

Vorlesungstermine

WS 13/14 – Di 15:45 Uhr bis 19:00 Uhr, V 47.02



Datum	Titel / Inhalt
29.10.13	Einleitung / Erforderliche Grundlagen
05.11.13	Verhalten in der Schmelze
12.11.13	Verhalten als Festkörper
19.11.13	Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften / Kunststoffaufbereitung
26.11.13	Einflüsse auf die Eigenschaften
03.12.13	Einführung in die Extrusion
17.12.13	Einführung in das Spitzgießen
<i>Vorlesungsfreie Zeit: 23.12.13 bis 06.01.14</i>	
07.01.14	Verarbeitung von vernetzenden Formmassen / Faserkunststoffverbunde
14.01.14	Einführung in die Weiterverarbeitung
21.01.14	Einführung in das Konstruieren mit Kunststoffen
28.01.14	Kunststoffe und Umwelt
<i>Prüfungsvorbesprechung; Prüfung am 13.02.2014</i>	

Bestehen Fragen zum vorherigen Vorlesungstermin?



Kunststofftechnik

Verhalten als Festkörper

Institut für Kunststofftechnik
Böblinger Straße 70
70199 Stuttgart

Nach dieser Veranstaltung sollten Sie...

- die relevanten Prüfverfahren für Kunststoffeigenschaften samt Messgrößen erklären
- die physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen kennen und den jeweiligen Bezug zur Praxis erklären
- die Werte für den Wärme- und Stoffaustausch kennen und deren experimentelle Bestimmung beschreiben

... können

Verhalten als Festkörper

Übersicht



Mechanische Eigenschaften

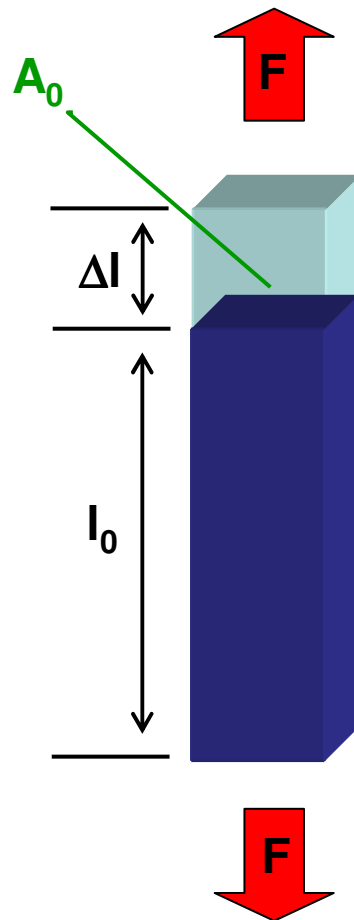
- Zugbelastung
- Der Schnellzerreiversuch
- Dynamische Belastung
- Biegebelastung
- Biegebelastung und Zugbelastung im Schlagpendel

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

Kraftübertragung

Wiederholung



Spannung: $\sigma = \frac{F}{A_0}$

F = Kraft, die auf eine Probe wirkt

A_0 = Querschnittsfläche des Probenkörpers vor der Belastung

Dehnung: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

Δl = Längenänderung der Probe in Belastungsrichtung

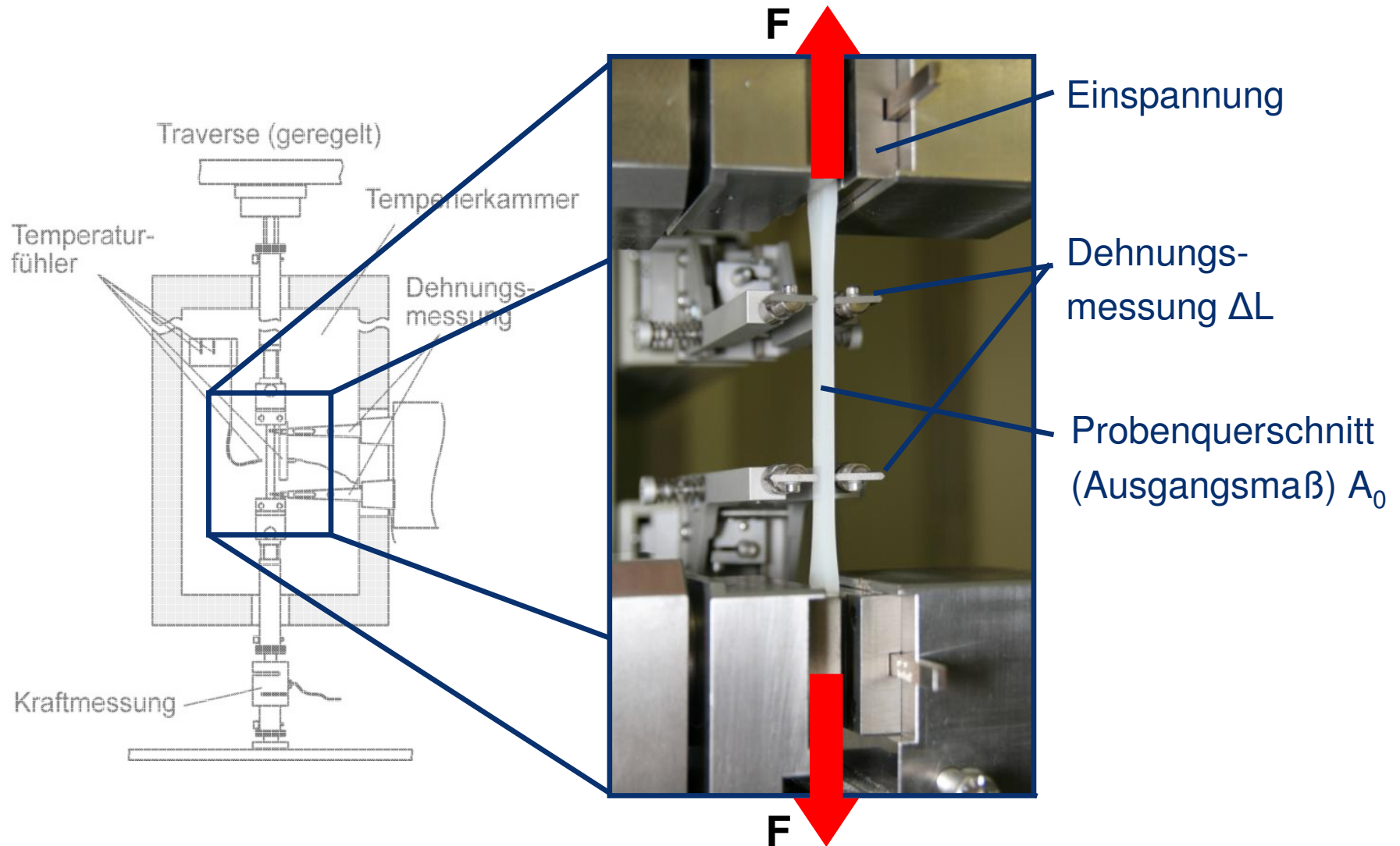
l_0 = (Anfangs-)Bezugslänge

Steifigkeit: $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

E = Elastizitätsmodul

Zugprüfung

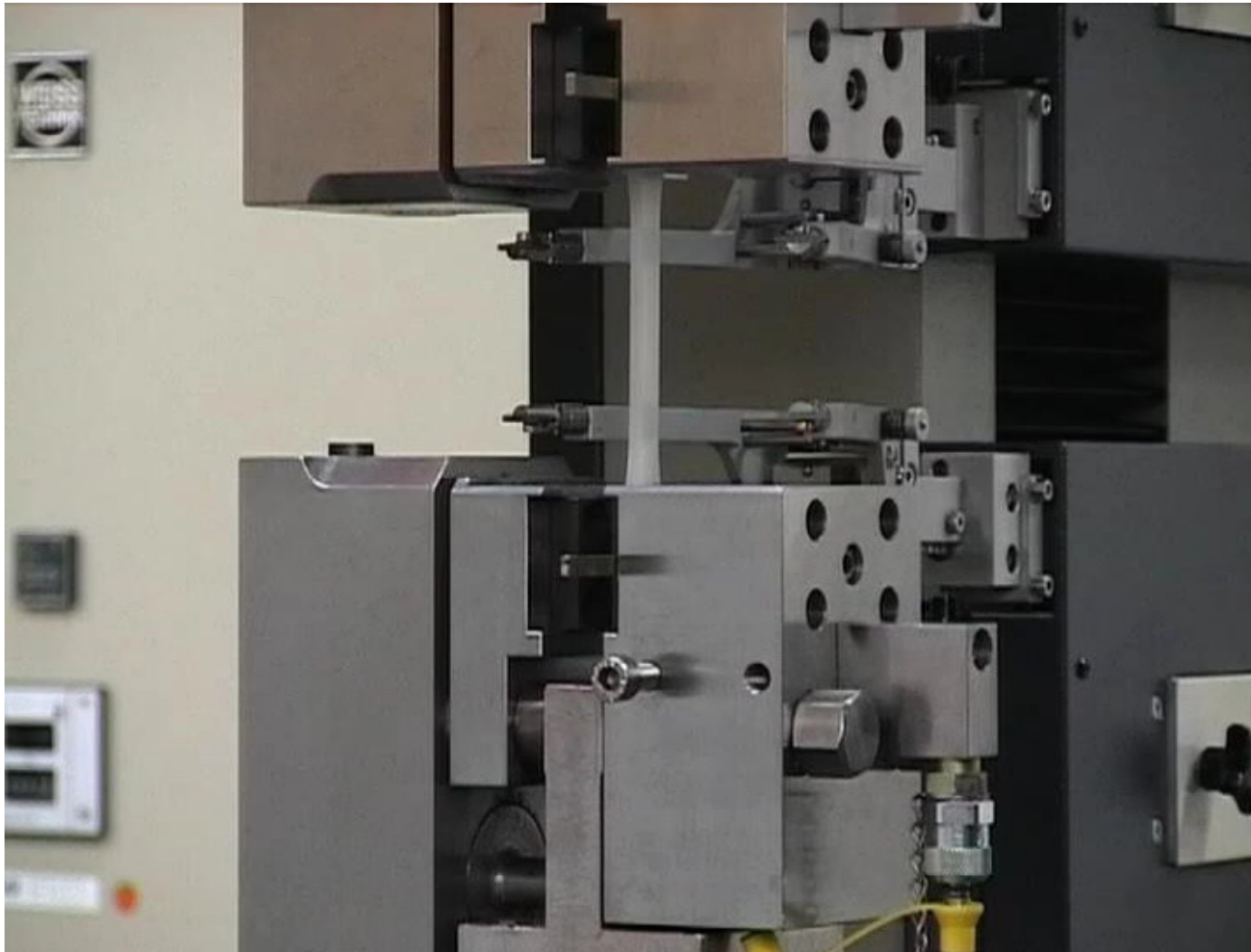
Schematischer Aufbau



Zugprüfung

Video

IKT



Zugprüfung

Kurzzusammenfassung

Eigenschaften:

- sehr präzise
- Zugbeanspruchung (einachsiger Spannungszustand)
- für alle Kunststoffe anwendbar
- Kennwerte: E-Modul, Zugfestigkeit, Dehnungen, ...

Vorteile:

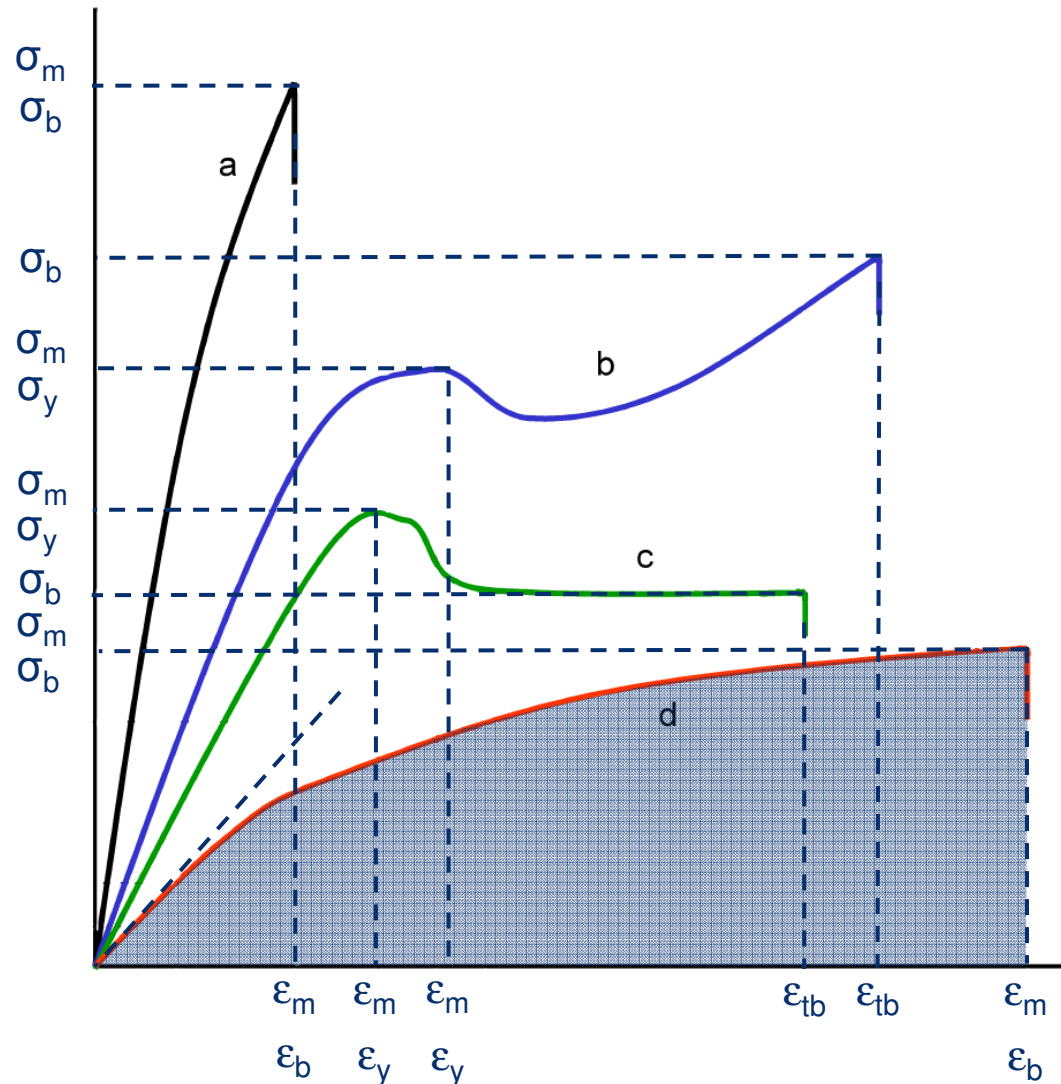
- verbreitetes Prüfverfahren (bei allen Werkstoffen)
- universell einsetzbar

Nachteile:

- eher geringe Prüfgeschwindigkeit

Zugprüfung

Spannungs-Dehnungs-Diagramm



E-Modul: Kennwert für
Werkstoffsteifigkeit

Zähigkeit: Fläche unter der
Kurve

Proben ohne Streckgrenze:

σ_m = Zugfestigkeit

ϵ_m = Dehnung der Zugfestigkeit

σ_b = Bruchspannung

ϵ_b = Bruchdehnung

Proben mit Streckgrenze:

σ_y = Streckgrenze

ϵ_y = Streckdehnung

σ_m = Zugfestigkeit

ϵ_m = Dehnung der Zugfestigkeit

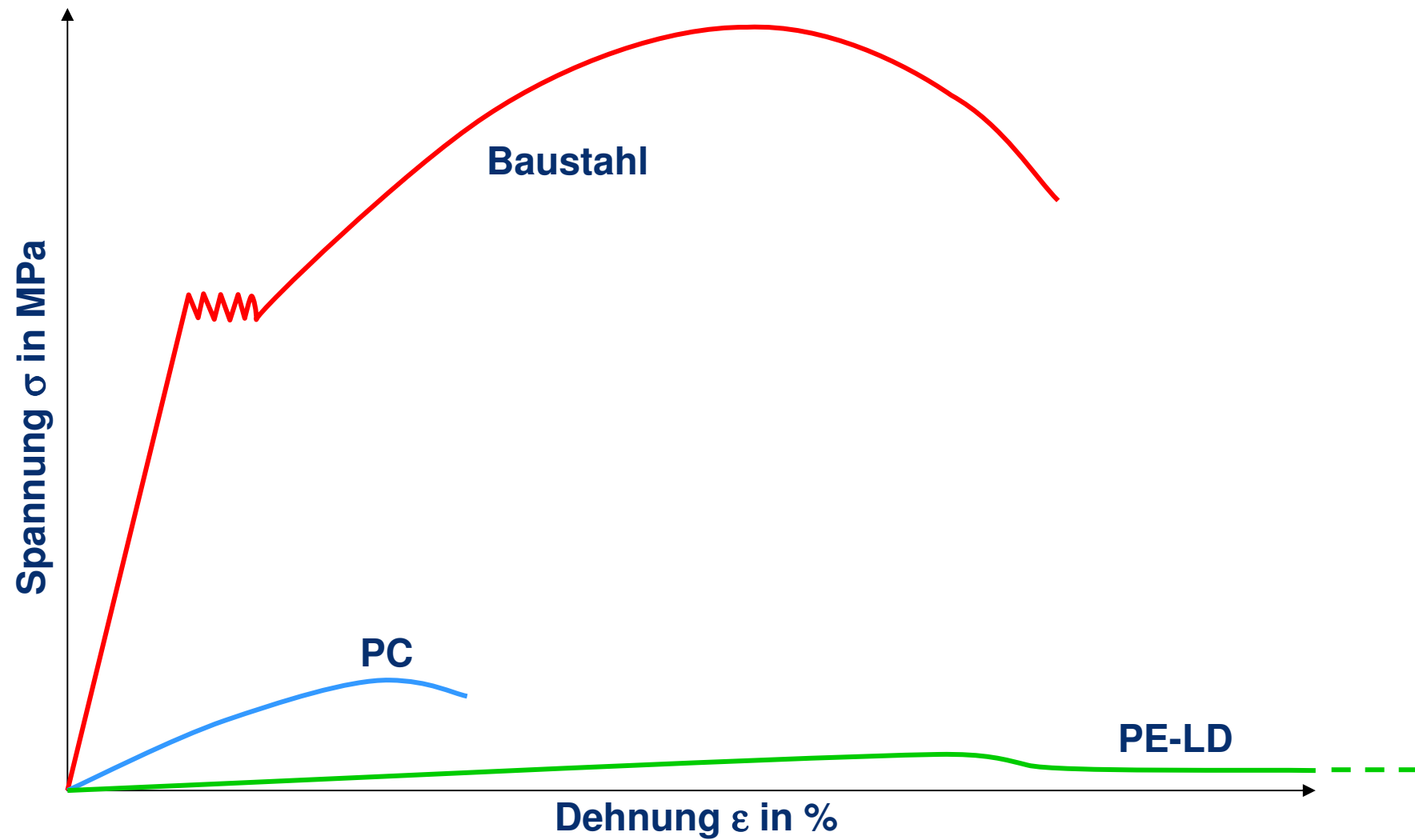
σ_b = Bruchspannung

ϵ_{tb} = nominelle Bruchdehnung

[Quelle: DIN EN ISO 527-1:2012]

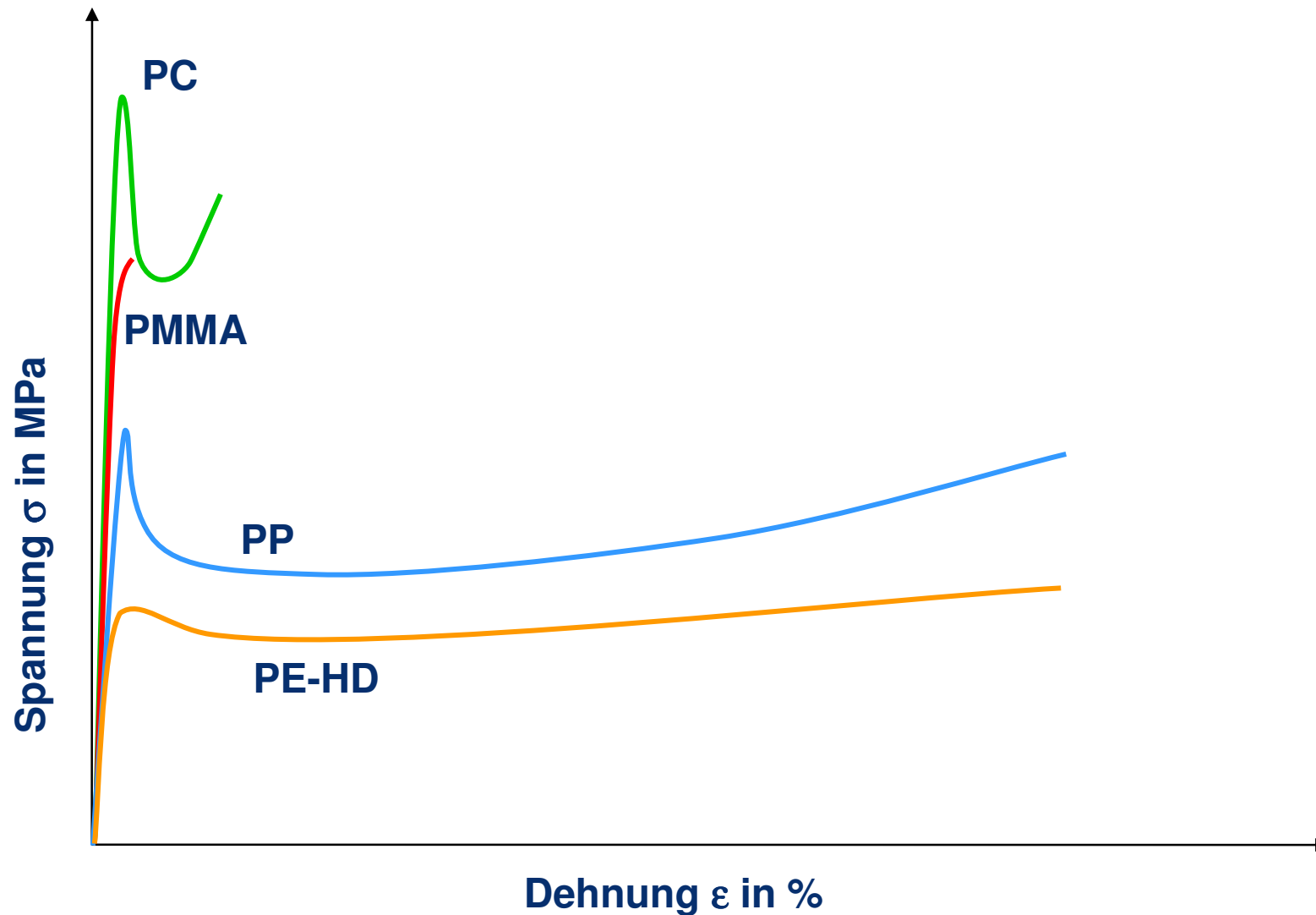
Spannungs/Dehnungs-Verhalten

Vergleich Stahl - Kunststoff



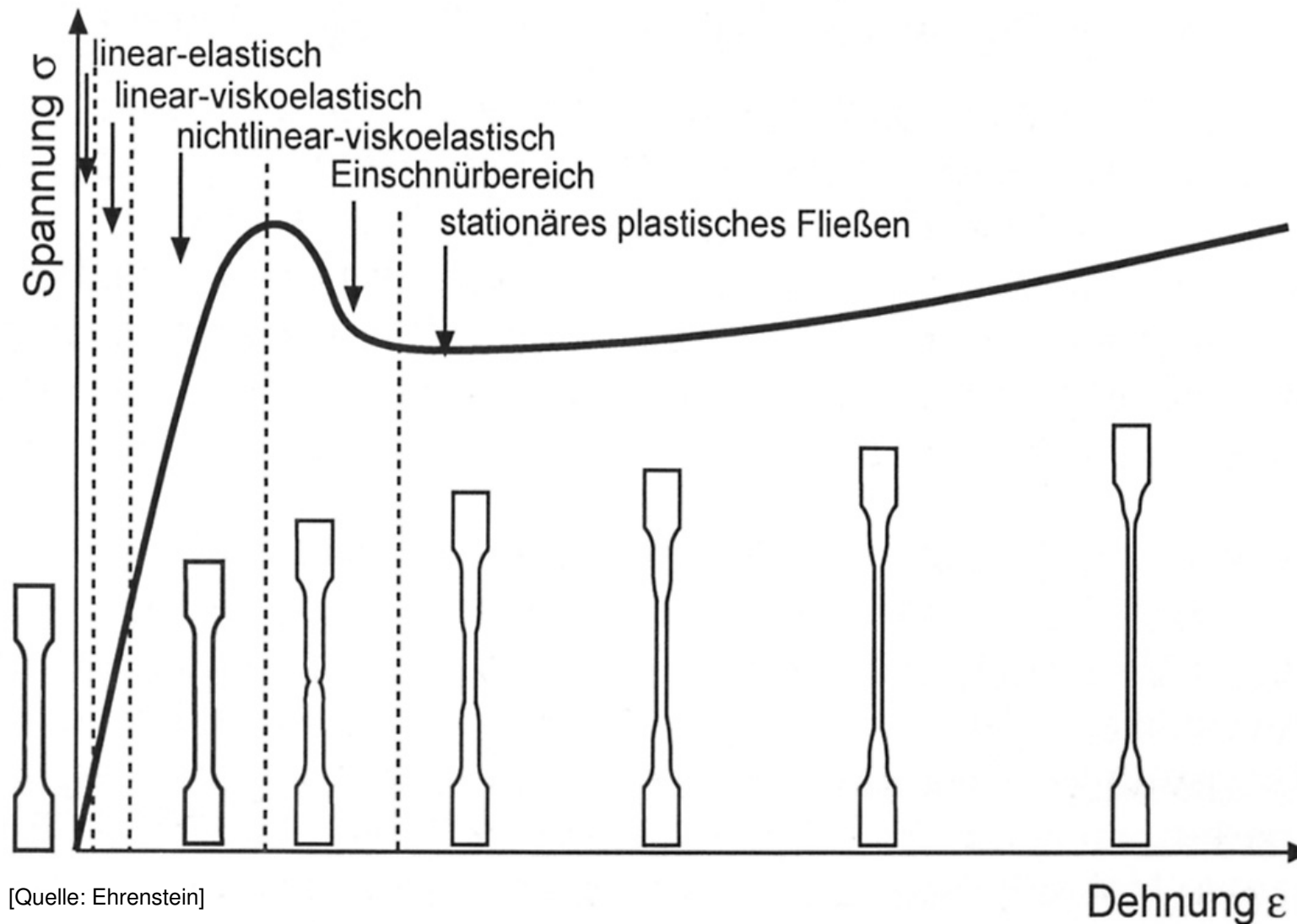
Spannungs/Dehnungs-Verhalten:

Vergleich verschiedener Thermoplaste



Spannungs/Dehnungs-Verhalten

Bereiche der Verformung



[Quelle: Ehrenstein]

Verhalten als Festkörper

Übersicht



Mechanische Eigenschaften

- Zugbelastung
- Der Schnellzerreiversuch
- Dynamische Belastung
- Biegebelastung
- Biegebelastung und Zugbelastung im Schlagpendel

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

Schnellzerreiversuch

Aufbau



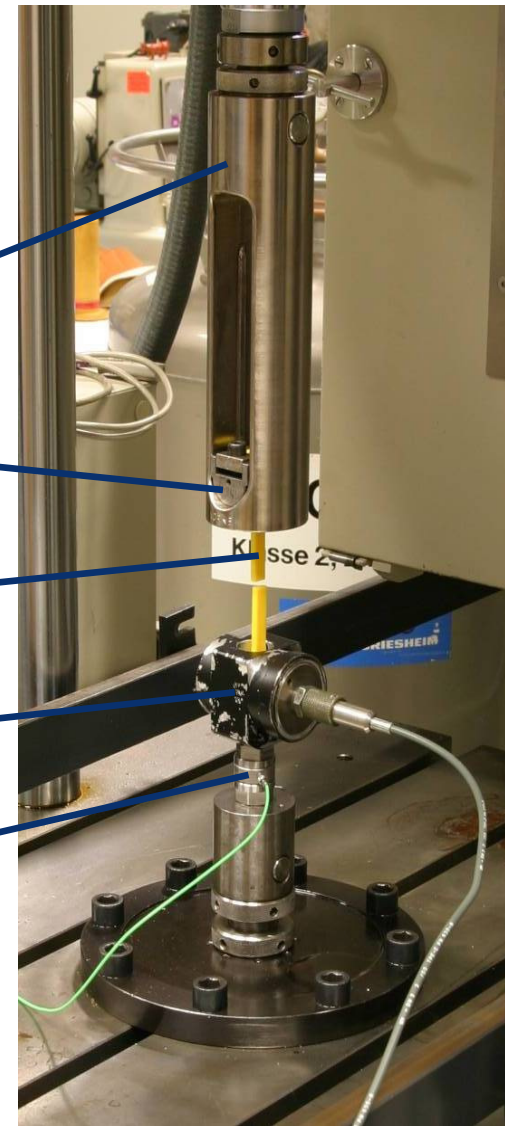
Bewegte Traverse

Oberer Mitnehmer

Gebrochene Probe

Einspannung

Kraftmessdose



Schnellzerreiversuch

Kurzzusammenfassung



Eigenschaften:

- uniaxiale Zugbeanspruchung
- Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs bei sehr hohen Geschwindigkeiten
- Ermittlung des Arbeitsaufnahmevermögens über die Fläche unter der Kurve

Vorteile:

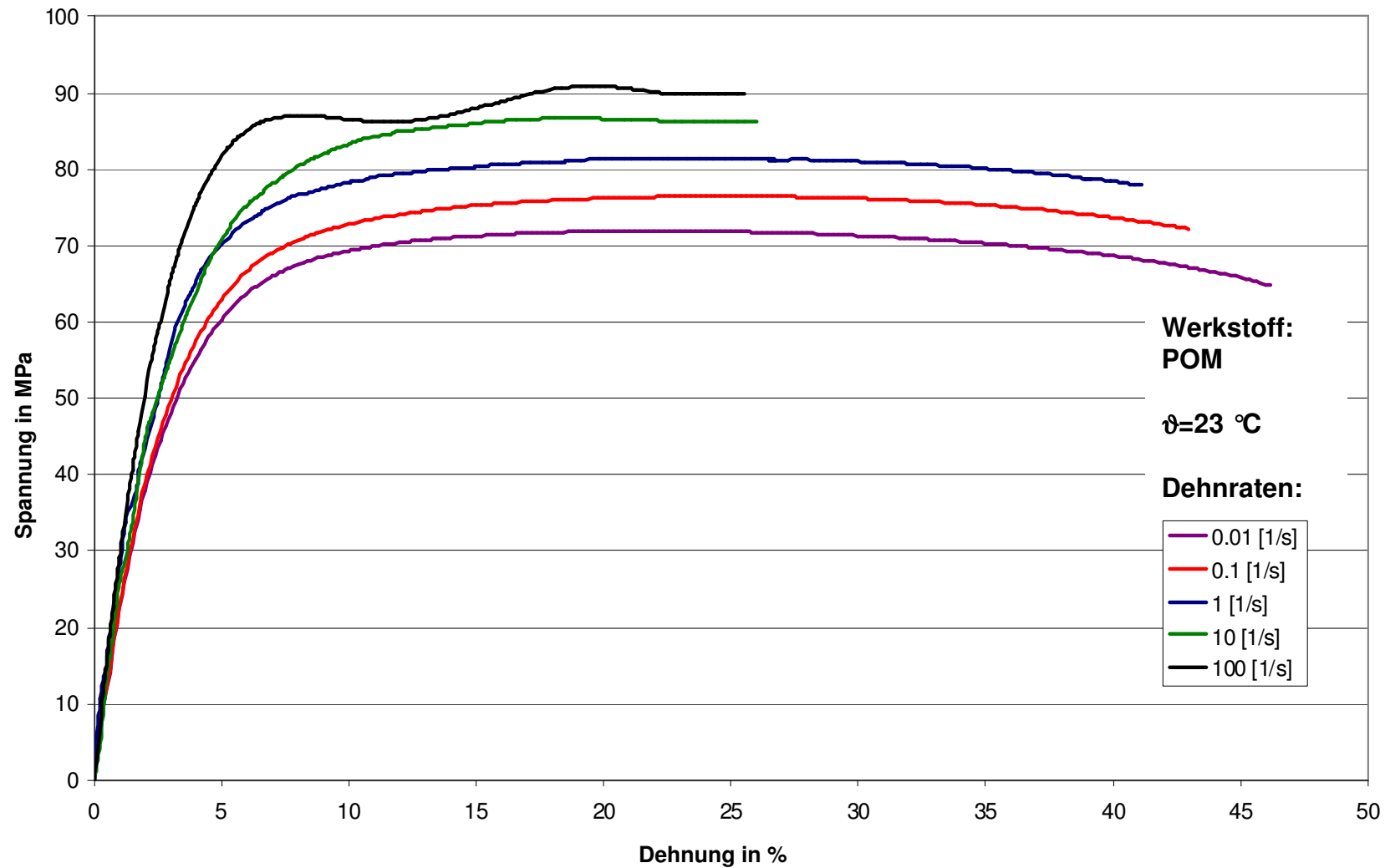
- Belastungsgeschwindigkeiten wählbar
- Belastungsgeschwindigkeiten konstant
- instrumentalisiert (Kraftverlauf über der Zeit)
- Werkstoffverhalten (duktil, spröd) über Kurvenverlauf erfassbar

Nachteile:

- servo-hydraulische Zugprüfmaschine notwendig

Schnellzerreiversuch

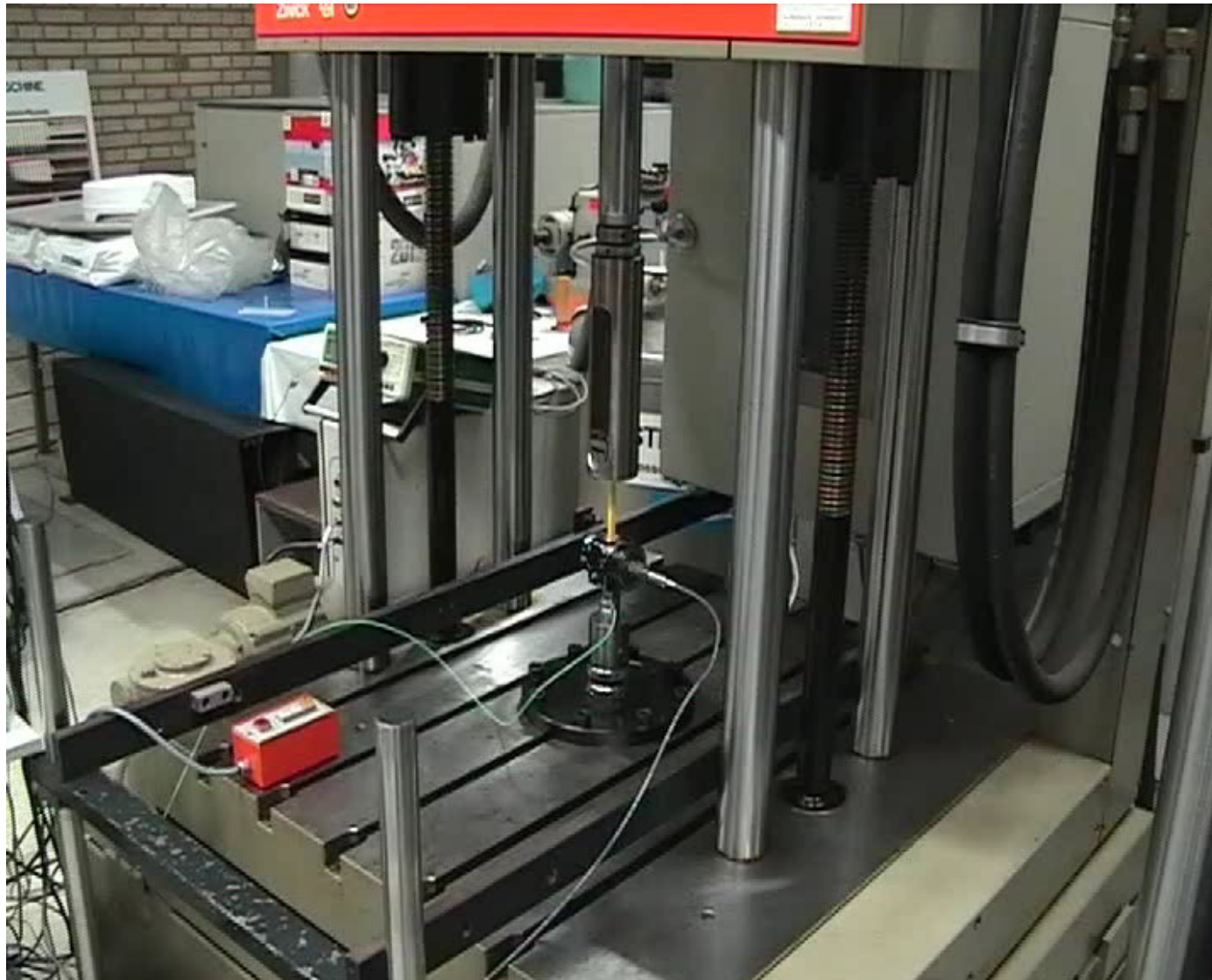
Messkurven unterschiedlicher Dehnraten



Schnellzerreiversuch

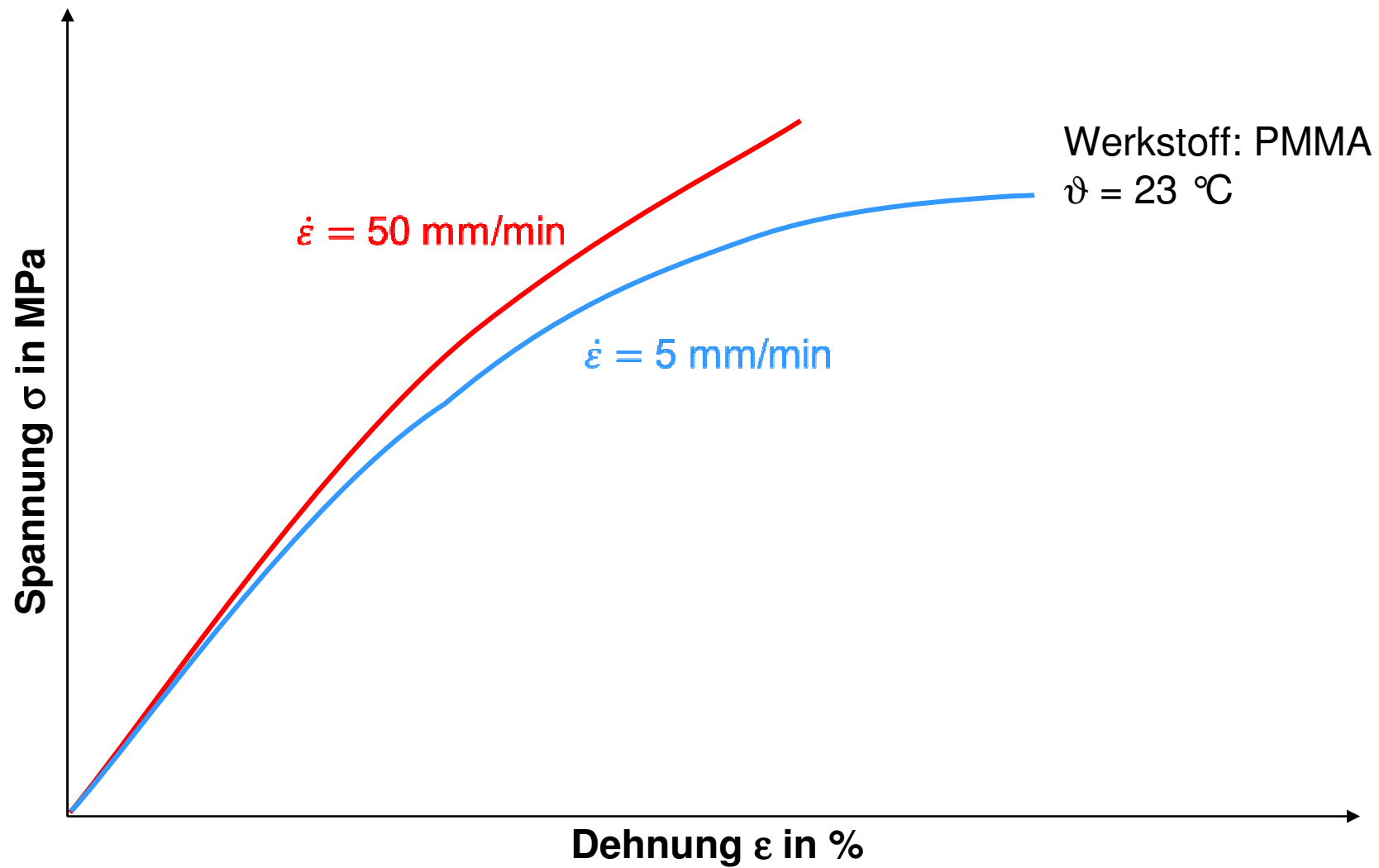
Video

IKT



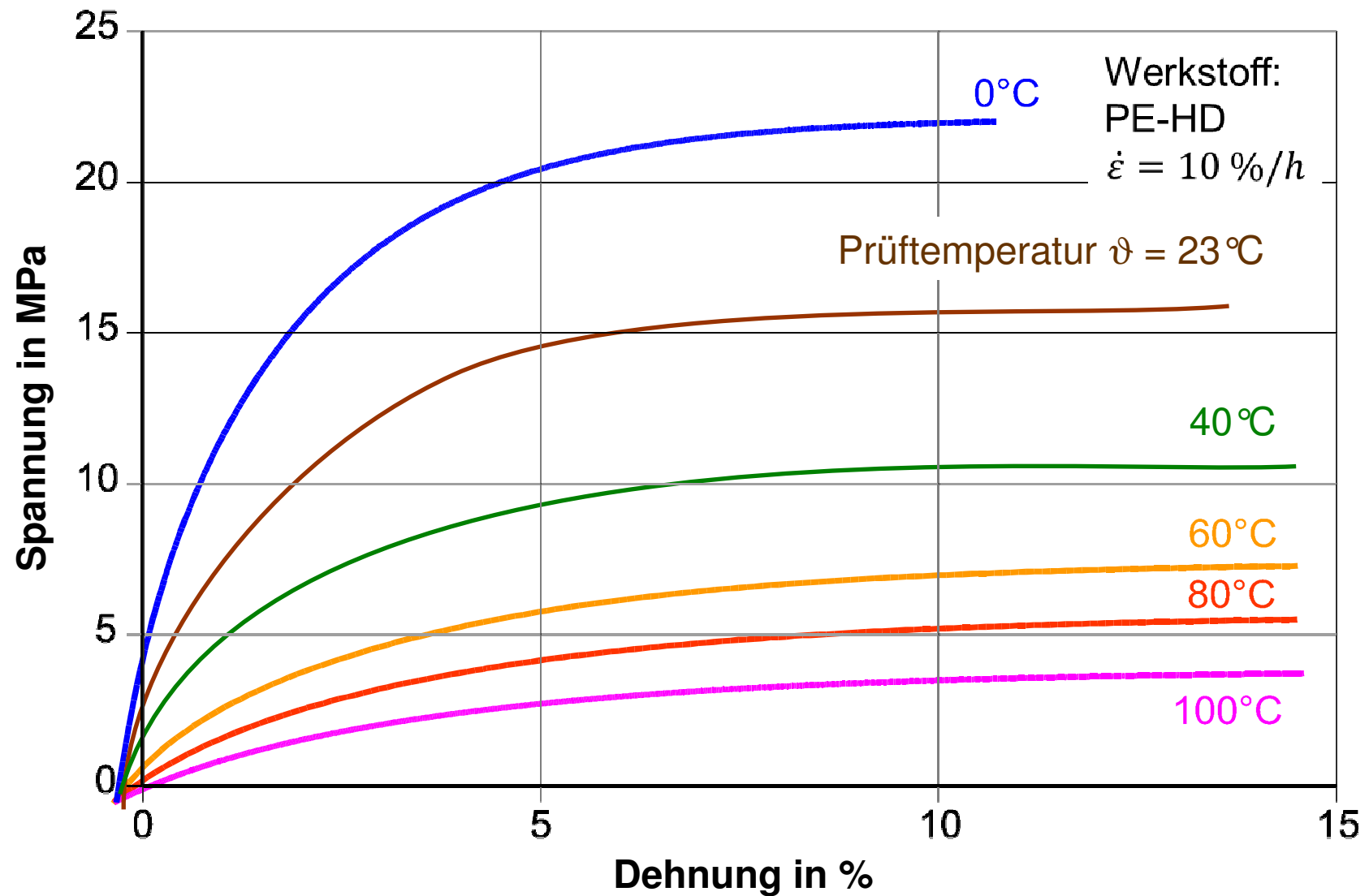
Zeitabhängigkeit

Temperatur konstant



Temperaturabhängigkeit

Geschwindigkeit konstant



Zeit- und Temperaturabhängigkeit

ZTV-Gleichung

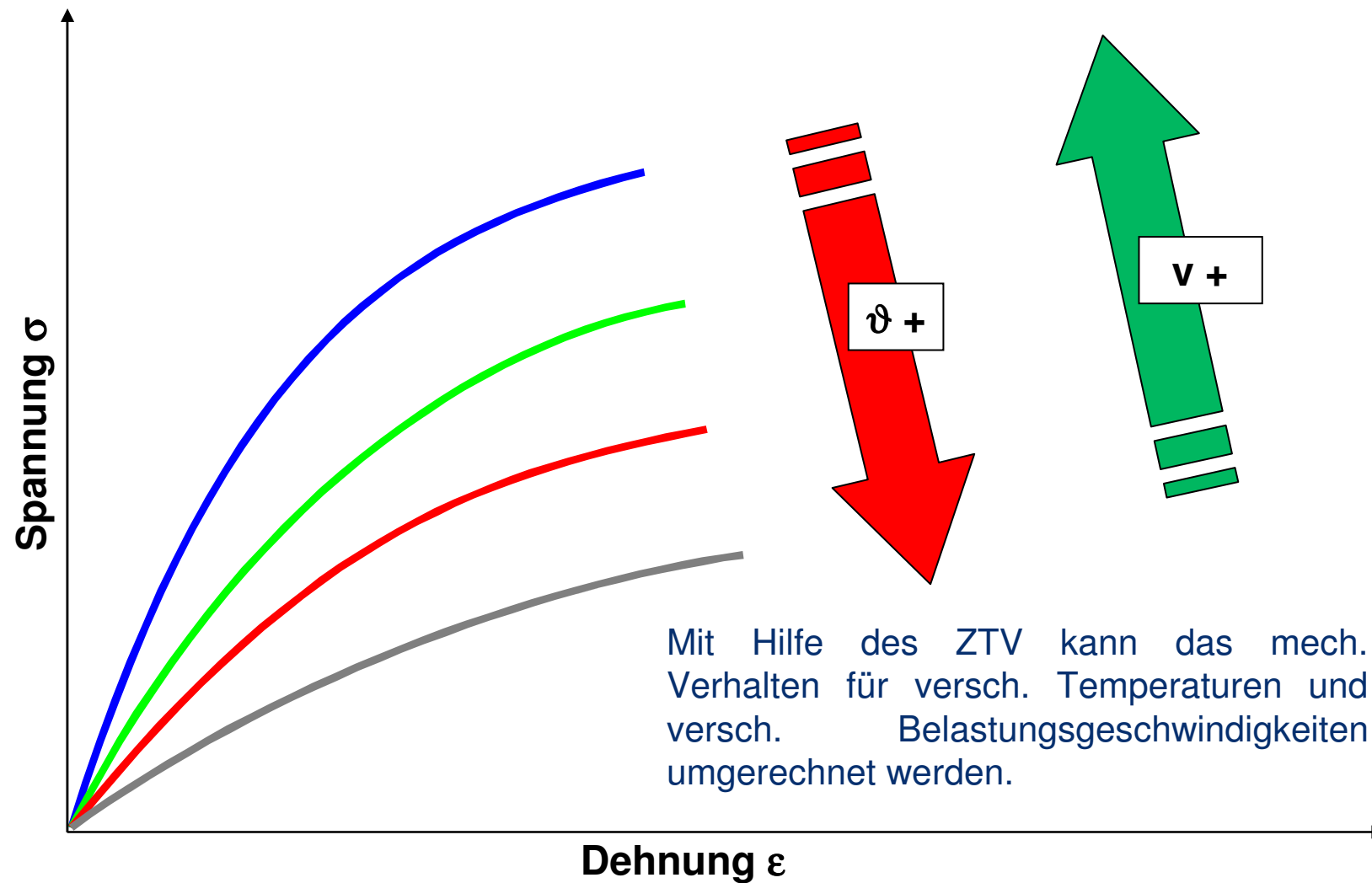


Die Zeit-Temperatur-Verschiebungsgleichung (ZTV-Gleichung) stellt einen Zusammenhang zwischen Dehngeschwindigkeit und Temperatur her.

$$\log\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ref}}\right) = k \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)$$

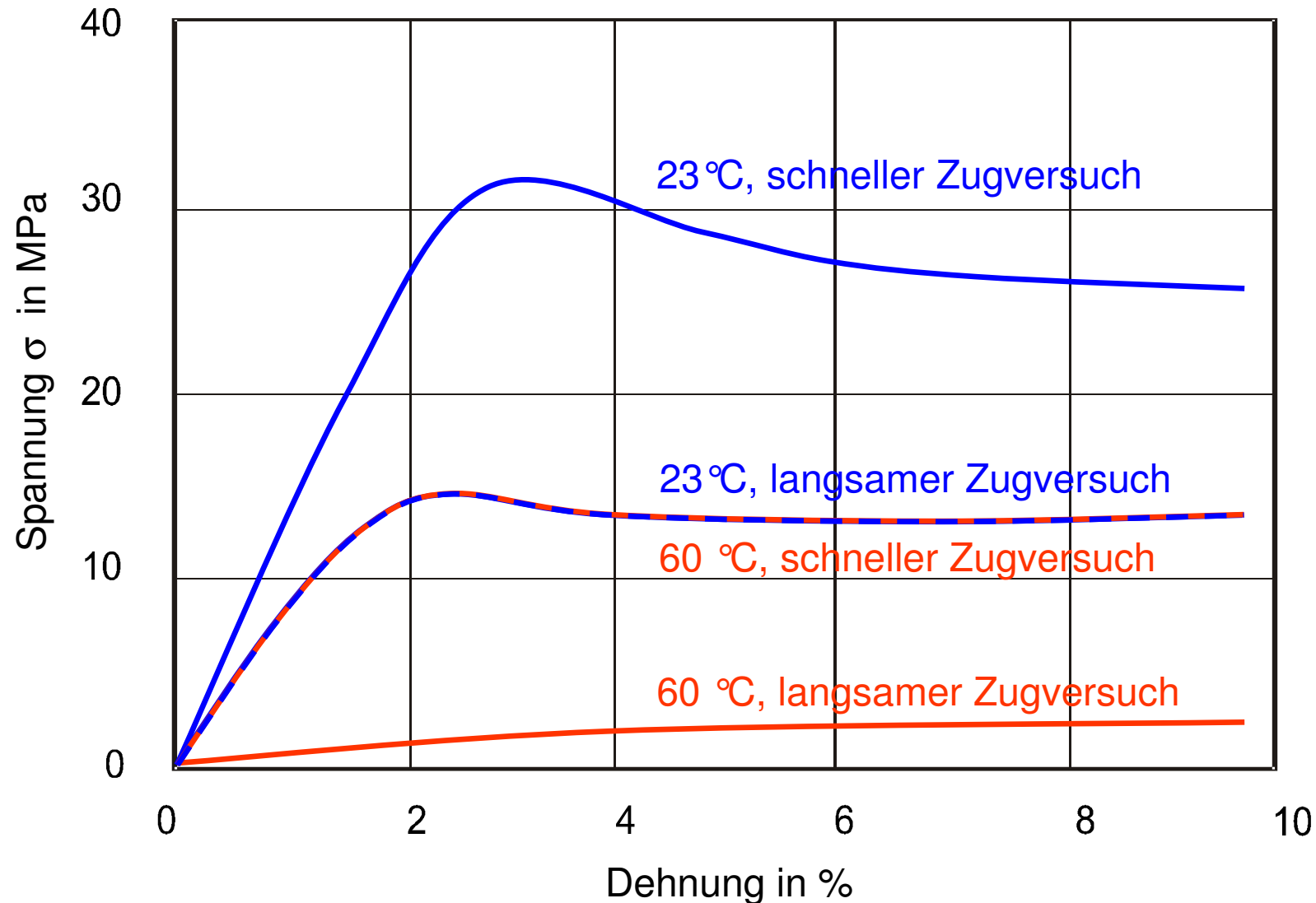
- **Voraussetzung:** Struktur des Kunststoffes darf nicht durch Temperatureinfluss verändert werden (T_g , T_m , T_z nicht überschreiten)
- Kenntnis eines Referenzzustandes notwendig (Spannungs-Dehnungskurve bei Referenztemperatur und Referenzdehngeschwindigkeit)
- Ermittlung der Temperatur-/Dehngeschwindigkeits-Paarung, bei der dasselbe Verhalten des Kunststoffs erreicht wird
- Aktivierungsfaktor k ist werkstoffspezifisch

Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip



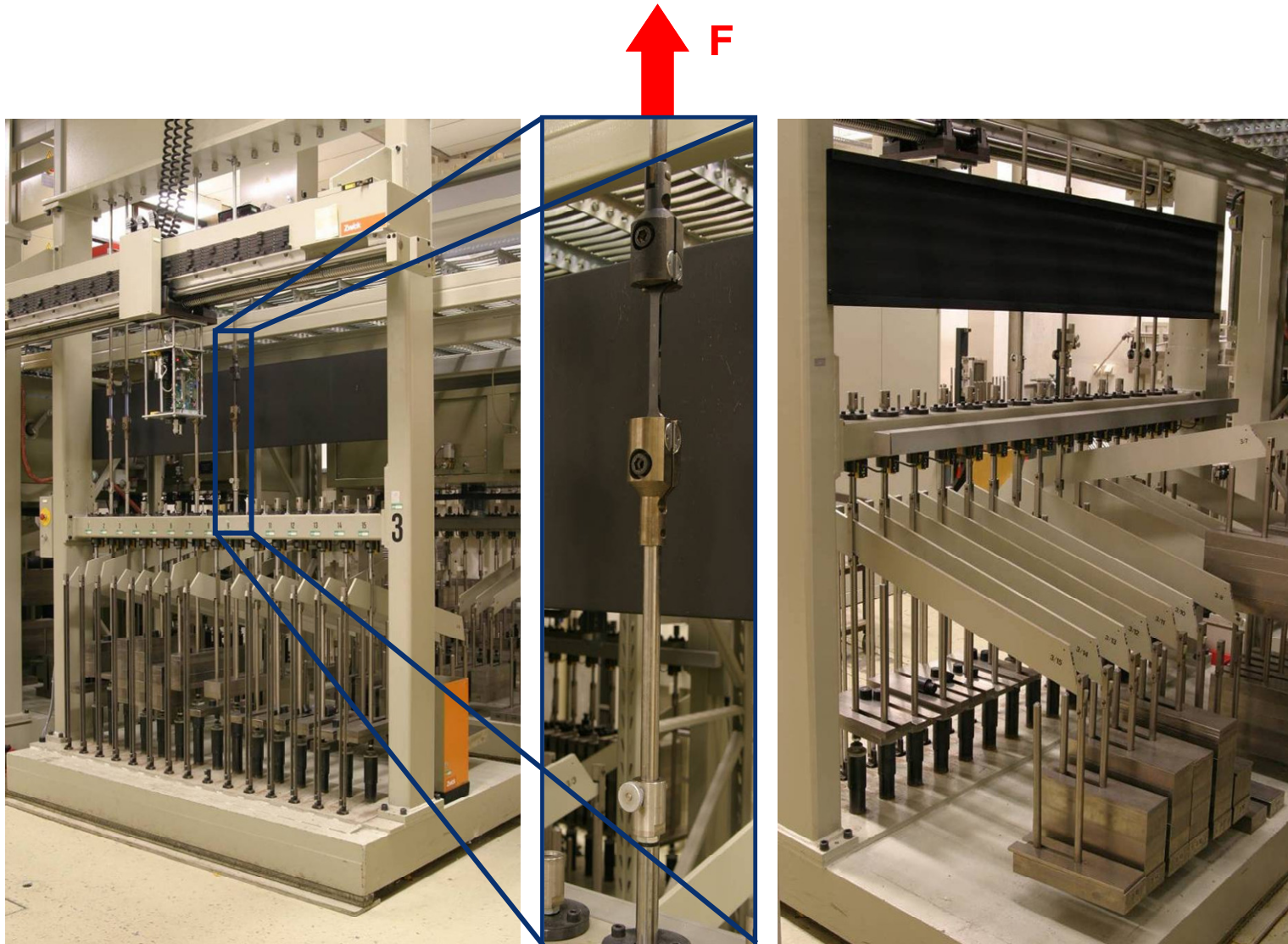
Zeit- und Temperaturabhängigkeit

Umrechnung



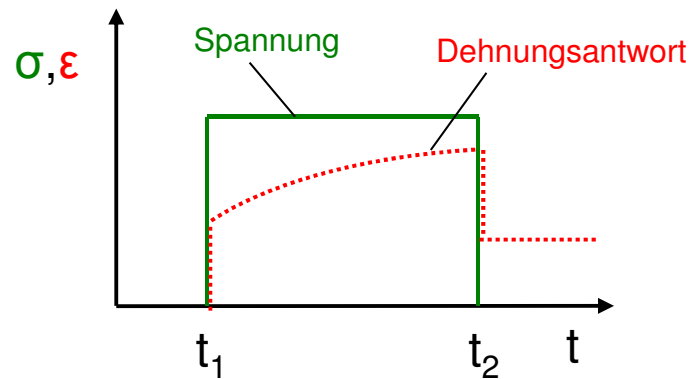
Zeitstand-Zugversuch

Versuchsanlage des IKT

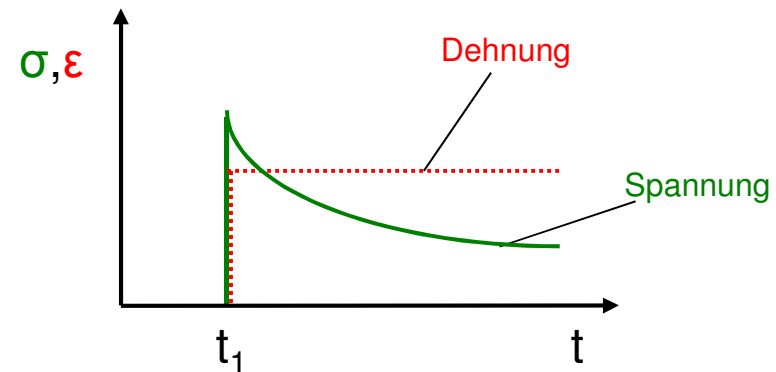


Zeitstand-Zugversuch

Retardation und Relaxation



Retardation



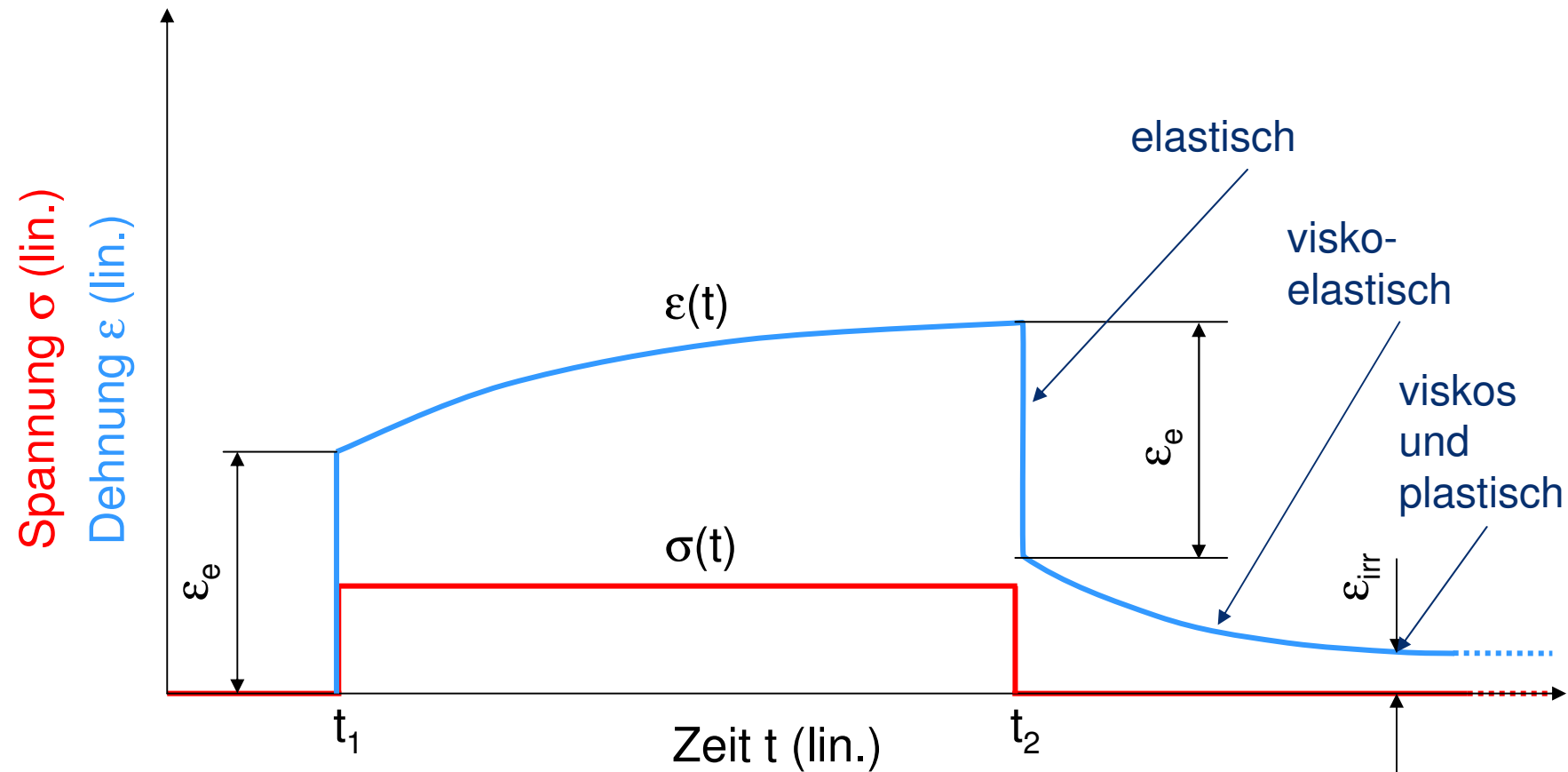
Relaxation

Einfluss des viskoelastischen Verhaltens auf Langzeitbelastungen

- Retardation und Relaxation bei amorphen Thermoplasten stärker ausgeprägt als bei teilkristallinen
- bei Elastomeren und Duromeren vernachlässigbar

Viskoelastisches Werkstoffverhalten

Kriechverhalten



- Erklären Sie anschaulich, warum eine geringere Verformungsgeschwindigkeit und/oder eine erhöhte Einsatztemperatur die Dehnfähigkeit von Kunststoffen erhöht.
- Erklären Sie, warum die Zugfestigkeit, welche mit dem Standardzugversuch bestimmt wurde, für die Auslegung von Crash-Bauteilen nicht geeignet ist.

Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

- Zugbelastung
- Der Schnellzerreiversuch
- Dynamische Belastung
- Biegebelastung
- Biegebelastung und Zugbelastung im Schlagpendel

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

Kunststoffe unter schwingender Beanspruchung

Anwendung

IKT

BASF / ContiTech Vibration Control / Porsche



Kunststoffe unter schwingender Beanspruchung

Hydropulser des IKT

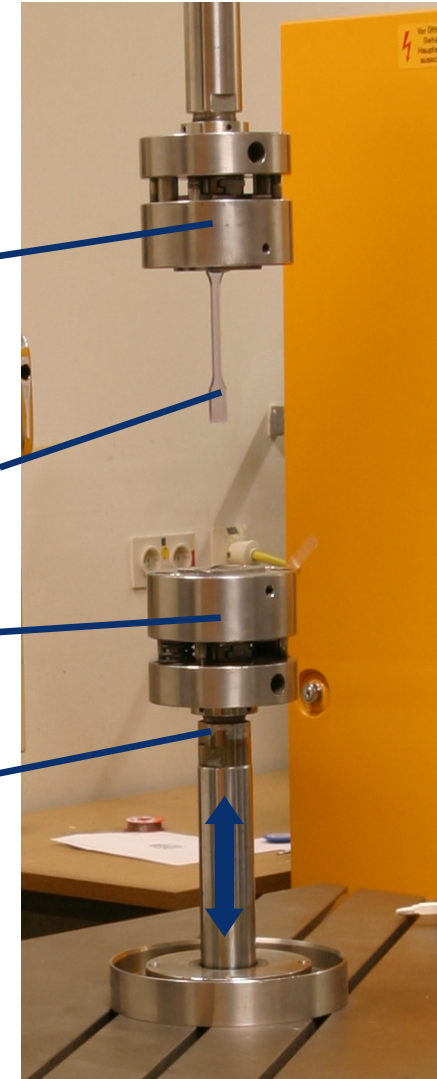


Obere
Einspannung

Nicht eingespannte
Probe (hier Zugstab)

Untere
Einspannung

Bewegte Traverse



Kunststoffe unter schwingender Beanspruchung

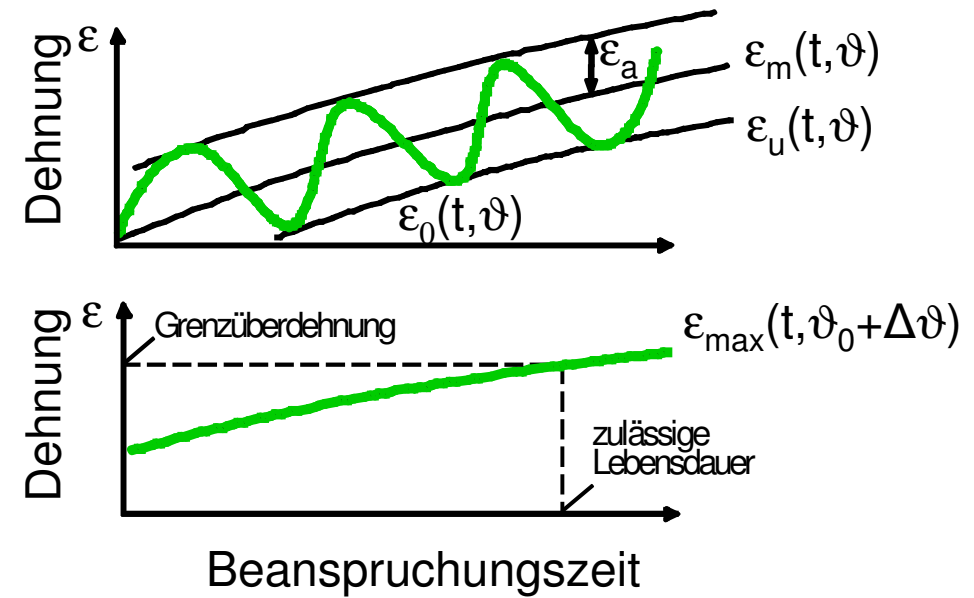
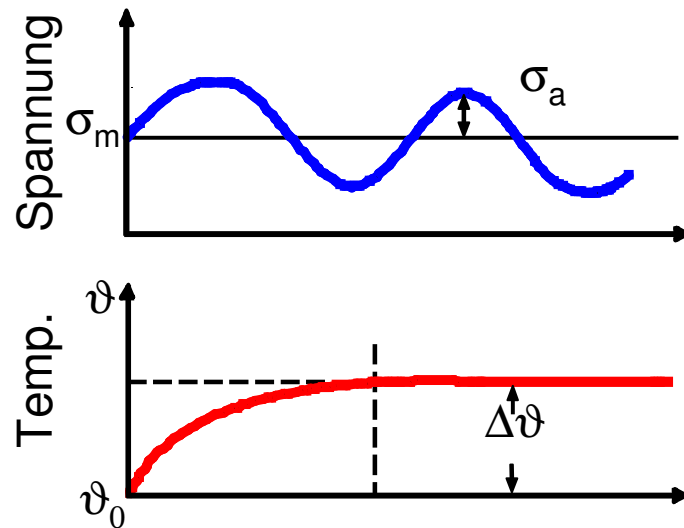
Video

IKT



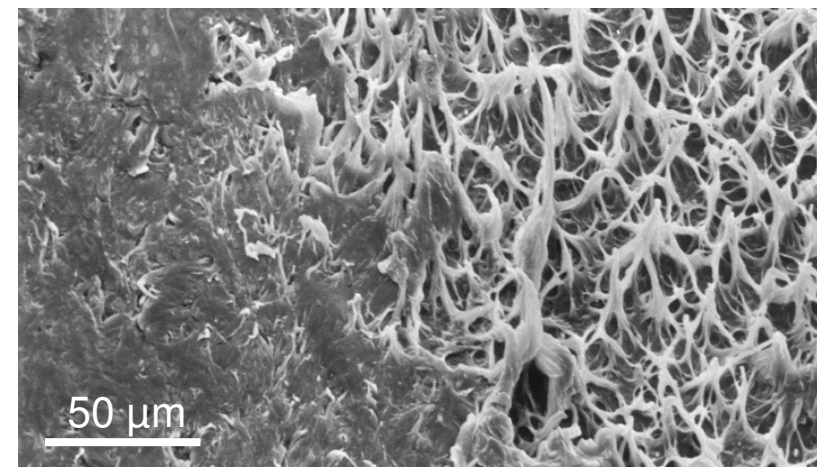
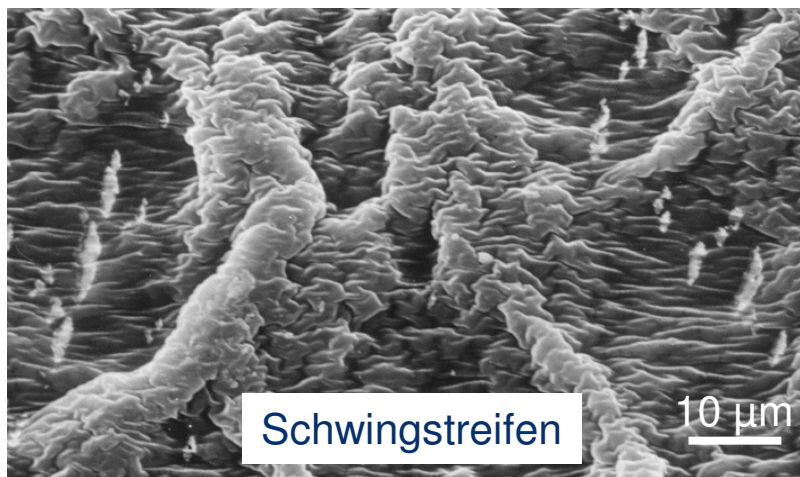
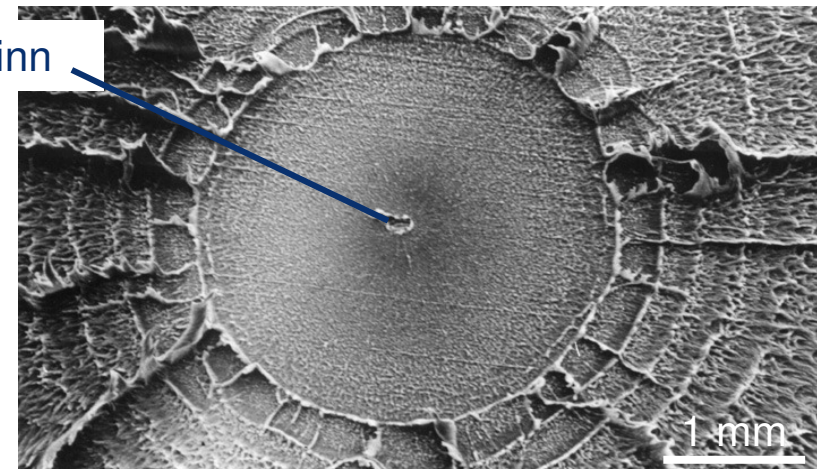
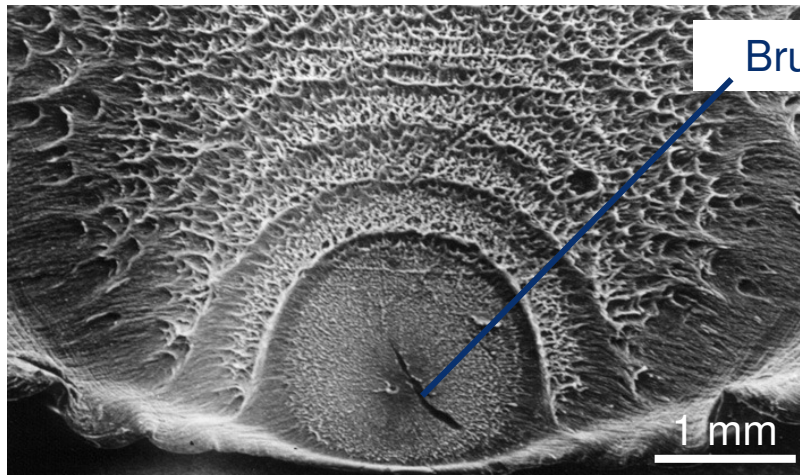
Kunststoffe unter schwingender Beanspruchung

Spannung, Dehnung, Temperatur



Kunststoffe unter schwingender Beanspruchung

Typisches Bruchbild im REM (Rasterelektronenmikroskopie)



Verhalten als Festkörper

Übersicht



Mechanische Eigenschaften

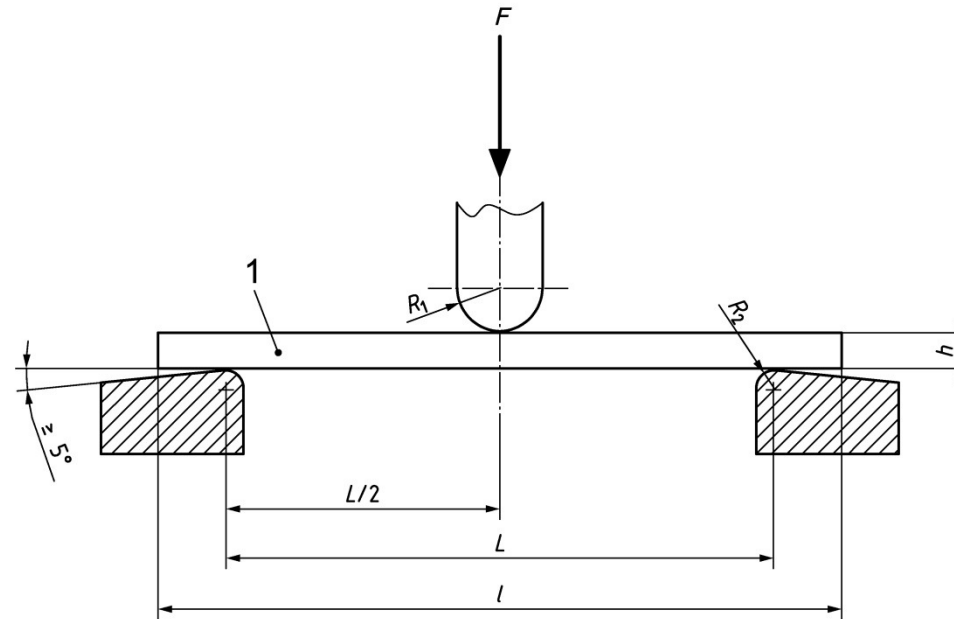
- Zugbelastung
- Der Schnellzerreiversuch
- Dynamische Belastung
- Biegebelastung
- Biegebelastung und Zugbelastung im Schlagpendel

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

3-Punkt-Biegeversuch

nach DIN EN ISO 178



- Berechnung der Randfaserdehnung nach DIN EN ISO 178, „Kunststoffe - Bestimmung der Biegebeanspruchung“

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2}$$

Mit

s: Durchbiegung

h: Höhe der Probe

L: Auflageabstand

3-Punkt-Biegeversuch

Kurzzusammenfassung

Eigenschaften:

- Biegebeanspruchung (mehrachsiger Spannungszustand)
- Kennwert: (Biege-)Spannungs-(Randfaser)Dehnungs-Diagramm

Vorteile:

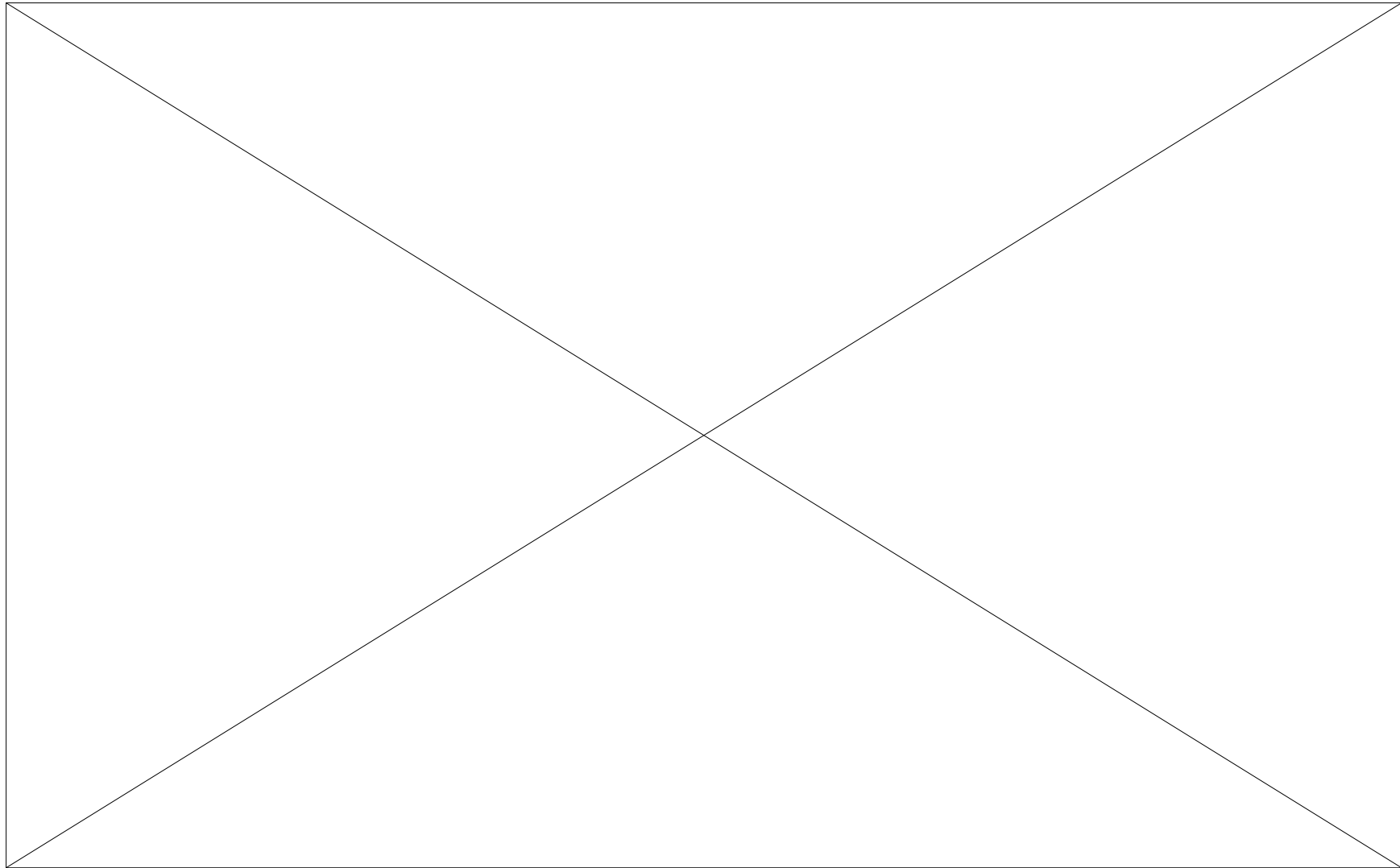
- Prüfung für Biegebeanspruchung
- praxisnäher als einachsige Zugbeanspruchung

Nachteile:

- gegenüber Zugprüfung aufwändigerer Aufbau (Auflagerabstand von Probendicke abhängig)

3-Punkt-Biegeversuch

Animation



Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

- Zugbelastung
- Der Schnellzerreiversuch
- Dynamische Belastung
- Biegebelastung
- Biegebelastung und Zugbelastung im Schlagpendel

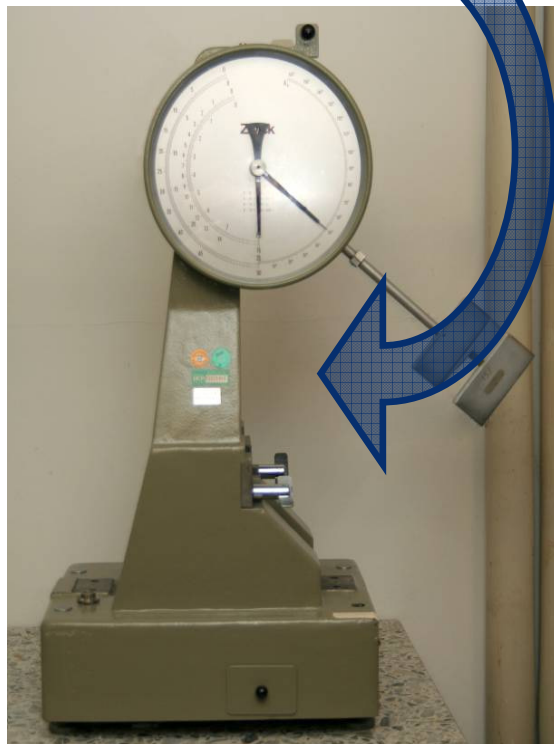
Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

Schlagbiegeversuch

Aufbau

Schlagbiegevorrichtung



Probenaufleger mit Probe und Hammer



Kunststoffprobe
mit/ohne Kerbe

Schlagrichtung

Schlagbiegeversuch

Kurzzusammenfassung

Eigenschaften:

- Biegebeanspruchung (mehrachsiger Spannungszustand)
- Kennwert: Energie (Arbeitsaufnahme pro Querschnittsfläche)
- gekerbte und ungekerbte Prüfkörper möglich
- durch Kerbe definierte Schwachstelle (bei zähen Materialien)

Vorteile:

- einfacher Aufbau und einfache Bedienung

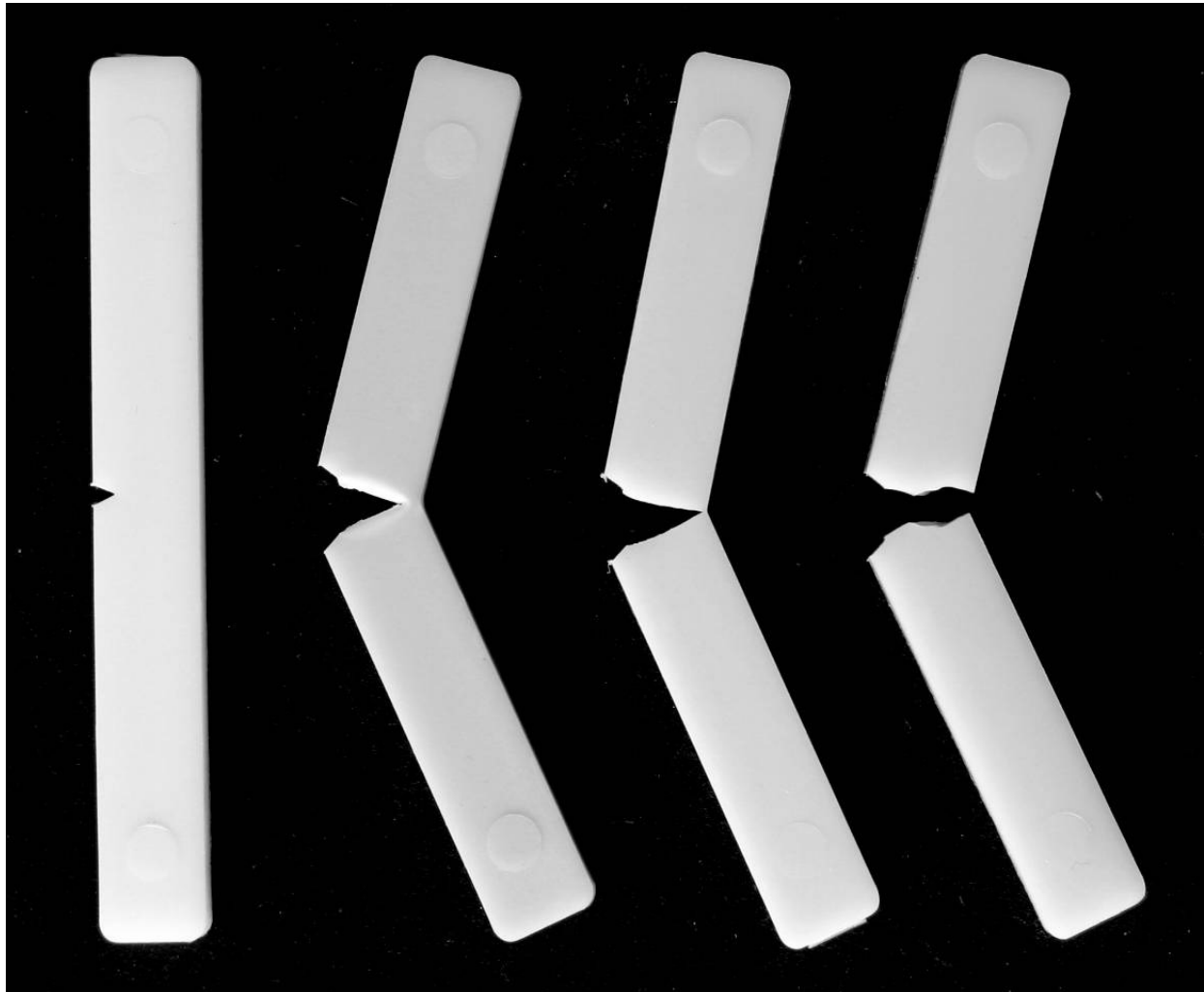
Nachteile:

- Geschwindigkeit nicht frei wählbar (Schlagpendel)
- Geschwindigkeit nicht konstant, Pendel durch Probe gebremst
- meist nicht instrumentalisiert
- Ergebnis stark von der Probenherstellung abhängig (Kerbengeometrie)

Schlagbiegeversuch

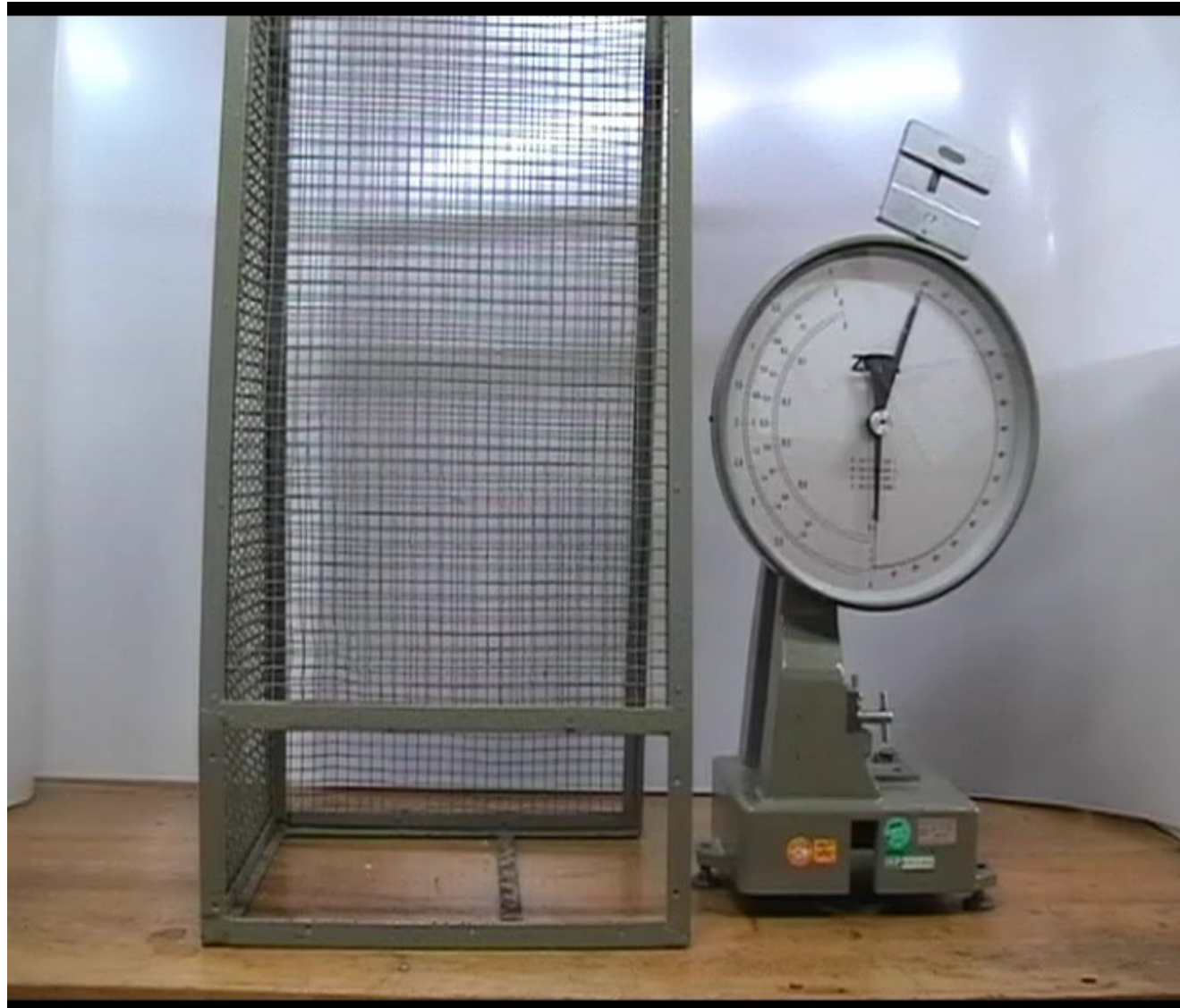
Brucharten

kein Bruch Teilbruch Scharnierbruch vollständiger Bruch



Schlagbiegeversuch

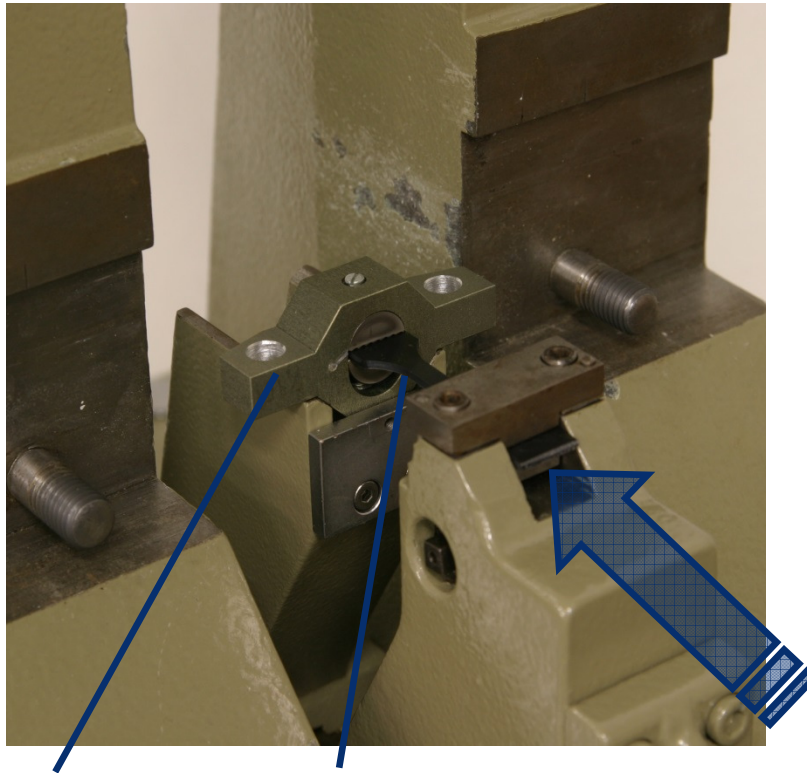
Video



Schlagzugversuch

Aufbau

Probeneinspannung



Querjoch Kunststoffprobe
mit/ohne Kerbe Schlagrichtung



Schlagpendel
(schlägt gegen das Querjoch und
zieht damit an Probe)

Schlagzugversuch

Kurzzusammenfassung

Eigenschaften:

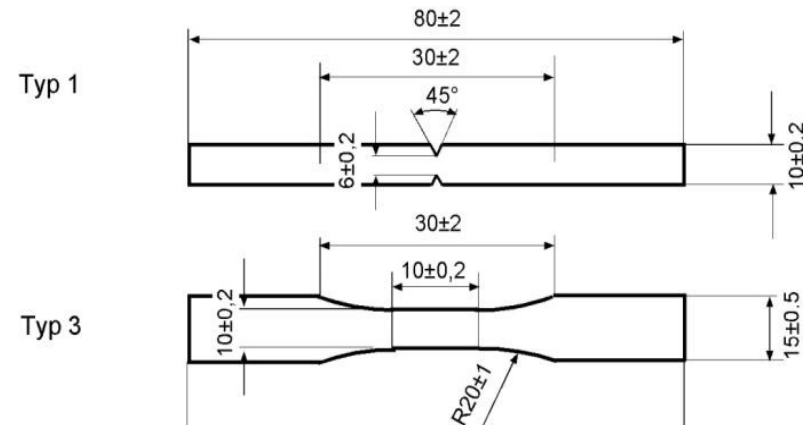
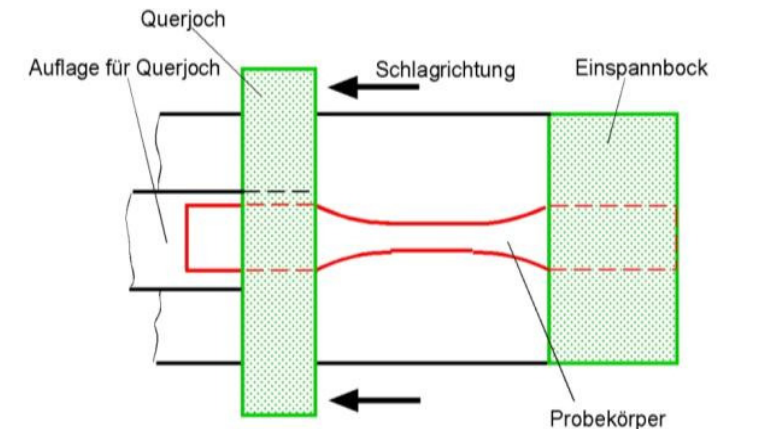
- uniaxiale Zugbeanspruchung
- Kennwert: Energie
- gekerbte Prüfkörper möglich

Vorteile:

- einfacher Aufbau und Auswertung
- einfacher Spannungszustand

Nachteile:

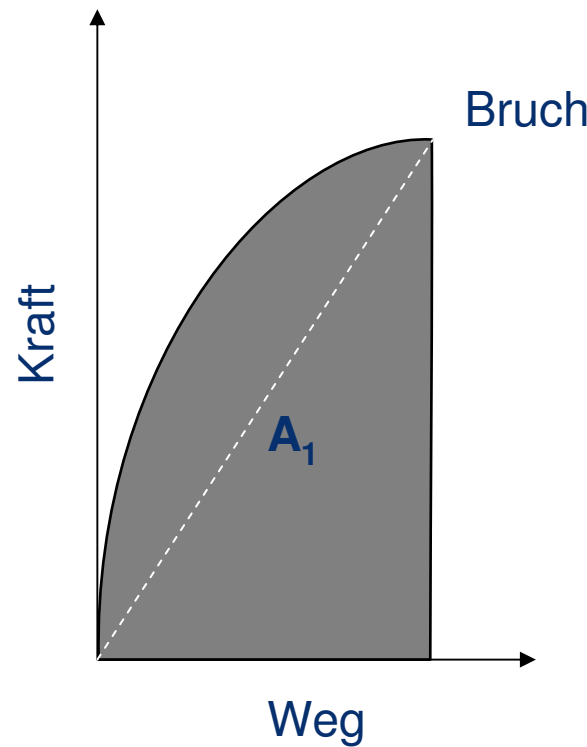
- Geschwindigkeit nicht frei wählbar (Schlagpendel)
- Geschwindigkeit nicht konstant, Pendel durch Probe gebremst
- meist nicht instrumentalisiert
- Ergebnis stark von der Probenherstellung abhängig (Kerbengeometrie)



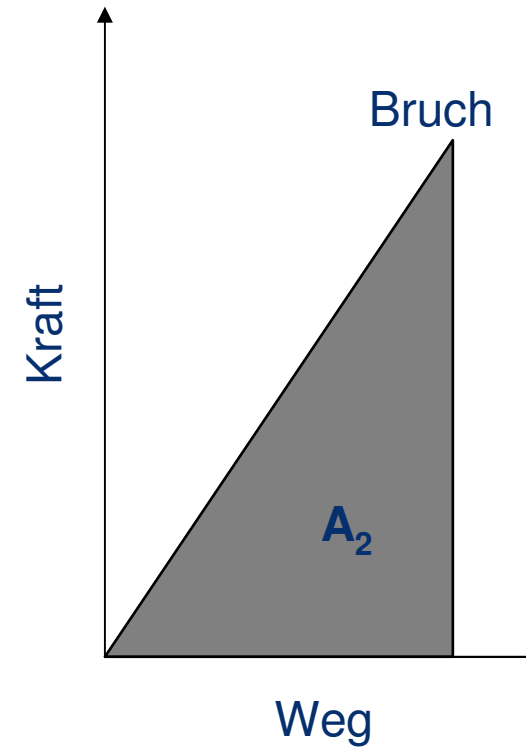
Schlagzugversuch

Messkurven

Jede Fläche steht für die aufgenommene Energie bis zum Bruch. Welche Kurve zeigt die größere Zähigkeit?



$$A_1 > A_2$$



Lernstopp

Verständnisfragen



- Sie sollen ein Bauteil auslegen, das in der späteren Anwendung sowohl schwingend als auch, in Ausnahmefällen, schlagartig belastet wird. Mit welchen Prüfverfahren ermitteln Sie geeignete Kennwerte für die Werkstoffauswahl?

Verhalten als Festkörper

Übersicht



Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

- Elektrische Eigenschaften
- Magnetische Eigenschaften
- Optische Eigenschaften
- Akustische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

Elektrische Eigenschaften

Isolator

Kunststoffe sind nicht elektrisch leitfähig - Isolator

keine Atombindungen; keine freien Elektronen, daher keine Elektronenwanderung möglich

Anforderungen an einen Isolator

- hohe Durchschlagfestigkeit
- geringe Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit

Einsatzgebiete

- Kabelummantelung, elektrische Bauteile



Quelle: Wikipedia



Quelle: Wiha



Quelle: Wacker

Elektrische Eigenschaften

Durchschlagfestigkeit



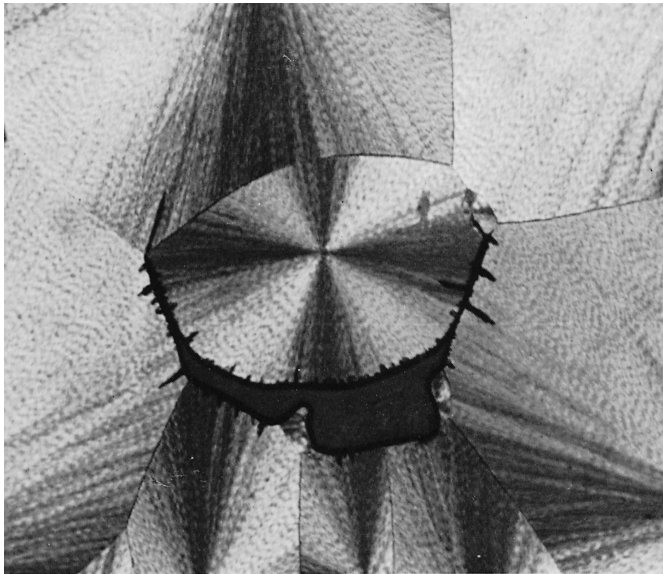
Durchschlagfestigkeit: Hohe Spannungen können ein Zerstören des Kunststoffs bewirken. Die Fähigkeit, hohen Spannungen zu widerstehen, wird dabei durch die Durchschlagfestigkeit beschrieben.

Oberflächenwiderstand: Widerstand, der sich unter einer Gleichstromspannung zwischen zwei Elektroden einstellt, die auf die Oberfläche eines Kunststoffprüfkörpers aufgesetzt sind

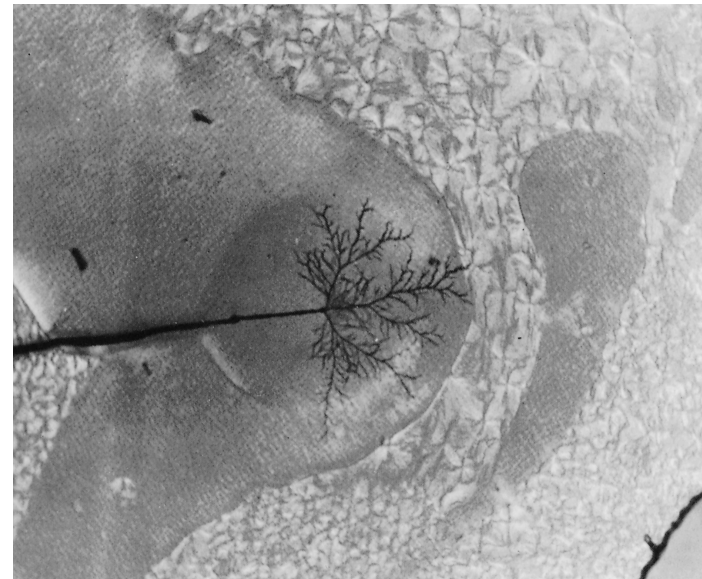
Der Oberflächenwiderstand und die Durchschlagfestigkeit sind wichtige technische Kennwerte, die durch Verunreinigungen, Inhomogenitäten und die Oberflächenbeschaffenheit des Kunststoffes beeinflusst werden.

Elektrische Eigenschaften

Für Isolatoren ist es wichtig, die Langzeitdurchschlagfestigkeit zu prüfen, denn der elektrische Widerstand von Kunststoffen fällt mit zunehmender Temperatur und Langzeitbelastung.



Durchschlagkanal an Sphärolitgrenze von PP



Durchschlagkanal in strukturloser feinkristalliner Zone von PP

Elektrische Eigenschaften

Isolator

Kunststoffe sind nicht elektrisch leitfähig - Isolator

Nachteil:

- elektrostatische Aufladung (Beeinflussung durch Zusatzstoffe)

Beispiele:

- Aufladung Kleidung
- anhaftendes Pulver
- Explosionsgefahr im Untertagebau

Elektrische Eigenschaften

Perkolation

Grundlagenforschung:

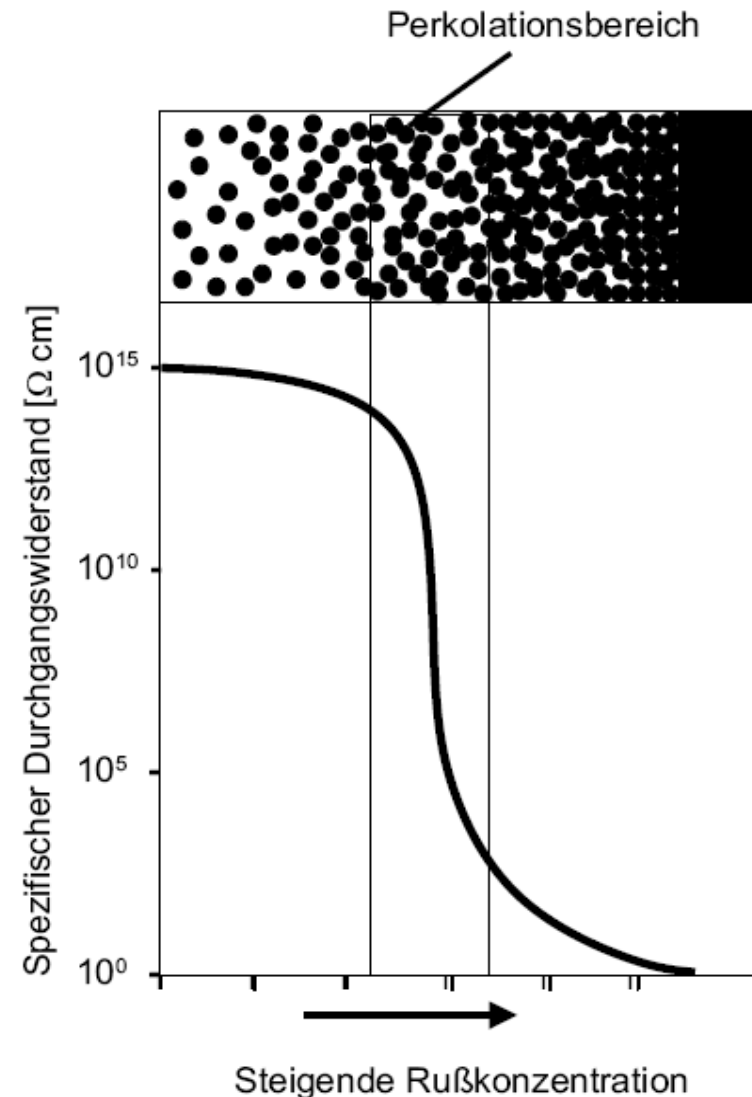
Intrinsisch leitfähige Polymere (teure Exoten)

Elektrisch leitfähige Kunststoffe:

Leitfähig gemachte Kunststoffe (durch Zugabe von Leitruß, Graphit, aber auch leitfähigen Fasern, Pulver und Plättchen aus Metall oder Kohlenstoff)

Perkulationsschwelle:

Menge an Füllstoff, bei der sich leitfähige Brücken bilden



Elektrische Eigenschaften

Dielektrisch leitfähige Kunststoffe

Dielektrisch leitfähige Kunststoffe (Ausrichtung von Ladungen oder Ketten-segmenten im elektrischen Feld)

Wichtigster Kennwert: relative Permittivität (früher: Dielektrizitätskonstante)

Anwendung:

Hochfrequenzschweißen

(Schweißen von Infusionsbeuteln, Blister)

Einsatz in Kondensatoren

(Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten)



Quelle: Leitz



Quelle:
MediSeal

- Warum sind Kunststoffe ohne Zusatzstoffe keine elektrischen Leiter?

Verhalten als Festkörper

Übersicht



Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

- Elektrische Eigenschaften
- Magnetische Eigenschaften
- Optische Eigenschaften
- Akustische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

Magnetische Eigenschaften

Begriff und Anwendung



- Reine Polymere sind leicht diamagnetisch, das heißt, dass das äußere Magnetfeld magnetische Momente induzieren kann. Es sind jedoch keine permanenten magnetischen Momente im Stoff vorhanden, die wie bei den ferromagnetischen oder paramagnetischen Stoffen ausgerichtet werden können.
- Elektromagnetische Wellen können Kunststoffbauteile ungehindert durchdringen.

Grundlagenforschung:

- Intrinsisch ferromagnetische Polymere (teure Exoten)

Magnetische Kunststoffe:

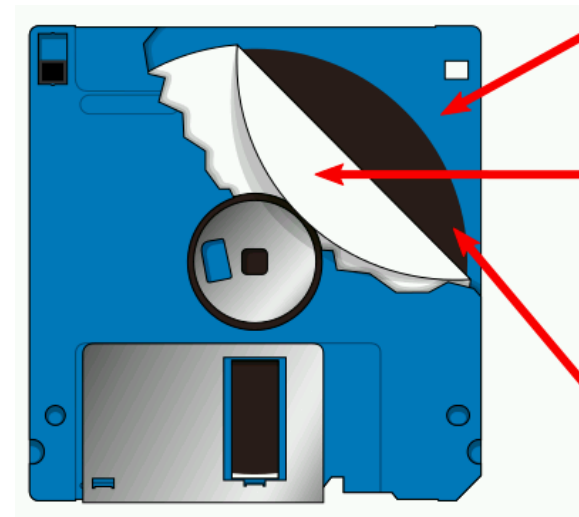
Mit ferromagnetischen Partikeln gefüllte Formmassen oder Beschichtungen

Magnetische Eigenschaften

Blick in die Vergangenheit



Quelle: Wikipedia



Kunststoff-
gehäuse

Papier-
schicht

Magnet-
scheibe

Quelle: Wikipedia

Verhalten als Festkörper

Übersicht



Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

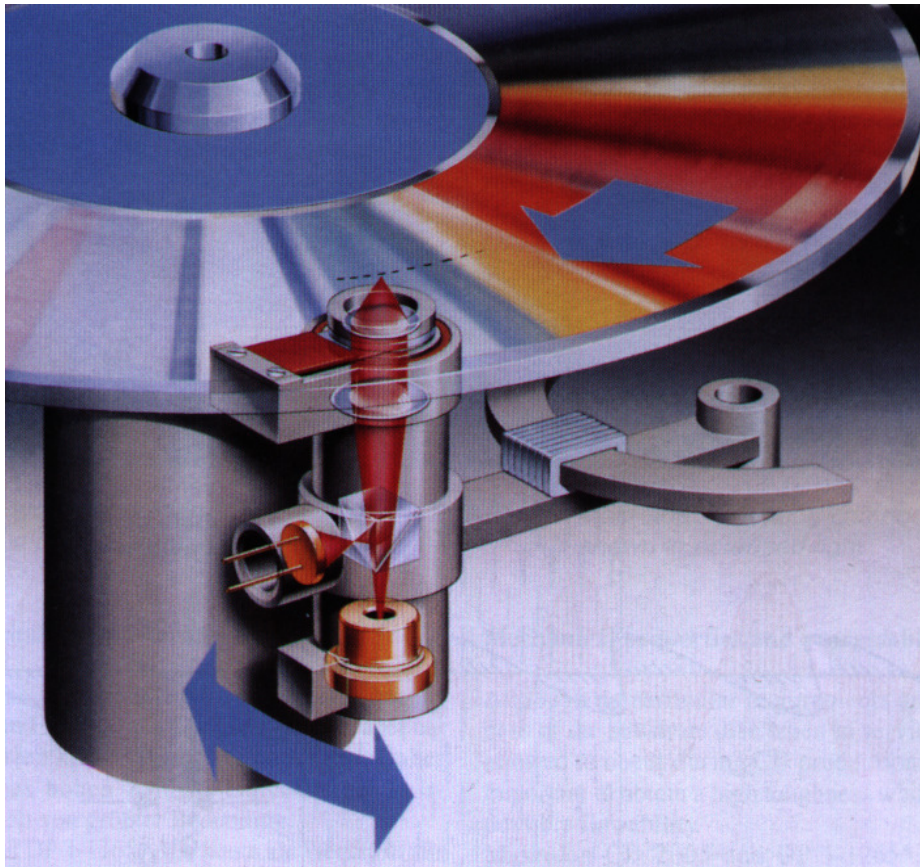
- Elektrische Eigenschaften
- Magnetische Eigenschaften
- Optische Eigenschaften
- Akustische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

Optische Eigenschaften

Optische Datenträger

Von der CD (700 MB, 1982) zur Blu-ray (bis 128 GB, 2006)



Vorteile gegenüber Bandspeichern:

- höhere Datendichte
- kein Qualitätsverlust beim Abspielen
- kein Bandsalat

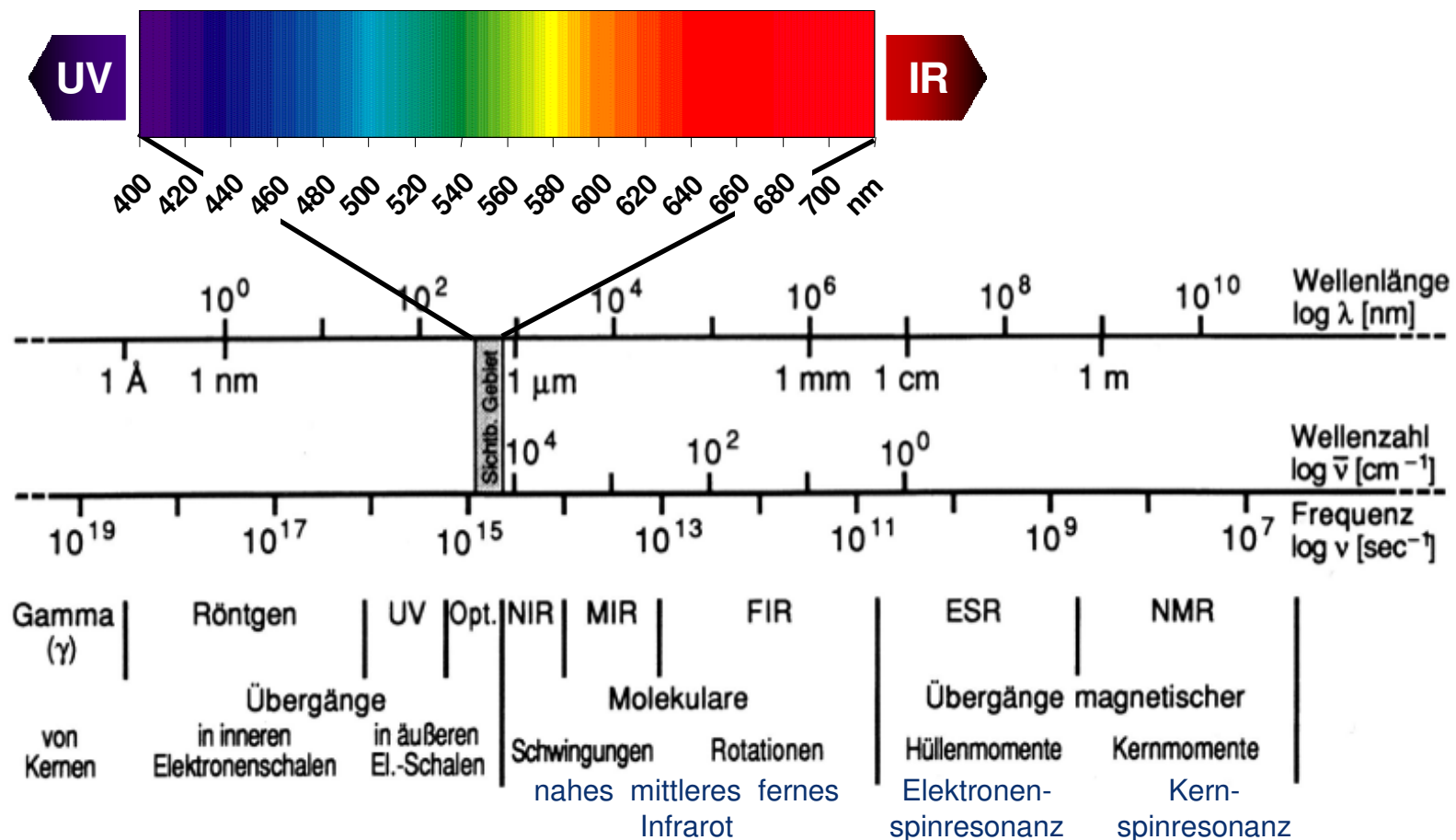
Anforderungen:

- homogene optische Eigenschaften wie Brechung, Transparenz

Optische Eigenschaften

Sichtbares Licht

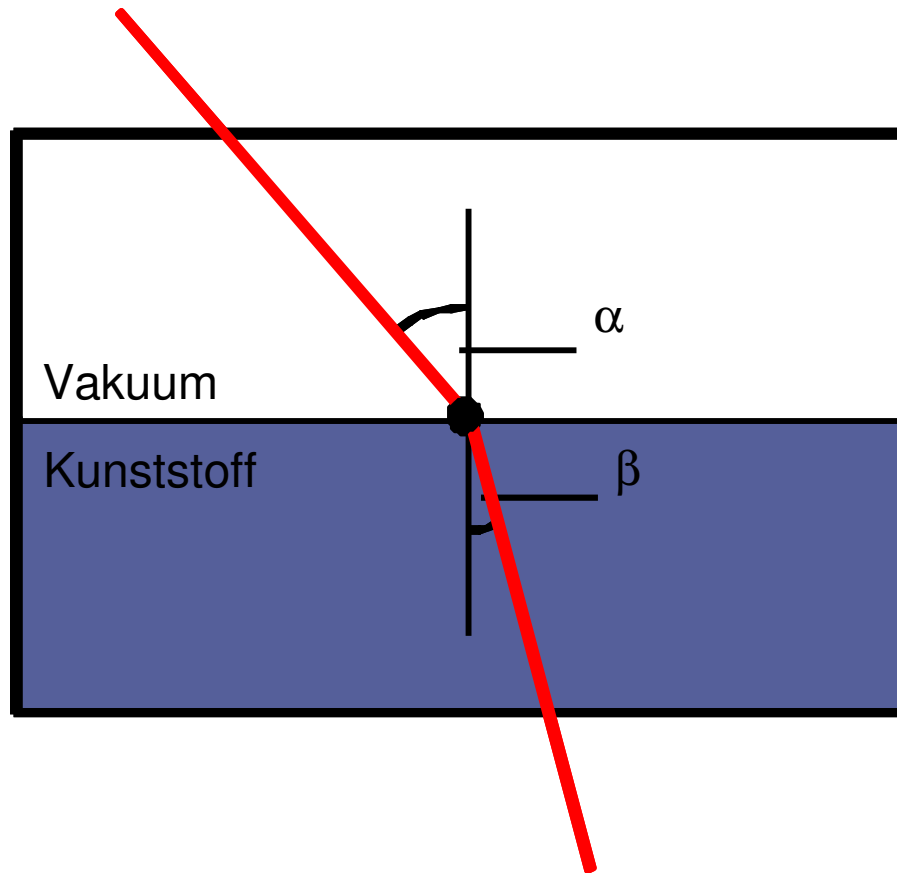
Das sichtbare Licht ist lediglich ein enger Bereich des Wellenlängenspektrums elektromagnetischer Strahlung.



Optische Eigenschaften

Brechungsindex

Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zur Lichtgeschwindigkeit im Medium



$$n = \frac{c_0}{c}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

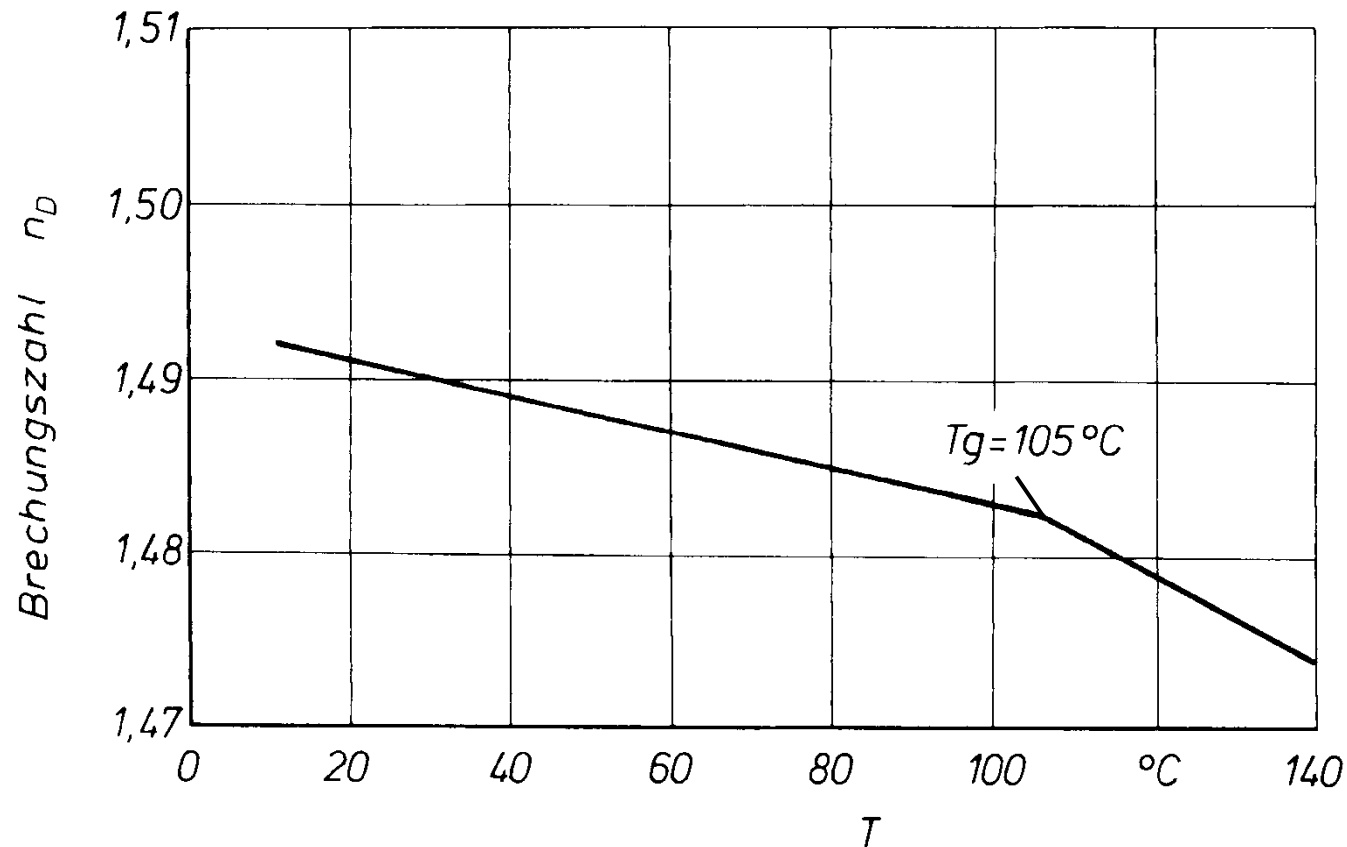
n: Brechungszahl

c: Lichtgeschwindigkeit

Optische Eigenschaften

Brechungsindex

Abhängigkeit von der Temperatur (hier: PMMA)

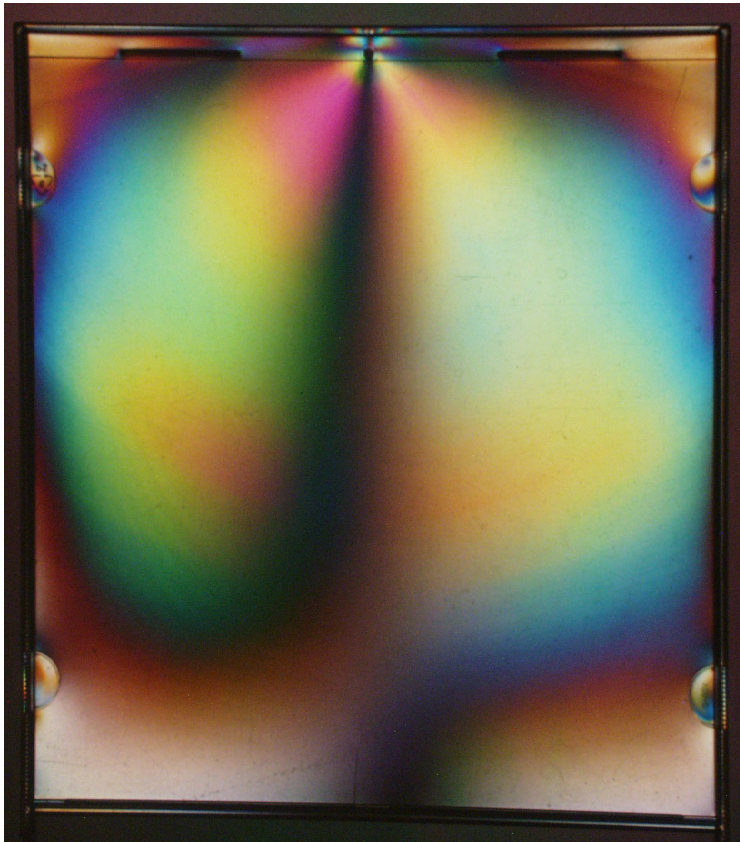


Die Brechungszeit hat bei transparenten, amorphen Kunststoffen bei der Glasübergangstemperatur T_g einen Knick hin zur stärkeren Neigung.

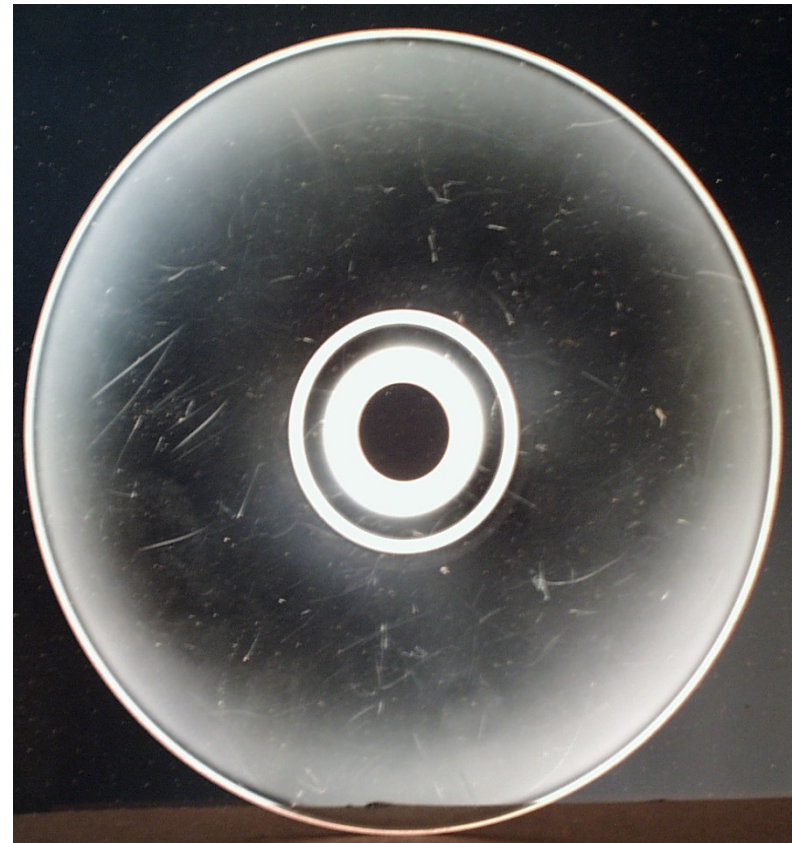
- Welche optischen Anforderungen werden an einen Kunststoff gestellt, der als CD oder DVD verwendet werden soll?

Abhängig von der Orientierung der Makromoleküle

↓ Anguss



Hülle mit vielen Orientierungen

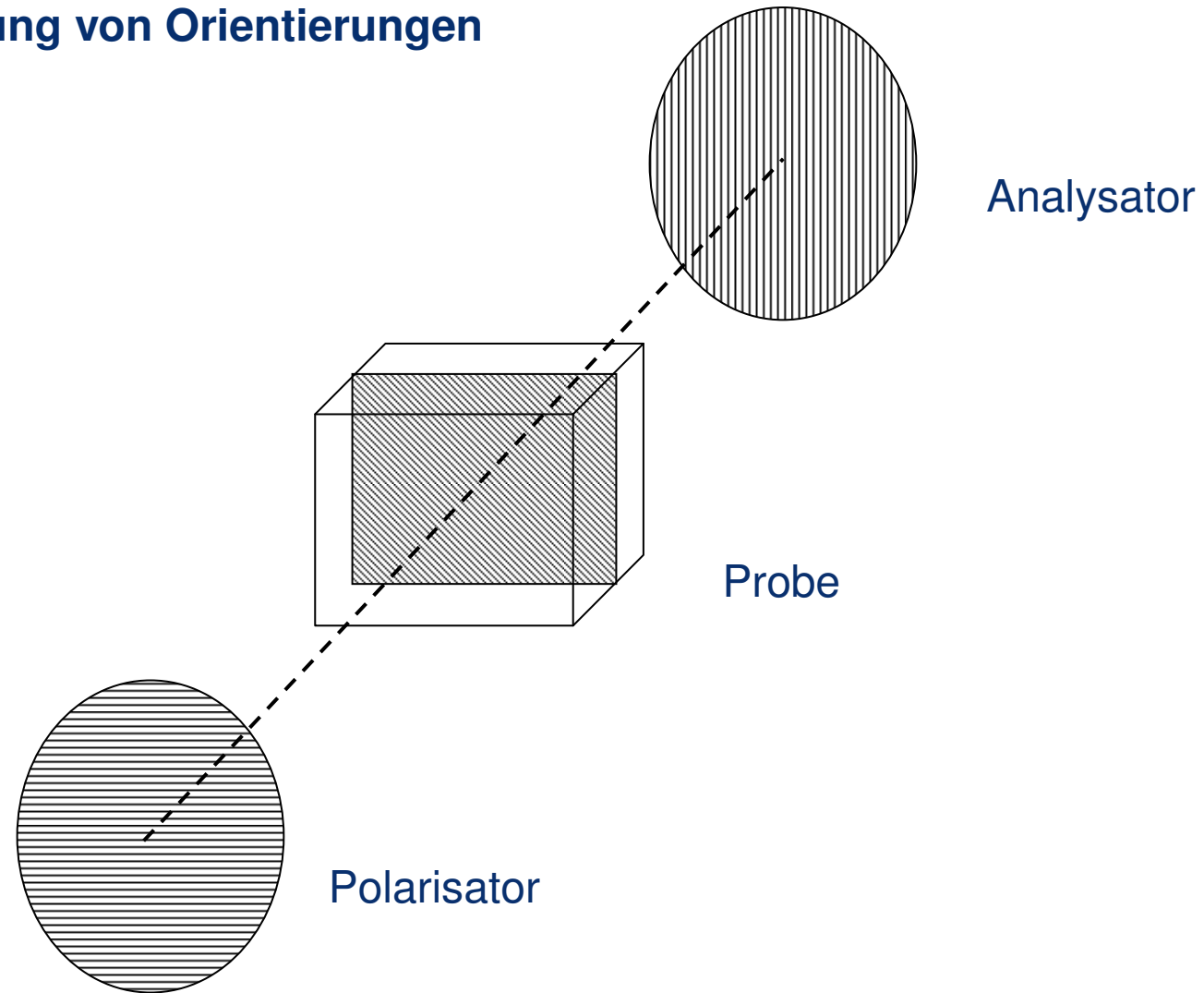


CD mit wenig Orientierungen

Optische Eigenschaften

Doppelbrechung

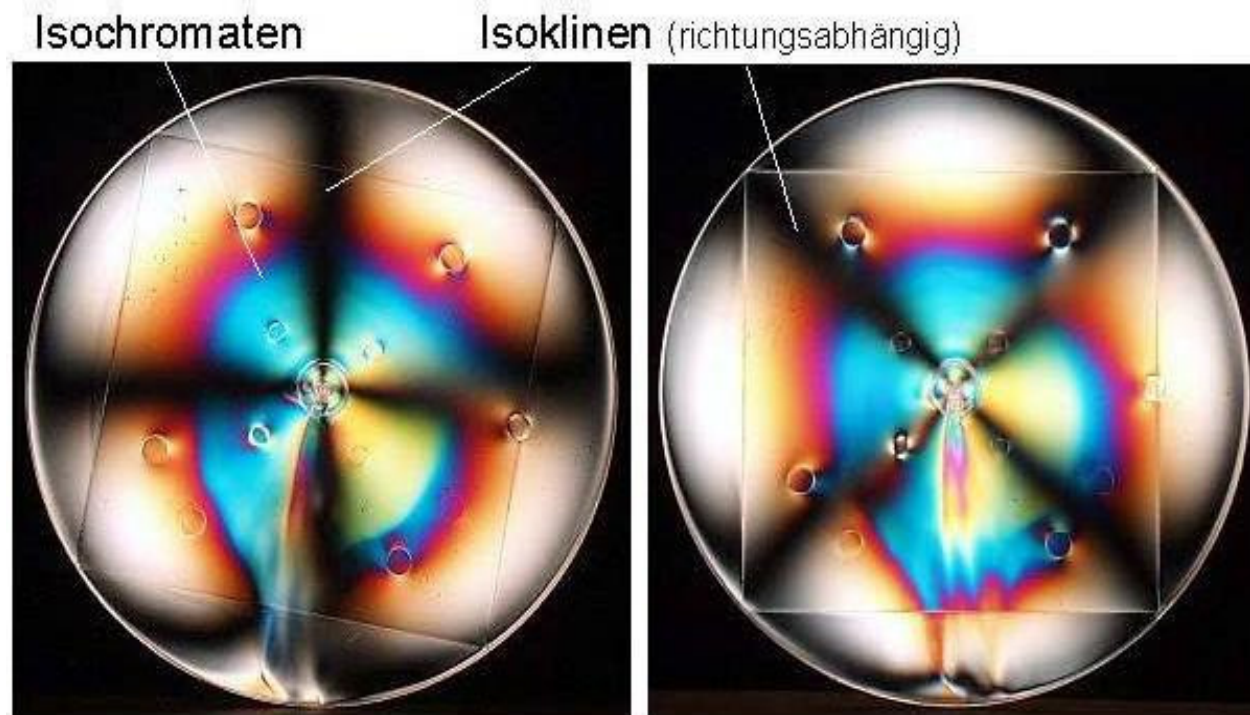
Sichtbarmachung von Orientierungen



Optische Eigenschaften

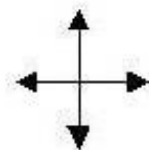
Doppelbrechung

Sichtbarmachung von Orientierungen

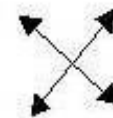


linear polarisiertes Durchlicht

linear polarisiertes Durchlicht



Polarisatorstellung



Optische Eigenschaften

Transparenz

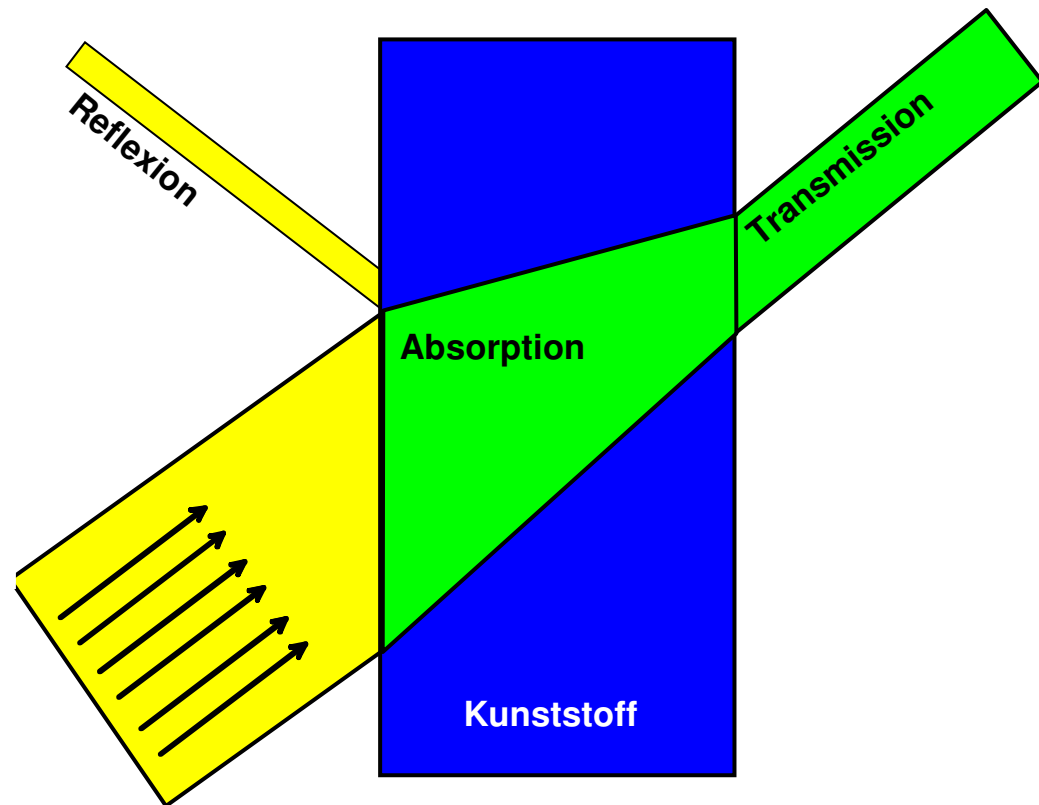
Transparenz

Fähigkeit von Materie, Wellen
(Schall, Wasser, Licht,...)
durchzulassen

Beispiel hier: Licht

Lichtdurchlässigkeit

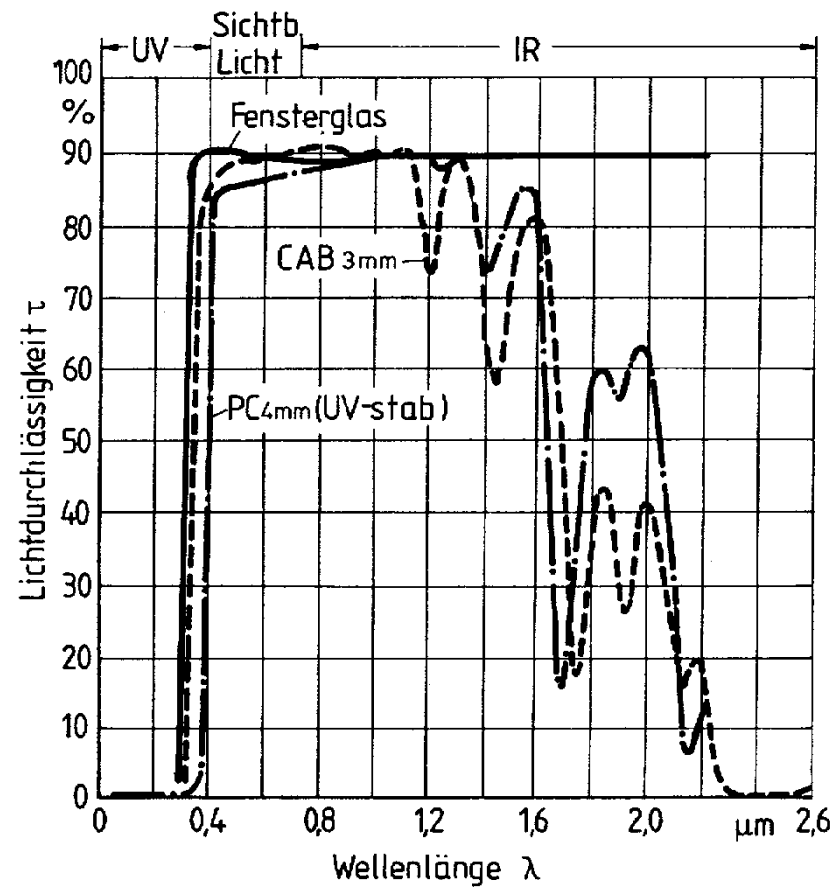
ist die Transparenz elek-
tromagnetischer Strahlung im
Bereich des sichtbaren Lichts



Optische Eigenschaften

Lichtdurchlässigkeit

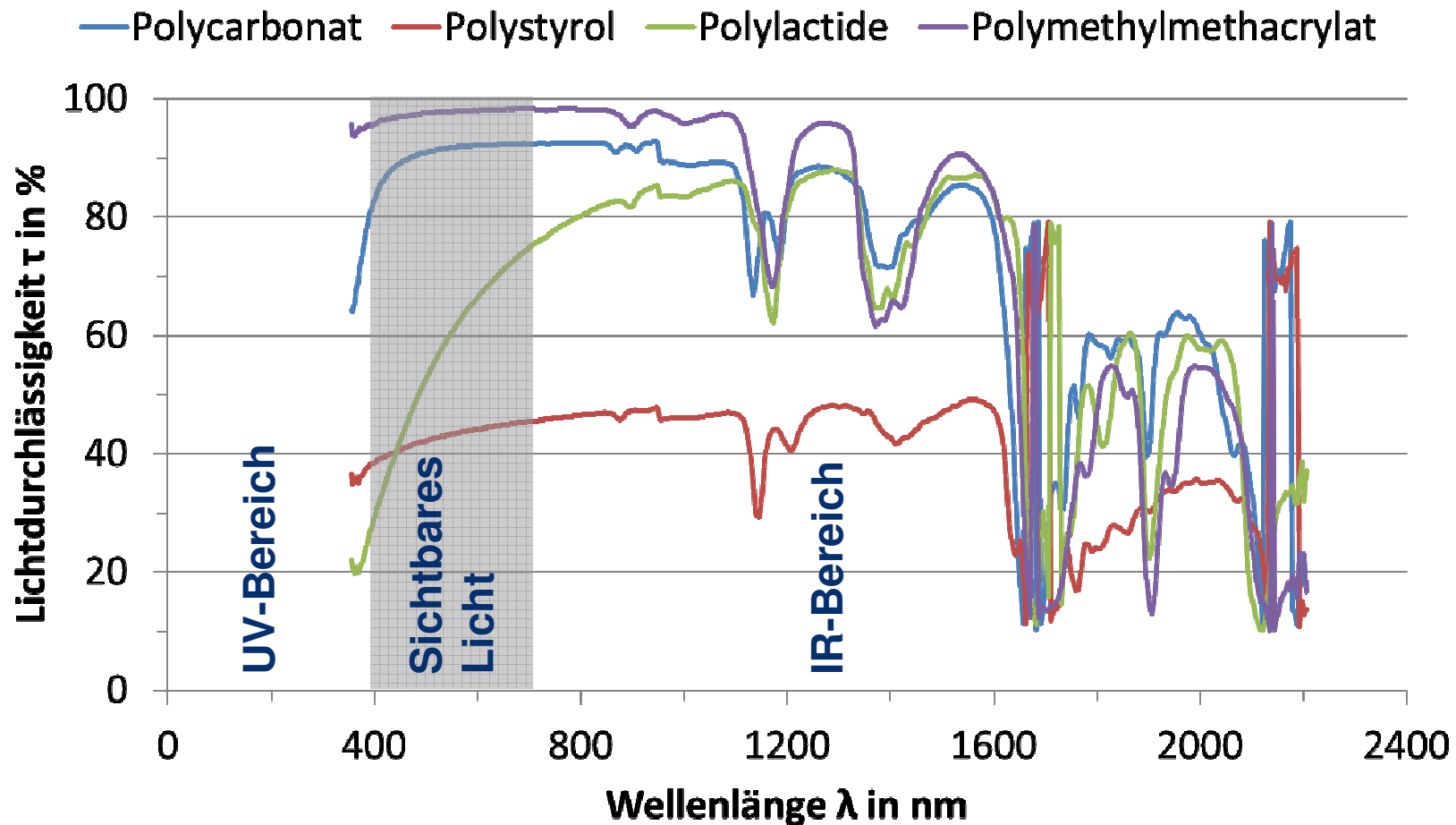
Lichtdurchlässigkeit ist die Transparenz elektromagnetischer Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichts.



Optische Eigenschaften

Lichtdurchlässigkeit gemessen am IKT

Lichtdurchlässigkeit ist die Transparenz elektromagnetischer Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichts.



- Wie können Orientierungen im Kunststoff sichtbar gemacht werden?
- Warum bekommen Sie im Auto hinter der Glasscheibe keinen Sonnenbrand?

Optische Eigenschaften

Amorphe und teilkristalline Kunststoffe



Amorphe Polymere

- regellose Anordnung der Kettensegmente
- einfallendes Licht wird nicht gestreut, kann ungehindert durchscheinen
- amorphe Polymere ohne lichtbrechende Zusatzstoffe sind **transparent** oder **glasklar** (zum Beispiel: PMMA)

Teilkristalline Polymere

- teilweise kristalline Anordnung der Ketten
- unterschiedliche Orientierungen der Kristallite
- einfallendes Licht wird gestreut
- teilkristalline Polymere sind stets **opak** oder **milchig**

Optische Eigenschaften

Trübung



Quelle: Bauer



Quelle: Coca Cola

Optische Eigenschaften

Video

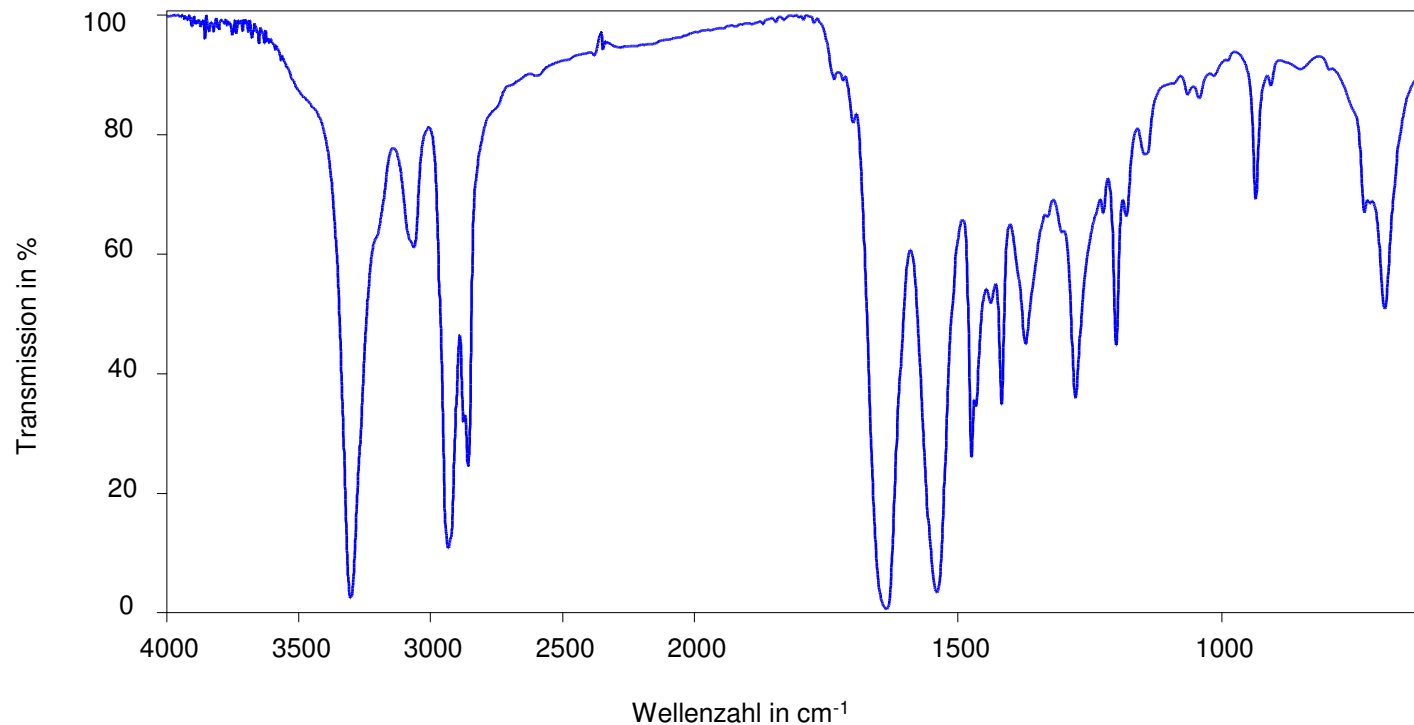
IKT

Trübung bzw. Opazität Einfluss der Kristallisation



Einsatz dieses Effekts in der Infrarot-Spektroskopie

- Absorption von IR-Strahlung durch funktionelle Gruppen der Polymere
- je nach Polymer eindeutiges Absorptionsmuster („Fingerabdruck“)

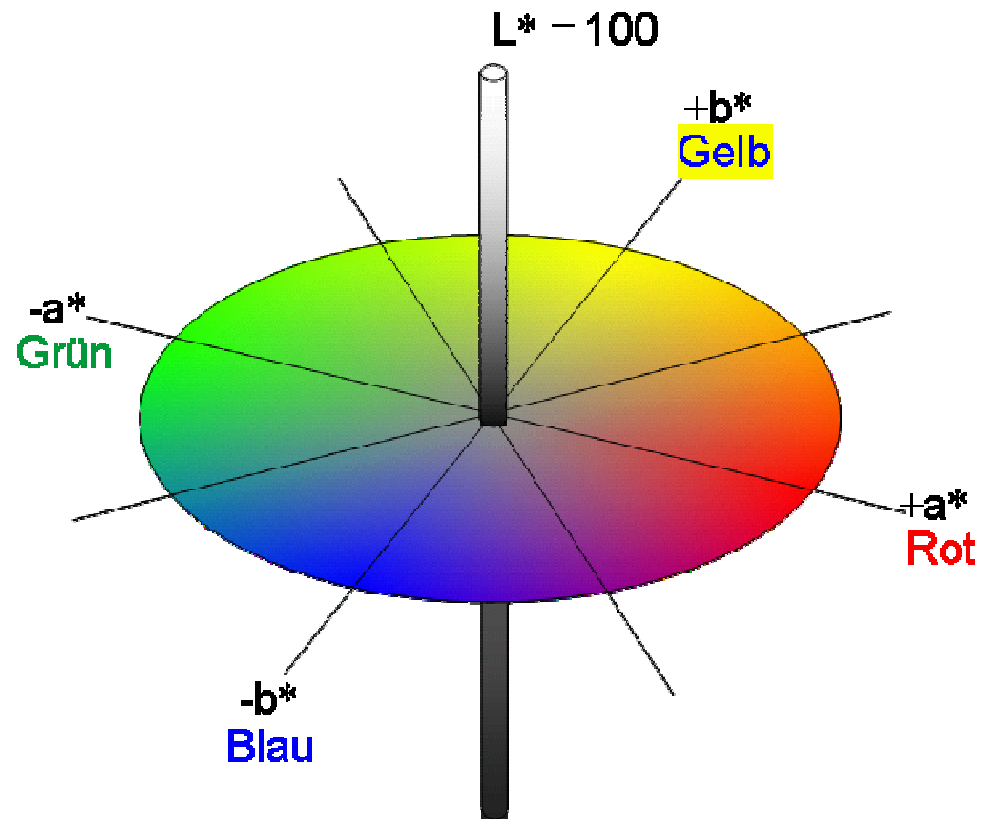


PA 66

Optische Eigenschaften

Farbmessung

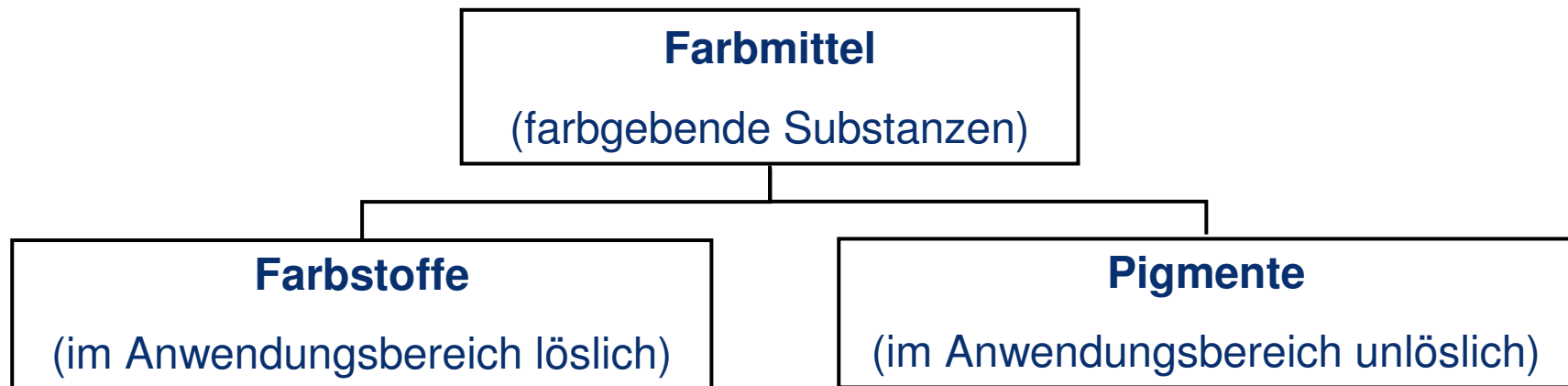
- CIE-System
- Farbmessung seit Mitte der 70er Jahre
- Koordinaten L (Helligkeit), a (grün-rot), b (blau-gelb)



Optische Eigenschaften

Farbmittel

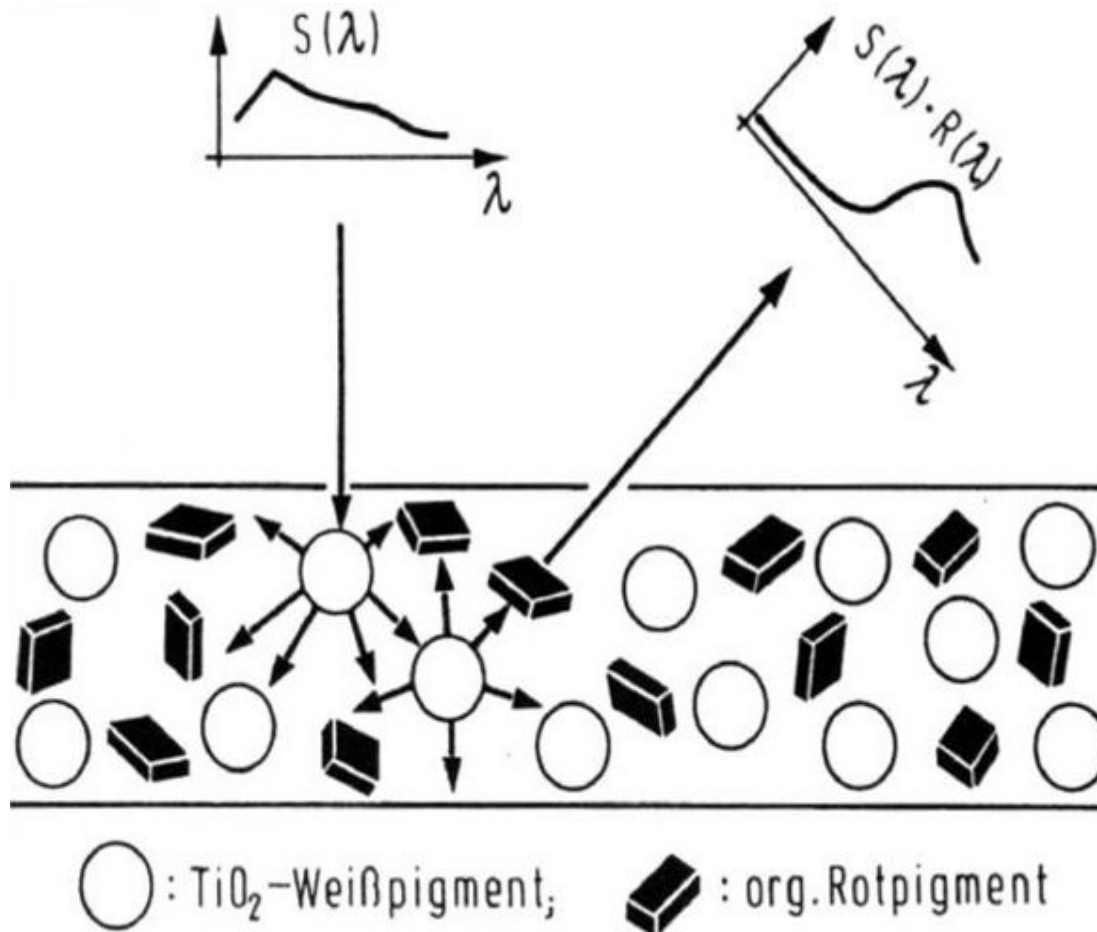
Der Begriff Farbmittel umfasst alle Stoffe, die aufgrund ihrer farbgebenden Eigenschaften eingesetzt werden. Es gibt folgende Unterscheidung:



Optische Eigenschaften

Pigmentpartikeln in eingefärbten Kunststoffen

Kunststoffe werden meist durch Einmischen von Pigmenten „gefärbt“. Sie wirken als innere Streuzentren und reflektieren diffus.



Plättchenförmiges Pigment:

richtungsabhängig

Kugelförmiges Pigment und löslicher Farbstoff:

richtungsunabhängig

Optische Eigenschaften

Einfluss von Glanz und Farbe



Quelle:
BYK
Gardner

Optische Eigenschaften

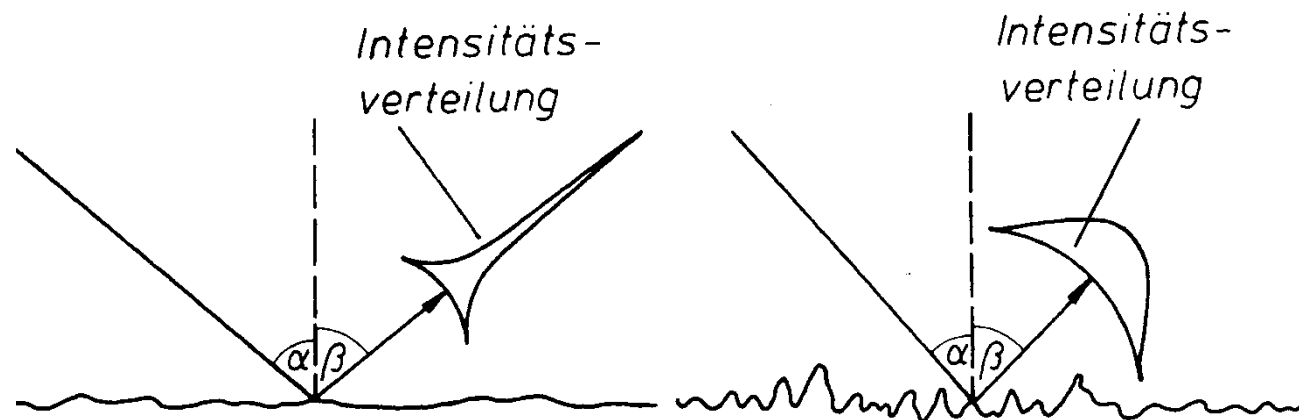
Glanz

Glanz

...ist die Eigenschaft einer Oberfläche, Licht ganz oder teilweise spiegelnd zu reflektieren.

abhängig von:

- der Richtung und Polarisation des einfallenden Lichts
- der Richtung und Polarisation des reflektierenden Lichts
- der Wellenlänge des einfallenden Lichts
- der Oberflächenstruktur des Gegenstandes
- dem Beobachtungswinkel



Lernstopp

Verständnisfragen

Amorphe und teilkristalline Kunststoffe unterscheiden sich im Allgemeinen in ihren optischen Eigenschaften. Ordnen Sie zu.

	Amorph	Teilkristallin
Regellose Anordnung der Kettensegmente		
Einfallendes Licht wird nicht gestreut, kann ungehindert durchscheinen		
Einfallendes Licht wird gestreut		
Kunststoff erscheint opak (oder milchig)		
Kunststoff erscheint transparent		

Verhalten als Festkörper

Übersicht



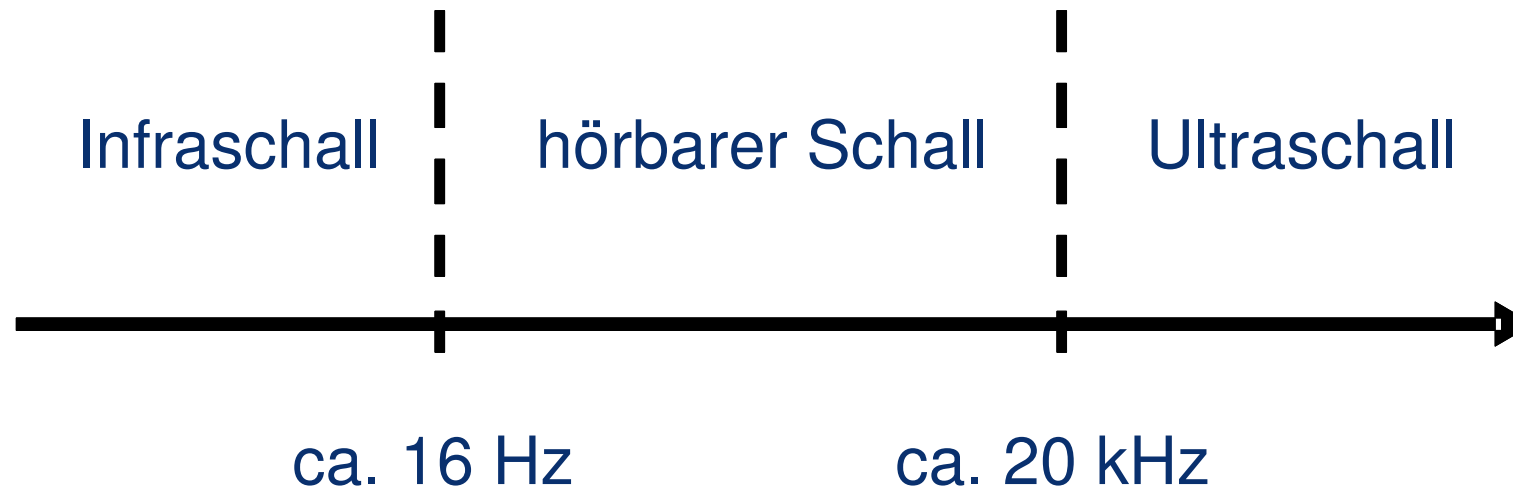
Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

- Elektrische Eigenschaften
- Magnetische Eigenschaften
- Optische Eigenschaften
- Akustische Eigenschaften

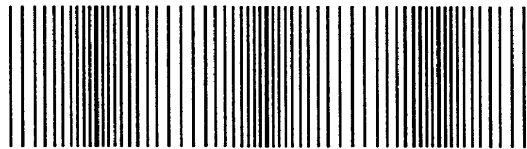
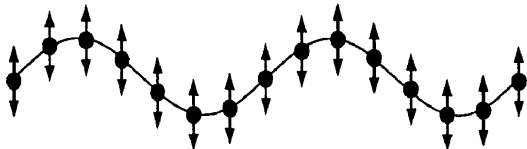
Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

Schall ist eine mechanische Schwingung eines Mediums (fest, flüssig, gasförmig)



Akustische Eigenschaften

Wellenformen

Typ	Wellenform
Reine Longitudinalwelle (Dehnwellen)	
Reine Transversalwelle	

Vereinfachte Berechnung der Schallgeschwindigkeit einer Longitudinalwelle v_L und Transversalwelle v_T in einem Kunststoffstab:

$$v_L^2 = \frac{G}{\rho} \quad v_T^2 = \frac{E}{\rho}$$

G: Schubmodul

E: Elastizitätsmodul

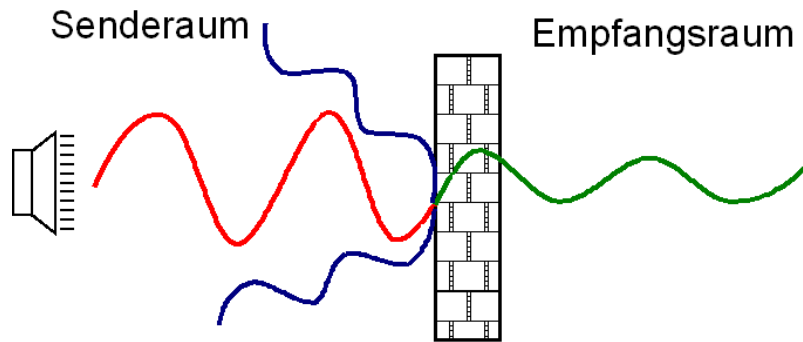
ρ : Dichte

Akustische Eigenschaften

Luftschaall

Schalldämmung

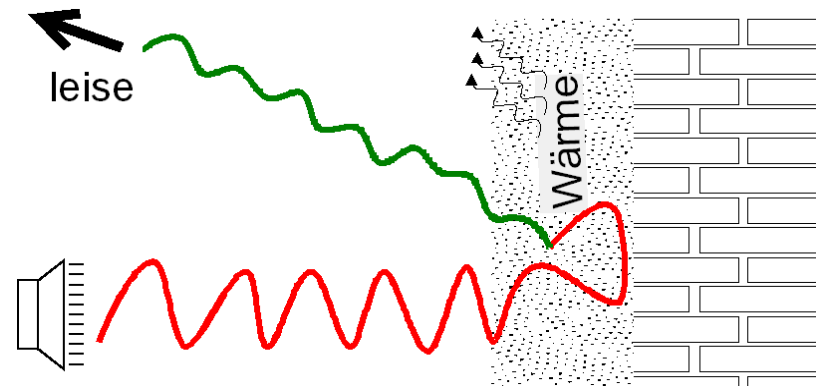
Reflexion



Beispiel:
Material: Nahfeldschale
Eigenschaften: Polyamid/Glasfaser
Steifigkeit, Dichte

Schalldämpfung

Absorption



Beispiel:
Material: Innenraumauskleidung
Eigenschaften: Schäume, Teppich, Vlies
Dämpfungsfaktor

Akustische Eigenschaften

Technische Akustik



In der technischen Akustik wird unterschieden zwischen:

- Schallreflexion
- Schallausbreitung
- Schallabsorption

Zur Schallreflexion ist eine hohe Masse erforderlich. Will man die Schallausbreitung in einem festen Körper vermeiden, so sind weiche Zwischenlager erforderlich.

Sogenannte Schallabsorber sind offenporige Schaumstoffe, die nicht als starr angesehen werden können. Die Welle dringt in die Poren ein und verliert ihre Energie durch Reibung zwischen den Molekülen der Luft und durch die Deformation der Wände.

Akustische Eigenschaften

Einfluss mechanischer Kennwerte



Das akustische Verhalten der Kunststoffe hängt eng mit dem dynamisch-elastischem Verhalten zusammen. Es bestehen jedoch charakteristische Unterschiede zwischen den kompakten und den geschäumten Kunststoffen.

Die gebräuchlichsten **Kenngrößen**, um das akustische Verhalten eines Kunststoffes zu charakterisieren sind:

- Elastizitätsmodul E (Tonhöhe)
- “Verlustfaktor” $\tan \delta$ (Stärke der Lautstärkeabnahme)

Man kann die Eignung eines Polymerwerkstoffs als akustischer Isolator für die gegebene Bedingung anhand der Kurve des Verlustfaktors $\tan \delta$ über der Temperatur abschätzen.

- Sie stoßen auf einer Party mit Freunden (auf die bestandene Prüfung) an. Von welchem mechanischen Kennwert ist die Tonhöhe des klingenden Weinglases abhängig?
- Welcher mechanische Kennwert ist für die Geschwindigkeit des Abklingens verantwortlich?

Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

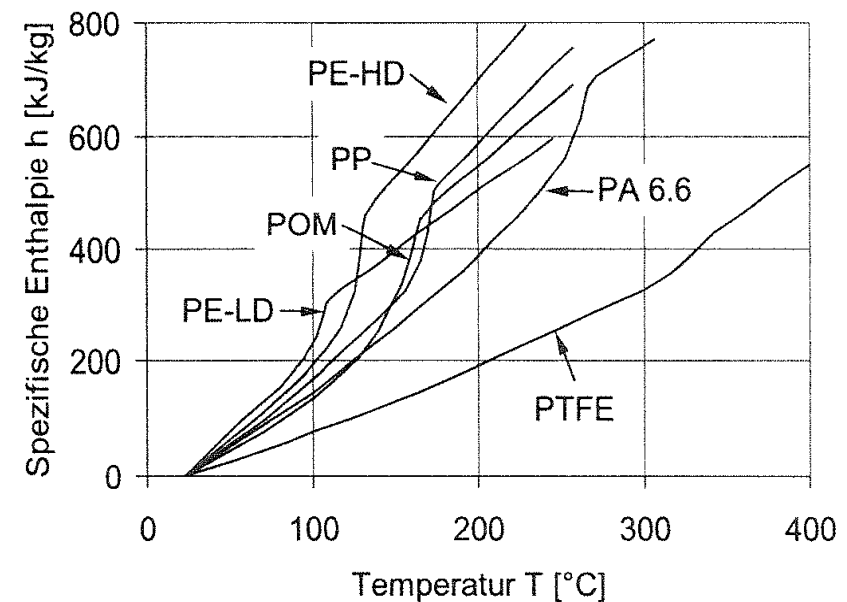
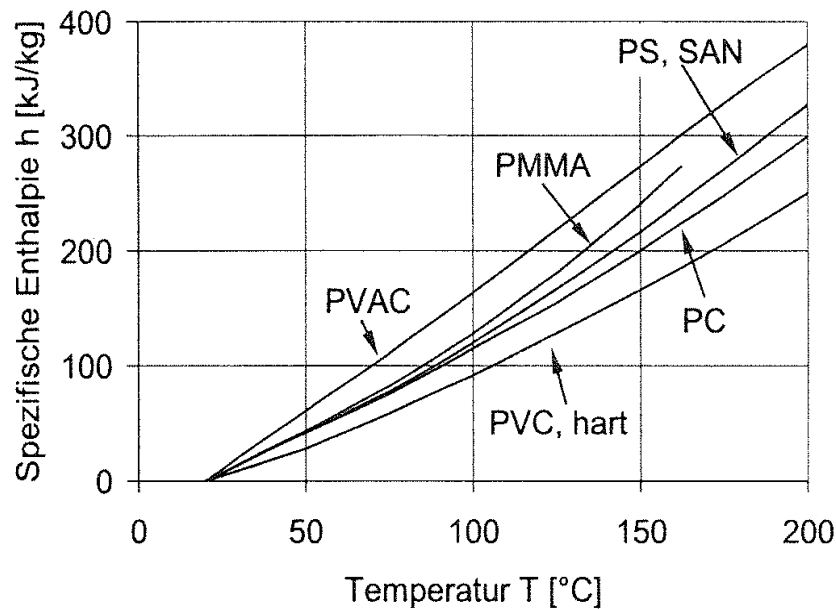
Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

- Enthalpie Δh
- Spezifische Wärmekapazität c_p
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmeausdehnungskoeffizient α
- Temperaturleitfähigkeit a
- Wärmeeindringzahl b
- Stofftransport
- Maßnahmen zur Permeationsminderung

Enthalpie Δh

Vergleich amorpher und teilkristalliner Thermoplaste



Teilkristalline Formmassen besitzen im Schmelzbereich einen erheblich höheren Wärmeinhalt als amorphe Werkstoffe.

Bedeutung: Bei Plastifizier- und Kühleinrichtungen für teilkristalline Kunststoffe wird im Durchschnitt etwa die doppelte Leistung benötigt (bei gleichen Durchsätzen).

Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

- Enthalpie Δh
- Spezifische Wärmekapazität c_p
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmeausdehnungskoeffizient α
- Temperaturleitfähigkeit a
- Wärmeeindringzahl b
- Stofftransport
- Maßnahmen zur Permeationsminderung

Spezifische Wärmekapazität c_p

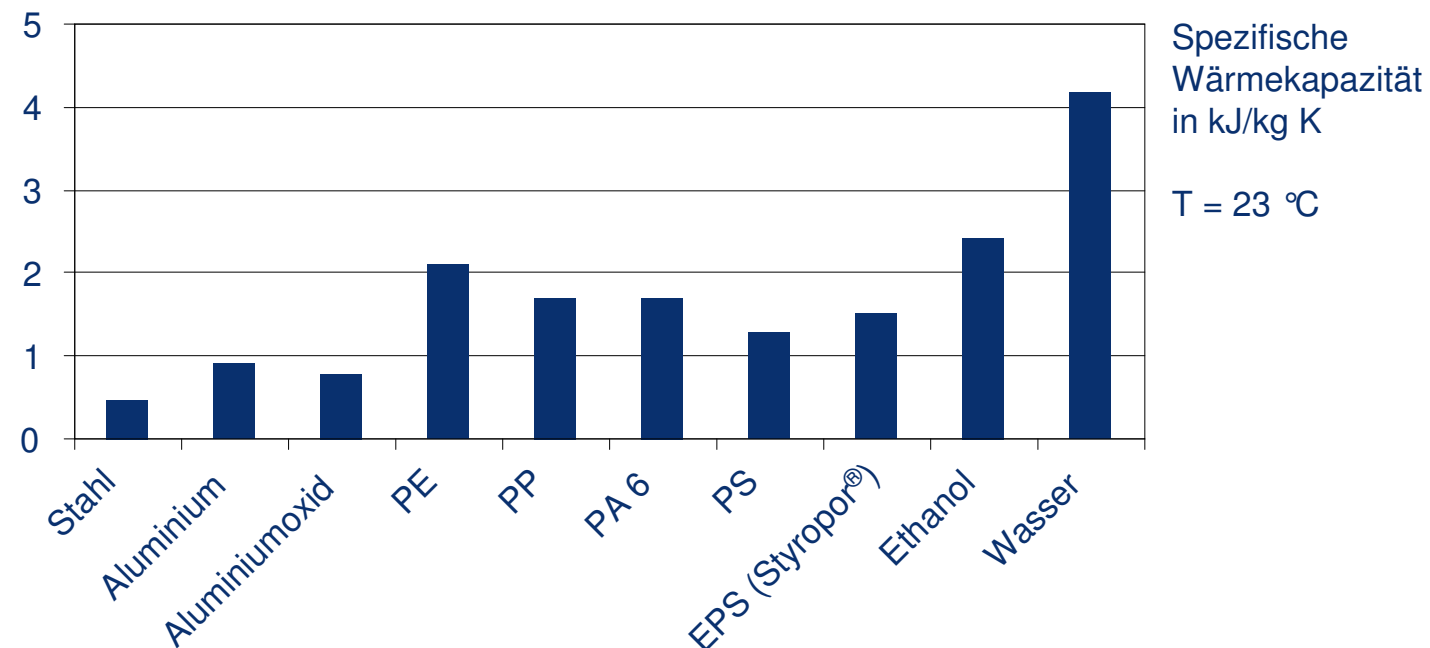
Definition

Die spezifische Wärmekapazität entspricht der Ableitung der Enthalpie nach der Temperatur. Sie beschreibt den Bedarf an Wärme zur Erhöhung der Temperatur.

Kennwert der spezifischen Wärmekapazität: c_p in kJ/(kgK).

Die Wärmekapazität von Kunststoffen liegt im Bereich 0,4 bis 2,7 kJ/(kgK).

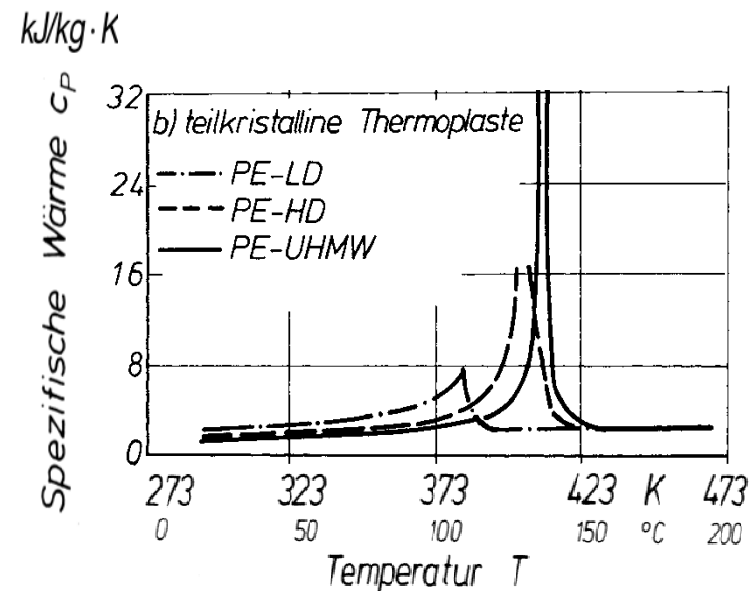
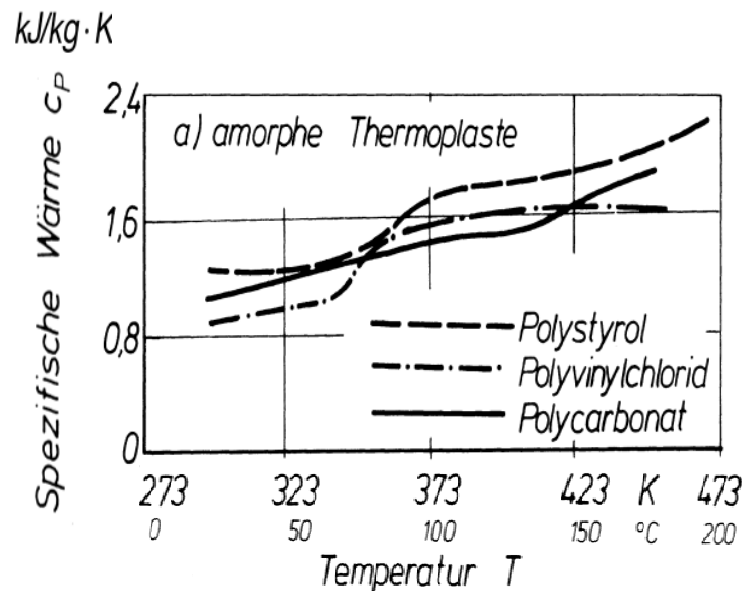
Ermittlung mittels der Differential-Scanning-Calorimetry (DSC).



Spezifische Wärmekapazität c_p

Vergleich amorpher und teilkristalliner Thermoplaste

Vergleich der spezifischen Wärmekapazität:



Bei teilkristallinen Thermoplasten besitzt die spezifische Wärme eine Unstetigkeit am Kristallitschmelzpunkt, da hier die Wärmezufuhr nicht zur Erwärmung, sondern zur Kristallitschmelze eingesetzt wird (ähnlich dem Siedeverzug bei Flüssigkeit zur Gasphase). Die spezifische Wärme ist daher vom Kristallisationsgrad abhängig.

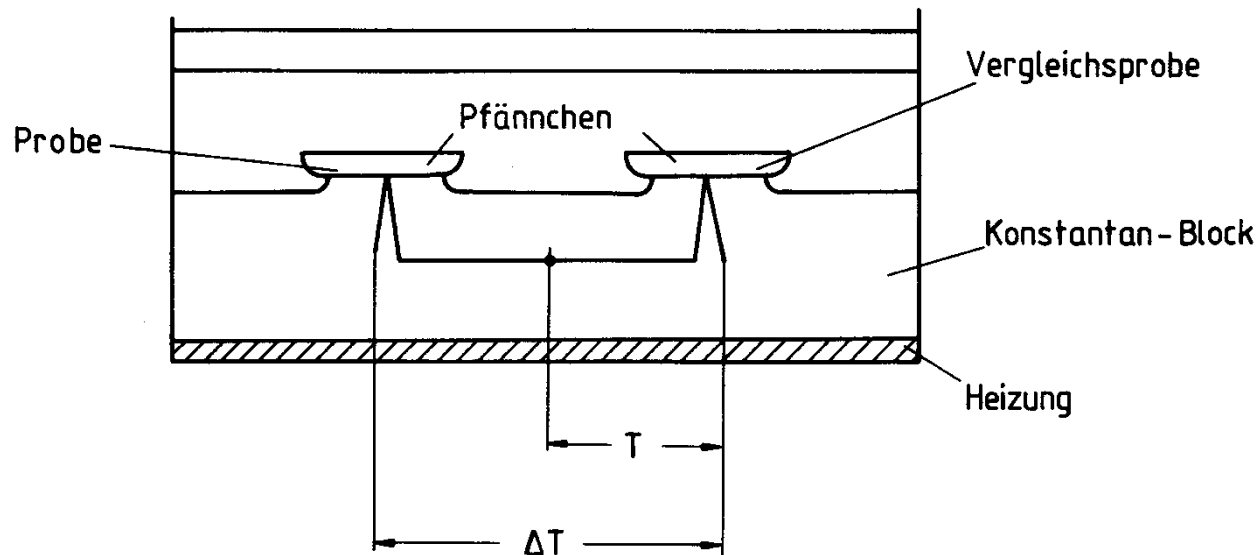
Spezifische Wärmekapazität c_p

Bestimmung durch Differential-Scanning-Calorimetry (DSC)

Messung des Wärmestroms in Abhängigkeit von Temperatur und/oder Zeit.

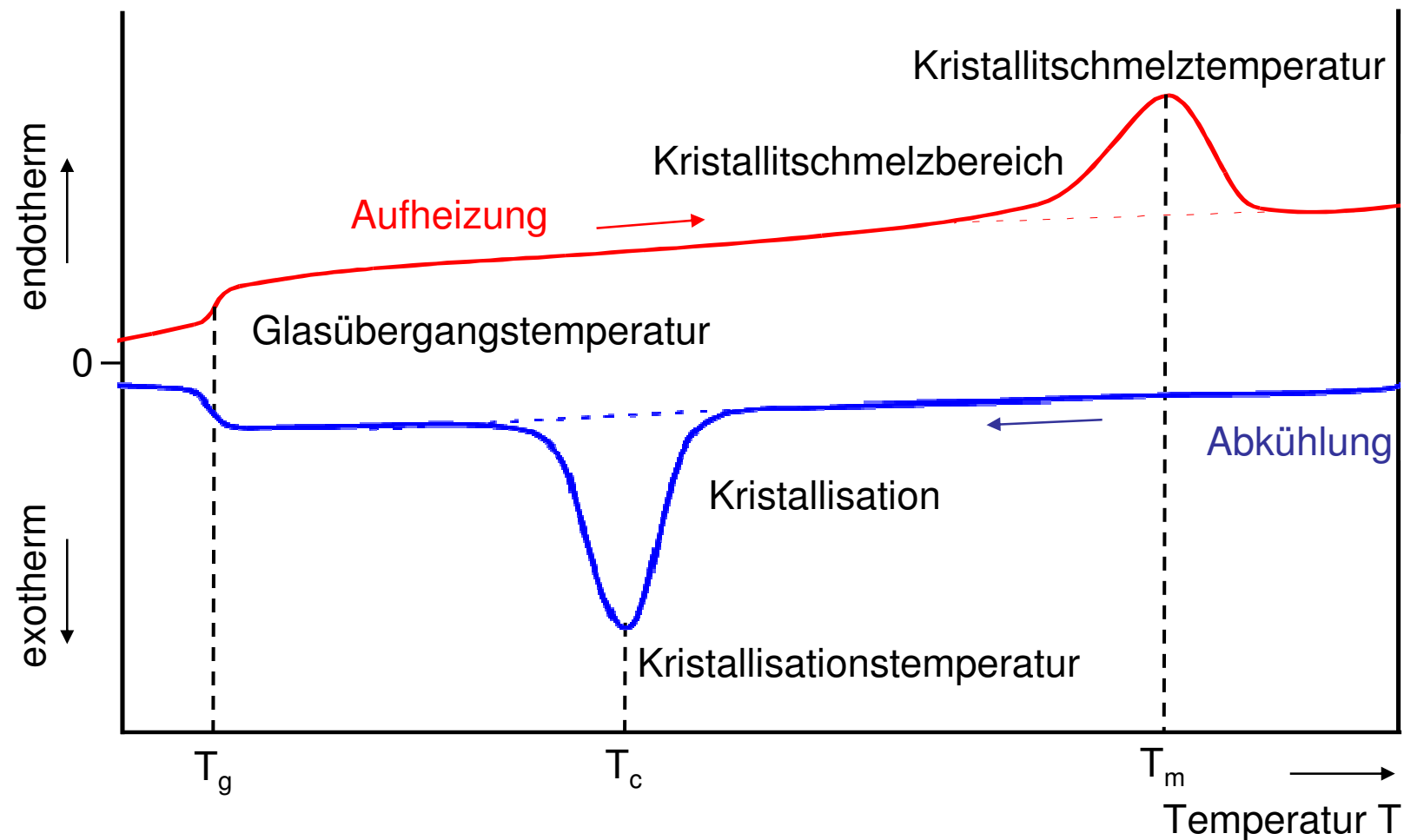
Änderung der Wärmemenge durch chemische oder physikalische Umwandlungen eines Stoffes.

Vorteil der DSC: Neben reinen Umwandlungstemperaturen können auch Umwandlungswärmen, Reaktionswärmen, Wärmekapazitäten u.ä. gemessen werden.



Spezifische Wärmekapazität c_p

Auswertung einer DSC-Kurve (schematisch)



Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

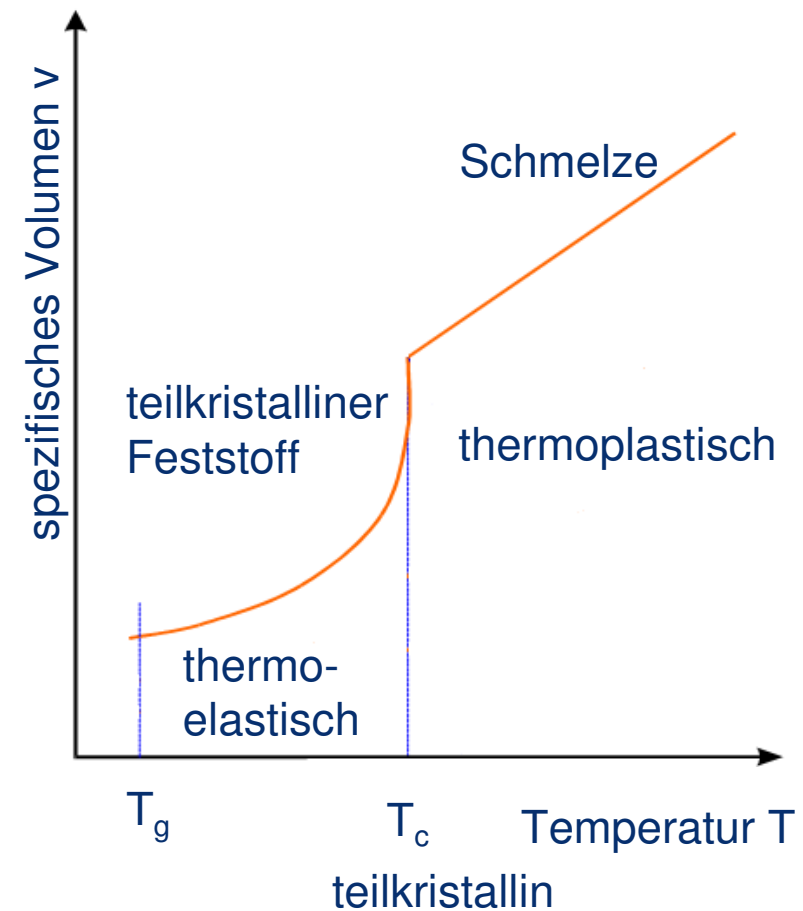
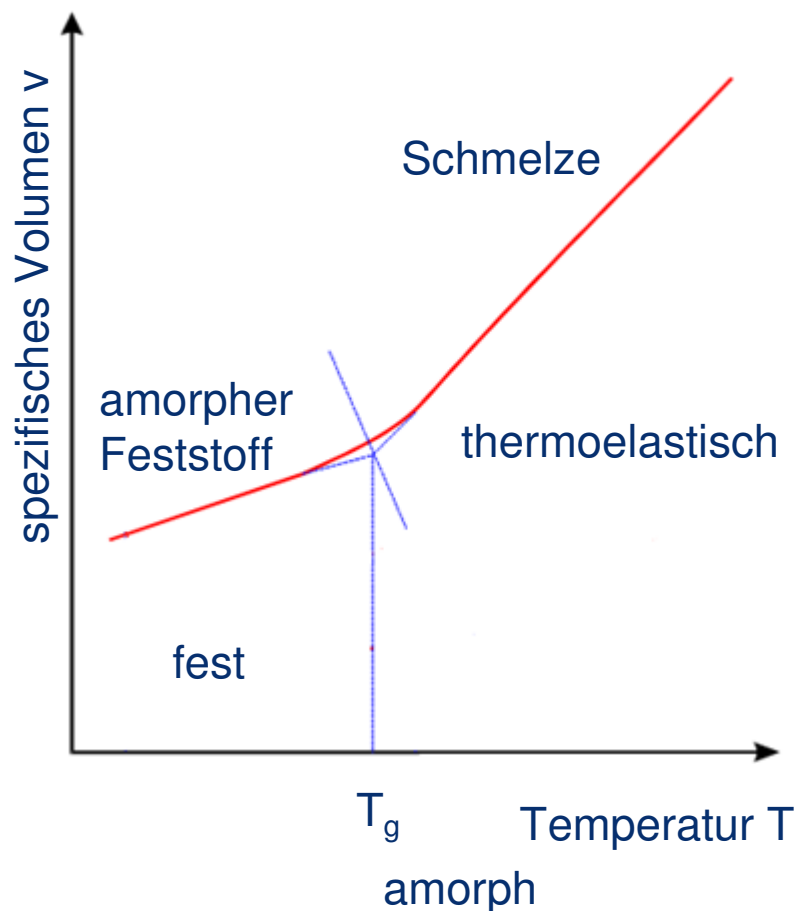
Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

- Enthalpie Δh
- Spezifische Wärmekapazität c_p
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmeausdehnungskoeffizient α
- Temperaturleitfähigkeit a
- Wärmeeindringzahl b
- Stofftransport
- Maßnahmen zur Permeationsminderung

Dichte ρ

Vergleich amorpher und teilkristalliner Thermoplaste

Vergleich des spezifischen Volumens v (Kehrwert der Dichte ρ) amorpher und teilkristalliner Thermoplaste:



- Wodurch kann das spezifische Gewicht eines Kunststoffes erhöht werden?

Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

- Enthalpie Δh
- Spezifische Wärmekapazität c_p
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmeausdehnungskoeffizient α
- Temperaturleitfähigkeit a
- Wärmeeindringzahl b
- Stofftransport
- Maßnahmen zur Permeationsminderung

Wärmeleitfähigkeit λ

Allgemein

Kunststoffe haben im Allgemeinen eine geringe Wärmeleitfähigkeit.

Vorteil: Kunststoffe besitzen gute Dämmeigenschaften.

Nachteil: Die Wärme kann beim Verarbeitungsprozess nur langsam eingebracht bzw. am Ende der Verarbeitung wieder abgeführt werden.

Fensterprofil aus
Aluminium (λ hoch)



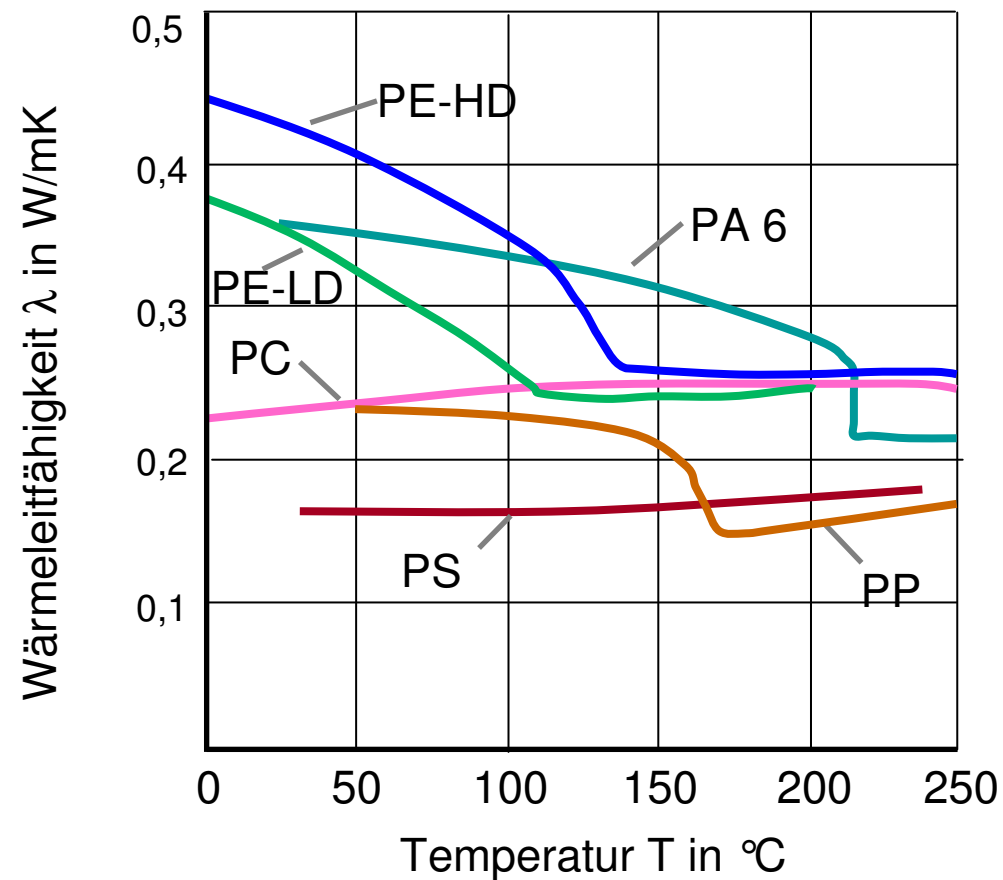
Thermische Entkopplung über Vakuum

Thermische Entkopplung über Kunststoff-zwischenelemente (λ niedrig)

[Quelle: Batima]

Wärmeleitfähigkeit λ

Vergleich unterschiedlicher Kunststoffe



Wärmeleitfähigkeit λ

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit kann über direkte und indirekte Messverfahren erfolgen.

Bei indirekten Verfahren wird zunächst die Temperaturleitfähigkeit ermittelt. Anschließend wird die Wärmeleitfähigkeit bei bekannter Wärmekapazität und bekannter Dichte rechnerisch ermittelt.

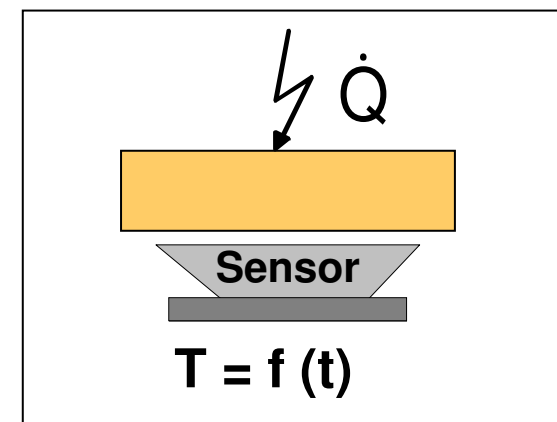
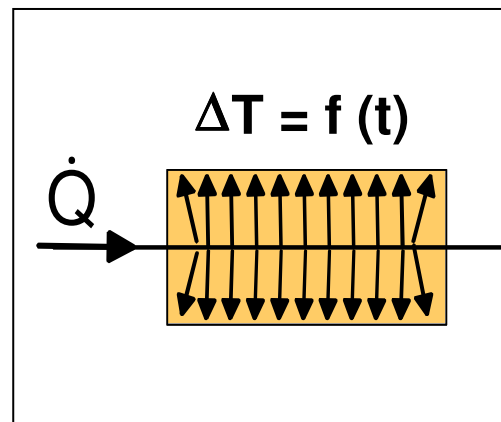
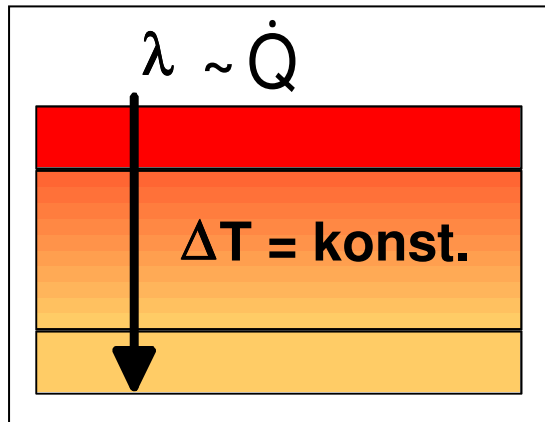
Direkte Verfahren:

Platten-, Direktheizverfahren

Heizdrahtverfahren

Indirekte Verfahren:

Impulsverfahren (Laser-, IR-, Xenonblitz)

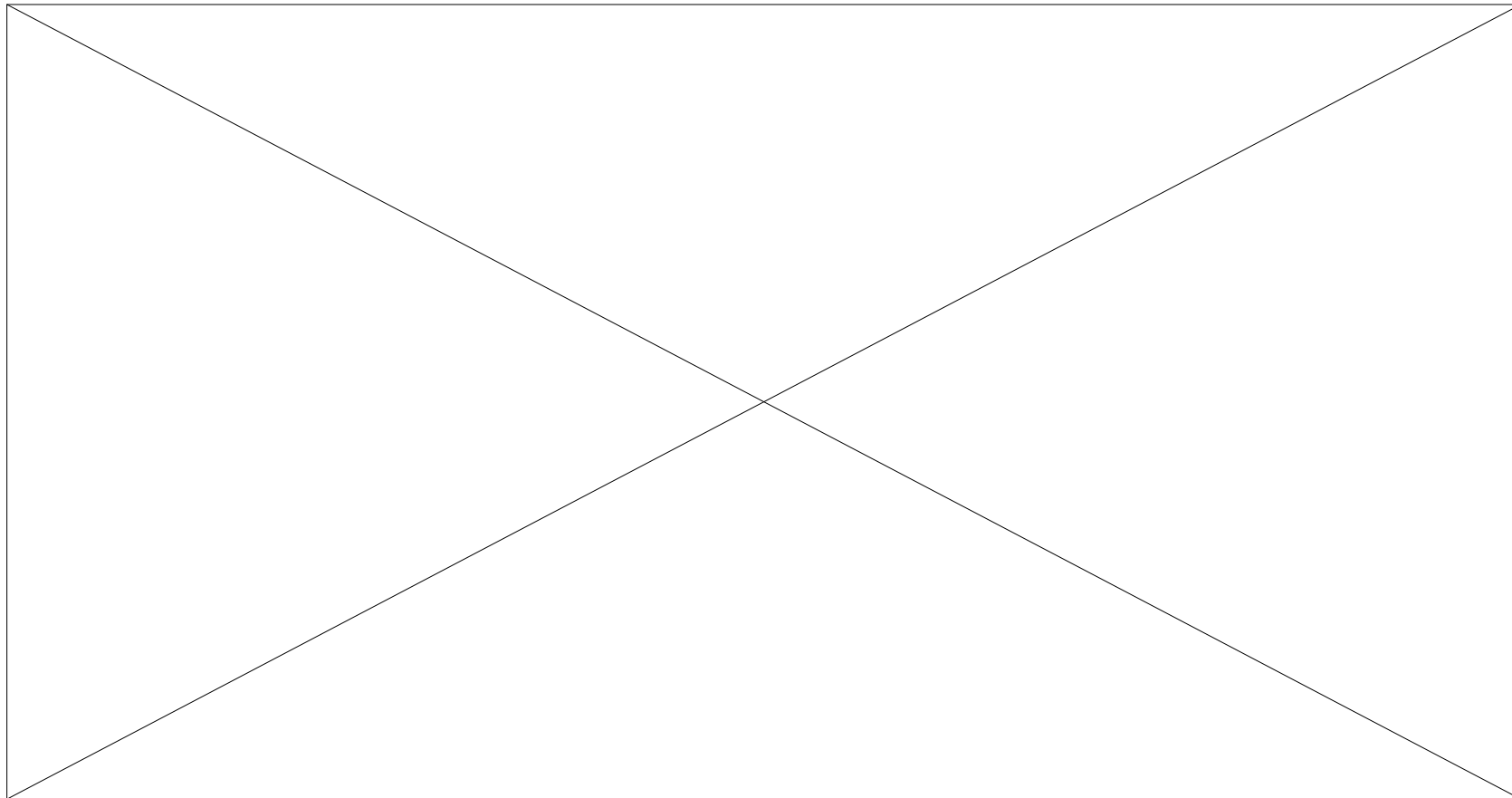


Wärmeleitfähigkeit λ

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Nano-Flash-Verfahren: $\lambda = a \cdot \rho \cdot c_p$

Die Messung kann richtungs- und temperaturabhängig erfolgen.



[Quelle: Underwriters Laboratories]

- Kunststoffe verfügen im Allgemeinen über eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Wie kann diese Eigenschaft positiv genutzt werden?

Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

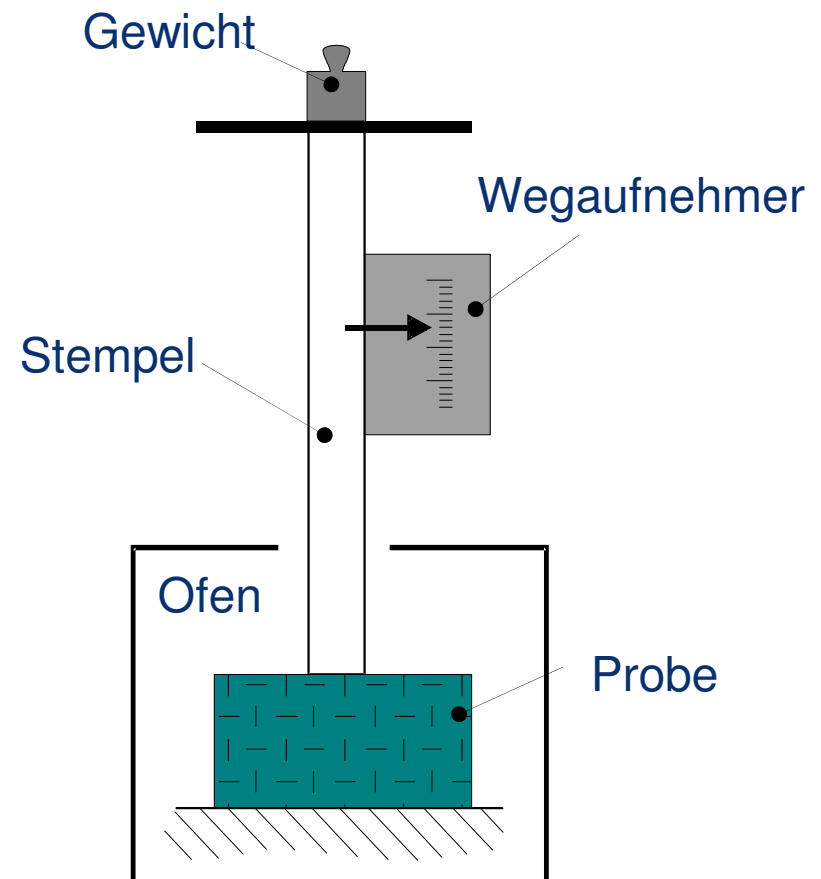
Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

- Enthalpie Δh
- Spezifische Wärmekapazität c_p
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmeausdehnungskoeffizient α
- Temperaturleitfähigkeit a
- Wärmeeindringzahl b
- Stofftransport
- Maßnahmen zur Permeationsminderung

Wärmeausdehnungskoeffizient α

Thermomechanische Analyse (TMA)

- Bei der TMA wird eine Probe über einen Stempel mit einem Gewicht belastet.
- Das Gewicht wird dabei so niedrig wie möglich gehalten.
- Im Ofen wird die Probe kontinuierlich erwärmt.
- Über einen Wegaufnehmer kann die thermische Ausdehnung der Probe gemessen werden.

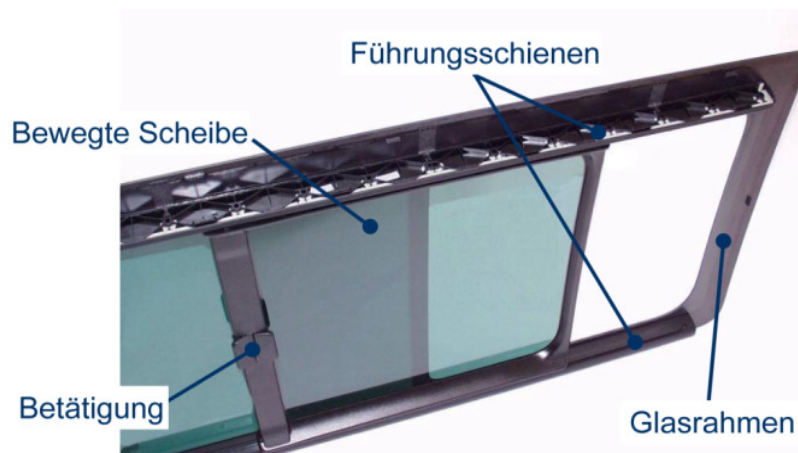


Wärmeausdehnungskoeffizient α

Beispiele

Kunststoff/Metall-Hybridbauteile:

Unterschiedliches Ausdehnungsverhalten der Werkstoffe führt zu inneren Spannungen, sog. Eigenspannungen. Diese reduzieren die zusätzliche Belastbarkeit.



[Quelle: IB Steiner, DURA Automotive]

Beispielsweise beträgt der Wärmeausdehnungskoeffizient α von unverstärktem PA 6 ≈ 70 bis $100 \cdot 10^{-6}/K$ und der von glasfaserverstärktem PA 6 (PA 6 GF30) $\approx 30 \cdot 10^{-6}/K$.

Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

- Enthalpie Δh
- Spezifische Wärmekapazität c_p
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmeausdehnungskoeffizient α
- Temperaturleitfähigkeit a
- Wärmeeindringzahl b
- Stofftransport
- Maßnahmen zur Permeationsminderung

Temperaturleitfähigkeit a

Definition

Die Temperaturleitfähigkeit a [mm²/s] ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der sich die Temperatur zeitlich und räumlich in einem Körper verändert. Sie wird zur Berechnung von Wärmeleitvorgängen verwendet.

Die Temperaturleitfähigkeit ist definiert als das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit λ zur Wärmespeicherfähigkeit $\rho \cdot c_p$:

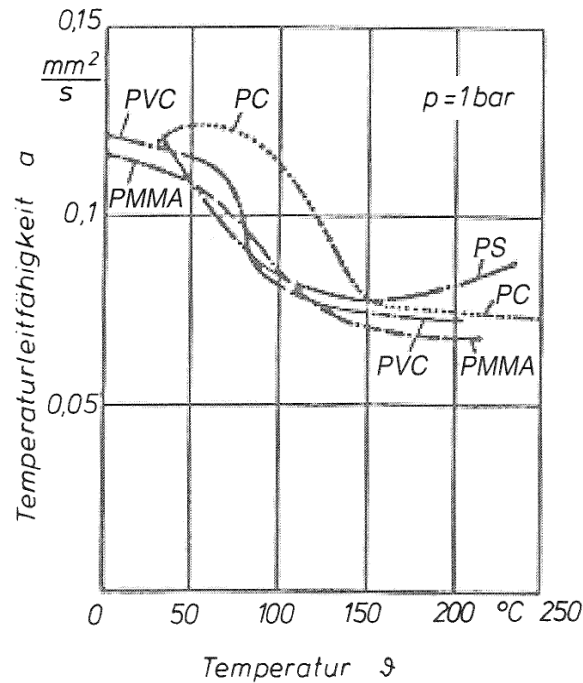
$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

Topf aus Aluminium
(hohe Temperaturleitfähigkeit)

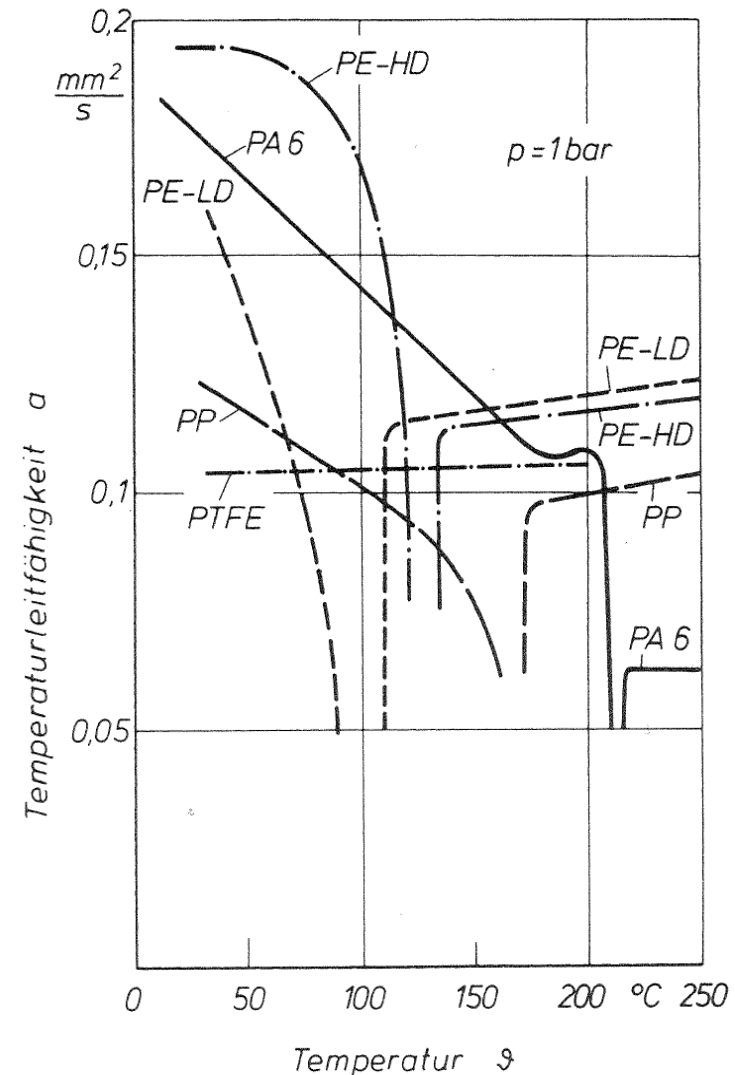


Temperaturleitfähigkeit α

Vergleich amorpher und teilkristalliner Thermoplaste



Die Temperaturleitfähigkeit hat bei teilkristallinen Thermoplasten eine Unstetigkeit am Schmelzpunkt, die auf die Schmelzwärme der Kristallite zurückzuführen ist.



Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

- Enthalpie Δh
- Spezifische Wärmekapazität c_p
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmeausdehnungskoeffizient α
- Temperaturleitfähigkeit a
- **Wärmeeindringzahl b**
- Stofftransport
- Maßnahmen zur Permeationsminderung

Wärmeeindringzahl b

Definition

Ein Kennwert von eher praktischem Nutzen ist die Wärmeeindringzahl. Sie ergibt sich zu:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}$$

Die Wärmeeindringzahl wird zur Berechnung der Kontakttemperatur T_k bei Berührung zweier Körper A und B herangezogen:

$$T_k = \frac{b_A \cdot T_A + b_B \cdot T_B}{b_A + b_B}$$

Die Kontakttemperatur ist damit z.B. für die Berechnung von Griffen von beheizten Gegenständen oder von Trinkbechern aus Kunststoff eine wichtige Größe.

Wärmeeindringzahl b

Beispiel

Erfahrbar wird die Kontakttemperatur, wenn man Stoffe gleicher Temperatur mit der bloßen Hand berührt. Stoffe mit **hoher Wärmeeindringzahl** werden als **kalt**, Stoffe mit **niedriger Wärmeeindringzahl** als **warm** empfunden.



Trinkbecher mit Kunststoffgriff



Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

- Enthalpie Δh
- Spezifische Wärmekapazität c_p
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmeausdehnungskoeffizient α
- Temperaturleitfähigkeit a
- Wärmeeindringzahl b
- Stofftransport
- Maßnahmen zur Permeationsminderung

1. (Ad-) Sorption

Stoff wird auf die Oberfläche angelagert

2. Absorption

Stoff wird im Kunststoff gelöst
(Henry'sches Gesetz)

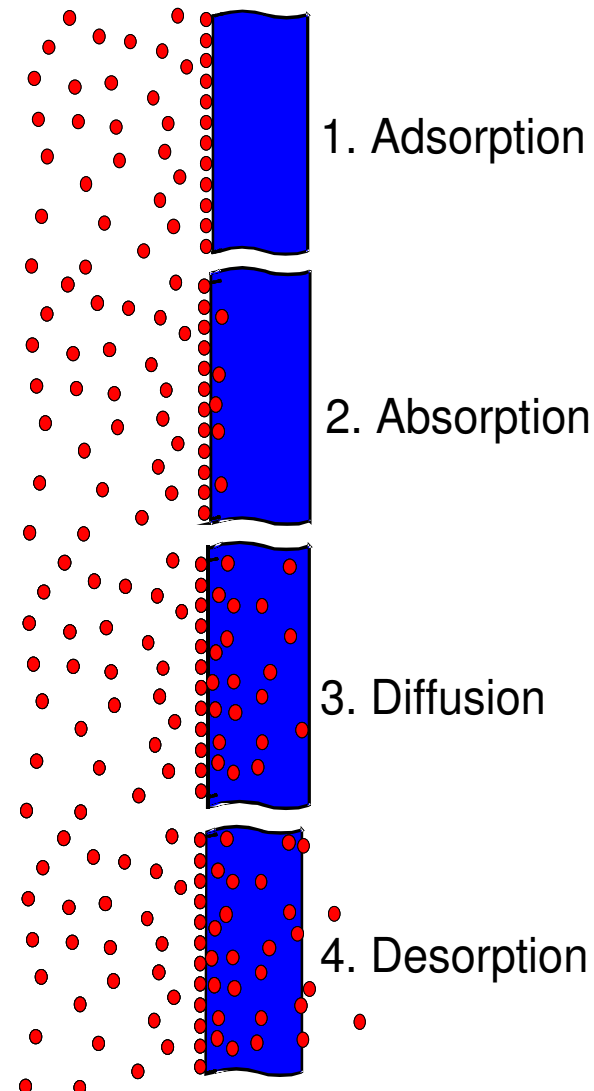
3. Diffusion

Stoff wandert aufgrund von
Konzentrationsunterschieden durch den
Kunststoff

4. Desorption

Stoff wird von der Oberfläche abgegeben
(meist bei Temperaturerhöhung)

Schritte der Permeation



Henry'sches Gesetz

$$p = S \cdot c$$

mit

c: Konzentration des gelösten Stoffes

S: Löslichkeit / Henry-Konstante

p: Partialdruck des gelösten Stoffes

Fick'sche Diffusionsgesetze

1. stationär

$$I = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

2. instationär

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Temperaturabhängigkeit:

Löslichkeit

$$S(T) = S_0 \cdot e^{-\frac{\Delta H_s}{RT}}$$

Diffusion

$$D(T) = D_0 \cdot e^{-\frac{ED}{RT}}$$

Permeationskoeffizient

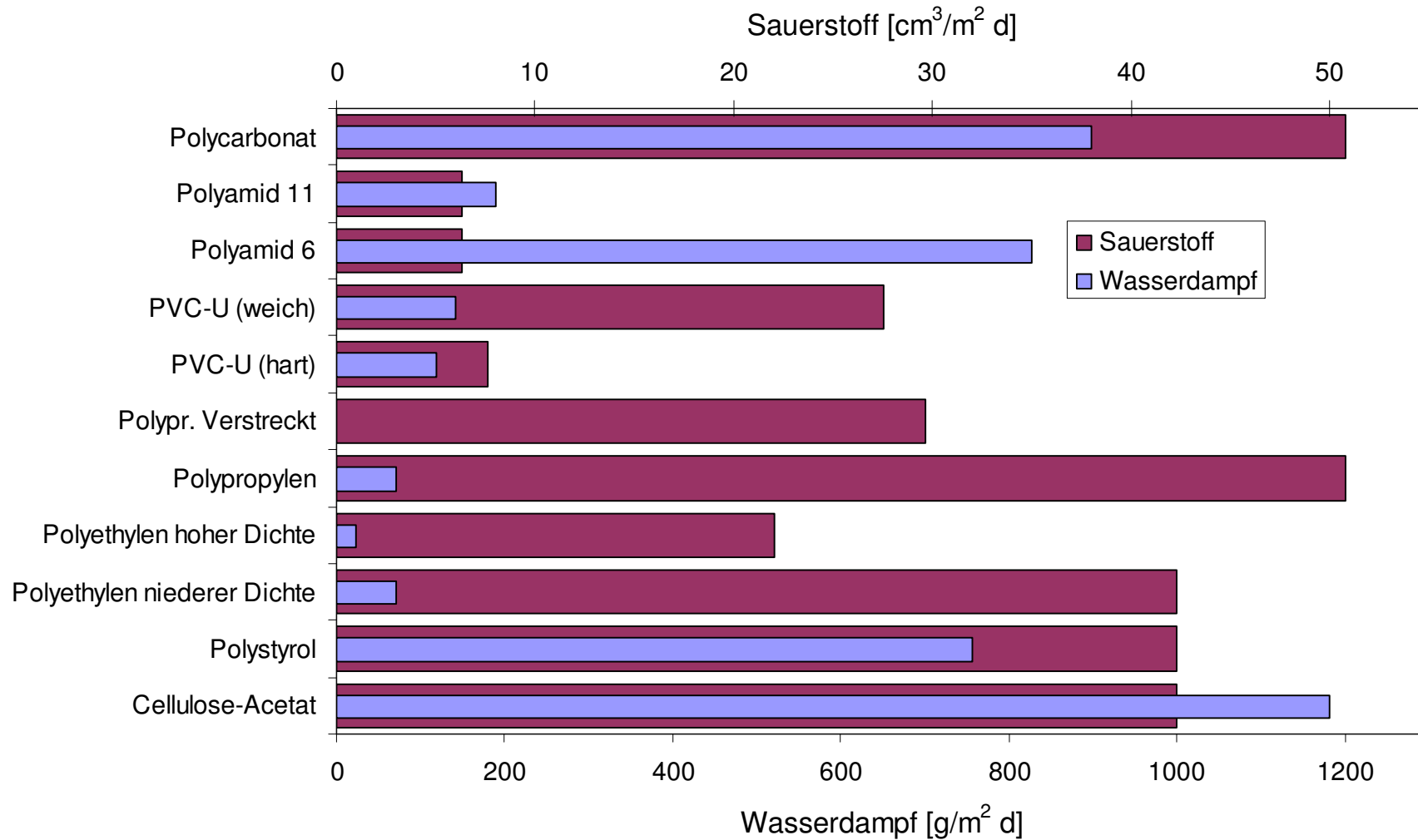
$$P = D \cdot S$$

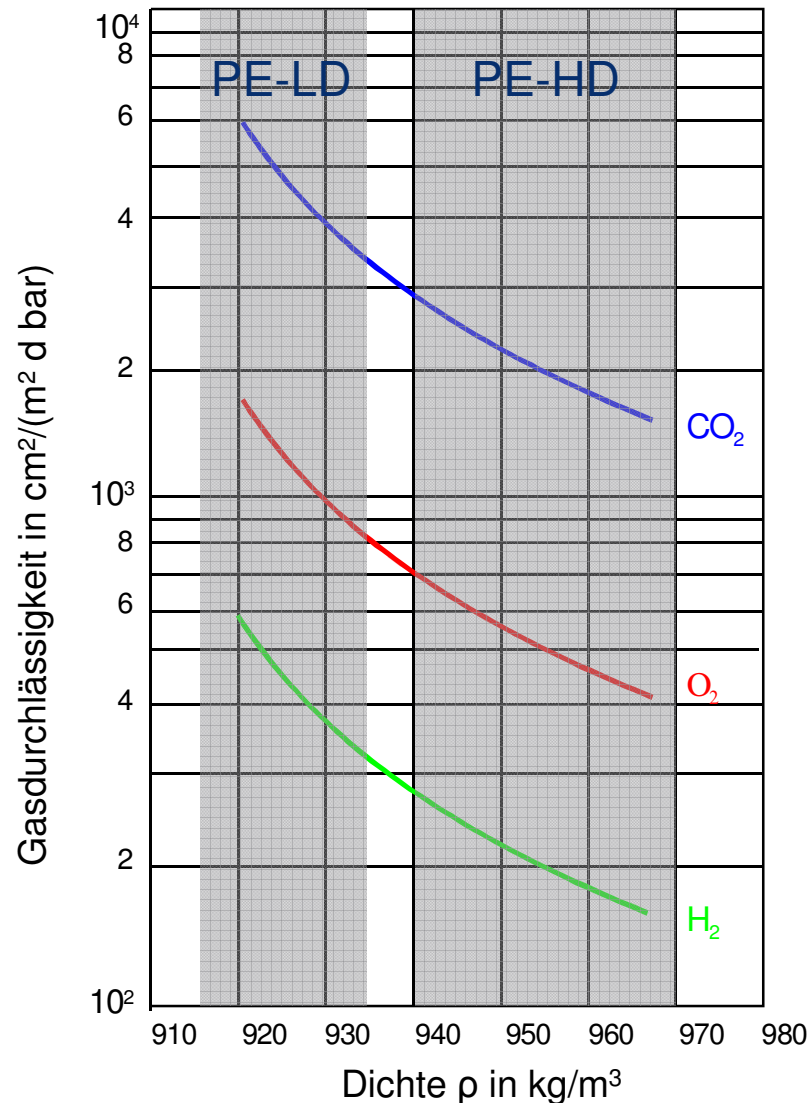
Lernstopp

Verständnisfragen



- Nennen Sie die vier Schritte der Permeation.
- Erklären Sie den Unterschied zwischen Absorption und Adsorption.





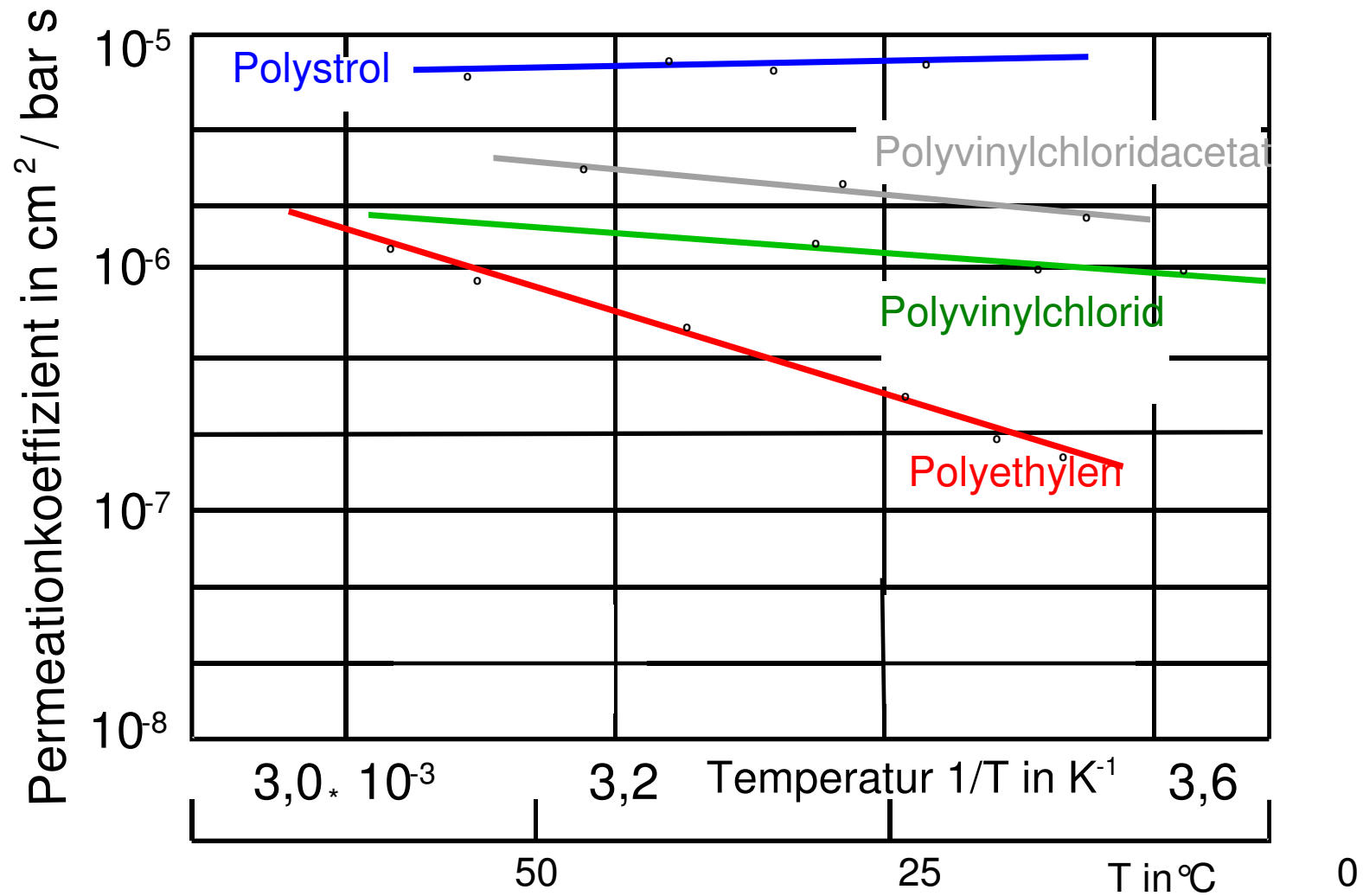
- Permeation abhängig von Kristallisation und Dichte
- PE geringerer Dichte lässt mehr Gas durch
- PE hoher Dichte weniger

PE-LD: 915 - 935 kg/m^3

PE-MD: 930 - 940 kg/m^3

PE-HD: 940 - 970 kg/m^3

Quelle: Domininghaus



Verhalten als Festkörper

Übersicht

Mechanische Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften

Werte für den Wärme- und Stoffaustausch

- Enthalpie Δh
- Spezifische Wärmekapazität c_p
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Wärmeausdehnungskoeffizient α
- Temperaturleitfähigkeit a
- Wärmeeindringzahl b
- Stofftransport
- Maßnahmen zur Permeationsminderung

Maßnahmen zur Permeationsminderung

Möglichkeiten



- geeignete Werkstoffauswahl
- Barrierschichten im Inneren
- äußere Beschichtungen (z. B. Bedampfen)
- Fluorierung, Sulfonierung
- Füllstoffanteile erhöhen
- Kristallinität erhöhen
- Vernetzung erhöhen
- Orientierung erhöhen

Maßnahmen zur Permeationsminderung

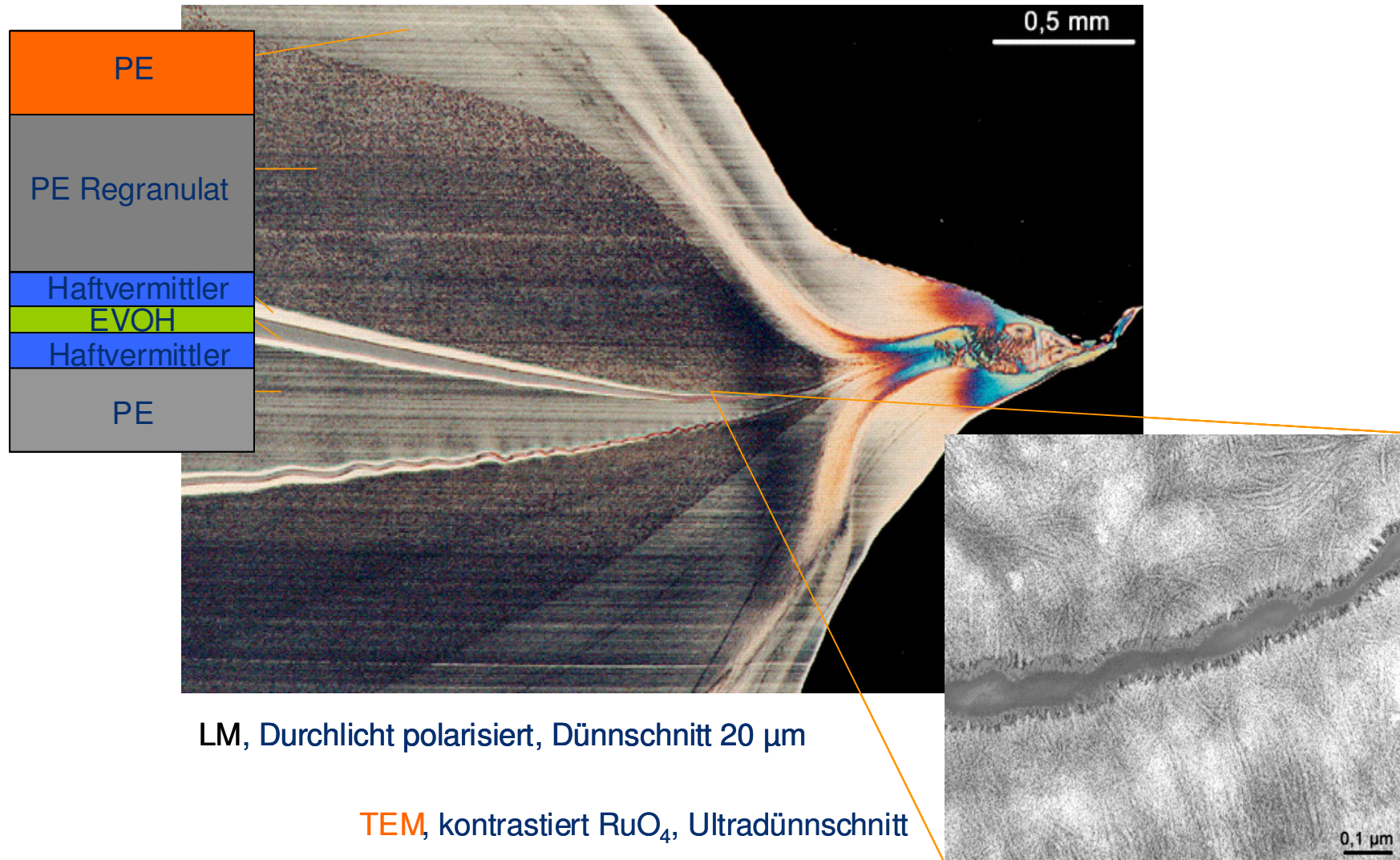
Kunststoff-Kraftstoffbehälter

Bauteilwandungen mit Barrierschichten



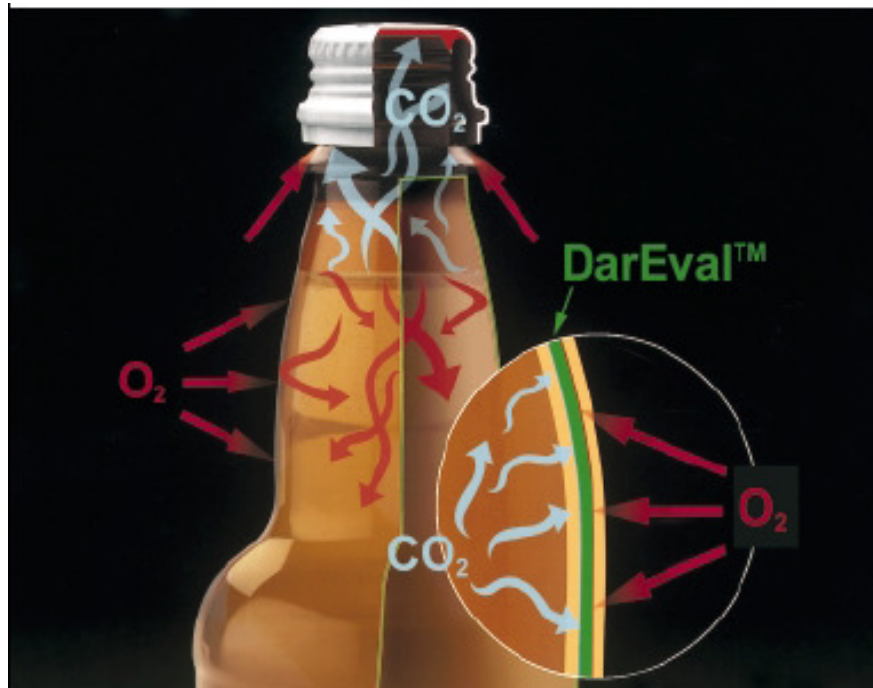
Maßnahmen zur Permeationsminderung

Mikroskopische Aufnahmen einer Barrierschicht

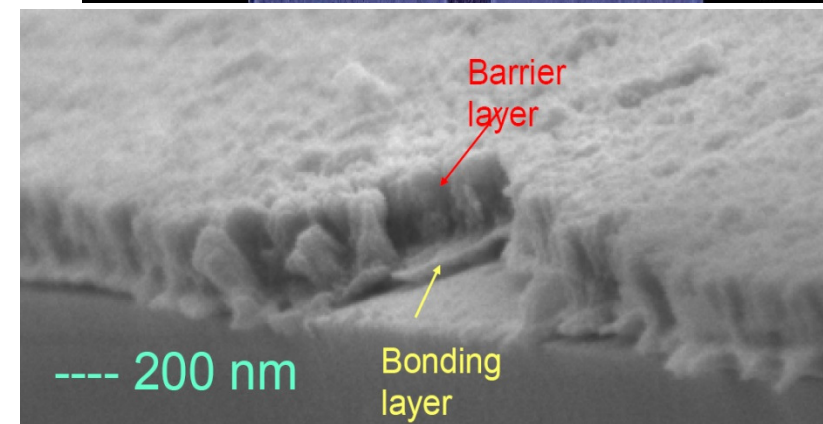
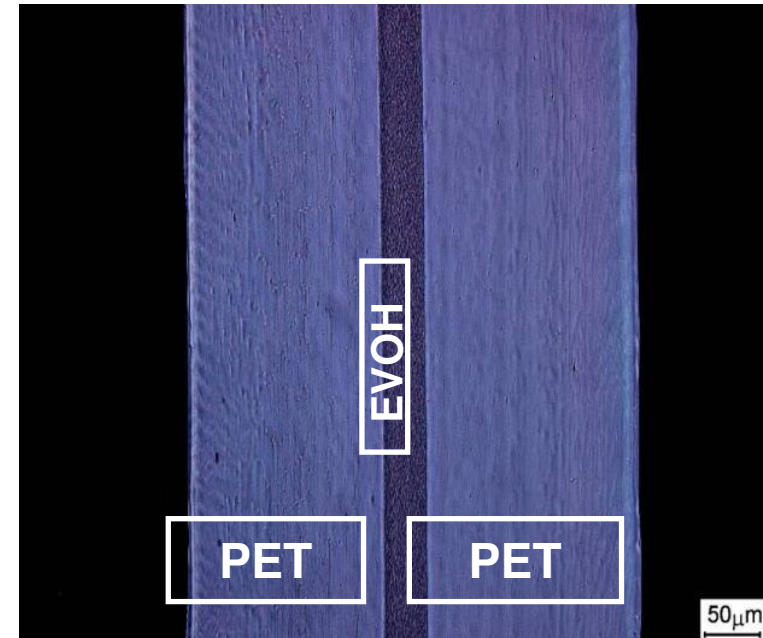


Maßnahmen zur Permeationsminderung

Barrierschicht für eine PET-Flasche



„ SiO_x “ Barrierschicht im Innern einer PET-Flasche; $d \sim 35 \text{ mm}$



[Quelle: Fraunhofer IVV]

Kunststofftechnik

Verhalten als Festkörper

Institut für Kunststofftechnik
Böblinger Straße 70
70199 Stuttgart