Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 52 (1961)
Heft: 1

Artikel: Aufbau und Eigenschaften der Kunststoffe
Autor: Held, F.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059029

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Organe commun de l'Association Suisse des Electriciens (ASE)
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité (UCS)

A l'occasion de la Nouvelle Année

Le Secrétariat de l'ASE et la Rédaction du «Bulletin» remercient les auteurs d'articles, de comptes rendus et de communications pour leur collaboration durant l'année qui vient de s'achever. Nous leur présentons, ainsi qu'aux membres et aux abonnés, nos meilleurs vœux pour la Nouvelle Année.

Aufbau und Eigenschaften der Kunststoffe

Vortrag, gehalten an der 19. Schweiz. Tagung für elektrische Nachrichtentechnik vom 16. September 1960 in Basel,

von *F. Held*, Zürich

621.315.616.9

1. Einleitung

Die grosse Bedeutung, die die Kunststoffe als Werkstoffe für verschiedenste Verwendungszwecke in den letzten zwanzig Jahren erlangt haben, ist hinreichend bekannt. Die rasche Entwicklung lässt sich am besten veranschaulichen, wenn man die Produktionsziffern von Kunststoffen mit anderen Werkstoffen oder Werkstoffgruppen vergleicht. Hier kann festgestellt werden, dass die Kunststoffproduktion heute volumenmässig diejenige der Nichteisenmetalle übertrifft und sehr nahe an die jährliche Erzeugung vom Glas herankommt.

Im folgenden sollen unter dem Begriff Kunststoffe Festkörperverbindungen verstanden werden, die ganz oder teilweise synthetisch hergestellt werden und deren Bausteine Makromoleküle darstellen, d. h. Moleküle mit Molekulargewichten grösser als etwa 10 000 (als Vergleich kann erwähnt werden, dass das Molekulargewicht von Paraffin zwischen 400 und 500 liegt.) Die Herstellung makromolekularer Stoffe geschieht nach verschiedensten Verfahren und führt in der Regel, ausgehend von niedermolekularen Verbindungen, in einem oder mehreren Schritten zu hochmolekularen Produkten. Dabei lassen sich drei Grenzfälle unterscheiden, wie sie schematisch in Fig. 1 dargestellt sind. Bei den Thermoplasten ist der Baustein, das lineare Kolloid, als Individuum erkennbar, während bei den beiden andern Gruppen infolge gegenseitiger Vernetzung die eigentlichen makromolekularen Bausteine im Festkörper nicht mehr erkennbar sind. Diese strukturellen Unterschiede beeinflussen die Eigenschaften, insbesondere das Verhalten gegenüber Wärme und Lösungsmitteln, wie dies in Tab. I dargestellt ist.

Die Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen Aufbau und Eigenschaften makromolekularer Stoffe sind zur Zeit stark im Fluss. Obschon es heute noch nicht möglich ist, aus der molekularen Struktur die makroskopischen Eigenschaften eines hochpolymeren Körpers quantitativ abzuleiten, ergaben sich im Laufe der vielen Untersuchungen gewisse Zusammenhänge, die sowohl für den Wissenschafter wie für den Praktiker als Hinweise für die Beurteilung der physikalischen und technologischen Eigenschaften hochpolymerer Stoffe von Bedeutung sind. Die Einflüsse der zahlreichen Strukturparameter auf die physikalischen Eigenschaften sind sehr vielgestaltig und komplex. Es soll daher im folgenden versucht werden an einigen wenigen Beispielen zu zeigen, was für allgemeine Zusammenhänge existieren, wobei sich eine Beschränkung nach zwei Richtungen aufdrängt, nämlich hinsichtlich Strukturparameter und hinsichtlich der zu betrachtenden Eigenschaften; hier sollen nur die mechanischen und dielektrischen Eigenschaften berücksichtigt werden.

Beeinflussung der Eigenschaften von Kunststoffen durch strukturelle Unterschiede

Tabelle I

Kunststoffe	Aufbau	Thermisches Verhalten	Chemisches Verhalten	Beispiele
Thermoplaste	Statistisch ineinander verschlungene lineare Makromoleküle (Fadenmoleküle) sog. Wattebauschstruktur	Schmelzbar, breites Schmelzintervall, im plastischen Zustand leicht verformbar	In geeigneten Lösungsmitteln löslich	Plexiglas Polyvinylchlorid Polystyrol Polyäthylen
	Symmetrisch gebaute Fadenmoleküle in teilweise geordnetem (kristallinem) Zustand	Schmelzbar mit engem Schmelzintervall, spinnbar aus Schmelze oder Lösung		Nylon, Terylen, Orlon
Elastomere (kautschuk-elastische) Stoffe	Fadenmoleküle, gegenseitig vernetzt mit wenigen Vernetzungsstellen	Chemischer Abbau ohne richtig zu schmelzen. (Die Formgebung geschieht im nicht vernetzten Zustand wie bei den Thermoplasten)	Unlöslich, in geeigneten Lösungsmitteln quellbar	Synthetische Kautschuke, Vulkollan, Silikonkautschuk
Duroplaste	Kugelförmige, vernetzte Makromoleküle mit vielen Vernetzungsstellen (Sphärokolloide)	Chemische Zersetzung ohne zu schmelzen. (Die Formgebung geschieht im wenig vernetzten niedermolekularen Zustand durch z. B. Formpressen oder Giessen)	Unlöslich, praktisch nicht quellbar	Phenoplaste («Bakelit»), Aminoplaste, Epoxyharze, Alkydharze, Silikonharze

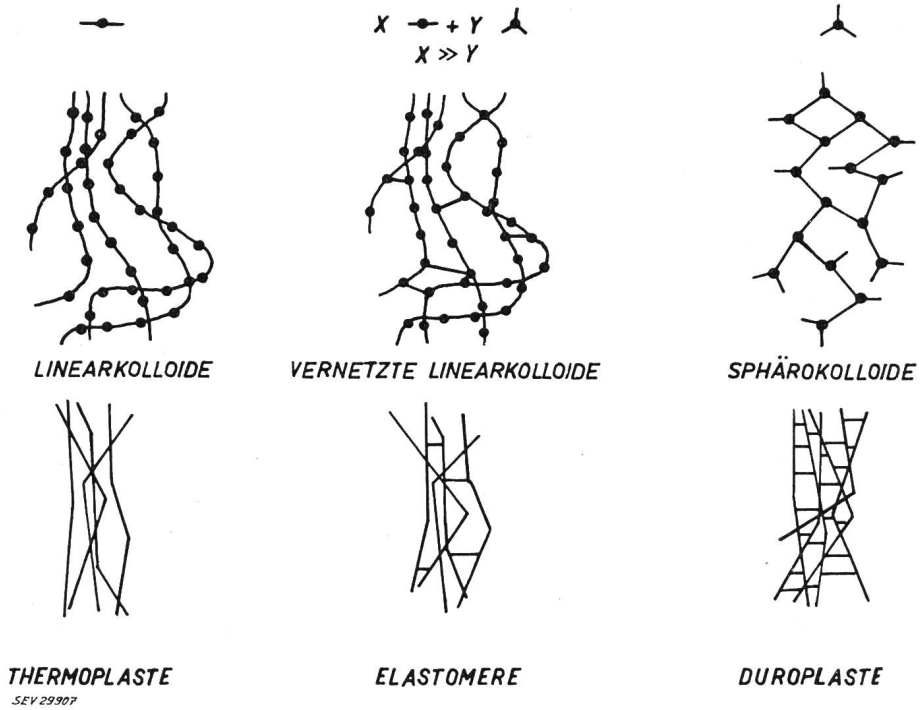

Fig. 1
Aufbau und Einteilungsprinzip makromolekularer Stoffe

findet hier harte und spröde, weiche und zähe (lederartige) und weiche und elastische Werkstoffe in ein und derselben Gruppe. Die Erklärung dieses Verhaltens kann mit der sog. mikrobrownschen Beweglichkeit der Fadenmoleküle (Beweglichkeit von Kettenteilstücken) gedeutet werden, wie dies in Fig. 2 schematisch dargestellt ist. Grundsätzlich kann jeder Thermoplast die vier angedeuteten Grenzzustände einnehmen je nach der Temperatur bei der er betrachtet wird. So kann ein Thermoplast, der auf Grund seiner Spannungs-

2. Strukturparameter und mechanische Eigenschaften

Von den Strukturparametern die die mechanischen Eigenschaften beeinflussen sind als wichtigste zu nennen:

a) Chemische Konstitution;
b) Molekulare Struktur (Architektur);
c) Gegenseitige Anordnung (Übermolekulare Struktur wie z. B. Kristallinität).

Besonders gross sind die Einflüsse der erwähnten Strukturparameter bei den Thermoplasten, weil hier die Zusammenhaltsmechanismen der Fadenmoleküle im Verband direkt beeinflusst werden. Dies drückt sich bereits aus in der grossen Variabilität der Zustandformen innerhalb der thermoplastischen Kunststoffe etwa bei Zimmertemperatur. Man

Dehnungs-Charakteristik bei —10 °C hart und spröde ist, bei 90 °C kautschukelastisch sein (Fig. 3). Die Temperatur bei welcher die freie mikrobrownsche Bewegung aufhört, nennt man die Einfriertemperatur T_E, die Temperatur bei welcher die Verschiebung ganzer Ketten gegeneinander einsetzt, die Schmelztemperatur T_S.

Es sollen nun im folgenden an einigen Beispielen die Einflüsse der drei Strukturparameter bei thermoplastischen Kunststoffen besprochen werden, um generell einige Zusammenhänge zwischen Aufbau und Eigenschaften anzudeuten.

2.1 Chemische Konstitution

Die chemische Konstitution beeinflusst vor allem die Bindungsverhältnisse von Kette zu Kette. Starke Dipole im Grundmolekül und demzufolge

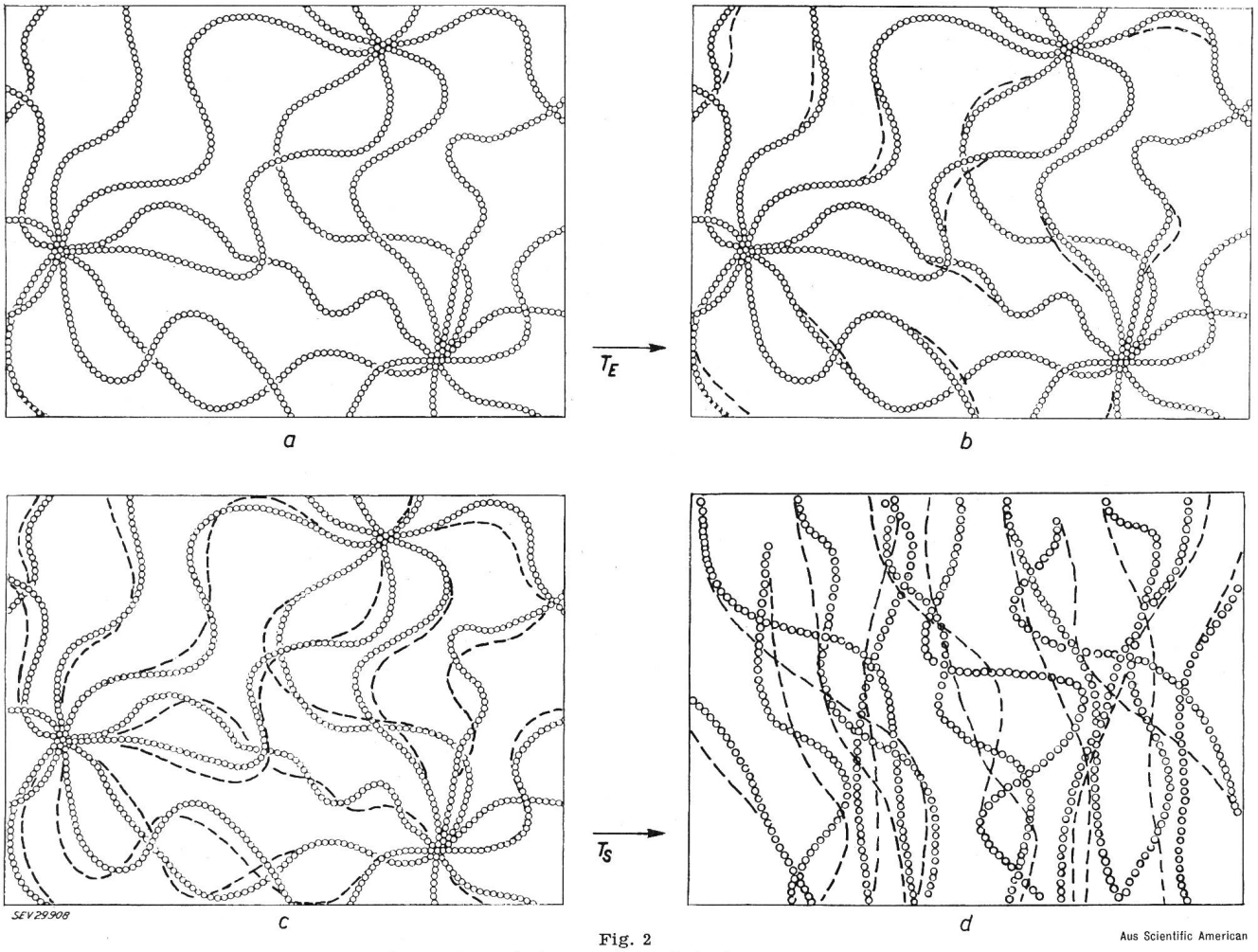

Fig. 2
Thermodynamische Zustände bei Linearpolymeren
a glasartig, hart, spröde; *b* lederartig, weich, zäh; *c* kautschukelastisch; *d* flüssig
T_E Einfriertemperatur; T_S Schmelztemperatur

auch in der Kette verstärken die nebenvalenten Bindungskräfte. Je grösser das Dipolmoment, desto geringer wird bei einer gegebenen Temperatur die mikrobrownsche Beweglichkeit, desto mehr wird T_E nach höhern Temperaturen verschoben, wie dies aus Tabelle II für einige Thermoplaste deutlich

Einfriertemperatur (T_E) und chemische Konstitution
Tabelle II

Hochpolymere Substanz	Dipolmoment μ in Debye-Einheiten	T_E °C	DK-Dispersion (50 Hz) bei t °C
Poly-Isobutylen	0	−65	unpolar
Polyvinylmethyläther	1,2	<−20	−15
Polyakrylsäure-methylester	1,7	+ 5	+25
Polyvinylacetat	1,7	+31	+54
Polyvinylchlorid	2,0	+77	+90
Polyakrylnitril	3,4	>+100	+150...170

erkennbar ist. Die Wirkung der Dipole ist schematisch in Fig. 4 an drei bekannten Kunststoffen (Polyaethylen, Polyvinylchlorid und Polyamid) dargestellt. Besonders stark ist die Nebenvalenz-Bindung, wenn ein bewegliches Wasserstoffatom und stark negative Atomgruppierungen vorhanden sind (Wasserstoffbrückenbindung oder Protonenbindung). Sowohl T_S wie auch die mechanische Festigkeit zeigen sehr hohe Werte wie sie für die Polyamide und Polyurethane charakteristisch sind.

Je geringer die Zahl der Dipole in der Kette, d. h. je grösser die Anzahl der Kettenatome pro Dipol im Grundmolekül, desto kleiner ist der Einfluss,

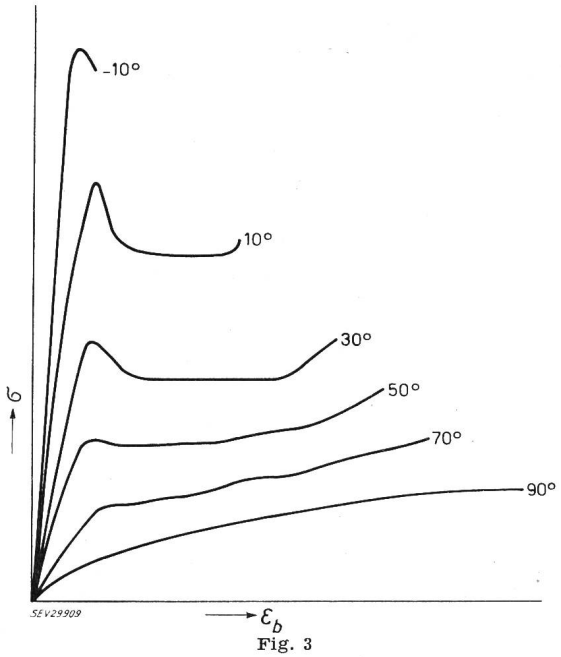

Fig. 3
Thermisches Verhalten von Linearpolymeren
σ Zugspannung; ϵ_b Bruchdehnung

und die Werte beispielsweise von T_S, streben einen Grenzwert für unpolare Stoffe an (Fig. 5). Die Wirkung des Individuums, hier des Dipols, geht in der Masse, hier der Kettenatome, verloren.

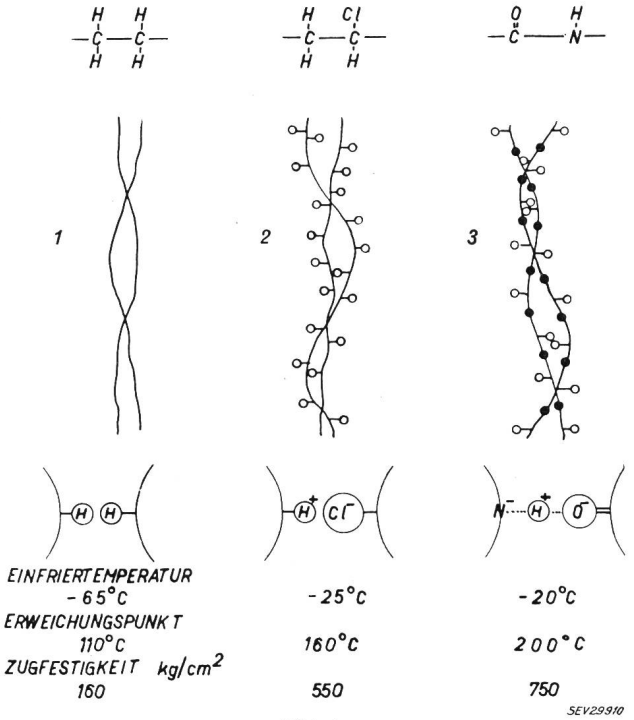

Fig. 4
Einfluss der chemischen Konstitution auf Bindungskraft
1 Polyäthylen; *2* Polyvinylchlorid; *3* Polyamid (Nylon)

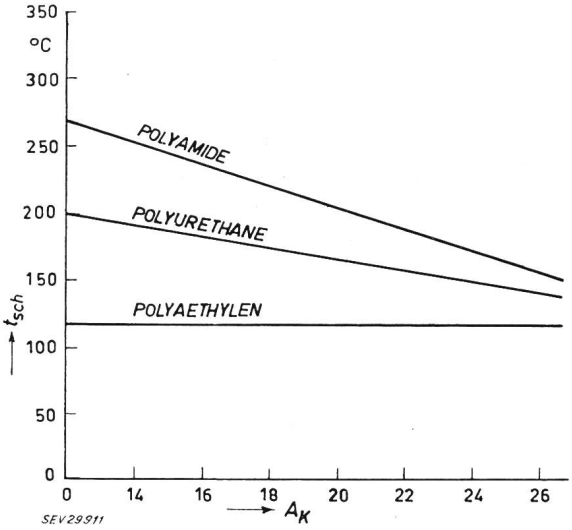

Fig. 5
Schmelzpunkt als Funktion der Anzahl polarer Gruppen
t_{sch} Schmelzpunkt; A_K Zahl der Kettenatome im Grundmolekül

2.2 *Molekulare Struktur*

Als wichtigste Parameter sind hier zu erwähnen das Molekulargewicht, d. h. die Kettenlänge, die Molekulargewichtsverteilung (alle technischen Produkte bestehen aus einem Gemisch von Ketten verschiedener Länge), Kettenverzweigungen und Kettenendgruppen. Generell kann festgestellt werden, dass die mechanische Festigkeit mit wachsendem Molekulargewicht ansteigt, weil Verknäuelungen und Haftpunkte pro Makromolekül zunehmen, wie dies in Fig. 6 schematisch angedeutet ist. Über die Einflüsse der Molekulargewichtsverteilung lassen sich zur Zeit nur qualitative Angaben machen. So wirken niedermolekulare Anteile schon in geringen Mengen ungünstig auf die Schlagbiegefestigkeit, während umgekehrt wenige, sehr lange Moleküle die Zähigkeit eines Thermoplasten verbessern. Die Gründe, warum hier fundierte Zusammenhänge fehlen, liegen vor allem in den ausserordentlichen präparativen Schwierigkeiten, geeignete Modellsubstanzen mit vorgegebener, definierter Molekülstruktur in genügender Reinheit darzustellen.

2.3 *Übermolekulare Struktur*

Eine spezifische Anordnung der Fadenmoleküle im Verband ist sowohl durch äussere wie durch innere Kräfte möglich. Äussere Kräfte spielen vor allem bei der Formgebung eine sehr grosse Rolle. Das Spritzen durch eine Düse oder Spalt, das Kalandrieren auf einer Walze und andere Verformungsprozesse ergeben sog. Verformungstexturen, die die mechanischen Eigenschaften sehr stark richtungsabhängig beeinflussen können. Ein etwas grobes Beispiel der Verformungstextur kann man beim Spaghetti-Essen beobachten. Auf der Anrichteplatte befinden sich die Spaghetti in vollständig ungeordnetem Zustand kreuz und quer ineinander verschlungen. Diese Anordnung bezeichnet der Kunststoffchemiker als Wattebauschstruktur. Beim Schöpfen wird durch Zugbewegung eine gewisse

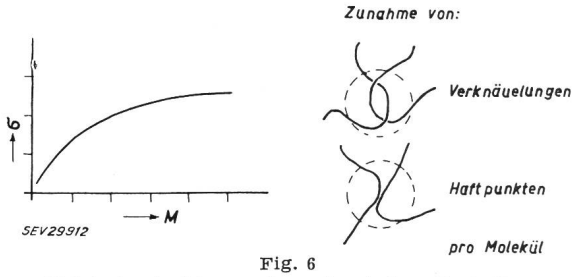

Fig. 6
Molekularstruktur und mechanisches Verhalten
σ mechanische Festigkeit; M Molekulargewicht

Parallel-Lagerung erzwungen und führt zu teilweise geordneten Kettenbündeln. Wenn schliesslich die Spaghetti mit der Gabel kunstvoll aufgerollt werden, wird eine weitgehende Parallel-Orientierung erreicht, d. h. es wird ungefähr der gleiche übermolekulare Ordnungszustand erhalten wie er sich beim Recken einer Folie, etwa aus Polystyrol, einstellt.

Eine spezifische Ordnung durch innere Kräfte tritt vor allem dann auf, wenn das Fadenmolekül sehr symmetrisch gebaut ist und damit die Bildung kristalliner Bereiche ermöglicht wird. Es lassen sich dabei zwei Ordnungsmöglichkeiten unterscheiden. Im einen Fall besteht der kristalline Bereich aus parallel gelagerten, im andern aus parallel gefalteten Ketten, wie dies in Fig. 7 schematisch angedeutet ist. Wesentlich ist, dass das gleiche Fadenmolekül sich über kristalline und amorphe Bereiche erstreckt. Ein sehr schönes Beispiel über die Einflüsse der Kristallinität bietet das Polyäthylen. Je nach dem Herstellungsverfahren sind die Kettenmoleküle des Polyäthylens mehr oder weniger verzweigt, d. h. mehr oder weniger symmetrisch gebaut. Mit Hilfe der heute zur Verfügung stehenden

physikalischen Untersuchungsmethoden ist es möglich, die Mittelwerte verschiedener Strukturparameter zu bestimmen. In Tab. III sind für drei handelsübliche Typen von Polyäthylen die Zahl der Verzweigungen pro 1000 C Atome und der Grade der Kristallinität zusammengestellt. Je geringer die Kettenverzweigungen, d. h. je grösser die Symmetrie des Makromoleküls, desto grösser ist die Kristallinität. Die Einflüsse der Kettenverzweigung und damit der Kristallinität auf die mechanischen Eigenschaften sind für ein Niederdruck-Polyäthylen (*1*) und für ein Hochdruck-Polyäthylen (*2*) (schematische Darstellung des Fadenmoleküls) in Fig. 8 in Funktion der Temperatur dargestellt. Aus dem Diagramm ist erkennbar, dass bei Produkten hoher Kristallinität der Schmelzbereich und damit die zulässige Gebrauchstemperatur deutlich erhöht wird.

Vergleich verschiedener Polyäthylene

Tabelle III

	Polyäthylen		
	A	B	C
Dichte, g/cm³	0,91...0,92	0,93...0,95	0,96
Doppelbindungen / 1000 C-Atome	0,6	0,7	1,5
Methylgruppen / 1000 C-Atome			
Total	21,5	3	1,5
Endgruppen	4,6	≈2	1,5
Methyl-Seitenketten	≈2,5	—	—
Aethyl-Seitenketten	14,4	1	1
Kristallinität in %, durch Röntgenstrahlen bestimmt	64	87	93
Kristallinität in %, durch Kernresonanz bestimmt	65	84	93
Kristallgrösse, A	190	360	390

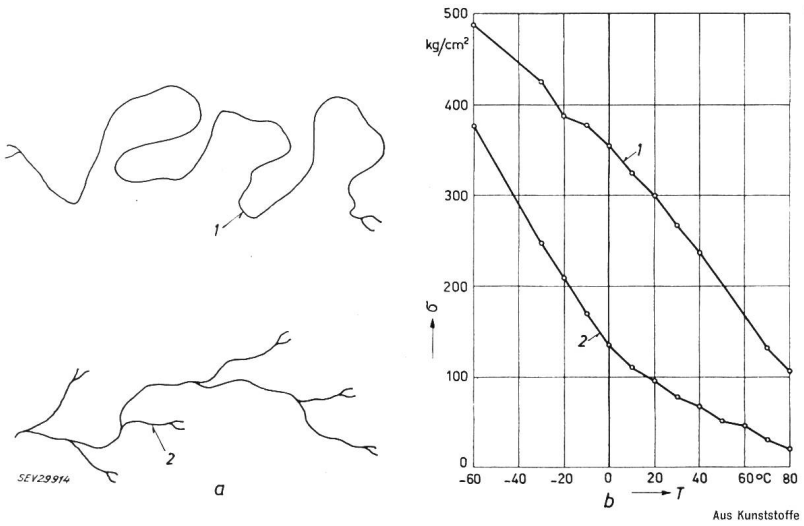

Fig. 8
Struktur, Kristallinität und mechanische Eigenschaften
a Molekülbau, schematisch; *b* Zugfestigkeit σ / Temperatur *T*
1 Niederdruckpolyäthylen
2 Hochdruckpolyäthylen

Nun gibt es zahlreiche Thermoplaste, deren Grundmoleküle bereits asymmetrisch gebaut sind, so dass beim Zusammenketten verschiedene Anordnungen in der Kette möglich sind, und somit stark asymmetrische Fadenmoleküle mit sehr geringer Kristallisationstendenz entstehen. Mit Hilfe bestimmter Katalysatoren ist es vor etwa 10 Jahren zum ersten Mal gelungen, derartige asymmetrische Monomere stereo-spezifisch, d. h. in einer bestimmten Anordnung, zu polymerisieren (stereo-spezifische Polymerisation bzw. stereo-spezifische Polymerisate), und auf diese Weise symmetrisch gebaute Kettenmoleküle mit grosser Kristallisationstendenz zu synthetisieren. Der Aufbau dieser ausserordentlich interessanten Kunststoffe kann im wesentli-

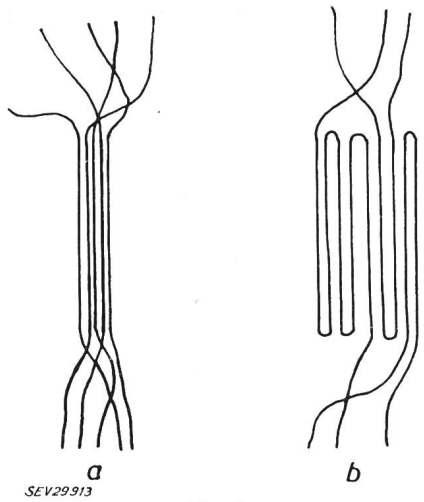

Fig. 7
Bildung kristalliner Bereiche bei Linearpolymeren
a Parallel-Lagerung; *b* parallel gefaltet

chen an einem einfachen Beispiel erläutert werden. Das Monomer sei ein Eisenbahnwagen, im einen Fall mit dem Gang in der Mitte (symmetrisches Grundmolekül) im andern Fall mit einem Seitengang (asymmetrisches Grundmolekül). Im ersten Fall (Gang in der Mitte) kann man die Wagen beliebig zusammenhängen, es entsteht immer eine Wagenkette von symmetrischem Bau. Ein Beispiel für diese Art der Anordnung ist das Polyäthylen, das Teflon u. a. m. Im zweiten Fall sind grundsätzlich verschiedene Anordnungen möglich. Man kann die Wagen so zusammenhängen, dass der Gang immer auf der gleichen Seite liegt. Die Wagenkette ist symmetrisch gebaut und man spricht übertragen auf molekulare Dimensionen von sog. isotaktischen Polymeren, die eine grosse Kristallisationstendenz aufweisen. Das andere Extrem liegt dann vor, wenn die Wagen völlig statistisch aneinander gereiht werden, so dass sich die Gänge links und rechts in Zugrichtung betrachtet ungeordnet verteilen. Bei der Polymerisation asymmetrischer Grundmoleküle nach den üblichen Verfahren ist diese Anordnung bevorzugt. Es enstehen sog. ataktische Polymerisate mit sehr geringer Kristallisationstendenz. Zwischen diesen beiden Extremfällen gibt es noch zahlreiche Möglichkeiten einer geordneten Einreihung der Wagen, etwa in dem Sinne, dass beim einen Wagen der Gang rechts, beim nachfolgenden links angeordnet ist, und diese regelmässige wechselnde An-

ordnung für die ganze Wagenkette gleich ist. Übertragen auf die Polymerisation spricht man hier von sog. syndiotaktischen Polymerisaten, die ebenfalls Kristallisationstendenz aufweisen. Die Variationsmöglichkeiten bei der Herstellung sind genau wie beim Beispiel der Eisenbahnwagen ausserordentlich mannigfaltig und es ist möglich, praktisch jeden beliebigen Grad der Kristallinität zu erreichen. Die Entdeckung der stereo-spezifischen Polymerisation darf als eine der fruchtbarsten Entwicklungen in der Kunststoffchemie bezeichnet werden. Der grosse Einfluss auf den Schmelzpunkt und damit auf die maximale Gebrauchstemperatur ataktischer (amorph) und isotaktischer (kristallin) Polymeren ist aus Tab. IV ersichtlich. Die Unterschiede sind

Schmelztemperatur T_S stereo-spezifischer Polymerisate

Tabelle IV

Polymere	Ataktisch		Isotaktisch	
	Dichte gcm^{-3}	Schmelzpunkt °C	Dichte gcm^{-3}	Schmelzpunkt °C
Polypropylen	0,85	−35	0,92	160...170
Polystyrol	1,05	85	1,08	230

derart gross, dass, obschon chemisch die gleichen Verbindungen vorliegen, von ganz verschiedenen Werkstoffen gesprochen werden darf, deren Festigkeitseigenschaften bei gleichen Temperaturen sich wesentlich unterscheiden. In Tab. V sind ergänzend die Einflüsse einiger wichtiger Strukturparameter zusammengestellt.

Strukturparameter und Eigenschaften von Linear-Polymeren

Tabelle V

Eigenschaften	Strukturparameter
Bruchfestigkeit Bruchdehnung	Orientierung Kristallinität Kettenlänge
Zähigkeit	Kettenverteilung (Anteil langer Ketten günstig)
Sprödigkeit	Hohe Kristallinität Sphärolithstruktur
Schlagbiegefestigkeit	Molekulargewichtsverteilung
Plastizität	Zusätze, die Bindung zwischen den Ketten lockern (Weichmacher, Verzweigungen)
Zeiteffekte Kriechen elastische Erholung Spannungsrelaxation	 Kristallisation molekulare Beweglichkeit niedermolekulare Zusätze
Schmelzpunkt Einfriertemperatur Löslichkeit zu Quellbarkeit	chemische Konstitution Orientierung Verhältnis kristallin zu amorph
Witterungsbeständigkeit (Oxydation, U. V.)	chemische Konstitution

3. Strukturparameter und dielektrische Eigenschaften

Im Folgenden sollen nur diejenigen dielektrischen Eigenschaften berücksichtigt werden, bei denen auf Grund der heutigen Erkenntnisse eindeutige strukturelle Zusammenhänge existieren. In diesem Sinne sollen Eigenschaften, wie etwa die Durchschlagfestigkeit und die Kriechstromfestigkeit, die beide nur über eine Zerstörungsprüfung ermittelt weden können und damit von vielen äusseren Bedingungen abhängen, nicht besprochen werden.

Am besten untersucht sind die Zusammenhänge zwischen Struktur und Dielektrizitätskonstante, Verlustfaktor und Gleichstromleitfähigkeit. Die wichtigsten Strukturparameter sind dabei:

a) chemische Konstitution (Anzahl polarer Gruppen sowie deren Dipolmoment), und
b) innere Viskosität (Beweglichkeit von Dipolen und vorhandenen Ionen unter Berücksichtigung der gegenseitigen feldmässigen Beeinflussung).

Zahlreiche Ergebnisse über mikrobrownsche Bewegungen in makromolekularen Stoffen sind mit Hilfe von Verlustwinkelmessungen in Funktion der Temperatur und der Frequenz gewonnen worden. Bei der Betrachtung der dielektrischen Eigenschaften ist eine Aufteilung in Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste nur bedingt richtig. Als weitere Unterteilung ist eine Trennung in polare und unpolare Stoffe zweckmässig, insbesondere bei den Gruppen der thermoplastischen Kunststoffe. Da es heute, vom Verbraucherstandpunkt aus gesehen «leider» noch keine unpolaren Duroplaste als technisch brauchbare Erzeugnisse gibt, bilden die Duroplaste in dieser Hinsicht auch bezüglich ihrem dielektrischen Verhalten zur Zeit noch eine abgeschlossene Gruppe. Das generelle Verhalten etwa des Verlustfaktors in Funktion der Temperatur (auch in Funktion der Frequenz ergibt sich ein ähnliches Bild) ist für die beiden wichtigsten Gruppen in Fig. 9 dargestellt. Der Einfluss der chemi-

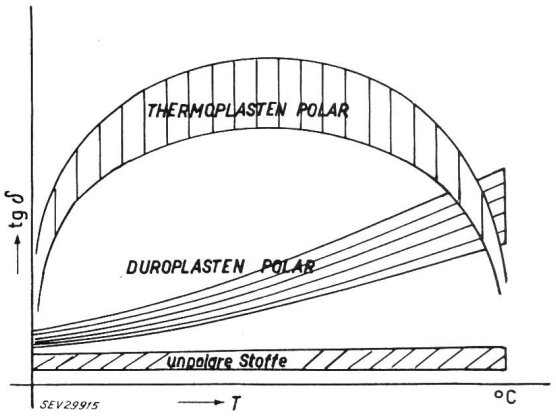

Fig. 9
Generelles Verhalten des Verlustfaktors tg δ in Funktion der Temperatur T

schen Konstitution geht am schönsten aus Versuchen hervor, wo am Grundmolekül oder am Makromolekül die Polarität verändert wird. Derartige Versuche sind auch an der AfiF [1]) an Phenolharzen durchgeführt worden und zwar durch Verätherung der stark polaren Hydrosylgruppe des Phenols an 3-...4kernigen Grundmolekülen. Aus Fig. 10 ist ersichtlich, wie mit zunehmender Verätherung (Ver-

[1]) *AfiF* Abteilung für industrielle Forschung des Institutes für technische Physik der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich.

kleinerung des Dipolmomentes) die dielektrischen Verluste herabgesetzt werden können. Auch am Makromolekül selbst und zwar am Festkörper sind derartige chemische Veränderungen möglich. Ein Beispiel dieser Art ist etwa die Acetylierung der Cellulosefaser oder direkt von Papier.

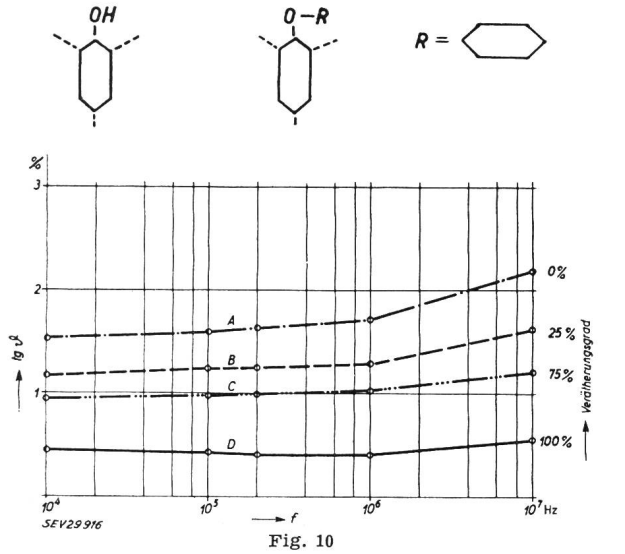

Fig. 10

Prozentuale dielektrische Verluste tg δ in Funktion der Frequenz *f* bei verschiedenen Verätherungsgraden

A alle Hydroxylgruppen vorhanden; *B* 25 % Hydroxylgruppen vorhanden; *C* 75 % Hydroxylgruppen vorhanden; *D* keine Hydroxylgruppen vorhanden

Die generellen Zusammenhänge zwischen Beweglichkeit (Einstellbewegung der Dipole mit ihrer Umgebung zu einem äusseren Wechselfeld) sind vor allem bei polaren weichgemachten Thermoplasten untersucht worden. Die Relatationspektren in Funktion der Temperatur sind wegen der starken Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur verhältnismässig scharf und können beispielsweise direkt zu Vergleichsprüfungen von Kabelisolationen herangezogen werden. Noch eindeutiger werden die Aussagen, wenn die Abhängigkeit des Verlustwinkels in Funktion der Temperatur und Frequenz als räumliches Kurvengebilde in Form eines Reliefs dargestellt werden. Aus derartigen Reliefs können über Wirkung von Weichmachern, Stabilisatoren, Füllstoffen usw. in Thermoplastmischungen, wie auch über verschiedene Qualitäten der Thermoplaste selber sehr viele Informationen gewonnen werden. Fig. 11 zeigt den Einfluss der Weichmacherkonzentration auf den Verlauf der Verlustfaktorkurve in Funktionen der Temperatur. Das Verlustwinkelmaximum verschiebt sich mit zunehmendem Weichmachergehalt (grössere Beweglichkeit der Dipole) nach tieferen Temperaturen.

Neben polaren Gruppen sind es vor allem in technischen Produkten die ionogenen Verunreinigungen, welche die dielektrischen Eigenschaften beeinflussen. Hier wird neuerdings versucht Messungen des Gleichstromwiderstandes zur Deutung der Bewegungsvorgänge im festen Zustand heranzuziehen. Der Beginn der mikrobrownschen Beweglichkeit (T_E) zeigt sich bei vielen Thermoplasten als scharfer Knickpunkt des Gleichstromwiderstandes. Die Messung der Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes erlaubt ferner Aussagen über die Aktivierungsenergien von Platzwechselvorgängen zu machen, die mit den aus Diffusionsmessungen ermittelten sehr gut übereinstimmen.

Die bisherigen Ausführungen verfolgten den Zweck, anhand einiger Beispiele auf gewisse Zusammenhänge zwischen Aufbau und Eigenschaften von Kunststoffen hinzuweisen. In Anbetracht des sehr komplexen Gebietes sind die Darlegungen unvollständig und summarisch und sollen eigentlich

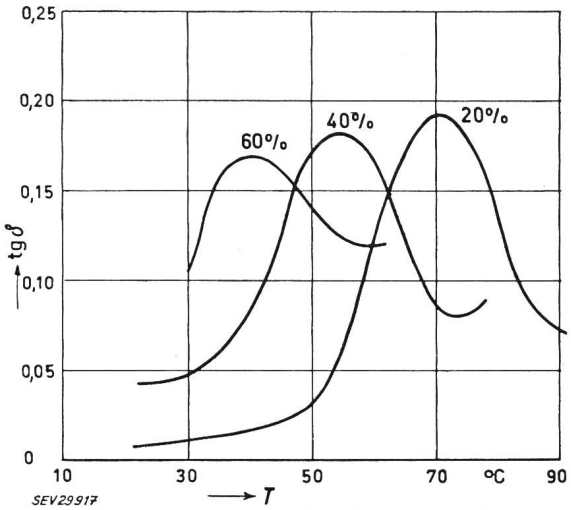

Fig. 11

Einfluss der Weichmacherkonzentration auf den Verlustfaktor tg δ in Funktion der Temperatur *T*

nur zeigen, dass die Erkenntnisse auf diesem Gebiet der Kunststoffentwicklung sowohl für den Hersteller wie für den Verbraucher von gleich grosser Bedeutung sind. Wenn man heute noch lange nicht imstande ist mit Hilfe einer quantitativen Theorie die technologischen und physikalischen Eigenschaften eines hochpolymeren Körpers aus seiner molekularen Struktur abzuleiten, so ist das bisher gesammelte Material über die Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Struktur zur Beurteilung und Weiterentwicklung der Kunststoffe von grossem Wert. Der heutige Stand lässt eines klar erkennen: Der stille Wunschtraum des Verbrauchers nach einem Universalkunststoff, der alle guten Eigenschaften, sowohl als Werkstoff wie auch verarbeitungstechnisch vereinigt, wird kaum in Erfüllung gehen. Die Zahl, aber auch die Qualität, bzw. Eignung für ein spezielles Anwendungsgebiet, wird ständig zunehmen. Wenn die Fachkenntnisse des Verbrauchers mit der Entwicklung Schritt halten, darf die Zukunft der Kunststoffe in jeder Beziehung optimistisch beurteilt werden.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. sc. techn. *F. Held*, Abteilung für industrielle Forschung (AfiF) des Institutes für technische Physik der ETH, Gloriastrasse 41, Zürich 7/6.