

6 Nichtmechanische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen

6.1 Thermische Eigenschaften

Stoffkennwerte

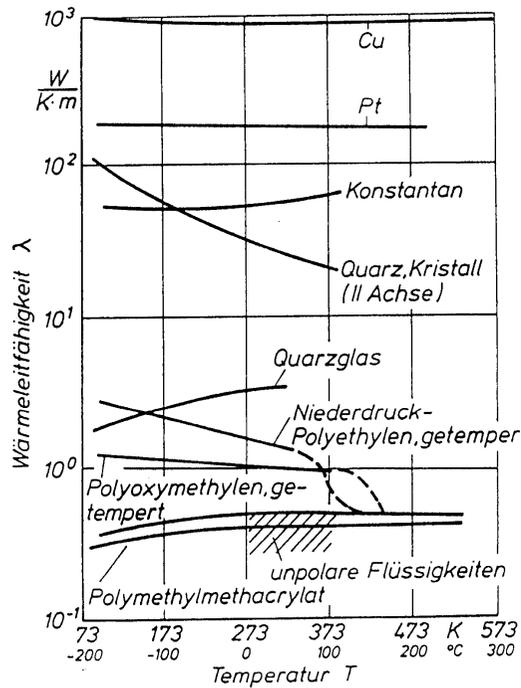
– **Wärmeleitfähigkeit**

$$\lambda \approx c_p \cdot \rho \cdot u \cdot l$$

- c_p spez. Wärme
- ρ Dichte
- u Schallgeschwindigkeit
- l Molekülabstand

amorphe Polymere,
Duroplaste

Verhalten wie eingefrorene
anorganische Gläser bis T_g ,
dann wie organische Flüssigkeiten



Wärmeleitfähigkeit verschiedener Kunststoffe

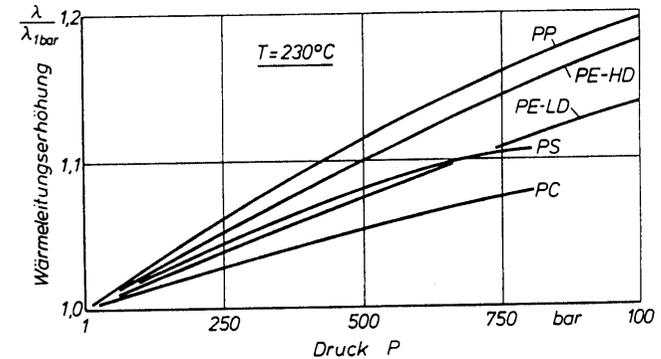
(nach W. Knappe)

teilkristalline Thermoplaste:

Wärmeleitfähigkeit auf Grund höherer Dichte im festen Zustand eine Größenordnung besser

Polymerschmelzen:

λ wie bei org. Flüssigkeiten; Zunahme mit Druck



Änderung der Wärmeleitfähigkeit bei steigendem Druck

(nach Dietz)

gefüllte Kunststoffe:

anorganische Füllstoffe verbessern meist λ

Mischungsregel nach Knappe

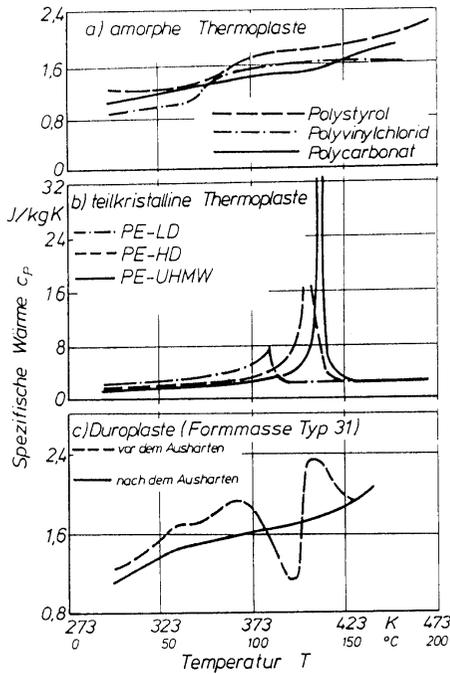
$$\lambda_M = \frac{2\lambda_H + \lambda_F - 2\phi_F(\lambda_H - \lambda_F)}{2\lambda_H + \lambda_F + 2\phi_F(\lambda_H - \lambda_F)} \cdot \lambda_H$$

- λ_M Wärmeleitfähigkeit des Gemisches
- λ_H Wärmeleitfähigkeit der Matrix
- λ_F Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffs
- ϕ_F Volumenanteil des Füllstoffs

– Spezifische Wärme

Temperaturabhängigkeit

- im Gebrauchstemperaturbereich nur geringe Änderung
- bei teilkristallinen Thermoplasten Unstetigkeit bei Kristallitschmelztemperatur
- ausgehärtete Duroplaste ähnlich amorphen Thermoplasten



Spezifische Wärme von Kunststoffen

(nach W. Knappe)

- Copolymere

$$c_p = \sigma_1 \cdot c_{p1} + \sigma_2 \cdot c_{p2}$$

σ Molanteil

– Dichte

Temperaturabhängigkeit

$$\rho(T) = \rho(T_0) \frac{1}{1 + \alpha(T - T_0)}$$

T_0 Bezugsstemperatur

α lineare Wärmedehnzahl

gilt für lineare Abschnitte (T_g, T_m beachten!)

bei Stoffkombinationen:

Polymer/anorg. Füllstoff

$$\rho(T) = \frac{\rho_K(T)\rho_F}{\psi\rho_K(T) + (1-\psi)\rho_F} \quad (\text{Mischungsgleichung})$$

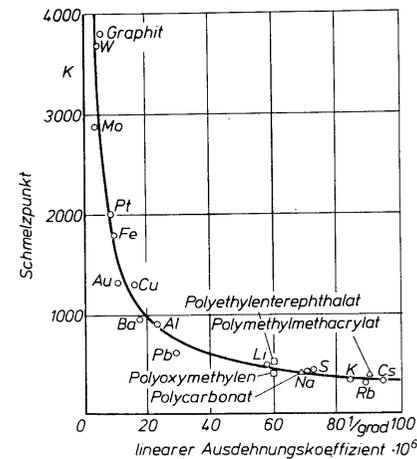
ρ_K Dichte Kunststoff

ρ_F Dichte Füllstoff

ψ Masseanteil

– Wärmeausdehnung

- Zusammenhang mit Schmelzpunkt



Wärmeausdehnung von Metallen und Kunststoffen bei 20 °C (293 K)

(nach W. Knappe)

- Ausdehnungskoeffizient im Anwendungsbereich nahezu T-unabhängig; bei Polyolefin: $1,5 \dots 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

- Fasern und Füllstoffe setzen Wärmeausdehnung herab

Pulver, Kurzfasern $\alpha_C = \alpha_K (1-\phi_F) + \alpha_F \phi_F$ F: Füllstoff

durchgehende Armierung Ausdehnung der Fasern maßgebend

Schichtlamine Kontinuumstheorie (Thebing)

Glastemperatur

- von **Nebenvalenzkräften** abhängig, also durch LM, Weichmacher, Gleitmittel, Stabilisatoren u. a. erniedrigt

$$T_{gc} = \frac{\phi_p \cdot \alpha_p \cdot T_{gp} - (1-\phi_p) \cdot T_{gL}}{\phi_p \cdot \alpha_p + (1-\phi_p) \alpha_L}$$

α Wärmeausdehnungskoeffizient

ϕ Volumenanteil des Polymers

Index p Polymer

Index L LM, Weichmacher, Gleitmittel usw.

Index c Gemisch

T_{gL} Einfriertemperatur des LM

- Faustregel:

1 Vol. % Gleitmittel senkt T_g um 2K

Kalorische Daten

thermische Zersetzung

- Kettenbruch, Abspaltung von Substituenten, Oxidation (z. B. HCl-Bildung, toxische Gase)

- Thermogravimetrie** (TGA, TG)

Prüfling in Luft oder Schutzgas auf hochempfindlicher Waage erwärmt → Masseänderung verfolgt

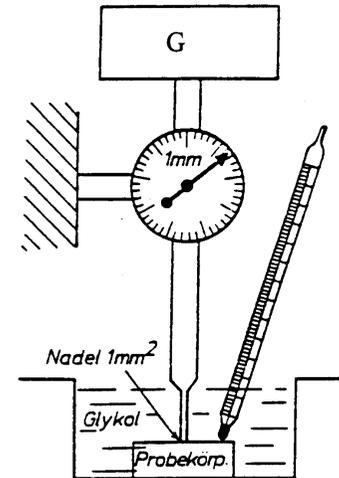
- Ofentest (Farbänderung)

Wärmeformbeständigkeit

Vicat-Temperatur DIN 53460

Martens-Temperatur DIN 53458/53462

Heat-Distortion-Temperatur



Apparatur zur Bestimmung der Wärmeformbeständigkeit (nach BASF)

Vicat-Temperatur: Temperatur, bei der Nadel 1 mm tief eindringt

Dauereinsatzgrenze von Thermoplasten: ca. 15 K unter Vicat-Temperatur

Thermoanalyse

- Differential-Thermoanalyse** (DTA)

Untersuchungen von **schnell ablaufenden Reaktionen**
meist dynamische Messung (lineare Temperaturänderung);
hauptsächlich Bestimmung von **Übergangstemperaturen**

- Differential-Scanning-Calorimetrie** (DSC)

Thermoelemente sitzen nicht in Probe;

Probe in Al-Pfännchen, das außen von Thermoelementen berührt

Schmelztemperatur, Schmelzwärme

Kristallisationsgrad

$$\chi = \frac{\Delta H_{sc}}{\Delta H_c}$$

ΔH_{sc} Schmelzwärme des Pol.

ΔH_c Schmelzwärme der 100 %ig kristallinen Probe

Glastemperatur

spezifische Wärme

Reinheit

thermische Stabilität

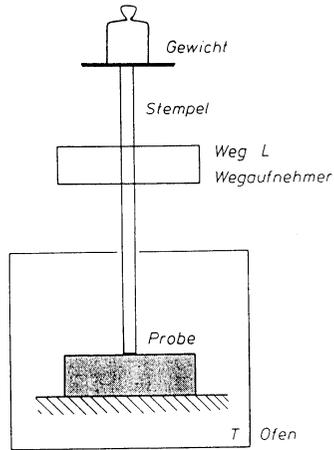
- **thermomechanische Analyse (TMA)**

Bestimmung der Wärmeformbeständigkeit:

Probe linear aufgeheizt
hohe Genauigkeit
gleichzeitig lineare Dilatometrie möglich → Einfrier-Temperatur und Wärmeausdehnungskoeffizient α

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T}$$

bei isotropen Stoffen kubischer Ausdehnungskoeffizient $\gamma = 3\alpha$



Thermomechanische Analyse TMA (Schema)

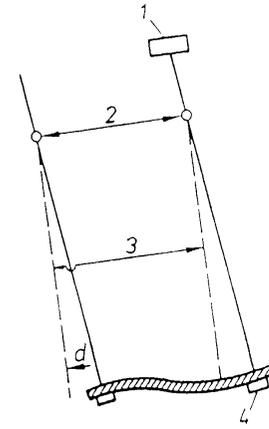
(nach G. Menges)

- **dynamisch-mechanische Analyse (DMA)**

Biegeeinrichtung für Flachstäbe in Temperierkammer;

4 verschiedene Beanspruchungen:

- Schwingung unter fester Frequenz
- Schwingung unter Resonanzfrequenz
- statisch als Spannungsrelaxation
- statisch als Kriechen



- 1 Elektromagnetischer Antrieb zum Aufbringen der Belastung,
- 2 Drehzapfen,
- 3 Nulllage gestrichelt (Probe ohne Verformung),
- 4 Befestigung der Probe,
- d Verschiebung, welche die Deformation der Probe bewirkt

DMA-Meßgerät

(nach Du Pont)

Elektrische Eigenschaften

6.2 Dielektrisches Verhalten

- Übliche Polymere nahezu keine Elektronenleitfähigkeit → deshalb hängen elektrische Eigenschaften besonders von Beweglichkeit der Molekülbausteine ab.

- **relative Dielektrizitätszahl ϵ_r**

$$C = \epsilon_r \cdot C_0 = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A / d$$

- C Kapazität
- C_0 Kap. im Vakuum
- ϵ_0 Dielektrizitätszahl im Vakuum
- A Fläche der Kondensatorplatte
- d Plattenabstand

ϵ_r abhängig vom Werkstoff des Dielektriums, Temperatur und Frequenz

- **dielektrische Polarisation:**

- **Flächenladungsdichte der Polarisationsladungen P**

$$P = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot E$$

- χ dielektrische Suszeptibilität
- E Feldstärke

χ ist Maß für Polarisierbarkeit des Stoffes

- Polarisation eines Dielektrikums im elektrischen Feld entsteht insbesondere durch Verschiebungs- und Orientierungspolarisation

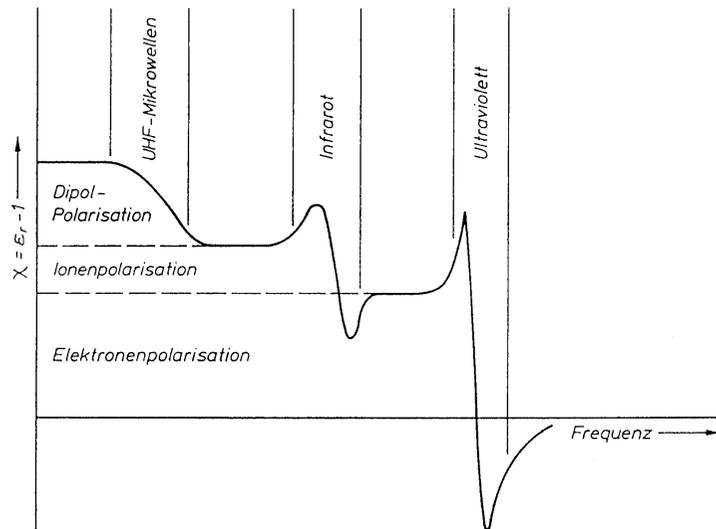
Verschiebungspolarisation: Verzerrung der Ladungen in Feldrichtung (Elektronenpolarisation; Ionenpolarisation)

Orientierungspolarisation: Ausrichtung von Molekülen im el. Feld infolge Dipolmoment → dauert um so länger, je viskoser Medium: in hochfrequenten Wechselfeldern deshalb dielektrische Relaxation

→ führt zu dielektrischen Verlusten und äußert sich bei polaren Molekülen in dielektrischer Erwärmung

Dipolpolarisation:

polare Kunststoffe besitzen permanente Dipole (PVC, C=O-Gruppen)
→ in Wechselfeldern dielektrische Verluste



Frequenzabhängigkeit der Polarisationsanteile

(nach Herspings)

bei Polymeren existieren also **mehrere Dispersionsgebiete**

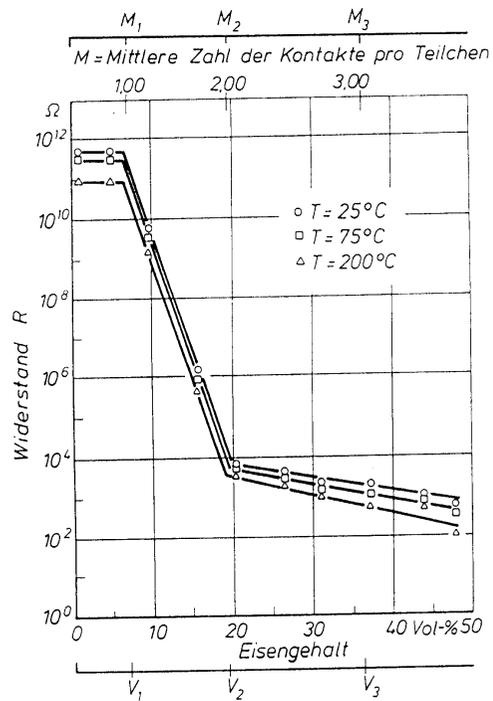
$$\tan \delta = \frac{I_w}{I_b}$$

I_w Wirkstrom
 I_b Blindstrom

- **unpolare Kunststoffe** (PTFE, PE, PS) $\tan \delta < 0,0005$
- **polare Kunststoffe** (PVC) $\tan \delta = 0,001 \dots 0,02$
- **Duomere**, gefüllt mit Glas, Cellulose $\tan \delta = 0,02 \dots 0,5$
- **Anwendung**
Hochfrequenzisolationen (Antennen, Radarantennen)
→ $\tan \delta$ gering (PE, PS)
dielektrische Erwärmung (Hochfrequenzschweißen, Konfektionierung von PVC-Folien, Kunstleder)

6.3 Elektrische Leitfähigkeit

- Oberfläche von Kunststoffen meist anderen elektrischen Gleichstromwiderstand als Volumen (Verunreinigungen: Staub, Feuchte); besondere Form des Oberflächenwiderstandes: Kriechstromfestigkeit
- **Volumenleitfähigkeit:**
 - **Elektronenleitfähigkeit:** bei üblichen Polymeren kaum
 - **Ionenleitfähigkeit:** sehr schwache Leitfähigkeit von Kunststoffen durch **Platzwechsel von Ionen** (nimmt mit Temperatur rasch zu) → eingeschleppte niedermolekulare Bestandteile, Katalysatoren, Restmonomere → **Diffusion von Ionen in Feldrichtung** (Hoppingmechanismus); gesteigert durch geringere Dichte, größeres Leervolumen und höhere Feuchte
- **Erhöhung der Leitfähigkeit:** Einarbeiten von Ruß oder Metallpulver; sprunghafter Anstieg, wenn Kontaktpfade entstehen



Widerstand R eines mit Metallpulver (Eisen) gefüllten Kunststoffs (nach Herspings)

- **elektrische Durchschlagsfestigkeit:** abhängig von t , T , Belastungsgeschwindigkeit und Frequenz; amorphe Kunststoffe besser als teilkristalline (Baufehler in Sphärolithen), bei Langzeitdurchschlag *Bäumchenbildung* (treeing) oder Lochbildung

Isolationswerkstoffe: sehr rein, enthalten Spannungstabilisatoren (aromat. KW, die in Fehlstellen eindiffundieren)

– **Elektrostatische Aufladung**

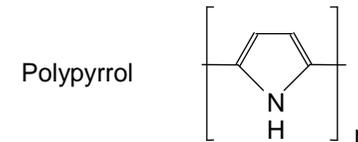
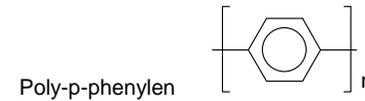
- Folge der hohen Isolationseigenschaften
- Gefahr von Explosionen bei Anwesenheit zündfähiger Gasgemische
- Niederschlagen von Staubpartikeln auf Oberfläche
- **Verhinderung:** leitfähige Füllstoffe (Graphit, Ausrüstung mit hydrophilen Substanzen)

– **Elektrete**

Festkörper mit permanentem elektrischen Feld, das auf eingefrorene Polarisierung zurückgeht (spezielle Folien aus Polyester, PC, PVDF: nach Kaltwalzen → Kondensatormikrofone (piezoelektrisches Verhalten))

– **leitfähige Polymere:**

- **Polymere mit ausgedehntem π -Elektronensystem** ggf. dotiert mit I, AsF_5 , $AgClO_4$, Li (Redoxreaktionen)

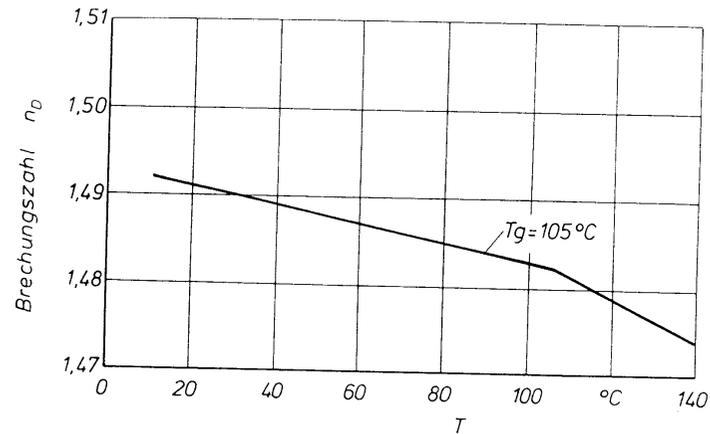


- **erste Anwendungen:** Halbleitertechnik
Elektroden in elektrochemischen Prozessen

6.4 Optische Eigenschaften

Brechungsindex, Brechzahl

- n nimmt bei amorphen Polymeren (organ. Gläsern) mit T ab; bei T_g Knick

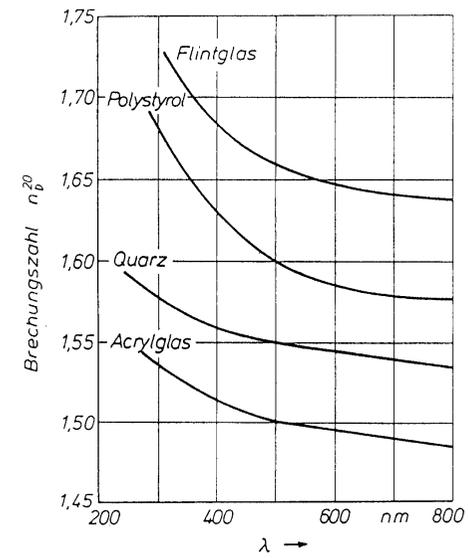


Brechungsanzahl n_D von PMMA ([®]Plexiglas GS 233) in Abhängigkeit von der Temperatur

n_D Brechungsindex beim Licht der Natrium-D-Linie ($\lambda = 589,3 \text{ nm}$)

(nach Arnold)

- Abnahme von n mit steigender λ des Lichtes



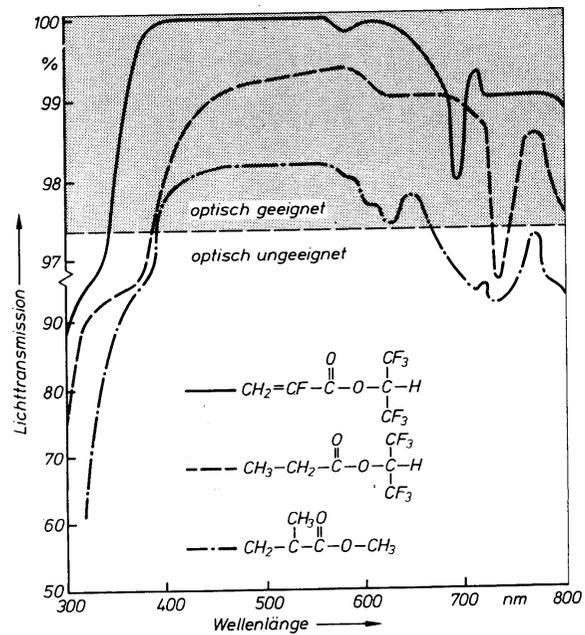
Brechungsanzahl n_D^{20} von organischen und anorganischen Gläsern in Abhängigkeit von der Wellenlänge, gemessen bei 20 °C

(nach Arnold)

- Einsatz von org. Gläsern als Sicherheitsgläser (PC, relativ schlag- und splittersicher), Kronleuchter; für hochwertige optische Gläser nicht geeignet (Kratzempfindlichkeit, unzureichende Dimensionsstabilität, hoher thermischer Ausdehnungskoeffizient)

Absorption, Transmission

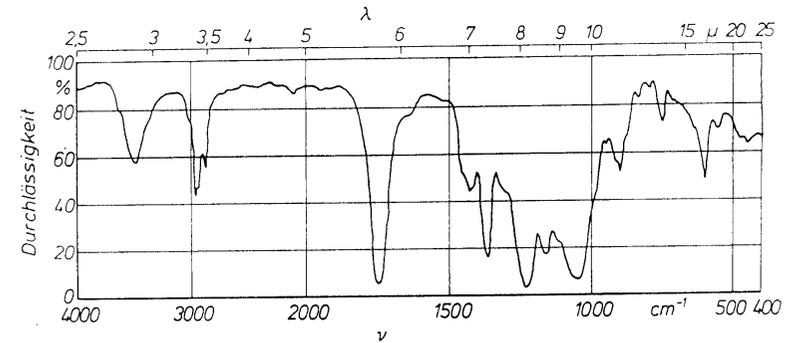
- die meisten Polymere im Bereich des sichtbaren Lichtes keine Absorption → farblos
- Einfärbung möglich
- durch Zusatz von Absorbieren durchlässiger Bereich beliebig einengbar
- Verbesserung der Lichttransmission durch Substitution von H gegen F. Vorteile der **polymeren Lichtwellenleiter**: leichtere Verarbeitung, geringere Empfindlichkeit gegen Vibration als bei Glasfasern



Einfluß von F-Substituenten auf die Lichttransmission (nach Hoechst)

– Infrarotspektroskopie

- wichtigste Methode zur **Bestimmung der molekularen Struktur** von Polymeren
- **Valenz- und Deformationsschwingungen von Molekülen und Molekülgruppen** haben Eigenfrequenzen im IR-Bereich → Absorptionen, "Banden"



IR-Spektrum von PC (Film aus CHCl_3 -Lösung hergestellt)

(nach Schreyer)

- Aufnahme von Folien, Pulver in KBr-Tabletten, Lösungen; ATR-Technik, weitere Reflexionsmethoden

6.5 Akustische Eigenschaften

– Schallgeschwindigkeit:

- sinkt in Polymerschmelzen mit T. und steigt mit p
- Dämpfung bei Polymeren besonders groß → Amplituden nehmen rasch ab
- Maß für Dämpfung stehender Wellen ist der mechanische Verlustfaktor $\tan \delta$
- Anwendung: Lärmbekämpfung mit geschäumten Weichkunststoffen

– Schalldämmung und Schalldämpfung

- Schalldämmung durch Schallreflexion
Schalldämpfung durch Schallabsorption
- Schallreflexion:
schwere und biege weiche Wände: Dämmmatten aus Weich-PVC, gefüllt mit Schwerspat (Ba SO_4);
Antidröhn-Massen (ähnlich), meist zum Aufspritzen
- Luftschalldämpfung:
Schallschluckstoffe: schallweiche Werkstoffe → offenporige Schaumstoffe und Faserstoffe; Absorption durch Umwandlung in Wärme;
offenporige Schaumstoffe aus Harnstoff-Formaldehyd, PUR, PS
- Körperschalldämpfung:
weiche Kunststoffe $T_g < T_{\text{Raum}}$
Entdröhnungsmassen (thermoplastische Kunststoffe und Elastomere mit hoher Haftung zu Blechen)

6.6 Stofftransportvorgänge

Einführung

- Kunststoffe relativ durchlässig für Gase und Flüssigkeiten
wichtig für Verpackungsmaterialien und Beschichtungen (Korrosion)

– Teilprozesse:

- Adsorption (Aufnahme des diffundierenden Stoffes)
- Diffusion
- Desorption (Abgabe an gegenseitiger Oberfläche)

- einfache Gesetze gelten, wenn

- Stoff inert
- Polymer homogenes Kontinuum
- keine Kapillaren, Risse u. ä.
→ selten so gegeben; aber brauchbare Abschätzungen sind möglich

– Sorption

- Adsorption
van der Waalsche Kräfte (physikalische Adsorption)
chemische Affinität (Chemisorption)
elektrostatische WW
- Absorption
Gas in Flüssigkeit oder Feststoff gelöst (nicht nur an Oberfläche gebunden!)
Henrysches Gesetz
 $c_1 = S \cdot p_1$ S Sorptionsgleichgewichtskonstante

– Diffusion

- Ursache: Wärmebewegung der Moleküle; Bewegung durch Zwischenräume mit Konzentrationsgefälle;
Molekülgröße wichtig (Wirkungsquerschnitt)

1. Ficksches Gesetz

$$\frac{dm}{dt} = -D \cdot A \cdot \frac{dc}{dx}$$

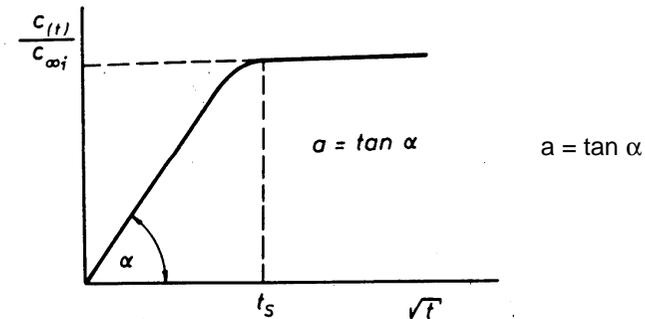
D	Diffusionskoeffizient
m	Masse des diffundierenden Stoffes
t	Zeit
A	verfügbarer Querschnitt
c	Konzentrat. d. diff. Stoffes
x	Richtungskoordinate der Diff.

- **Permeation:**
Molekularer Stofftransport eines Gases durch Membran
- Diffusion ist wärmeaktivierter Prozeß; nach Arrhenius **Diffusionskoeffizient**

$$D = D_0 \cdot e^{-E_D / R \cdot T}$$

E_D	Aktivierungsenergie der Diffusion
D_0	Konstante

- Diffusionskoeffizient aus Sorptionskurven bestimmt



Sorptionskurve (schematisch)

Konstante a (als Steigung)

$$a = \frac{c(t)/c_\infty}{\sqrt{t}} \quad \text{für } t \ll t_s$$

$c(t)$	Konzentration des aufgenommenen Stoffes
c_∞	Sättigungskonzentration

$$\text{daraus } D = \frac{\pi}{16} \cdot s^2 \cdot a^2 \quad s = \text{Wanddicke}$$

- **Mehrschichtfolien** (Verpackungsmaterial)

$$\frac{1}{P_w} = \frac{1}{s} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{X_i}{P_i}$$

P_w	Permeationskoeffizient
s	Laminatdicke
X_i	Dicke der i-ten Schicht
P_i	Permeationskoeffizient der i-ten Schicht

Löslichkeit von Gasen und Dämpfen

Sorptionsgleichgewichtskonstante S abhängig von Art des Gases und dessen Verdampfungs-Temperatur → Verhältnisse ($N_2 = 1$)

H ₂	0,75
N ₂	1,00
O ₂	2,00
CO ₂	25,00

berechnet aus kritischer Temperatur oder Siede-Temperatur

Diffusion von Gasen

$$D = D_0 \cdot e^{-E_D / R \cdot T}$$

E_D abhängig von Wirkungsradius des Gasmoleküls d^2 (d aus Tabellen), Glas-Temperatur des Polymeren und Temperatur

- **Berechnung von D:**
- für Kautschuk

$$\log D = -\frac{E_D}{2,3R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) - 4$$

$T_R = 435$ empirisch gefundene Bezugs-Temperatur

- **amorphe Kunststoffe im Glaszustand**

$$\log D \approx -\frac{E_D}{2,3R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) - 5 \quad T_R = 435 \text{ K}$$

- **teilkristalline und gefüllte Kunststoffe**

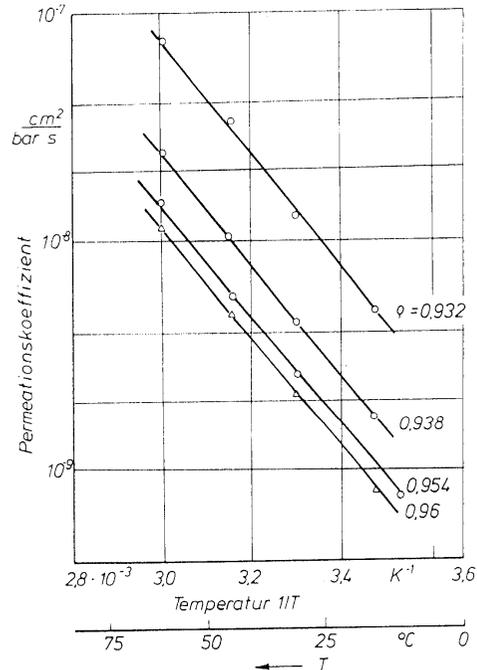
$$D = D_a(1 - \chi_{\text{kristallin}})$$

$\chi_{\text{kristallin}}$ Volumenanteil der kristallinen Phase

D_a Diffusionskoeffizient für das amorphe Polymer

- bei inerten Gasen gute Übereinstimmung

– Permeation verringert sich mit Anstieg von Dichte und Kristallisationsgrad



Permeation von Stickstoff durch Polyethylenfolien verschiedener Dichte ρ in Abhängigkeit von der Temperatur

(nach W. Knappe)

Permeation von Dämpfen

- ~ bei organ. Dämpfen ist $D = f(c)$.
- LM-Moleküle in WW mit Polymeren → Quellung;
- Messungen erforderlich
- ~ bei niedrigen T. Diffusion c-unabhängig
- ~ bei hohen Penetrationswirksamkeiten
- ~ bei $< T_g$ Spannungsrisse
- ~ dazwischen: Übergangsbereich, durch Quellspannungen kontrolliert

Diffusion von Flüssigkeiten (H₂O)

- ~ Mechanismen ähnlich wie bei Dämpfen
- ~ bei H₂O sehr unterschiedliches Verhalten
 - Polymere mit H-Brücken (Cell., PA)
 - Polymere mit pol. Gruppen (PMMA)
 - hydrophobe Pol. (Polyolefine)
 - (hier: Henry'sches Gesetz)

Einwirkung spannungsrisszeugender Medien

- ~ Erweichen, Lösungsvorgänge, Spannungsrissbildung
- Mechanismen:
 - **Erniedrigung der Grenzflächenenergie**
Eindringen entlang der Zonen geringer Dichte (Partikelgrenzen, Füllstoffgrenzflächen, Poren)
 - Haftkräfte herabgesetzt → Grenzflächendehnung sinkt → Mikrorisse und Fließzonen
 - Beispiel:
Netzmittel bei PE
Kapillarkräfte = Triebkraft für Penetrieren und Rissfortschritt
 - **Quellkräfte**
Gewichtszunahme, Volumenvergrößerung
 - **Desorption**
Spontan Zugspannungen, die schnell Rissbildung bewirken
 - **Lösen:**
wenn $\delta_l \rightarrow \delta_p$ (Löslichkeitsparameter Medium bzw. Polymer)
starke Spannungsrissbildung
(insbesondere Monomere des Polymeren)
 - zusätzlich: Herauslösen von Oligomeren und Additiven

Diffusion von Polymermolekülen, Selbstdiffusion

rasche Abnahme der Diffusionsfähigkeit mit M;

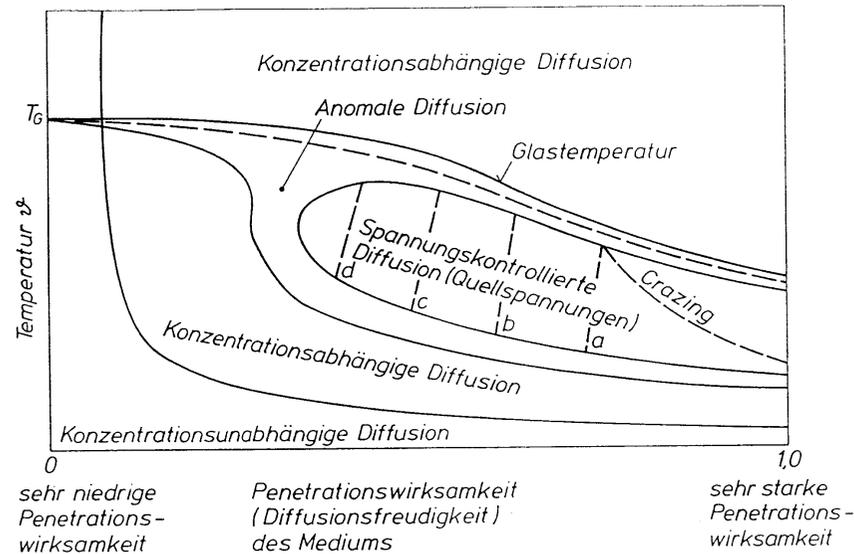
ab $M > 5 \cdot 10^3$ kaum noch Diffusion
(nur noch in porösen Membranen)

Selbstdiffusion:

Bewegung von Polymermolekülen in eigener Schmelze

- in Schmelze (z. B. bei Kristallisation und Nachkristallisation)
- Kleben von Gummi (Tack)
- Diffusionskoeffizient für Selbstdiffusion

$$D \sim \frac{T}{\eta}$$



sehr niedrige Penetrationswirksamkeit

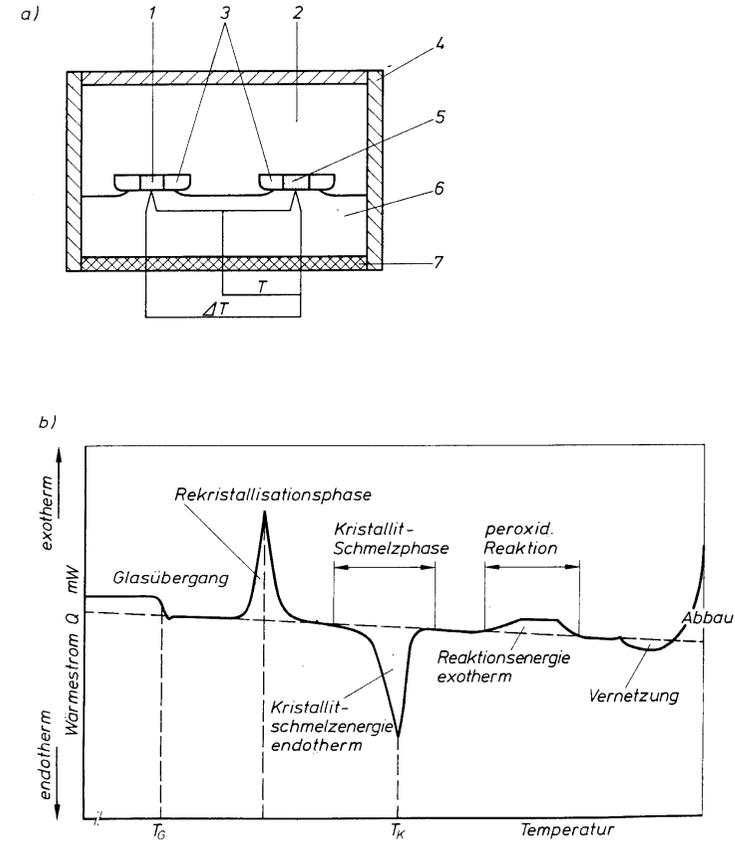
Penetrationswirksamkeit (Diffusionsfreudigkeit) des Mediums

sehr starke Penetrationswirksamkeit

Konzentrationsabhängige Diffusion von amorphem Polymeren (qualitativ und schematisch)

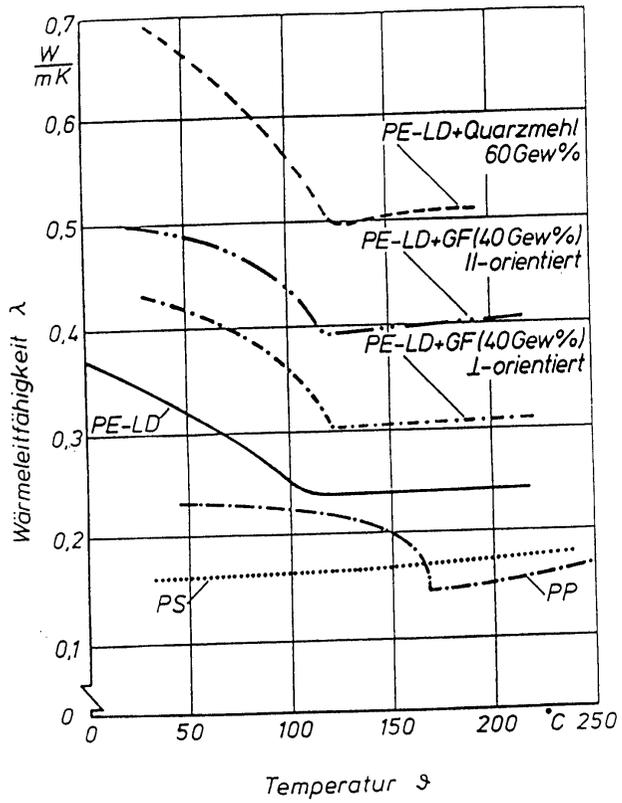
a, b, c, d = Linien gleicher Aktivierungsenergie

(nach Frisch und Hopfenberg)



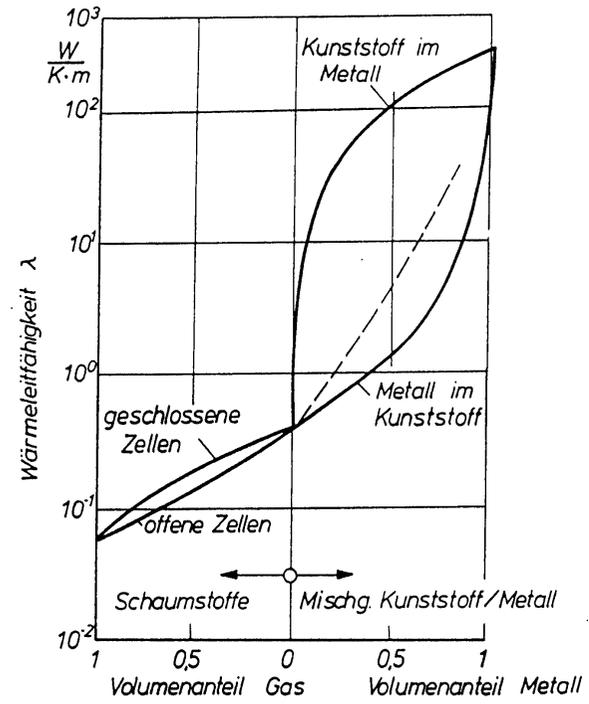
DSC-Meßeinrichtung (a) (Prinzipbild nach Du Pont) und typischer DSC-Messschrieb (b) Erläuterungen siehe Text
1 Probe, 2 Inertgasatmosphäre, 3 Pfännchen, 4 Druckkammer, 5 Vergleichsprobe, 6 Konstantanblock, 7 Heizung

(nach G. Menges)



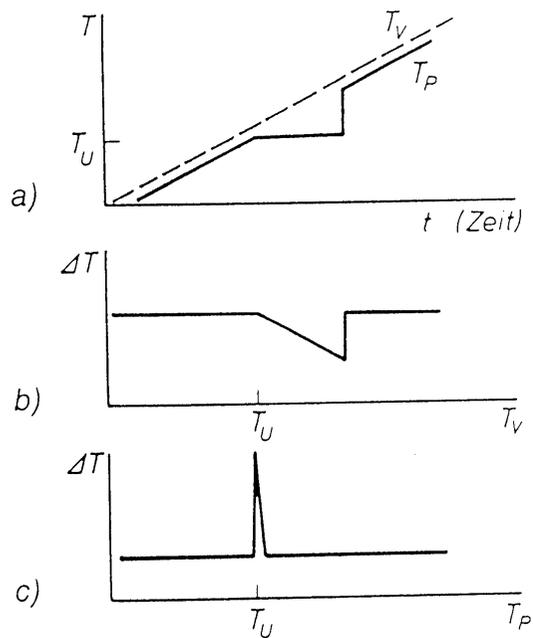
Füllstoffeinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit

(nach E.W. Fischer)



Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen, gefüllt mit Gas oder Metall

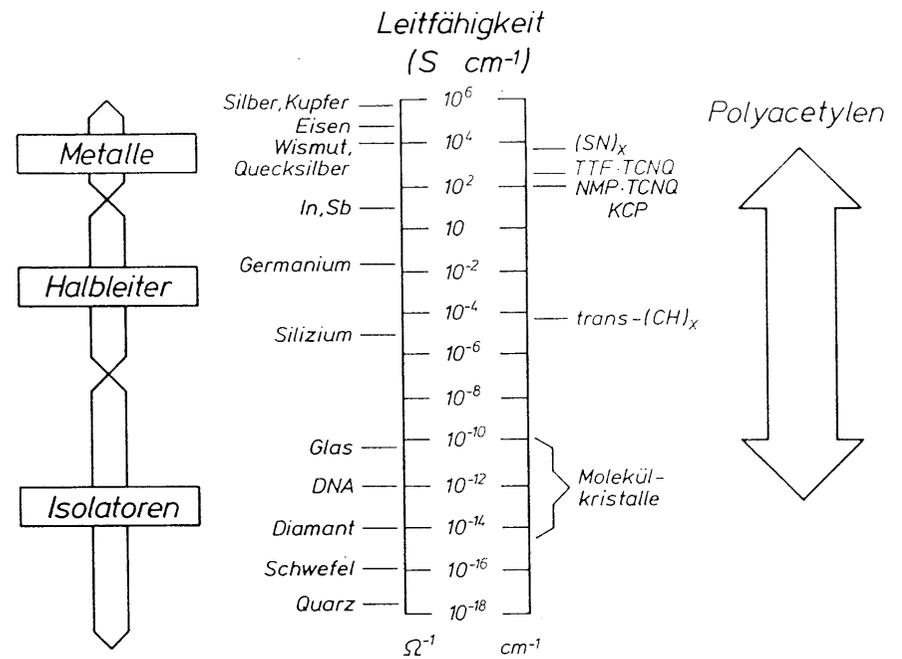
(nach W. Knappe)



P: Probe; V: Vergleichssubstanz

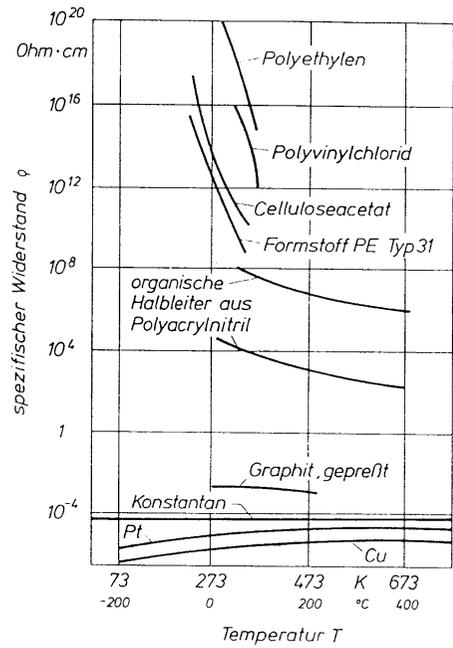
Temperaturverläufe beim Schmelzen kristalliner Proben

(nach G. Menges)



Elektrische Leitfähigkeit von Polyacetylen [trans-(CH)_x] im Vergleich mit anderen Werkstoffen. Potentielle Anwendungen elektrisch leitfähiger Polymerer:

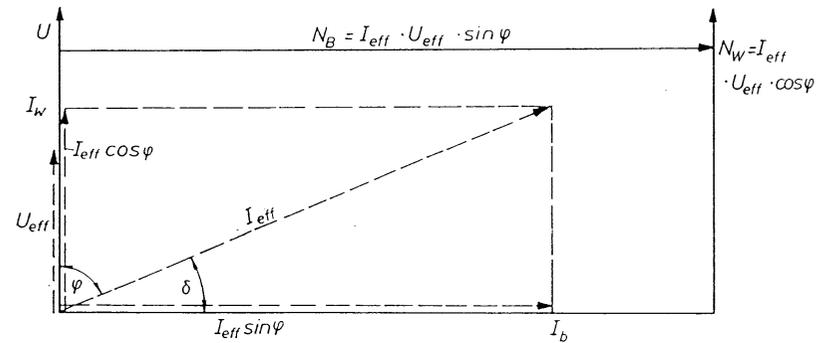
- Elektrotechnik:** flexible elektrische Leiter geringer Dichte, Heizbänder, antistatische Ausrüstung, Hochfrequenzabschirmung
- Halbleitertechnik:** Halbleiterbauelemente (p-n-Übergänge, Schottky-Batterien), Solarzellen
- Elektrochemie:** Batterien mit hoher Energie- und Leistungsdichte, Elektroden für elektrochemische Verfahren, elektrochrome Anzeigen



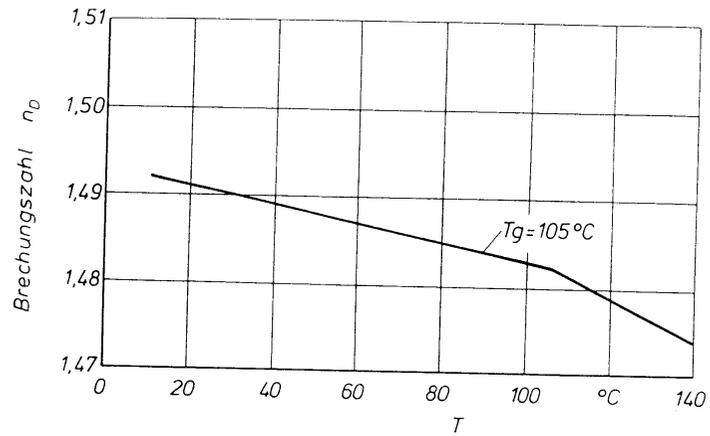
Spezifischer elektrischer Widerstand von Kunststoffen und Metallen in Abhängigkeit von der Temperatur

(nach W. Knappe)

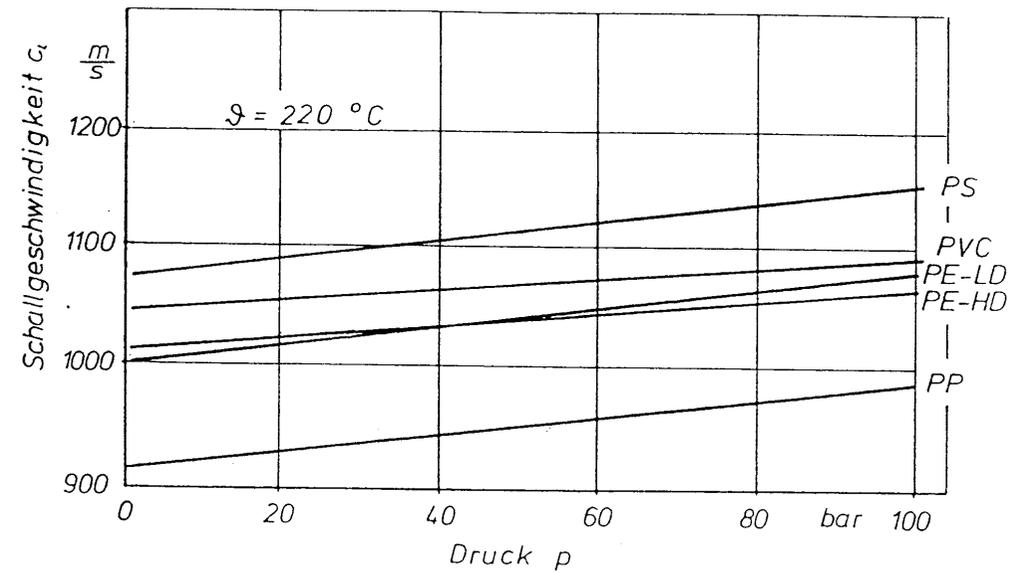
– dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$



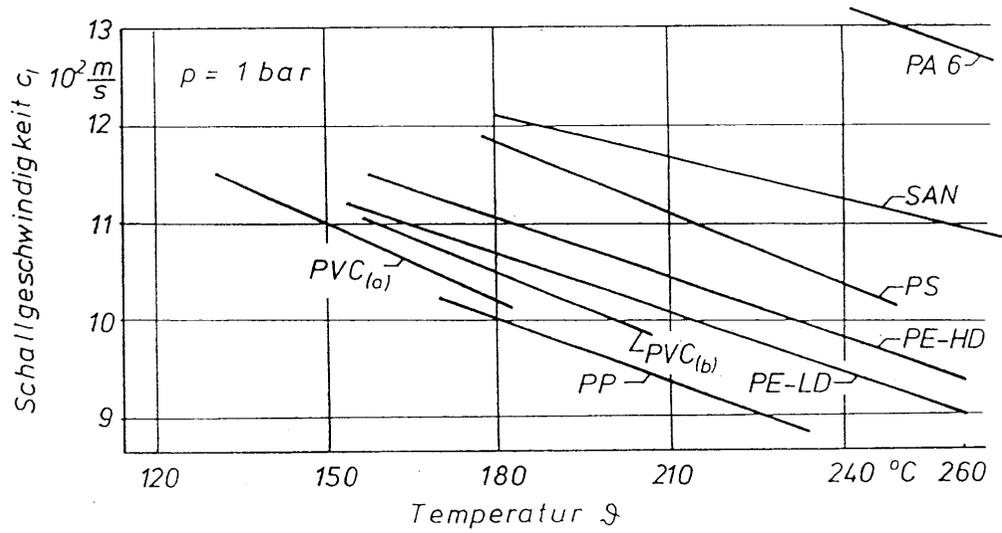
Strom-Spannungs- bzw. Leistungszeigerdiagramm elektrischer Wechselströme (nach Herspring)



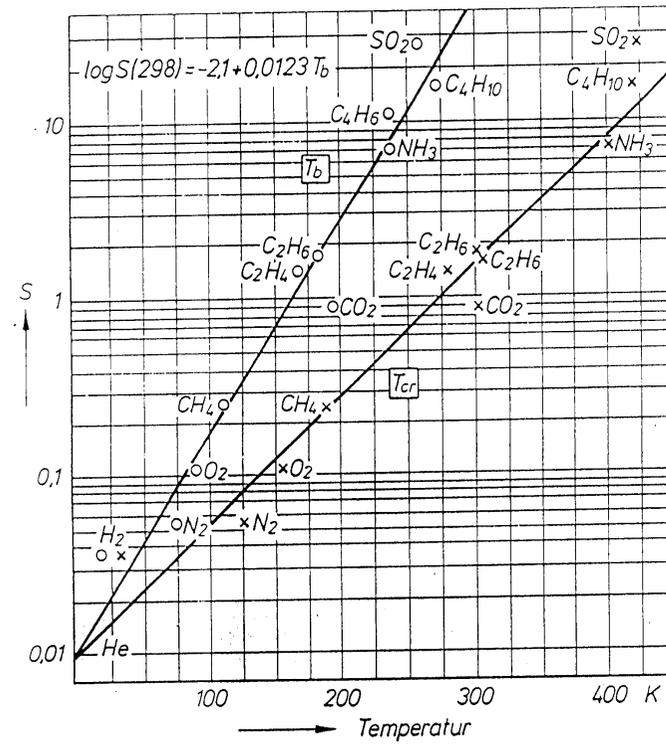
Brechungszahl n_D von PMMA (®Plexiglas GS 233) in Abhängigkeit von der Temperatur
 n_D Brechungsindex beim Licht der Natrium-D-Linie ($\lambda = 589,3 \text{ nm}$)
 (nach Arnhold)



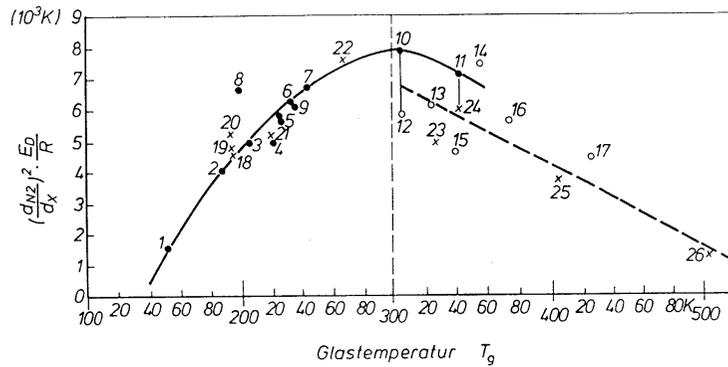
Schallgeschwindigkeit in einigen Kunststoffen in Abhängigkeit von Druck
 (nach Offergeld)



Schallgeschwindigkeit in einigen Kunststoffen in Abhängigkeit von der Temperatur
(nach Offergeld)



Sorptions-Gleichgewichtskonstante S von Gasen in Naturkautschuk bei 25 °C als Funktion der kritischen Temperatur T_{cr} und der Dampftemperatur T_b der Gase
(nach van Krevelen)

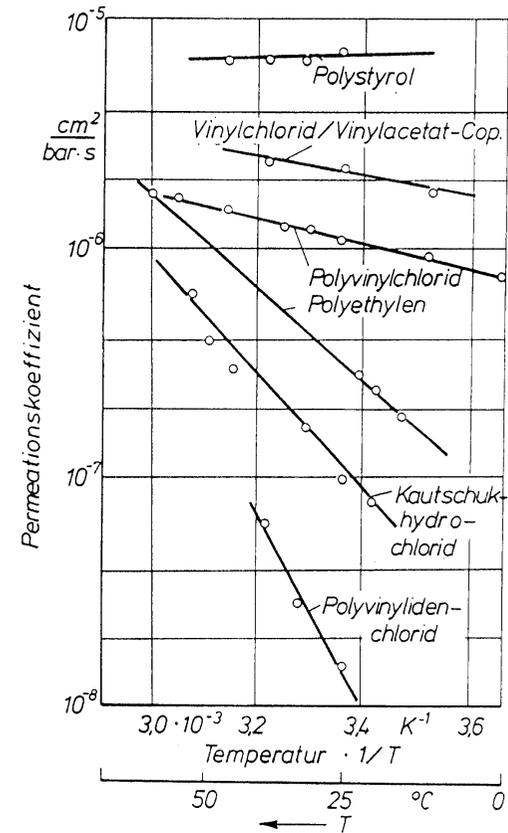


Bestimmung der Aktivierungsenergie der Diffusion, bezogen auf den Wirkungsradius der Moleküle des diffundierenden Gases in Abhängigkeit von der Glastemperatur des Polymerwerkstoffs;

– Kautschuke; --- amorphe Kunststoffe, teilkristalline Kunststoffe

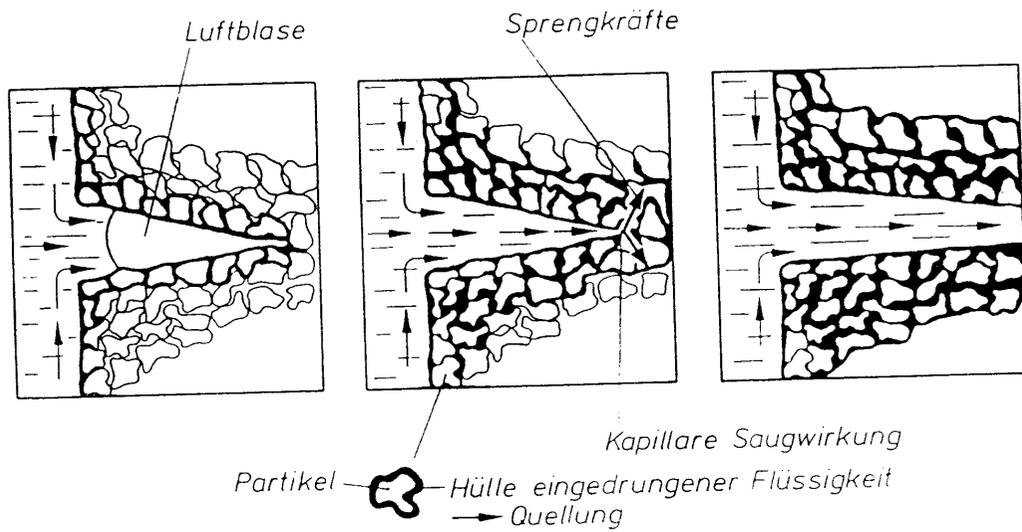
- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 Silikonkautschuk | 14 Polyvinylchlorid |
| 2 Polybutadien | 15 Polymethylmethacrylat |
| 3 Naturkautschuk | 16 Polystyrol |
| 4 Butadien/Acrylnitril K 80/20 | 17 Polycarbonat |
| 5 Butadien/Acrylnitril K 73/27 | 18 Polyethylen hoher Dichte |
| 6 Butadien/Acrylnitril K 68/32 | 19 Polyethylen niedriger Dichte |
| 7 Butadien/Acrylnitril K 61/39 | 20 Polyoxymethylen |
| 8 Butylkautschuk | 21 Guttapercha |
| 9 Polyurethankautschuk | 22 Polypropylen |
| 10 Polyvinylacetat | 23 Polychlorotrifluorethylen |
| 11 Polyethylenterephthalat | 24 Polyethylenterephthalat |
| 12 Polyvinylacetat | 25 Polytetrafluorethylen |
| 13 Vinylchlorid/Vinylacetat-Cop. | 26 Poly(2,6-diphenylphenylenoxid) |

(nach G. Menges)



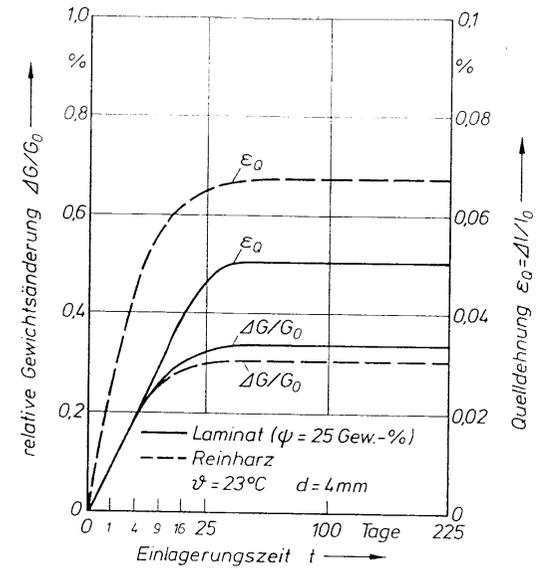
Permeation von Wasserdampf durch Kunststofffolien in Abhängigkeit von der Temperatur

(nach W. Knappe)



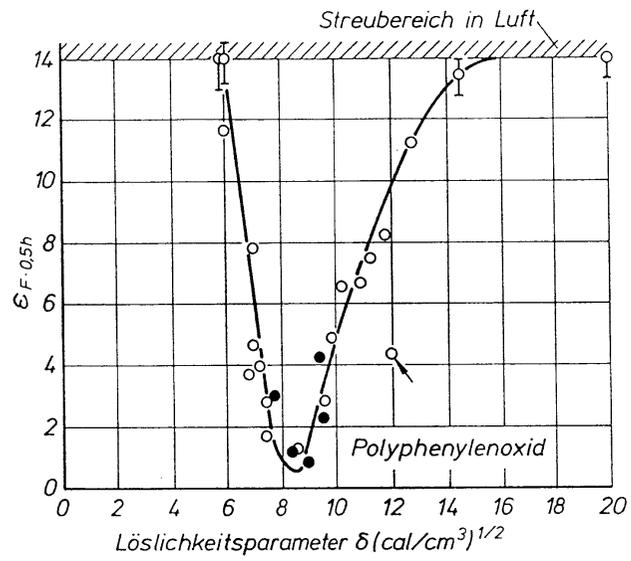
Eindringen von benetzenden Flüssigkeiten in das partikelförmige Kunststoffgefüge

(nach G. Menges, Suchanek)



Gewichtsaufnahme und Quelldehnung in Abhängigkeit von der Einlagerungszeit bei Kunststoffen am Beispiel von ungesättigtem Polyester mit und ohne Glasfaser-
verstärkung

(nach G. Menges)



Absinken der Entstehungsgrenzdehnung ϵ_F für Crazes oder Spannungsrisse, wenn der Löslichkeitsparameter δ des berührenden Lösungsmittels in den Bereich des Löslichkeitsparameters des Polymerwerkstoffs (hier Polyphenylenoxid) kommt

● Risse; ○ Crazing

(nach Kambour)