Tabelle V

Relative Luftfeuchtigkeit %	Feuchtigkeitsgehalt %	Durchschlagfestigkeit kV/mm	Spezifische Übergangswiderstand Ω cm
Ofentrocken	0	35	$2{,}0 \cdot 10^{16}$
50	4,1	31	$1{,}2 \cdot 10^{16}$
95	10,7	34	$1{,}4 \cdot 10^{14}$

als Wicklungs- und Nutisolation werden durch die gute Verträglichkeit mit den meisten Lacken und Harzen (Silikon, Phenol, Epoxy und Polyester) noch ausgeweitet.

Zwei andere, schon seit längerer Zeit bekannte Kunststoffe, *Polyäthylen* und *Polypropylen*, sind ein weiteres Beispiel für die Tendenz, neue Modifikationen für spezielle Anforderungen gewissermassen auf Mass zu entwickeln.

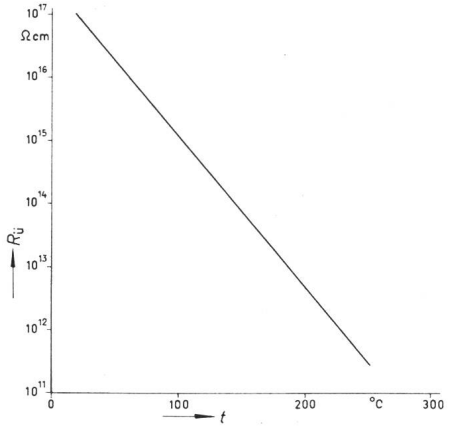


Fig. 3
Übergangswiderstand $R_{ü}$ von Nomex-Papier (0,25 mm) in Funktion der Temperatur t

Dabei sind es gleichermassen die vorzügliche chemische Beständigkeit wie die ungewöhnlich vorteilhaften elektrischen Eigenschaften, besonders im Hochfrequenzgebiet, welche die Polyolefine für diese Variationen empfehlen.

Die Modifizierung kann sich entweder auf die Verknüpfung der Polymerketten, auf die Einführung anderer Substituenten oder auf die Entwicklung von Copolymeren erstrecken.

So gelingt es z. B., durch Behandlung von Polyäthylen mit energiereicher Strahlung eine räumliche Vernetzung der Fadenmoleküle zu erreichen. Das *bestrahlte Polyäthylen* zeichnet sich durch bessere Abriebfestigkeit, erhöhte Schmelztemperatur und damit erhöhte Dauergebrauchstemperatur aus.

Querverkettungen lassen sich aber auch in verschiedener Art mit rein chemischen Mitteln herbeiführen. Eine dieser Methoden bildet die Grundlage für eine neue Gruppe von Kunststoffen, die sog. *Ionomere* (Tabelle VI). Bei dieser

Eigenschaften von «Ionomeren» im Vergleich mit Polyäthylen

Tabelle VI

	Dichte	Elastizitätsmodul kg/cm²	Zugfestigkeit kg/cm²	Bruchdehnung %
Ionomere	0,93...0,97	1400...4200	210...350	200...500
Hochdruck-Polyäthylen	0,92	1000...2000	70...175	100...650
Niederdruck-Polyäthylen	0,95	3500...12000	210...385	15...100

Methode wird die Quervernetzung durch Ionenbindung zwischen den in gewissen Abständen in die Polymerkette einpolymerisierten Carboxylgruppen und mehrwertigen Metallkationen erzeugt. Durch diese «ionische» Vernetzung ergeben sich folgende Vorteile:

a) Das Material wird mechanisch fester und zäher als ein unvernetztes Polymerisat ähnlicher Molekularstruktur;
b) Da die Vernetzung thermoreversibel ist, bleibt das Material trotzdem ein Thermoplast;
c) Die Verringerung der kristallinen Bereiche ergibt eine ausgezeichnete Transparenz.

Durch Variation der Art der Metallkationen und des Gehaltes an Carboxylgruppen können die Eigenschaften weitgehend variiert werden.

Ein heute erhältliches Ionomer hat eine Dichte von 0,93...0,94, der Erweichungspunkt nach Vicat liegt bei 70 °C, der Versprödungspunkt unterhalb von —105 °C. Seine Steifigkeit entspricht ungefähr derjenigen von Polyäthylen, doch besitzt es eine gummiartige Rückprallelastizität.

Für die Elektrotechnik bestehen die Vorteile dieses Ionomers in der hohen Glimmbeständigkeit und der geringen Neigung zur Spannungsrissbildung. Anderseits jedoch sind die Ionomere wegen ihrer teilweise polaren Natur dem Polyäthylen in den elektrischen Eigenschaften unterlegen. Der Verlustfaktor, tg δ, beträgt 0,0015, die Dielektrizitätskonstante 2,5 bei 1 kHz.

Bei einer anderen chemischen Quervernetzungsmethode geht man von einem verzweigten Polyäthylen niederer Dichte aus, dessen freie Äthylenradikale unter der Einwirkung eines Peroxyd-Katalysators miteinander verknüpft werden. Das «vulkanisierte» Material entspricht in seinen Eigenschaften weitgehend einem Elastomer und wird hauptsächlich als Kabelisolation verwendet.

An diesem Beispiel wird ersichtlich, wie sich die Grenzen zwischen Thermoplasten und Elastomeren immer mehr verwischen. In der amerikanischen Literatur wird diese Tatsache vielfach schon durch einen neuen Begriff, dem der sog. «elastoplastics» Rechnung getragen.

Auch die *Äthylen-Propylen Copolymere* (EPM) können in diesen Zwischenbereich der «elastoplastics» eingeteilt werden. Diese vollständig amorphen Elastomere werden ebenfalls meist unter der Einwirkung von Peroxyd-Katalysatoren vulkanisiert. Bei relativ günstigen Preisen haben sie sich in der kurzen Zeit ihrer Marktverfügbarkeit schon recht gut als Kabelisolation eingeführt. Die Hauptvorteile sind: ausgezeichnete Ozon- und Wetterfestigkeit, gute Wärmebeständigkeit (120...130 °C), günstige Tieftemperatureigenschaften, hohe Rückprallelastizität und ausgezeichnete elektrische Charakteristiken. Die Ölbeständigkeit ist allerdings schlecht.

Neuere Entwicklungen mit *Äthylen-Propylen Dien-Terpolymeren* (EPDM) tendieren hauptsächlich dahin, die Verarbeitbarkeit zu erleichtern und die konventionelle, besser zu beherrschende Vulkanisierung mit Schwefel zu ermöglichen.

Als Weiterentwicklung von Polyäthylen in weiterem Sinn kann auch das schon seit einigen Jahren bekannte *chlorsulfonierte Polyäthylen* betrachtet werden. Bei geeigneter Zusammensetzung sind die elektrischen Eigenschaften dieses Produktes sehr gut, ebenso die Temperaturbeständigkeit. Hervorstechend ist aber besonders die vorzügliche Ozonbeständigkeit auch bei hohen Konzentrationen, sowie die gute Öl- und Fettbeständigkeit. Dagegen ist das Verhalten gegenüber chlorierten Kohlewasserstoffen und aromatischen Lösungmitteln eher schwach. Bei normalen Temperaturen ist die Rückprallelastizität eher schlechter als beim Naturkautschuk und bei anderen künstlichen Elastomeren; bei höheren Temperaturen verschwinden die Unterschiede aber, oder das Verhältnis verschiebt sich zugunsten des chlorsulfonierten Polyäthylens.

Vergleichbar mit diesem Elastomer bezüglich Wärme-, Öl- und Ozonbeständigkeit sind auch die erst kürzlich bekannt gewordenen *chlorierten Polyäthylene*. Je nach Chlorierungsgrad, Stellung der Chlor-Substituenten, Molekulargewicht und Kristallisationsgrad können sehr unterschiedliche Produkte — vom kautschukelastischen bis zum starren Polymer — synthetisiert werden. Als weitere Vorteile sind gute Flammwidrigkeit und gutes Tieftemperaturverhalten zu nennen. Auch diese Kunststoffe werden hauptsächlich für Kabelisolationen empfohlen.

Als eine der jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet der Polyolefine sei zuletzt noch das *4-Methylpenten* erwähnt, das von allen Thermoplasten das niedrigste spezifische Gewicht besitzt (Tabelle VII). Das unter der Bezeichnung TPX vorläufig nur in halbtechnischem Maßstab hergestellte Produkt zeichnet sich durch hohe Lichtdurchlässigkeit, gute elektrische Eigenschaften und gute Temperaturbeständigkeit aus. So ist die Steifigkeit noch bei 100 °C gleich jener von Hochdruckpolyäthylen bei Raumtemperatur, doch neigt das neue Material stärker zur Versprödung als die konventionellen Polyolefine. Der Zugmodul entspricht ungefähr dem des Polypropylens, die Schlagzähigkeit derjenigen des Polystyrols. Auch die chemischen Eigenschaften sind denjenigen der anderen Polyolefine vergleichbar. Wegen seiner UV-Empfindlichkeit ist das nicht stabilisierte Material für Aussenanwendungen ungeeignet.

Eigenschaften von (Poly-)4-Methylpenten-1 [11]

Tabelle VII

Spezifisches Gewicht	g/cm³	0,83
Transparenz	%	90
Zugfestigkeit	kg/cm²	280
Bruchdehnung bei 20 °C	%	15
Zugmodul	kg/cm²	11 200
Härte (Rockwell L)		67...74
Erreichungspunkt nach Vicat	°C	179
Wärmeleitfähigkeit	W/m °C	0,17
Linearer Ausdehnungskoeffizient	10^{-5}/°C	11,5
Wasseraufnahme	%	0,01
Dielektrizitätskonstante bei 25 °C		2,12
Verlustfaktor bei 25 °C und 10^3 Hz		0,00015
Spezifischer Widerstand	Ω cm	$> 10^{16}$
Durchschlagfestigkeit einer 1,27-mm-Folie	V/mm	27 500
Lichtbogenfestigkeit		keine Verkohlung

Durch seinen Hauptvertreter, das Polytetrafluoräthylen, gehören die *Fluorkarbon-Polymere* (Tabelle VIII) heute schon zu den allgemein bekannten Kunststoffen. Sie bieten ein weiteres illustratives Beispiel dafür, wie gerade ein «gutes» Material immer wieder abgewandelt wird, um den einen oder anderen schwachen Punkt auszugleichen oder für gewisse Anwendungen hochzuzüchten. Dabei ist *Polytetrafluoräthylen* (PTEE oder TFE) ein ganz aussergewöhnlicher Kunststoff: eine Dauertemperaturbeständigkeit bis zu 250 °C, Flexibilität und Zähigkeit bis zu tiefsten Temperaturen, niedrigster Reibungskoeffizient unter allen Feststoffen, absolute Wetter-, UV- und Chemikalienbeständigkeit und vorzügliches elektrisches Verhalten sind Eigenschaften, die teils auf die besondere chemische Natur, teils auf die grosse Länge des Polymermoleküls, teils auf die hauptsächlich kristalline Struktur zurückzuführen sind. Aber diese gleichen strukturellen Charakteristiken machen auch die Nachteile des Materials aus: die Länge der Polymermoleküle verhindert den plastischen Fluss beim Schmelzen, sodass komplizierte Sintermethoden zur Verarbeitung herangezogen werden müssen; die hohe Kristallinität macht das Material steif,

Eigenschaften einiger Fluorpolymere

Tabelle VIII

Eigenschaften	Einheit	Polytetra-fluoräthylen	Polychlortri-fluoräthylen	Polyvinyliden-fluorid	Polyfluor-äthylenpropylen
Spezifisches Gewicht	g/cm^3	2,13...2,20	2,1	1,76	2,14...2,17
Zugfestigkeit	kg/cm^2	134	280...420	—	—
Reissfestigkeit	kg/cm^2	197	360	490	230
Dehnung an der Str ckgrenze	%	15...55	8	—	—
Bruchdehnung	%	350	160	300	320
Biege-E-Modul	kg/cm^2	2800...10500	15500...19700	14000	6700
Druck-E-Modul	kg/cm^2	4900...6300	12700	14000	4700
Rockwell-Härte		21			25
Linearer Wärmeausdehnungs-Koeffizient	$10^{-5}/^0C$	10	4,5	4,7	8,3...10,5
Reibungskoeffizient		0,02...0,1	0,08	—	0,1
Wasseraufnahme	%	< 0,01	0	0,04	< 0,01
Durchgangswiderstand	Ωcm	$> 10^{18}$	$1,2 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{14}$	$> 2 \cdot 10^{18}$
Dielektrizitätskonstante bei 60 Hz		2,0	2,3...2,8	8,4	2,1
bei 10^6 Hz		2,0	2,3...2,8	6,4	2,1
Verlustfaktor, tg δ bei 60 Hz		< 0,0002	0,0012	0,0497	0,0003
bei 10^6 Hz		< 0,0002	0,0036	0,159	0,0007

die vollkommene Fluor-Abschirmung verhindert jegliche Klebeverbindung.

Durch besondere Verarbeitungsmethoden ist es aber heute weitgehend gelungen, diese Nachteile zu umgehen. So wurden z. B. Ätzmittel auf der Basis von Alkalimetalldispersionen entwickelt, mit welchen es gelingt, die Oberflächen des PTFE zu «entfluorisieren» und damit der Verklebung zugänglich zu machen. Ein flexibleres, weicheres und abriebfesteres Material kann durch Abschrecken der Schmelze und damit Vergrösserung des amorphen Anteils erhalten werden. Zu erwähnen ist auch die Tatsache, dass dieses Material heute mit einer Reihe von Füllstoffen (Molybdändisulfid, Graphit, Kupfer, Aluminiumoxyd, Glasfasern) im Handel erhältlich ist und damit einem weiten Bereich von Anforderungen mechanischer und elektrischer Art gerecht werden kann. Trotz des immer noch verhältnismässig hohen Preises ist daher dieses Material in der Elektrotechnik gut eingeführt, wo es hauptsächlich als Schlauch- und Folienmaterial für thermisch hoch beanspruchte Isolationen herangezogen wird.

Eine weitere, mit Erfolg eingesetzte Massnahme, um die bei PTFE existierenden Verarbeitungsschwierigkeiten zu überwinden, war die Entwicklung eines chemisch ähnlich gebauten Copolymerisates aus *Tetrafluoräthylen* und *Hexafluorpropylen* (FEP). Das FEP ist ein echter Thermoplast mit einer Schmelzviskosität, welche die Verarbeitung in Schneckenpressen und Spritzgussmaschinen erlaubt. Die Dauertemperaturbeständigkeit beträgt 200 °C.

Zu den Fluorkarbonen im weitern Sinn wird im allgemeinen auch das *Polychlortrifluoräthylen* (PCTFE) gezählt. PCTFE besitzt eine ähnliche Molekularstruktur wie PTFE mit dem Unterschied, dass an jedem zweiten C-Atom ein Fluor-Atom durch Chlor ersetzt ist. Da die Bindungsenergien zwischen C und Cl weniger gross sind als zwischen C und F, resultiert, verglichen mit PTFE, eine etwas geringere thermische und chemische Stabilität. Auch ergeben sich aus den durch das Vorhandensein von Cl entstehenden Dipolen eine höhere Dielektrizitätskonstante und ein höherer Verlustfaktor.

Polyvinylidenfluorid (PVF) ist ein weiterer perfluorierter Thermoplast mit ausgezeichneten chemischen und thermischen Eigenschaften. Auch dieses Fluorkohlenstoff-Polymerisat lässt sich mit den üblichen Verarbeitungsmethoden für Thermoplaste verarbeiten, doch ist der Temperatureinsatzbereich etwas enger als der von PTEE (—60...+150 °C).

Bei niedrigeren Temperaturen sind die chemischen Eigenschaften von PVF und PCTFE etwas besser als die von PTFE, doch sinkt z. B. die Zugfestigkeit von PVF und PCTFE mit steigender Temperatur rascher (Fig. 4). Polyvinylidenfluorid wird vor allem als Folie, Band und Schlauch eingesetzt und soll sich durch ausgezeichnete Abriebfestigkeit auszeichnen.

Ebenso wie die Polyolefine sind auch Fluorkarbonpolymere in den Zwischenbereich zwischen Thermoplasten und Elastomeren eingedrungen. Es sind heute folgende Typen von Elastomer-ähnlichen fluorhaltigen Polymerisaten bekannt:

Copolymere von Vinylidenfluorid und Perfluorpropylen;
Copolymere von Chlortrifluoräthylen und Vinylidenfluorid;
Fluorsilikon-Kautschuk;
Perfluorbutylacrylkautschuk;
Fluorierte Polyester-Elastomere.

Alle diese Elastomere zeichnen sich durch hohe Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit aus. Während aber die vier zuletzt erwähnten Elastomere bisher noch wenig bekannt und mehr oder weniger nur in Ausnahmefällen eingesetzt wurden, hat sich das *Copolymerisat aus Vinyliden-*

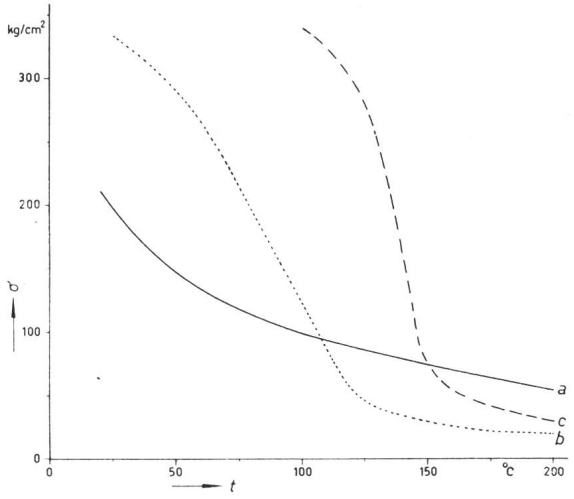


Fig. 4
Zugfestigkeit σ von Fluorkarbon-Thermoplasten in Funktion der Temperatur *t*
a Polytetrafluoraethylen; *b* Polychlortrifluoraethylen; *c* Polyvinylidenfluorid

fluorid und Perfluorpropylen schon einen verhältnismässig breiten Einsatzbereich erobert. Dieser Erfolg ist auf eine Kombination ganz ausgezeichneter Eigenschaften zurückzuführen: gute Öl- und Chemikalienbeständigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit (bis 250 °C), gute Ozon- und Wetterbeständigkeit und verhältnismässig günstiges Tieftemperaturverhalten (bis —25 °C) bei annehmbaren mechanischen Eigenschaften. Der grösste Nachteil dieses Materials liegt in der schwierigen Verarbeitung und dem relativ sehr hohen Preis, sodass sein Einsatz mehr auf Spezialanwendungen beschränkt bleibt. Im Isolationssektor empfiehlt sich das Fluorelastomer wegen seiner mässigen dielektrischen Eigenschaften hauptsächlich nur für Anwendungen in der Niederspannungs- und Niederfrequenztechnik.

Eine weitere variationsreiche Klasse von Polymeren, die allem Anschein nach noch zu weiteren Entwicklungen fähig ist, stellen die *Silikonharze* dar. Im gesamten betrachtet besitzen diese Produkte eine recht gute Kombination von chemischen und elektrischen Eigenschaften, doch lassen oft die mechanischen Eigenschaften zu wünschen übrig. Silikon-Polymerisate widerstehen Dauertemperaturen von 180 °C und je nach Typ, kurzzeitigen Beanspruchungen bis zu 300 °C. Die elektrischen Eigenschaften ändern sich kaum bei höheren Temperaturen. Weitere günstige Merkmale sind gute Witterungs- und Alterungsbeständigkeit und hohe Bakterienresistenz.

Diese ungewöhnliche Kombination von Eigenschaften verdanken die Silikon-Polymere ihrem besonderen chemischen Aufbau, der durch Ketten oder Netzwerke sich abwechselnder Sauerstoff- und mit organischen Resten abgesättigter Siliziumatome charakterisiert ist und der sie in einen Zwischenbereich zwischen organische und anorganische Materie stellt.

Seit ihrem Aufkommen in den Jahren nach dem zweiten Weltkrieg haben sich die Silikonpolymere in vielfältiger Form in der Isolationstechnik eingeführt: als Klebstoffe, Tränk- und Drahtlacke, Pressmassen, Binder für Schichtpreßstoffe, Giessmassen und Überzugslacke.

Als neuere Entwicklung auf dem Gebiet der Silikonpolymere sind schneller zu verarbeitende Pressmassen (1...3 min) und vor allem verschiedene *warm- oder kalthärtende Verguss- und Einbettmassen* zu nennen, die hauptsächlich zum Vergiessen elektronischer Geräte entwickelt wurden. Es können zwei Hauptgruppen unterschieden werden:

In einem Fall handelt es sich um Vergussmassen, die zu kautschukähnlichen Vulkanisaten erstarren und somit eine mehr oder weniger grosse mechanische Widerstandsfähigkeit besitzen. Messungen und Reparaturen an derart eingegossenen Geräten lassen sich in der Art und Weise durchführen, dass aus der umgebenden Silikonmasse ein «Fenster» herausgeschnitten wird, das nach Beendigung der Arbeit wieder zugegossen werden kann. Diese Einbettmassen haben im allgemeinen einen Gebrauchstemperaturbereich von —55 bis +200 °C, einzelne (kurzzeitig) bis 250 °C; sie besitzen gute dielektrische Eigenschaften und eine ausgezeichnete Bewitterungsbeständigkeit. Bei einzelnen Silikonpolymeren ist eine gewisse Vorsicht beim Einsetzen unter vollkommenem Luftabschluss geboten, da unter diesen Bedingungen eine Erweichung durch teilweise Depolymerisation schon bei relativ tiefen Temperaturen eintreten kann.

Andere Einbettmassen, ebenfalls auf Silikonbasis, erstarren lediglich zu einer mehr gallertartigen Konsistenz und müssen daher in Behältern vergossen werden. Auch diese Einbettmassen zeichnen sich durch ausgezeichnete Temperatur- und Feuchtigkeitsbeständigkeit aus und besitzen ähnliche dielektrische Eigenschaften wie Silikonöle. Ein grosser Vorteil gegenüber der Verwendung von Flüssigkeiten liegt im Wegfallen der Dichtigkeitsprobleme, während anderseits die bei festen Giessmassen auftretenden Probleme des Spannungsaufbaues als Folge von Temperaturschwankungen nicht berücksichtigt zu werden brauchen. Ein weiterer Vorteil dieser Gelees besteht darin, dass sie sich bei gewollten oder ungewollten Beschädigungen spontan wieder verschliessen und somit jederzeit eine vollwertige Isolation gewährleisten.

Von allen Kunststoffen haben in der Elektrotechnik, insbesondere auf dem Isolationssektor, die *Epoxydharze* wohl die grösste Bedeutung gewonnen. Dieser Erfolg kann auf eine einmalige Kombination günstiger Eigenschaften zurückgeführt werden, die nachfolgend kurz in Erinnerung gerufen seien: geringe dielektrische Verluste bei hoher Durchschlagfestigkeit und hohem spezifischen Widerstand, gute mechanische Festigkeit selbst bei erhöhten Temperaturen, geringe Feuchtigkeitsempfindlichkeit und gute Chemikalienbeständigkeit, gute Haftfestigkeit auf Metallen und vielen anderen Werkstoffen, Härtung durch Polyaddition (d. h. ohne Abspaltung flüchtiger Bestandteile), einfache und trotzdem variationsreiche, den Anwendungszwecken anpassbare Verarbeitbarkeit, geringer Schwund. Wenn man sich vergegenwärtigt, dass heute mehr als 75 verschiedene Basisharze auf dem Markt angeboten werden, die mit einer nahezu ebenso grossen Anzahl von Härtern kombiniert werden können, so lässt sich abschätzen, dass das Prädikat des Variationsreichtums auch auf die erzielbaren Eigenschaften und die Einsatzmöglichkeiten der Produkte angewendet werden kann. Als natürliche Folge davon ist auch heute noch die technische Entwicklung der Epoxydharze in vollem Fluss. Das Ziel der Forschungsarbeiten liegt einmal darin, die bekannten Produkte weiter auszubauen, zum anderen aber neuartige Epoxyde mit noch besseren Eigenschaften zu entwickeln.

Eine der interessantesten Entwicklungen der letzten Jahre auf diesem Gebiet sind die *cycloaliphatischen Epoxydharze*, bei welchen die charakteristische Epoxydgruppe an gesättigten Ringen sitzt. Auf Grund einer etwas kompakteren Molekülstruktur, in welcher die Epoxydgruppen näher beieinander stehen als bei den Epoxyden auf Bisphenol-Epichlorhydrinbasis, ergibt sich bei der Polyaddition ein sehr engmaschiges Netzwerk. Daraus resultiert eine gegenüber den konventionellen Epoxyden verbesserte Temperaturbeständigkeit der mechanischen und elektrischen Eigenschaften, anderseits aber eine etwas geringere Zähigkeit (höhere Sprödigkeit). Die elektrischen Eigenschaften sind im allgemeinen vorzüglich: niedriger Verlustfaktor und niedrige Dielektrizitätskonstante, die über einen weiten Temperaturbereich unverändert bleiben, hoher Widerstand und auf Grund der nicht-phenolischen Struktur, eine gegenüber den konventionellen Epoxyden erheblich verbesserte Kriechstromfestigkeit. Überraschenderweise ist auch die Lichtbogenfestigkeit sehr hoch und reicht an diejenige von Acrylglas heran.

Von besonderer Bedeutung für die Elektrotechnik könnte sich das verbesserte Bewitterungsverhalten unter Spannung erweisen. Während phenolische Epoxydharze als Isolationsmaterial für Freiluftanwendungen bisher versagten, scheinen die cycloaliphatischen Harze der Erosion der Oberfläche und der Ausbildung von Kriechwegen bei atmosphärischer Einwirkung unter gleichzeitiger elektrischer Spannungsbelastung eine grössere Widerstandsfähigkeit entgegenzusetzen.

Auch bezüglich der Verarbeitbarkeit besitzen die cycloaliphatischen Harze verschiedene Vorteile: so ist die Viskosität im allgemeinen niedriger, die Gebrauchsdauer (pot life) länger, der Schwund geringer.

Ebenso wie die gebräuchlichen phenolischen Epoxydharze sind die cycloaliphatischen Harze in mannigfaltiger Form einsatzfähig: als Giessharze, Imprägnierharze, für Schichtpreßstoffe, glasfaserverstärkte Kunststoffe und als Klebstoffe.

Eine andere interessante Entwicklung sind die *flexibilisierten Epoxydharze,* bei denen eine höhere Dehnung und grössere Schlagbiegefestigkeit entweder durch Einbau langkettiger Glykole oder Fettsäuren zwischen die Epoxydgruppen, oder durch Verwendung langkettiger Aminhärter erzielt wird. Natürlich ist die Formbeständigkeit in der Wärme bei diesen Harztypen geringer, ebenso die chemische und Lösungsmittel-Beständigkeit. Die elektrischen Eigenschaften sind bei Raumtemperatur im wesentlichen die gleichen wie die der normalen Epoxyde, fallen jedoch bei höheren Temperaturen rascher ab.

Ein ähnliches, etwas weniger günstiges Temperaturverhalten lässt sich auch bei den *halogenhaltigen Epoxydharzen* feststellen, welche für Anwendungen, bei denen Flammwidrigkeit im Vordergrund steht, von Interesse sind. Bisher lag bei den meisten auf dem Markt angebotenen Produkten dieser Art die flammhemmende Komponente nicht in das Harzmolekül eingebaut und somit gewissermassen als Weichmacher vor. Neuerdings bemüht man sich daher, günstigere mechanische Resultate durch den Einbau halogenhaltiger Härtungsmittel oder durch Verwendung eines halogenhaltigen Basisharzes zu erzielen. Da durch die Halogenierung aber auch der Schmelzpunkt stark ansteigt, ergeben sich bei der Verarbeitung solcher Produkte meist noch grosse praktische Schwierigkeiten, was zur Folge hat, dass diese Harzsysteme fast ausschliesslich als Lösung für Schichtstoffimprägnierungen angeboten werden.

Neben den früher vielfach prädominierenden wirtschaftlichen Gesichtspunkten rückt bei der Betrachtung der *Füllstoffe* mehr und mehr deren Funktion als mechanisch verbesserndes Element in den Vordergrund. Intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet haben nicht nur zu einer besseren Kenntnis der Wechselwirkungen an der Grenzfläche zwischen Kunststoff und Füllmaterial geführt, sondern brachten auch einige Neuentwicklungen, welche für die Zukunft ausserordentlich grosse Möglichkeiten bereithalten. Zu erwähnen sind besonders die mit dem englischen Ausdruck «Whisker» bezeichneten faserförmigen Einkristalle meist sehr kleiner Dimension, welche sich durch extrem hohe mechanische Festigkeitswerte auszeichnen. Diese besonderen Eigenschaften sind darauf zurückzuführen, dass es sich um nahezu perfekte Einkristalle, frei von Versetzungen und Fehlstellen, handelt. Mit Whiskern gefüllte Kunststoffe lassen sich sowohl zu faden- und schichtförmigen als auch zu körperhaften Formteilen verarbeiten, wobei je nach ein-, zwei- oder dreidimensionaler Ausrichtung der Faserlängenachsen die mechanische Verfestigung in gewünschter Weise gelenkt werden kann.

Von den bisher in grösserem Umfang hergestellten Whiskern dürften die Saphir-Whisker (Al_2O_3) für die Isolationstechnik wohl die interessantesten sein. Al_2O_3-Whisker haben Zugfestigkeiten bis zu 200 000 kg/cm² und einen Elastizitätsmodul von über 21.10^6 kg/cm². Sie sind gut benetzbar und haften ohne Vorbehandlung an Epoxyd- und Phenolharzen. Sehr interessant scheint vor allem eine Anwendung beim Wickelverfahren (filament-winding) als Verstärkung zwischen den Hauptfasern. Über die erreichbaren Festigkeiten findet man in der Literatur unterschiedliche Werte, es scheint aber festzustehen, dass ganz erhebliche Verbesserungen gegenüber den heute üblichen Füllstoffen erzielt werden können (Tabelle IX). Saphir-Whisker werden neuerdings von einer amerikanischen Firma auf industrieller Basis hergestellt und sind in verschiedenen Faserlängen und -Durchmessern sowie als Saphirwollpapier erhältlich. Trotzdem die Preise seit den ersten Entwicklungsarbeiten schon etwas gesunken sind, ist eine wirtschaftlich interessante Anwendung heute noch nicht möglich. Auch technisch sind bei weitem noch nicht alle Probleme gelöst. Die Möglichkeiten dieser Materialien sind aber so erfolgversprechend, dass es sich lohnt, ihre Entwicklung im Auge zu behalten.

Vergleich der physikalischen Eigenschaften von verstärkten Kunststoffen mit Poly- und Einkristallfasern [18]

Tabelle IX

	Epoxydharz unverstärkt	Geschmolzener Quarz kontinuierliche Faser	Al_2O_3-Einkristall diskontinuierliche Faser
Dichte . . . . . g/cm³	1,27	1,72	1,63
Faserngehalt . . . Vol-%	0	49,1	14,2
Elastizitätsmodul . kg/cm²	24600	176000	422000
Zugfestigkeit . . . kg/cm²	787	5117	7910
Bruchdehnung . . . . %	7,5	5,3	3,2
Mittlere Faserfestigkeit. . . . kg/cm²	—	17600	70400

4.2 Entwicklung neuer Kunststoffe

Bei der Entwicklung neuer Kunststoffe macht sich heute die Tendenz zum zielbewussten Streben nach ganz spezifischen Eigenschaften bemerkbar. Richtungsweisend für diese Anstrengungen sind vor allem die Anforderungen nach höherer Strahlenbeständigkeit sowie nach Beständigkeit bei tiefen und hohen Temperaturen, die von der modernen Technik der Raumfahrt und der Nutzbarmachung neuer Energiequellen gestellt werden. Dass dabei insbesondere auch die Anstrengungen zur Entwicklung hoch wärmebeständiger Materialien den Tendenzen der Elektrotechnik zu immer höherer Ausnützung elektrischer Maschinen entgegenkommt, ist ein glückliches Zusammentreffen, welches in den kommenden Jahren ohne Zweifel für die Elektrotechnik noch von grossem Nutzen sein wird.

Es ist charakteristisch für diese Arbeiten, insbesondere für die Entwicklung von Polymeren mit hoher Wärmestabilität, dass in zunehmendem Masse gründliche theoretische Untersuchungen die Richtung der synthetischen Entwicklungsarbeiten bestimmen. Dabei ist vor allem der Einfluss der Molekülstruktur auf die inter- und intramolekularen

Bindungskräfte, und damit sowohl auf die Formbeständigkeit als auch auf die chemische Beständigkeit in der Wärme, Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen.

Nach heutigen Auffassungen kann die Formbeständigkeit in der Wärme bei linearen thermoplastischen Polymeren vor allem durch solche Strukturmerkmale gefördert werden, welche die Neigung zu höherer Kristallinität begünstigen. Solche Merkmale sind:

a) Regelmässige Anordnung der Seitenketten;
b) Starke intermolekulare Kräfte zwischen den Kettensegmenten;
c) Hohe Steifigkeit der Polymerketten, die ihrerseits wieder begünstigt wird durch Einbau von Ringen in die Kette und vom Vorhandensein sperriger Seitengruppen, welche durch ihre Raumbeanspruchung die Beweglichkeit behindern.

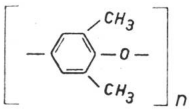
Bei den Duroplasten kommt neben den aufgezählten Faktoren noch die chemische Quervernetzung zwischen den Hauptketten hinzu.

Für die Erhöhung der chemischen Beständigkeit in der Wärme scheinen vor allem diejenigen Massnahmen geeignet zu sein, welche die Bildung freier Radikale (infolge sukzessivem Bruch von C—C-Bindungen oder Abspaltung von Wasserstoff) aus Methylenketten verhindern, also:

a) Ersatz der relativ schwachen C—H-Bindungen durch C—F-Bindungen;
b) Teilweiser oder vollständiger Ersatz der Kohlenstoffketten durch andere kettenbildende Elemente oder Elementkombinationen;
c) Einbau aromatischer oder heterocyklischer Ringe in die Kette.

Während die beiden ersten der aufgezählten Massnahmen schon bei älteren Polymeren ausgenützt sind (z. B. Fluorpolymere, Silikone), wird in letzter Zeit der Versteifung der Polymerketten durch Einbau von aromatischen Ringen vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt.

Bei einem der nach diesem Prinzip aufgebauten Kunststoffe, dem *Polyphenylenoxyd (PPO),* bildet die sich wiederholende Einheit



ein lineares Polymer. Der von einer amerikanischen und einer holländischen Firma gemeinsam entwickelte beigefarbene, opake Thermoplast besitzt ausgezeichnete mechanische Eigenschaften und einen hohen Erweichungsbereich bei einer Temperatur von ca. 200 °C. Als Dauerwärmebeständigkeit wurden zunächst etwa 175 °C angegeben, doch hat sich später gezeigt, dass bei dieser Temperatur eine verhältnismässig rasche Versprödung infolge Quervernetzung eintritt. Nach neueren Versuchsergebnissen dürfte die Dauerwärmebeständigkeit auf höchstens 100...120 °C anzusetzen sein. Neuerdings werden auch stabilisierte Typen angeboten, deren Temperaturbeständigkeit wesentlich verbessert sein soll. Hervorragend sind die elektrischen Eigenschaften, die eine nur geringe Abhängigkeit von der Temperatur aufweisen (Fig. 5). Besonders zu erwähnen ist die Beständigkeit des PPO gegen wässrige Chemikalien (auch Säuren und Laugen) und gegen Heisswasser und Wasserdampf. Die maximale Wasseraufnahme beträgt 0,1 %. Gegen geradkettige Kohlenwasserstoffe und Alkohole ist der neue Kunststoff stabil, nicht aber gegenüber Aromaten, Ketonen und chlorierten Kohlewasserstoffen.

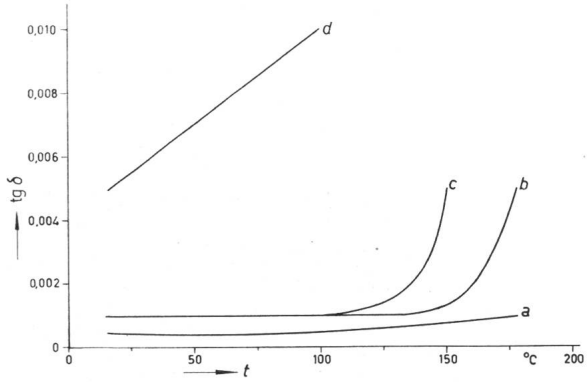


Fig. 5
Verlustfaktor tg δ verschiedener Thermoplaste in Funktion der Temperatur t
a Polyphenylenoxyd (PPO); *b* Polysulfon; *c* Polycarbonat; *d* Polyacetal

PPO lässt sich durch Spritzen und Strangpressen verarbeiten, wobei infolge der günstigen mechanischen Eigenschaften geringere Wandstärken als bei anderen Materialien zulässig sind. Auch dünne Folien, die sich als Kondensatorfolie und zur Kabelisolation eignen, sind herstellbar. Der Preis des PPO-Halbzeuges ist heute noch verhältnismässig hoch.

Eigenschaften von PPO und Noryl [19; 20]

Tabelle X

Eigenschaft	ASTM-Methode	Einheit	PPO	Noryl
Spezifisches Gewicht bei 23 °C		g/cm³	1,06	1,06
Zugfestigkeit bei 23 °C	D 638	kg/cm²	700...750	700
bei 125 °C	D 638	kg/cm²	320...450	
bei 93 °C	D 638	kg/cm²		450
Dehnung an der Streckgrenze	D 638	%	6...7	8
Bruchdehnung	D 638	%	50...80	20
Elastizitätsmodul	D 638	kg/cm²	25000...26000	25000
Biegefestigkeit	D 790	kg/cm²	1000	1000
Biegemodul	D 790	kg/cm²	25000...26000	25000
Schlagzähigkeit	D 1822	cm kg/cm²	750...970	≈ 400
Rockwell-Härte	D 785		118...120	119
Abrieb	D 1044	g	0,017	0,020
Linearer Ausdehnungskoeffizient	D 696	10^{-5}/°C	1,6	2
Schrumpfung in der Form	D 955	%	0,7	0,5...0,7
Erweichungspunkt bei 19 kg/cm² Belastung	D 648	°C	191	130
Brennbarkeit	D 635		selbstlöschend	selbstlöschend
Kurzzeit-Durchschlagfestigkeit	D 149	kV/mm	16...20	22...34
Spezifischer Durchgangswiderstand	D 257	Ωcm	10^{17}	10^{17}
Dielektrizitätskonstante bei 23 °C, 60 Hz	D 150		2,58	2,64
Verlustfaktor, tg δ, bei 60 Hz			0,00035	0,0006

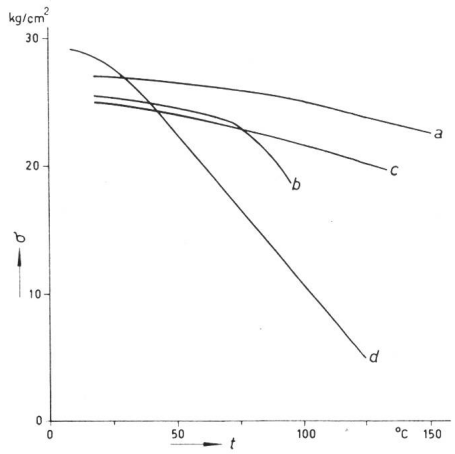
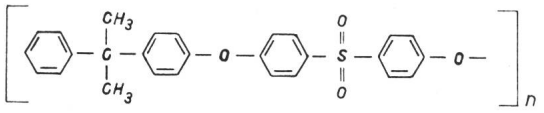


Fig. 6

Zugmodul σ verschiedener Thermoplaste in Funktion der Temperatur *t*
a Polyphenylenoxyd (PPO); *b* «Noryl»; *c* Polycarbonat; *d* Polyacetal

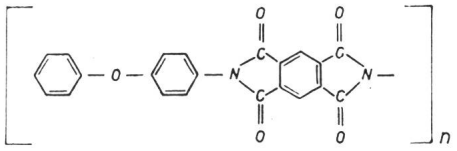
Unter dem Namen «Noryl» wurde im Verlauf des Jahres 1966 ein Abkömmling des PPO auf den Markt gebracht, dessen Preis etwa die Hälfte desjenigen von PPO beträgt. Bei ungefähr gleichen elektrischen und chemischen Eigenschaften liegen die mechanisch-thermischen Eigenschaften dieses Materials etwas niedriger als diejenigen von PPO (Tabelle X), sind aber immerhin noch mit denjenigen von Polycarbonat- und Acetalharzen vergleichbar (Fig. 6). Der Einsatzbereich erstreckt sich von —40 °C bis zu Dauertemperaturen von 95 °C.

Ein weiterer Thermoplast ähnlichen Bauprinzips wie das PPO ist das *Polysulfon*. Das neue Polymer besteht aus Ketten von Benzolringen, die durch Isopropyliden-, Sulfon- und Ätherbindungen miteinander verknüpft sind.



Polysulfon ist ein farblos-transparenter, zäher und harter Thermoplast mit einem Erweichungsbereich bei etwa 175 °C. Der Temperatureinsatzbereich reicht von —100 °C (wo noch 75 % der Festigkeitswerte bei Raumtemperatur vorhanden sind) bis 140...150 °C. Das Harz ist selbstlöschend und besitzt eine gute Oxydationsbeständigkeit, doch ist die UV-Beständigkeit nur mässig. Die Beständigkeit gegen Säuren, Alkalien, aliphatische Kohlewasserstoffe und Alkohole ist gut, von chlorierten und aromatischen Kohlewasserstoffen sowie von polaren organischen Lösungsmitteln wie Ketonen und Estern dagegen wird das Material angegriffen. Eine Zusammenstellung der mechanischen und der recht guten elektrischen Eigenschaften wird in Tabelle XI gegeben. Wie die Fig. 5 zeigt, wird der Verlustfaktor bis zu verhältnismässig hohen Temperaturen nicht verändert. Der spezifische Widerstand sinkt zwar mit steigender Temperatur, beträgt aber bei 175 °C immer noch 10^{14} Ωcm. Polysulfon ist ein echter Thermoplast, der sich durch Spritzen und Strangpressen — zwangsläufig bei höheren Temperaturen (300...400 °C) — verarbeiten lässt. Auch Folien, Folienschläuche und Rohre lassen sich extrudieren.

Waren mit den beiden erwähnten Polymeren, PPO und Polysulfon, die Fortschritte in der Wärmebeständigkeit noch relativ bescheiden sind, so stellt die Entwicklung der *Polyimide* für das Prinzip des Einbaues von Ringen in die Polymerkette einen grösseren Erfolg dar. Bei diesem ebenfalls noch sehr jungen Polymer ist das Molekül durch die Aneinanderkettung von Vielring-Bausteinen



gekennzeichnet.

Eigenschaften von Polysulfon [21]

Tabelle XI

Eigenschaft	Dimension	ASTM-Methode	Wert
Spezifisches Gewicht	g/cm³	D 792	1,24...1,25
Formschwund	%		0,76
Wasseraufnahme nach 24 h	%	D 570	0,22
Zugfestigkeit an der Streckgrenze	kg/cm²	D 638	720
Dehnung an der Streckgrenze	kg/cm²	D 638	5...6
Zugmodul	kg/cm²	D 638	25000
Bruchdehnung	%	D 638	50...100
Biegefestigkeit an der Streckgrenze	kg/cm²	D 790	1080
Biegemodul	kg/cm²	D 790	27300
Kerbschlagzähigkeit nach Izod bei 22 °C	cm kg/cm²		6,9
—40 °C	cm kg/cm²		6,4
Rockwell-Härte		D 785	M 69 (R-120)
Wärmestandfestigkeit bei 18,5 kg/cm²	°C	D 648	172
Entflammbarkeit		D 635	selbstlöschend
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	10^{-5}/°C		3,1
Wärmeleitfähigkeit	W/m °C		0,25
Spezifische Wärme bei 23 °C	J/kg °C		1000
bei 160 °C	J/kg °C		1550
Versprödungstemperatur	°C		—77
Durchschlagfestigkeit einer ⅛″-Probe	V/mm	D 149	16700
Lichtbogenfestigkeit	s	D 495	122
Spezifischer Widerstand bei 22 °C	Ωcm	D 257	$5 \cdot 10^{16}$
bei 175 °C			$5 \cdot 10^{14}$
Oberflächenwiderstand	Ω	D 257	$3 \cdot 10^{16}$
Dielektrizitätskonstante bei 60...10^6 Hz, bei 22 °C		D 150	3,14
bei 175 °C			2,82...2,73
Verlustfaktor tg δ bei 60...10^6 Hz, bei 22 °C		D 150	0,0008...0,0056
bei 175 °C			0,008...0,003

Polyimide zeichnen sich durch eine einzigartige Kombination hervorragender thermischer, mechanischer und elektrischer Eigenschaften aus. Sie sind nicht brennbar, schmelzen erst bei ca. 800 °C und weisen sowohl extreme chemische Wärmebeständigkeit als auch hohe Formbeständigkeit in der Wärme auf. In diesem Punkt sind sie den fluorhaltigen Polymeren deutlich überlegen, die zwar eine gute chemische Dauerbeständigkeit, aber eine nur niedrige Formbeständigkeit in der Wärme aufweisen.

Polyimide sind beständig gegen organische Lösungsmittel sowie gegen die meisten Chemikalien, mit Ausnahme starker Basen, und ausserordentlich ozon-, bewitterungs- und strahlenbeständig. Unter den elektrischen Eigenschaften sind eine hohe Durchschlagfestigkeit, ein hoher spezifischer Widerstand und ein niedriger dielektrischer Verlustfaktor zu nennen. Obwohl es sich beim Polyimid um ein linear aufge-

bautes, nicht vernetztes Polymer, also strukturell gesehen um einen Thermoplasten handelt, ist wegen des hohen Erweichungsbereiches die Verarbeitung mit den üblichen Formgebungsmethoden nicht möglich und man ist für die Herstellung von Halbzeug und Formteilen auf Sinterverfahren angewiesen. Demzufolge liegt der Preis des auf den Markt gebrachten kompakten Halbzeugs noch sehr hoch.

Das Hauptanwendungsgebiet der Polyimide (Tabelle XII) liegt infolgedessen auf dem Gebiet der Draht- und Tränklacke («Pyro-ML»-Lacke) und Folien («Kapton»-Folie), die für Anwendungen in Isolationen der Wärmeklasse H in Dicken von 0,025...0,125 mm im Handel sind. Die Dauerwärmebeständigkeit liegt zwischen 200 und 250 °C, für kurzzeitige Beanspruchung werden Temperaturen bis 400 °C als zulässig angegeben.

Richtwerte für die Eigenschaften von Polyimid-Folie im Vergleich mit Polyester-Folie

Tabelle XII

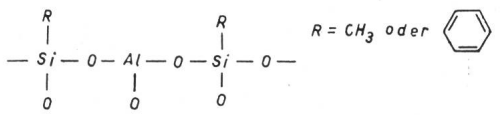
		Polyimid-Folie	Polyester-Folie
Spezifisches Gewicht	g/cm³	1,42	1,39
Zugfestigkeit			
bei 25 °C	kg/mm²	17,5	16
bei 200 °C	kg/mm²	12	5
Streckgrenze			
bei 25 °C	kg/mm²	10	8
bei 200 °C	kg/mm²	6	0,7
Bruchdehnung			
bei 25 °C	%	70	100
bei 200 °C		90	Material kriecht
E-Modul (Zug)			
bei 25 °C	kg/mm²	300	390
bei 200 °C	kg/mm²	180	35
Falzwiderstand MIT Falzungen bis zum Bruch		$\approx 10^4$	$\approx 10^5$
Einreissfestigkeit . .	g/mil	8	15
Durchschlagfestigkeit			
bei 25 °C	kV/mm	280	280
bei 150 °C	kV/mm	240	200
Dielektrizitätskonstante			
bei 25 °C		3,5	3,1
bei 200 °C		3,0	
Dielektrischer Verlustfaktor, tg δ			
bei 25 °C		0,003	0,005
bei 200 °C		0,002	0,01
Schmelzpunkt . . .	°C	schmilzt nicht	260
Brennbarkeit		selbstlöschend	schwach bis selbstlöschend
Alterungsbeständigkeit Zeit bis 1 % Bruchdehnung			
bei 200 °C	Jahre	> 10	0,1
bei 250 °C		10	schmilzt
bei 275 °C		1	schmilzt
Durchdrücktemperatur	°C	435	190
Strahlungsbeständigkeit . . .	REP	$> 10^9$	$> 10^5$
Feuchtigkeitsaufnahme			
bei 50 % rel. F. .	%	1,3	0,2
bei 100 % rel. F. .	%	2,9	0,8
Hydrolysebeständigkeit nach 70 d bei 100 °C		Zugfestigkeit auf 70 %, Dehnung auf 30 % der ursprünglichen Werte gesunken	zerstört
Isolierölbeständigkeit nach 180 d bei 150 °C		beständig	

Neben der reinen Kaptonfolie wird häufig eine Verbundfolie, Kapton ein- oder beidseitig mit FEP-Folie kaschiert, angewendet. Bei Temperaturen über 300 °C können gewickelte Isolationen (z. B. Drahtisolation) aus diesen Kombinationen zu einer zusammenhängenden, mechanisch und elektrisch hochwertigen Isolierschicht verschweisst werden.

Schichtstoffe mit Polyimid-Bindemittel sind bisher noch wenig verbreitet, da die Gelierzeit der Harze zu kurz ist und bei den Laminierverfahren höhere Drücke und Temperaturen als üblich erforderlich sind. Da jedoch verschiedene namhafte Firmen auf diesem Gebiet eine rege Tätitkeit entfalten, besteht kaum ein Zweifel, dass auch hier mit Fortschritten zu rechnen ist.

Die gute Wärmebeständigkeit der Imidbindung macht man sich weiter zunutze, indem man diese Gruppe in andere Polymerketten, z. B. in Polyamide oder Polyester, einbaut und auf diese Weise Produkte erhält, deren Wärmebeständigkeit zwischen derjenigen der Polyamide (oder Polyester) und derjenigen der Polyimide liegt. Solche *Polyesterimide und Polyamidimide* finden zunehmend Verwendung als Drahtlacke.

In einem der vorausgehenden Abschnitte wurde auf die Möglichkeit der Erzeugung wärmestabiler Kunststoffe durch Verwendung «anorganischer» Hauptketten hingewiesen. Nachdem diese Möglichkeit schon in den Silikonen verwirklicht worden ist, sind in den letzten Jahren grosse Anstrengungen gemacht worden, auch andere Element in ähnlicher Weise zur Bildung von Polymeren heranzuziehen. Diese Anstrengungen stossen aber heute noch auf grössere Schwierigkeiten, weil einerseits die anorganischen Monomere die Tendenz zeigen, bevorzugt zu 4-, 6- oder 8-gliedrigen Ringen zu polymerisieren und anderseits die anorganischen Elemente solcher Polymere vielfach eine beträchtliche Neigung zu hydrolytischer oder oxydativer Zersetzung zeigen. Trotz des erheblichen wissenschaftlichen Aufwandes auf diesem Gebiet stehen daher Erfolge, die eine kommerzielle Ausbeutung in grösserem Rahmen rechtfertigen würden, heute noch aus. Immerhin scheinen gewisse Ansätze zu einer industriellen Reife bei den sog. organischen Gläsern oder *Glasharzen* vorhanden zu sein, die seit kurzem in Amerika auf den Markt gebracht wurden. Es handelt sich dabei um Polymere, bei denen ein Teil der Silizium-Atome von Si—O—Si-Ketten und -Netzen durch andere Elemente, vor allem Al, ersetzt sind, sodass Strukturen des Typs



entstehen. Diese Glasharze eignen sich zur Herstellung transparenter Filme und Überzüge und sollen Dauertemperaturen zwischen 300 und 400 °C aushalten.

4.3 Anorganische Isolierstoffe

Besteht bei den organischen Kunststoffen ein gewisser Nachteil in der ungenügenden Wärmebeständigkeit, so sind

es bei den anorganischen Isolierstoffen wieder andere Probleme, wie z. B. die Sprödigkeit des Glases oder die schwierige Verarbeitbarkeit keramischer Massen, welche das Streben nach Verbesserungen anstossen.

In diesem Zusammenhang ist auf eine interessante Neuheit hinzuweisen, welche unter verschiedenen Namen bekannt wurde und die Vorteile beider Materialien, Glas und Keramik, in sich vereinigt. Die Herstellungsmethode besteht darin, durch Erhöhung des Gehaltes an leicht kristallierenden Komponenten (Magnesiumoxyd, Aluminiumoxyd-Titandioxyd), oder durch Zufügen besonderer Keimbildner (Fluoride, Phosphate, Platin, Silber, Gold, Kupfer) eine sehr feinkörnige gleichmässige Kristallisation zu verursachen und auf diese Weise das Glas in einen keramischen Körper überzuführen. In der Praxis kann das Produkt wie ein normales Glas geschmolzen, geblasen, gepresst, gezogen und zu Glas-Metall-Verbindungen verarbeitet werden. Durch Tempern bei höheren Temperaturen wird dann die Bildung von Kristallisationskeimen angeregt und der Körper unter Beibehaltung der einmal gegebenen Form in eine Keramik mit wesentlich erhöhter Erweichungstemperatur überführt. Nach der Umwandlung besitzen solche Stoffe im allgemeinen ein opak-weisses Aussehen, können aber je nach Zusammensetzung auch transparent sein. Das Material ist sehr dicht, hart und vollkommen porenfrei. Der Wärmeausdehnungskoeffizient kann, je nach Produkt, positive oder negative Werte annehmen, oder über einen weiten Temperaturbereich so klein sein, dass eine ausgezeichnete Temperaturwechselbeständigkeit erreicht wird.

Im dielektrischen Verhalten gelten bei solchen Massen die gleichen Prinzipien wie für Gläser allgemein, d. h. alkaliarme Produkte zeigen günstigere dielektrische Eigenschaften als alkalireiche. Ausserdem kann, je nach Zusammensetzung, das Minimum des Verlustwinkels bei niedrigen oder hohen Temperaturen auftreten.

Eine besondere Gruppe unter den Vitrokeramstoffen bilden die lichtempfindlichen sog. Photoform-Gläser, welche neben Silber noch andere Sensibilisatoren wie Ceroxyd oder Zinnoxyd enthalten. Mit UV-Licht bestrahlte Stellen solcher Gläser werden bei einer nachfolgenden Wärmebehandlung milchig-trüb, was zur Übertragung von Beschriftungen, Skalen und dergleichen ausgenützt werden kann und einen umso grösseren Vorteil gegenüber älteren Beschriftungsmethoden darstellt, als die Zeichnung unabänderlich in das Glas eingebettet ist. Eine andere wertvolle Eigenschaft dieser photosensibilisierten Gläser besteht darin, dass sich die belichteten und wärmebehandelten Stellen mit Flußsäure rund 15mal schneller wegätzen lassen als die unbelichteten. Auf diese Weise ist es möglich, komplizierte Muster (z. B. für gedruckte Schaltungen) mit sehr grosser Genauigkeit, Schärfe und Formtreue auf die Glasplatten zu übertragen und feinste Durchgänge zu erzeugen. Dank der Einfachheit von photographischer Übertragung und Ätzung ist das Verfahren auch zur Massenfertigung gut geeignet. Durch zusätzliche Wärmebehandlung lässt sich Photoform-Glas in das kristalline «Photoceram» überführen.

Unter den keramischen Materialien im weitern Sinn hat in letzter Zeit ein Isolationsmaterial mit interessanten Eigenschaften, *Bornitrid,* einige Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Bornitrid existiert in zwei Kristallmodifikationen, einer kubischen mit einem Kristallgitter und einer Härte ähnlich wie Diamant, und einer hexagonalen mit einer Schichtstruktur wie Graphit. Bei dem im Handel befindlichen, durch Sintern unter Druck erzeugten Halbzeug liegt die hexagonale Struktur vor, mit der Folge, dass durch die Orientierung der blättchenförmigen Kristalle in vielen Eigenschaften Anisotropie auftritt.

Bornitrid ist in nicht oxydierender Atmosphäre bis annähernd 1000 °C beständig. In Wasser tritt bei Raumtemperatur eine sehr langsame, bei höheren Temperaturen eine beschleunigte Hydrolyse auf. Ein niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient, vor allem senkrecht zur Pressrichtung, verleiht dem Material eine gute Temperaturwechselbeständigkeit.

Ähnlich wie beim Graphit macht sich die Anisotropie auch in den elektrischen Werten bemerkbar (Tabelle XIII),

Eigenschaften von Bornitrid

Tabelle XIII

		Parallel zur Pressrichtung	Senkrecht zur Pressrichtung
Dichte	g/cm³	2,10	
Härte (Mohs) . . .		2	
Elastizitätsmodul			
bei 24 °C	kg/cm²	870000	345000
bei 700 °C	kg/cm²	108000	36000
Bruchmodul			
bei 24 °C	kg/cm²	1120	510
bei 700 °C	kg/cm²	270	134
Linearer Ausdehnungskoeffizient 24...980 °C	1/°C	$7{,}5 \cdot 10^{-6}$	$0{,}8 \cdot 10^{-6}$
Durchgangswiderstand			
bei 25 °C	Ωcm	$3{,}0 \cdot 10^{13}$	$1{,}54 \cdot 10^{13}$
bei 550 °C	Ωcm	$3{,}3 \cdot 10^{9}$	$7{,}5 \cdot 10^{8}$
bei 920 °C	Ωcm	$1{,}2 \cdot 10^{6}$	$1{,}2 \cdot 10^{6}$
Dielektrizitätskonstante (10^2...10^8 Hz) . .		4,15	
Verlustfaktor, tg δ			
bei 10^2 Hz		0,00103	
bei 10^{10} Hz . . .		0,0003	

doch ist das Bornitrid im Gegensatz zu Graphit ein Isolator.

Neuerdings ist Bornitrid auch als Faser erhältlich, so dass in absehbarer Zeit mit papierartigen Formen gerechnet werden kann.

In den USA wurden *anorganische Vergussmassen* entwickelt, die Dauertemperaturen von über 250 °C besitzen sollen. Sie bestehen meist aus Bindemitteln auf Silikat-, Borat- und Phosphat-Basis mit Füllstoffen wie Quarz, Magnesit, Kalziumsulfat, Zirkon usw. Die Aushärtungstemperaturen liegen zwischen 500 und 750 °C. Da die meisten dieser Produkte unter Verdunsten eines Lösungsmittels (meist Wasser) aushärten, entstehen im allgemeinen ziemlich poröse Massen mit verhältnismässig schlechten elektrischen Eigenschaften. Andere Schwierigkeiten resultieren aus den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Vergussmasse und eingegossenen metallischen Teilen, sowie aus der je nach Zusammensetzung und Porosität teilweise erheblichen Wasseraufnahme.

Immerhin sind diese anorganischen Vergussmassen in gewissen Fällen, in denen besonders hohe Temperaturanforderungen gestellt werden, die einzige Möglichkeit. Nach Angaben der Literatur sollen sie sich auch schon bei Anwendungen der Raumfahrt bewährt haben.

5. Ausblick

Beobachtet man die Errungenschaften der letzten Jahre, so zeigt sich, dass auf allen Gebieten der Isolationstechnik zwar grosse Erfolge zu verzeichnen waren, dass aber viele der als wünschenswert erscheinenden Ziele bei weitem noch nicht erreicht wurden.

Eines dieser Ziele auf dem Gebiet der gasförmigen Isolierstoffe wäre z. B. die Bereitstellung eines Gases, das bei gleicher oder besserer dielektrischer Festigkeit als das SF_6 und die Fluorkarbone einen grösseren Temperatureinsatzbereich (gegeben einerseits durch die Kondensationstemperatur unter dem benötigten Druck, anderseits durch die thermische Stabilität) gewährleisten würde. Ein anderes Ziel auf weite Sicht wäre, die zwischen organischen und anorganischen Isolierstoffen bestehende Lücke zu schliessen, um so zu Werkstoffen zu gelangen, welche die Vorteile beider Stoffgruppen in sich vereinigen.

So wie die Dinge heute liegen, ist es nicht nur schwierig zu sagen, in welcher Richtung die Lösung dieser Probleme gesucht werden muss, sondern es ist sogar fraglich, ob eine Lösung im Sinne einer so kategorischen Problemstellung überhaupt möglich ist. Dies liegt nicht daran, dass mit den höheren Anforderungen auch die Schwierigkeiten, diese Anforderungen zu erfüllen, notgedrungen immer mehr steigen müssen. Bei dem riesigen, heute zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Potential kann man erwarten, dass jedes irgendwie zu lösende Problem über kurz oder lang auch einmal gelöst werden wird. Die Erfahrung hat aber gezeigt, dass für eine Verbesserung in einem Punkt in den meisten Fällen eine Verschlechterung in einem anderen Bereich in Kauf genommen werden muss. Immerhin gibt es Beispiele dafür, dass diese Regel gelegentlich auch durchbrochen werden kann und in einzelnen Fällen nicht das Prinzip des «entweder oder», sondern dasjenige des «sowohl als auch» Geltung besitzt.

Literatur

[1] Insulation Directory / Encyclopaedia Issue, Insulation 12(1966)6.
[2] Symposium on Electrical Insulating Gases, ASTM Special Technical Publication No 346, Dec. 1963.
[3] *C. Camilli:* Gaseous insulation goes to work. Power, Design and Equipment Application Section (1959) 62–66.
[4] *L. F. Kilham, R. R. Ursch:* Liquid and Gas Dielectrics for Magnetic Component Miniaturization. Electrical Manufacturing, May 1957, 140–145.
[5] Minnesota Mining and Manufacturing Company. 3 M Brand Inert Fluorchemical Liquids Technical Data.
[6] *K. Schneider:* Ionisch polymerisierte Lactame, Kunststoffe 55(1965)315.
[7] Du Pont de Nemours: Technical Information Bulletin N-195, Sept. 1965.
[8] Ionische Äthylen-Polymerisate. Kunststoffe 55(1965)12, 952.
[9] *E. G. Driscoll:* Rubber and Thermoplastic Power Cables, Insulation (1966)41.
[10] Speciality Elastomers, Materials and Process Manual No 232 [in Materials Design Engineering 62(1965)119–134].
[11] Der leichteste Thermoplast, Kunststoff-Berater 10(1965)797.
[12] Eigenschaften von Polyfluorcarbonen, Kunststoffe 55(1965)9, 715.
[13] Fluorcarbon Plastics. Materials and Process Manual No 215 [in Materials in Design Engineering 61(1964)93–104].
[14] Wacker-Chemie GmbH: Kaltvulkanisierender Siliconkautschuk.
[15] *R. Stierli:* Epoxydharze in der Elektrotechnik, ETZ-B (1965)20, 649.
[16] *K. Jellinek:* Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Epoxydharze, Kunststoffe 55(1965)2, 74.
[17] Epoxy-Plastics, Materials and Process Manual No 227 [in Materials Design Engineering (1965)111–122].
[18] Einkristalle geben Kunststoffen hohe Festigkeit, Kunststoff-Berater 10(1965)12, 977.
[19] PPO... new, high-heat Thermoplastic, Modern Plastics 42(1964)4, 95–97.
[20] Noryl... a New Engineering Thermoplastic Insulation 12(1966)7, 31.
[21] Polysulfon — bis 170 °C verwendbar. Kunststoff-Berater 10(1965)798.
[22] *J. F. Heacock, C. E. Berr:* Polyimides — New High Temperature Polymers, SPE Transactions, April 1965, 105–110.
[23] *R. S. Mallouk:* Polyimide-Film, Machine Design 36(1964)10, 232–37.
[24] *J. H. Freeman:* New Amide-Imide Plastics, Mat. Design Engineering 64(1966)4, 80–82.
[25] *W. Hennig:* Neuartiges Glas als Werkstoff der Elektronik, Elektronische Rundschau Nr. 6(1960), 233.
[26] *W. Hinz:* Vitrokeram, Silikattechnik 10(1959), Nr. 3, 119.
[27] The Carborundum Company: Boron Nitride.
[28] *C. H. Vondracek:* Inorganic Potting Compounds for High Temperatures, Mat. Design Engineering 60(1964)7, 100–103.

Adresse des Autors:
Frau Dr. *L. Hugi*, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

Lichttechnische Aspekte zur Hochmastbeleuchtung

Von *J. Roch*, Erlangen

656.057.39

1. Allgemeines

In der letzten Zeit sind beim Ausbau der Verkehrswege weiträumige Anlagen erstellt worden. Zur Verminderung der Unfallgefahr und zur Erhöhung der Sicherheit wurden und werden diese Objekte beleuchtet. Bei derartigen grossflächigen Anlagen ist nun versucht worden, eine Beleuchtung mit einem oder wenigen hohen Masten anstelle vieler Maste der konventionellen Methode zu erstellen.

Hier, wo es jedoch vornehmlich um die Sicherheit des schnellen Verkehrsteilnehmers geht, sollten aber die beleuchtungstechnischen Probleme sehr genau untersucht werden, ohne dass selbstverständlich die Wirtschaftlichkeit und Ästhetik dabei ausser acht gelassen werden dürfen. Die beleuchtungstechnische Seite der Hochmastbeleuchtung zeigt nämlich einige Besonderheiten, die für die Güte der Beleuchtung entscheidend sind.

Gerade die besondere Anordnung mit wenigen hohen Masten schafft ganz andere Beleuchtungsverhältnisse, weshalb nur durch das Zusammenspiel besonderer Beleuchtungskörper und richtig gewählter Fahrbahndecken eine befriedigende Lösung erreicht werden kann.

Die folgenden Überlegungen verdeutlichen die mit der Hochmastbeleuchtung verbundenen Gesetzmässigkeiten und zeigen zugleich eine optimale Lösung auf.

2. Art der Lichtverteilung

Am besten lassen sich die Verhältnisse am Beispiel einer beleuchteten Strassenfläche A entsprechend Fig. 1 demonstrieren. Die Leuchte befindet sich über einem Eckpunkt in der Lichtpunkthöhe h und strahlt einen Lichtstrom $\Phi = 1$ lm derart aus, dass sich auf der Fläche A eine Beleuchtungsstärke $E_A = 1$ lx ergibt. In diesem Fall beträgt die Beleuchtungsstärke der darunterliegenden gleich grossen Fläche A' nur noch ein Viertel, wenn die Lichtpunkthöhe auf $2h$ erhöht wird. Bei unveränderter Lichtstärkeverteilung müsste daher der Lichtstrom vervierfacht werden, um wieder die Beleuchtungsstärke $E = 1$ lx zu erhalten.

In Formeln ausgedrückt bedeutet dies:

Unter der Voraussetzung, dass die Form der Lichtverteilung konstant bleibt und der Lichtstrom $\Phi = 1$ lm beträgt, ist:

$$E_A = 1 \text{ lx}$$

und

$$E_A' = 1/4 \text{ lx}$$