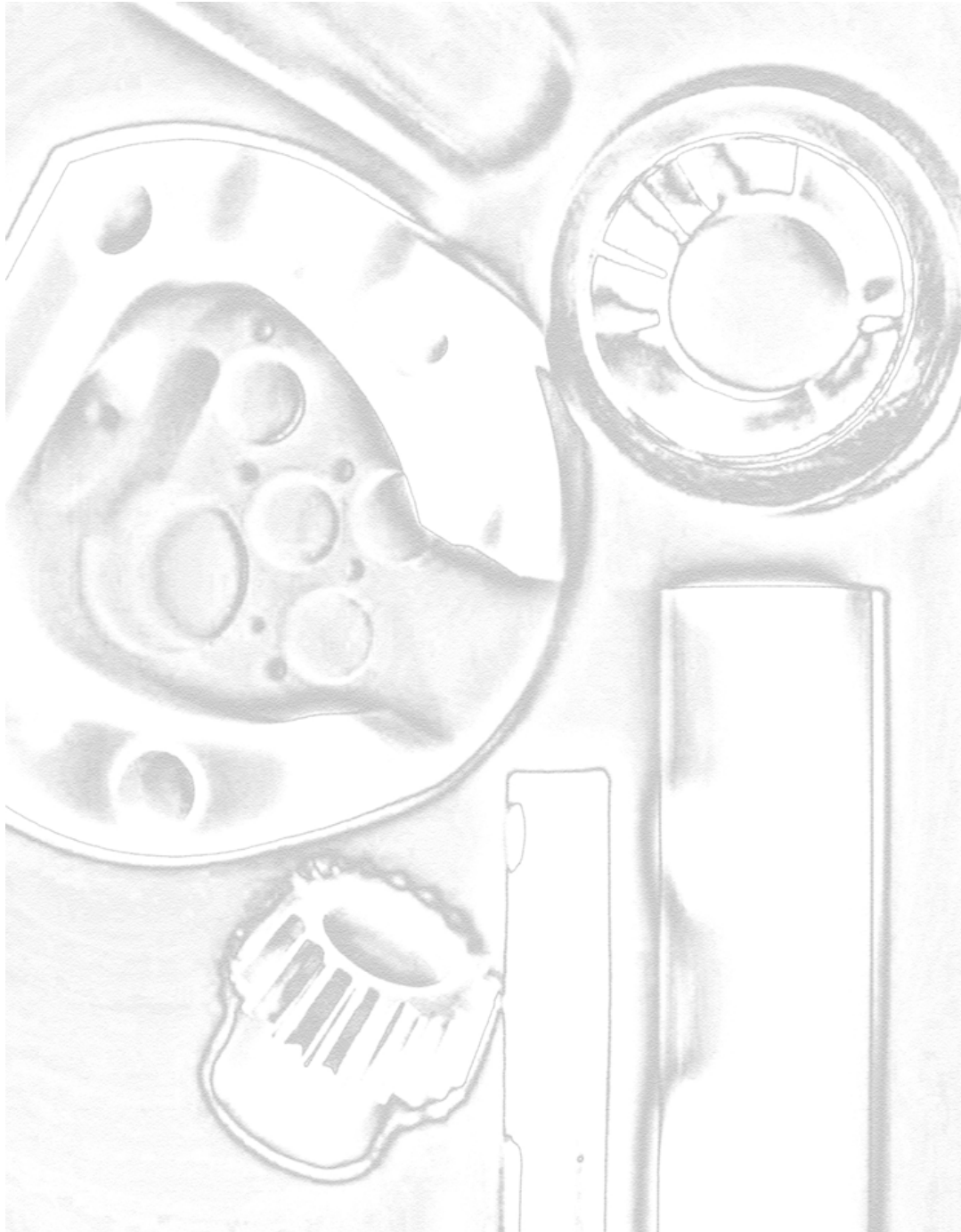


Kunststoffe

Technische Begriffserklärung

TECHNISCHE DOKUMENTATION



1	Einheiten	4
2	Mechanische Eigenschaften	4
2.1	Festigkeit	4
2.1.1	Zugversuch	4
2.1.2	Allgemeine Zugspannung	5
2.1.3	Zugfestigkeit	5
2.1.4	Reissfestigkeit	5
2.1.5	Streckspannung	5
2.1.6	Biegefestigkeit	6
2.1.7	Druckfestigkeit	6
2.1.8	Quetschfestigkeit	6
2.1.9	Bruchdehnung / Reissdehnung	6
2.2	Module	7
2.2.1	Elastizitätsmodul, E-Modul	7
2.2.2	Gleit- oder Schubmodul (G)	7
2.2.3	Kriechmodul	7
2.2.4	Relaxationsmodul	8
2.3	Kriechen	8
2.4	Relaxation	9
2.5	Härte	9
2.5.1	Kugeldruckhärte	9
2.5.2	Shore-Härte ShA und ShD	10
2.6	Festigkeiten, Zähigkeiten	10
2.6.1	Schlag- und Kerbschlagzähigkeit	10
2.6.2	Dauer- bzw. Zeitstandfestigkeit	11
2.6.3	Weiterreissfestigkeit	11
2.7	Allgemeine Eigenschaften	11
2.7.1	Dichte	11
2.7.2	Gleitreibungskoeffizient	12
2.7.3	Verschleiss, Abrieb	12
2.7.4	Spaltkraft	12
2.7.5	Hookesches Gesetz	13
2.7.6	Poissonzahl, Querkontraktion	13
2.7.7	Druckverformungsrest	13
2.7.8	Rückprallelastizität	14

3	Thermische Werte	14
3.1	Anwendungstemperatur	14
3.1.1	Maximale Anwendungstemperatur (kurzzeitig)	14
3.1.2	Maximale Anwendungstemperatur (langzeitig)	15
3.2	Wärmeformbeständigkeit	15
3.3	Wärmeleitfähigkeit	16
3.4	Spezifische Wärmekapazität	16
3.5	Längenausdehnungskoeffizient	17
4	Elektrische Werte	17
4.1	Spezifischer Durchgangswiderstand	17
4.2	Oberflächenwiderstand	18
4.3	Durchschlagsfestigkeit	18
4.4	Kriechstromfestigkeit	18
4.5	Dielektrizitätszahl	19
4.6	Dielektrischer Verlustfaktor tan	19
5	Grundlegende Berechnungen von Kunststoffkonstruktionen	20
5.1	Berechnungsmöglichkeiten	20
5.2	Spannungs- und Verformungsbedingungen	21
5.2.1	Lineares-, Nichtlineares Verformungsverhalten	21
5.2.2	Verformungsbedingungen	21
5.2.3	Statische Belastung	22
5.2.4	Schwingende Belastung	23
5.2.5	Intermittierende Belastung	24
5.2.6	Schlagartige Belastung	24
5.2.7	Stabilitätsprobleme	25
6	Verschiedene Werte	26
6.1	Wasseraufnahme	26
6.2	Feuchtigkeitsaufnahme	26
6.3	Brennbarkeit	27
7	Anhang	29
7.1	Literaturverzeichnis	29
7.2	Danke	29

1 Einheiten

Volumen:	1 [Liter] = 1 [dm ³]
Masse:	1 [kg]
Kraft:	1 [N] = 9.81 [kg m/s ²]; 1 [kp] = 9.81 [N];
Mechanische Spannungen:	1 [N/mm ²] = 0.01 [N/cm ²] = 9.81 [kg/mm ²]
Dreh- und Biegemoment:	1 [N m] = 9.81 [kg m]
Druck:	10 [bar] = 10 ⁶ [Pa] = 10 ⁶ [N/m ²] = 1 [N/mm ²] 1 [at] ≈ 0.981 [bar] = 98'100 [Pa] = 1 [kp/cm ²]; 1 [bar] ≈ 750 [Torr] 1 [atm] = 760 [Torr] = 101'325 [Pa]
Arbeit, Energie:	1 [J] = 1 [Nm] = 1 [Ws]
Leistung:	1 [J/s] = 1 [Nm/s] = 1 [W]
Temperatur	0 [°C] = 273.15 [K]; 100 [°C] = 373.15 [K]

2 Mechanische Eigenschaften

2.1 Festigkeit

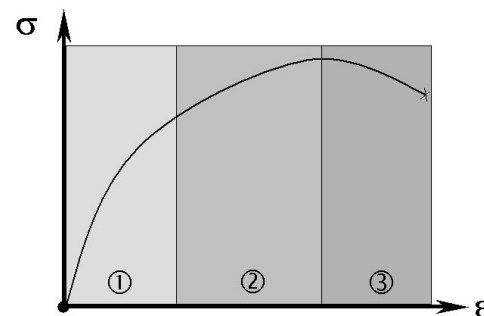
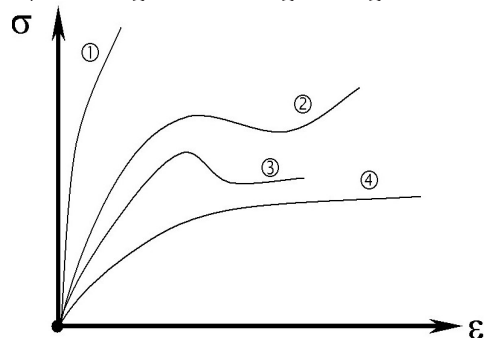
2.1.1 Zugversuch

Der Zugversuch ist ein genormtes Standardverfahren (DIN EN 10 002) der Werkstoffprüfung und dient zur Bestimmung von Materialkenngrößen durch Dehnen von länglichen Proben mit kleiner Querschnittsfläche bis zum Bruch. Das Ergebnis des Zugversuchs ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm, aus dem die verschiedenen Kenngrößen ermittelt werden können.

- 1. Spröder Werkstoff 3. Verstreckbarer Werkstoff
 - 2. Zäher Werkstoff 4. Weicher Werkstoff
5. Elastischer Bereich (es gilt hookesches Gesetz)
6. Viskoselastischer Bereich
7. Fließbereich

Bereich 1: Verformung reversibel (rückgängig)
Bereich 2 & 3: Verformung irreversibel (bleibend)

Spannungs-Dehnungs-Diagramm



2.1.2 Allgemeine Zugspannung

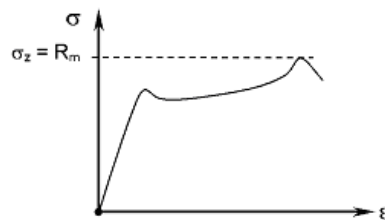
Die Zugspannung σ [N/mm²] ist die auf den kleinsten Anfangsquerschnitt A [mm²] des Probekörpers bezogene Zugkraft F [N] zu jedem beliebigen Zeitpunkt des Versuchs.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{DIN 53 371}$$

[N/mm²]

2.1.3 Zugfestigkeit

Zugfestigkeit σ_z ist das Mass für den Widerstand gegen äussere Belastungen und wird definiert mit maximal gemessener Kraft (F_{max}) dividiert durch den Anfangsquerschnitt (A_0).



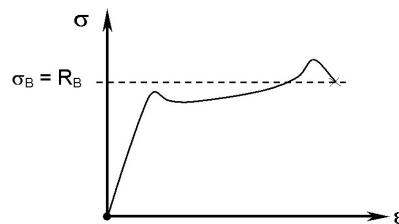
$$\sigma_z = \frac{F_{max}}{A_0}$$

[N/mm²]

DIN 53 455

2.1.4 Reissfestigkeit

Reissfestigkeit σ_R bezeichnet die in einem Zugversuch gemessene Kraft [N], bei dem eine Probe reiss. Die Kraft ist abhängig von der Dicke [mm] am Anfang, respektive vom Anfangsquerschnitt A_0 [mm²] der Probe.



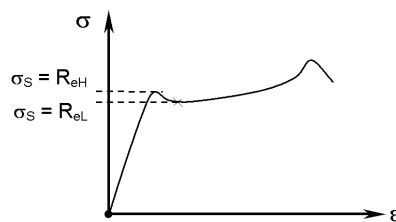
$$\sigma_B = \frac{F_{Bruch}}{A_0}$$

[N/mm²]

DIN 53 371

2.1.5 Streckspannung

Als Streckgrenze bezeichnet man die Spannung σ_s [N/mm²], bei der das Fließen des Werkstoffs einsetzt, ohne dass die anliegende Spannung [N/mm²] weiter erhöht wird. Kommt es bei Fließbeginn sogar zu einem Spannungsabfall, zeigt der Werkstoff im Spannungs-Dehnungs-Diagramm eine obere (R_{eH}) und eine untere (R_{eL}) Streckgrenze.



$$\sigma_s = \frac{F_{Streck}}{A_0}$$

[N/mm²]

2.1.6 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit σ_B ist der Widerstand eines Prüfkörpers bei Belastung auf Biegung im Augenblick des Bruches.

$$\sigma_B = \frac{M_{b_{\max}}}{W}$$

[N/mm²]

$M_{b_{\max}}$ = Maximales Biegemoment [Nmm]
 W = Widerstandsmoment [mm³]

2.1.7 Druckfestigkeit

Als Druckfestigkeit σ_D wird die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs bei der Einwirkung von Druckkräften bezeichnet. Die angelegte Druckkraft wird maximal, wenn ein Schaden am Körper eintritt.

$$\sigma_S = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

[N/mm²]

2.1.8 Quetschfestigkeit

Der Zeitpunkt, bei der ein duktiler (verformbar) Werkstoff unter Druckkraft zu fließen beginnt, ist mit der Quetschfestigkeit σ_{dF} definiert.

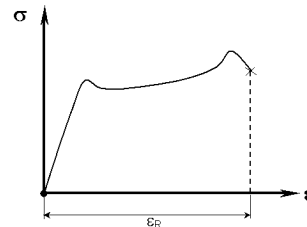
$$\sigma_S = \frac{F_{\text{Flie\ss}}}{A_0}$$

[N/mm²]

2.1.9 Bruchdehnung / Reissdehnung

Bruchdehnung ϵ_B oder Reissdehnung ϵ_R ist ein Werkstoffkennwert, der angibt um wie viel Prozent sich ein Material plastisch dehnen lässt, bevor es zum Bruch kommt.

Die Reissdehnung (ϵ_R) ist die auf die ursprüngliche Messlänge L_0 des Probekörpers bezogene Längenänderung (ΔL) im Augenblick des Reissens.



$$\epsilon_R = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100$$

[%]

2.2 Module

2.2.1 Elastizitätsmodul, E-Modul

Der Elastizitätsmodul (kurz E-Modul) auch Young's Modulus ist ein Mass für die Steifigkeit eines Werkstoffs. Dieser charakterisiert den Widerstand, welcher ein Werkstoff einer bestimmten aufgezwungenen Verformung entgegengesetzt. Die Aussagekraft bei Kunststoffen ist auf das kurzzeitige Verhalten beschränkt. Über das Verhalten unter Langzeitbelastung vermag das E-Modul nichts auszusagen.

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

[N/mm²]

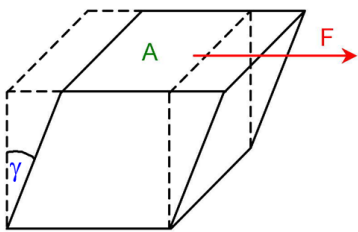
DIN 527

Der E-Modul ist das Verhältnis des Spannungsanstieges und der dabei entstehenden Dehnungszunahme bei ungehinderter Querschnittsverformung.

2.2.2 Gleit- oder Schubmodul (G)

Analog zum Hookeschen Gesetz (Kapitel 2.7.5) für Normalspannungen erhält man das Hookesche Gesetz für Schubspannungen (im linearen Teil der Spannungs-Dehnungs-Kurve): $\tau = G \cdot \gamma$

Dabei wird der Proportionalitätsfaktor G als Schubmodul oder Gleitmodul bezeichnet.



G = Gleitmodul, Schubmodul [N/mm²]

γ = Gleitwinkel [°]

τ = Schubspannung [N/mm²]

F = Kraft [N]

A = Fläche [mm²]

E = Elastizitätsmodul [N/mm²]

μ = Poissonzahl [-]

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

$$G = \frac{F}{A \cdot \gamma} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad \begin{array}{l} \text{DIN 53445} \\ \text{ISO 533} \end{array}$$

2.2.3 Kriechmodul

Das Kriechmodul E_c stellt das Verhältnis zwischen Zugspannung und Zugdehnung bei langzeitiger Belastung dar.

E_c = Zug-Kriechmodul [N/mm²]

σ = Zugspannung [N/mm²]

ε = Zugdehnung [%]

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

[N/mm²]

2.2.4 Relaxationsmodul

Das Verhältnis der momentanen Spannung zur aufgetragenen Dehnung als Mass für die zeitlich abnehmende Werkstoffsteifigkeit beim Entspannungsvorgang wird als Relaxationsmodul E_R bezeichnet.

σ = Spannung [N/mm²]
 ϵ_0 = konst. Dehnung [%]
 t = Belastungsdauer [s]
 T = Temperatur [K]

$$E_R = \frac{\sigma(t, T, \epsilon)}{\epsilon_0}$$

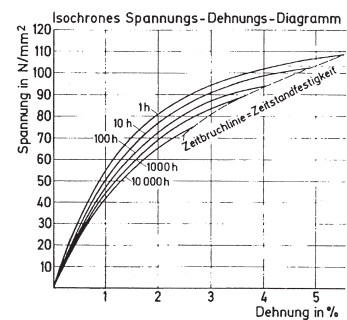
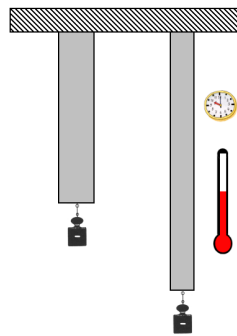
[N/mm²]

2.3 Kriechen

Mit Kriechen werden irreversible (nicht mehr rückgängige) Verformungsvorgänge bezeichnet. Diese Verformungen stellen sich nach einer längeren Zeit der Deformation bei konstanter Belastung ein.

DIN 50118
 ASTM-E-139

Um das Langzeitverhalten von Werkstoffen beurteilen zu können, müssen Kriechkurven aufgenommen werden. Die Auswertung erfolgt im isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramm.



Zur Ermittlung bedient man sich des Zeitstandversuchs (DIN 50118). Die erhaltene Kriechkurve gibt die Abhängigkeit der Dehnung von der Zeit an, deren Verlauf sich mit der Spannung und der Temperatur ändert.

Beim Kriechen durchläuft der Werkstoff die drei typischen Kriechbereiche. Im Anfangsstadium kommt es zur zeit-temperaturabhängigen Mikrostrukturänderung. Danach bildet sich ausgehend

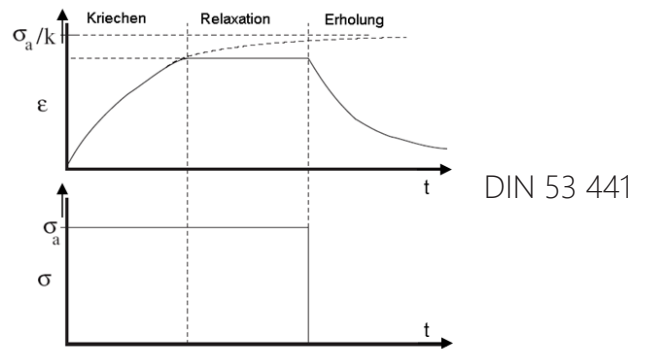
von der Porenbildung zum Wachstum von Mikrorissen. Am Schluss versagt der Werkstoff durch Rissbildung oder Bruch.

2.4 Relaxation

Kelvin-Modell:

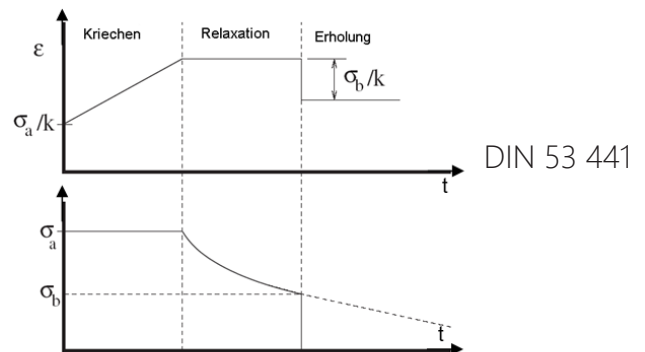
Relaxation bezeichnet die Entspannung der Dehnung ϵ_x nach einer Belastung mit σ_x . Das physikalische System kehrt nach der äusseren Störung durch den Relaxationsprozess in ihren Grundzustand zurück.

σ = Spannung
 ϵ = Dehnung
 k = Faktor (E-Modul)
 t = Zeit



Nach Maxwell-Modell:

Relaxation ist definiert als Spannungsabnahme in Funktion der Zeit bei konstanter Verformung und kann im Spannungsrelaxationsversuch gemessen werden. Die Last wird laufend so reduziert, dass sich die Verformung nicht ändert.



2.5 Härte

2.5.1 Kugeldruckhärte

Die Kugelhärte wird gemessen als das Verhältnis aus der Eindrückkraft und der beim Eindringen entstehenden Oberfläche. Die Prüfung wird mit einer gehärteten und polierten Stahlkugel mit 5 mm Durchmesser durchgeführt. Die Bezeichnung H358/30 bedeutet eine Eindrückkraft von 358 Newton und eine Prüfdauer von 30 Sekunden.

$$H = \frac{4 \cdot F}{d^2 \cdot \pi}$$

DIN 53 456

[N/mm²; Mpa]

2.5.2 Shore-Härte ShA und ShD

Die Härte eines Kunststoffs wird in Shore A/D gemessen. Eine hohe Zahl bedeutet eine grosse Härte. Das Messgerät der Shore-Härte besteht aus einem federbelasteten Stift, dessen Eindringtiefe ein Mass für die entsprechende Shore-Härte des Materials ist. Bei weichen Kunststoffen wird die Härte in Shore-A (0 - 90 ShA) angegeben. Dabei wird bei der Prüfung eine Nadel mit abgestumpftem Spitz in den Werkstoff gedrückt. Bei zähen Kunststoffen wird die Shore-D (30 - 100 ShD) angegeben. Bei der Messung wird ebenfalls eine Nadel, welche im 30°-Winkel zuläuft und nicht abgestumpft ist, in den Werkstoff gedrückt.

[Shore A/D]

DIN 53 505

2.6 Festigkeiten, Zähigkeiten

2.6.1 Schlag- und Kerbschlagzähigkeit

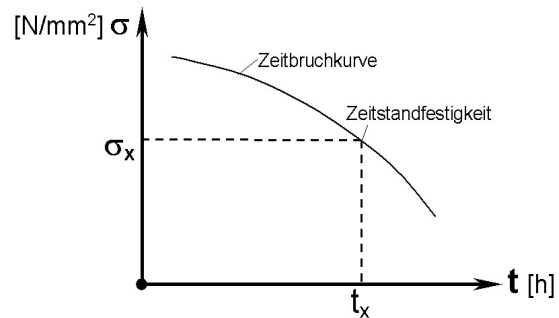
Die Schlagzähigkeit ist ein Mass für die Fähigkeit des Werkstoffes Stossenergie und Schlagenergie zu absorbieren ohne zu brechen. Dabei bestimmen einige Faktoren die Schlagfestigkeit des Bauteils: Wandstärke, Form und Grösse des Bauteils, Temperaturen und Stossgeschwindigkeit.

[kJ/m²]DIN 53 453
ISO179

Die Kerbschlagzähigkeit wird mit einer gekerbten Probe gemessen. Aufgrund der Spannungskonzentration liegen die Werte deutlich tiefer. Die Kerbschlagzähigkeit ermöglicht eine Aussage über die Kerbempfindlichkeit des verwendeten Werkstoffs.

2.6.2 Dauer- bzw. Zeitstandfestigkeit

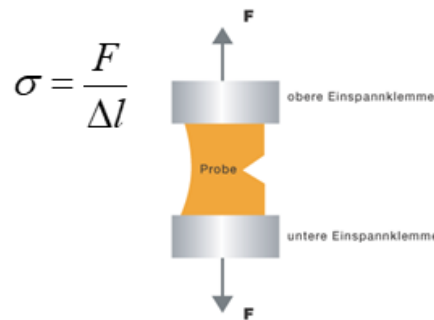
Die Dauerfestigkeit [N/mm²] bezeichnet die Belastungsgrenze, die ein dynamisch (z.B. schwingend) belasteter Werkstoff ohne nennenswerte Ermüdungserscheinungen bzw. Ausfallerscheinungen ertragen kann. Die Dauerfestigkeit ist abhängig von der Art der auftretenden Belastung. Je nachdem, ob die Art der Belastung nur aus Druck, nur Zug, Druck und Zug oder zusätzlich auch noch aus Biegung und Torsion besteht, ändert sich ihre jeweilige Höhe.



Die Zeitstandfestigkeit ($\sigma_{x/t}$) ist die Spannung (σ) bei der ein Probekörper nach der Zeit t bricht.

2.6.3 Weiterreissfestigkeit

Der Weiterreissversuch wird an weichen Folien und sehr flexiblen Elastomeren durchgeführt. Die zuvor eingeschnittenen Proben werden auseinander gezogen und die dazu benötigte Kraft wird aufgezeichnet. Diese ist sehr stark vom Abzugswinkel, welcher sich während der Prüfung einstellt, abhängig. Der Längenunterschied (Δl) ist die Differenz der eingeschnittenen Anfangslänge und der eingerissenen Länge nach dem Versuch.



[N/mm]

DIN 53515, DIN 53363, DIN 53507, ASTM D1004, ASTM D1938

2.7 Allgemeine Eigenschaften

2.7.1 Dichte

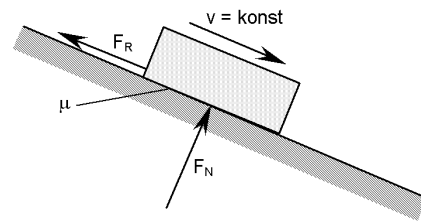
Die Dichte ρ ist eine physikalische Eigenschaft eines Werkstoffes. Diese ist der Quotient aus der Masse (m) des Probekörpers und dessen Volumen (V).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

[kg/m³; g/cm³]

2.7.2 Gleitreibungskoeffizient

Die Gleitreibungskraft (F_R) ist der Widerstand gegen das Aufrechterhalten einer Relativbewegung zweier sich berührender Körper. Der Gleitreibungskoeffizient ist das Verhältnis aus Reibungskraft (F_R) und der Normalkraft (F_N), mit der die beiden Körper gegeneinander gedrückt werden. Dieser Koeffizient hängt von den Schmierungsverhältnissen ab (Trocken-, Flüssigkeits- und Mischreibung).



$$\mu = \frac{F_R}{F_N}$$

[-]

2.7.3 Verschleiss, Abrieb

Verschleiss ist der fortschreitende Materialverlust von der Oberfläche eines festen Körpers, welcher nicht wieder rückgängig gemacht werden kann. Dieser Verschleiss wird hervorgerufen durch

mechanische Ursachen, d.h. durch Kontakt und Relativbewegung mit einem festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörper. (DIN 50 320)

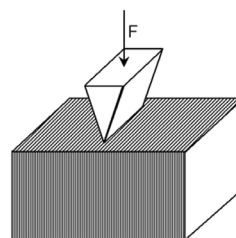
Verschleissarten:

- Gleitverschleiss
- Rollverschleiss
- Wälzverschleiss
- Prallverschleiss
- Stossverschleiss
- Schwingungverschleiss
- Furchungverschleiss

- Korngleitverschleiss
- Kornwälzverschleiss
- Spül- und Gleitstrahlverschleiss (Erosion)
- Prallstrahl- & Schrägstrahlverschleiss
- Kavitationserosion
- Tropfenschlag

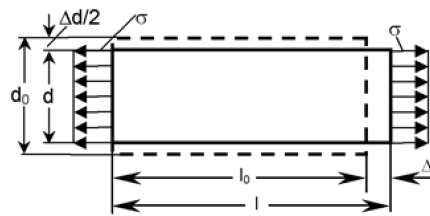
2.7.4 Spaltkraft

Der Spaltversuch dient zur Ermittlung des Widerstandes gegen das Trennen der Schichten voneinander durch Spaltbeanspruchung bei Halbzeugen aus Schichtpressstoffen. Die Spaltkraft F [N] ist die grösste Kraft, den die Probe beim Spaltversuch aushält.



2.7.5 Hookesches Gesetz

Das Hookesche Gesetz gilt für lineare elastische Deformationen. Diese Bedingung ist in der Regel für kleine Deformationen erfüllt. In diesem Bereich ist die Normalspannung (σ) proportional der Dehnung (ϵ).



$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

[N/mm²]
DIN 1304

Bei Deformationen oberhalb der so genannten Proportionalitätsgrenze werden die Verformungen nicht-linear.

2.7.6 Poissonzahl, Querkontraktion

Unter Einwirkung einer Zugkraft wird nach dem Hookeschen Gesetz jeder Körper länger. Gleichzeitig tritt aber eine relative Dickenänderung auf. Dadurch wird der Körper, rechtwinklig zur wirkenden Kraft, dünner. Dieser Effekt heisst Querkontraktion und ist über die Poissonzahl mit der Längsdehnung verknüpft. Die Poissonzahl ist eine Materialkonstante, d.h. sie ist abhängig vom verwendeten Werkstück.

ϵ_Q = Querdehnung [%]
 μ = Poissonzahl [-]
 ϵ_L = Längsdehnung [%]

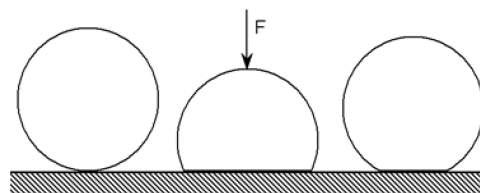
$$\mu = \frac{\epsilon_Q}{\epsilon_L}$$

[-]

2.7.7 Druckverformungsrest

Der Druckverformungsrest gibt den Anteil der plastischen Verformung eines Kunststoffs an. Dies bedeutet in der Praxis, dass bei einer Belastung auf das Bauteil über eine längere Zeit eine Verformung des Werkstoffs hervorgerufen wird. Nach der Entlastung sollte sich der Werkstoff wieder in die ursprüngliche Form zurück verformen. Je besser der Druckverformungsrest ist, desto

besser verformt sich der unter Belastung gestandene Werkstoff wieder in den Ursprung zurück.



Zur Ermittlung des Druckverformungsrests werden zylindrische Prüfkörper deformiert und über mehrere Stunden bei Raumtemperatur (23°C) gelagert. Danach werden die Proben entspannt und nach 30 Minuten die Restverformung gemessen. Die Differenz zwischen Ursprungshöhe und Ausgangshöhe wird prozentual als Druckverformungsrest angegeben. Der Druckverformungsrest kann auch bei höheren Temperaturen (z.B. 70°C) bestimmt werden.

[%]

DIN 53 517

2.7.8 Rückprallelastizität

Die Rückprallelastizität (R) ist der Quotient aus der nach dem Aufschlag wieder gewonnenen Rückprallhöhe (h_R) und der Anfangshöhe (h₀) des Pendels.

$$R = \frac{h_R}{h_0} \cdot 100$$

[%]

In der Praxis hat dieser Wert einen Einfluss auf die Abrasion (Verschleiss). Je grösser der Rückprallelastizitäts-Wert ist, desto weniger Abrasion erfährt der Kunststoff.

Prüfgerät

DIN 53 512

Kunststoff ist weder ein voll elastischer, noch ein gänzlich viskoser Stoff. Beim Aufschlagen eines Pendels auf eine Kunststoffplatte wird daher nur ein Teil der aufgewendeten Energie wieder in kinetische Energie zurückverwandelt.

3 Thermische Werte

3.1 Anwendungstemperatur

3.1.1 Maximale Anwendungstemperatur (kurzzeitig)

Die maximale Anwendungstemperatur (kurzzeitig) ist die höchste Temperatur, bei der die Kunststoff-Probe, ohne zusätzliche Beanspruchung (z.B. mechanische), eine bestimmte Zeit lang aushält.

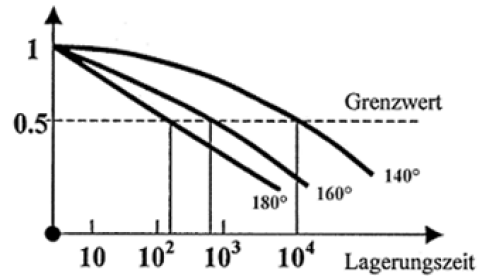
Dabei unter- bzw. überschreiten die betrachteten Eigenschaft, bei kurzzeitiger Wärmeeinwirkung, nie einen Grenzwert.

3.1.2 Maximale Anwendungstemperatur (langzeitig)

(Auch Dauergebrauchstemperatur genannt)

Die maximale Anwendungstemperatur (langzeitig) ist bei langandauernder Wärmeeinwirkung die höchste Temperatur, bei der die Kunststoff-Probe ohne zusätzlicher Wärmeeinwirkung und Beanspruchung (z.B. mechanisch) einer bestimmte Zeit lang aushält. Dabei unter- bzw. überschreiten die betrachteten Eigenschaften nie einen Grenzwert.

Eigenschaftswert, z.B. Zugfestigkeit



3.2 Wärmeformbeständigkeit

Die Formbeständigkeit in der Wärme ist die Probekörper-Fähigkeit, unter bestimmter ruhender Beanspruchung seine Form bis zu einer bestimmten Temperatur zu bewahren. Die Formbeständigkeit ist die Temperatur, bei welcher der in einem flüssigen Wärmeübertragungsmittel gleichmässig steigend erwärmte und beidseitig gelagerte Biegeprobekörper unter einer bestimmten mittig aufgebrachten Kraft eine definierte Durchbiegung erreicht hat, die einer Randfaserdehnung von ca. 0.2% entspricht.

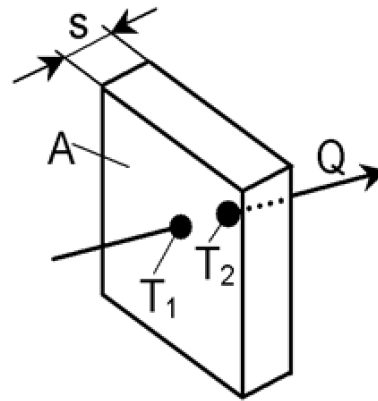
Die Ermittlung der Formbeständigkeit geschieht mittels diverser Verfahren. Zwischen diesen Verfahren ermittelten Formbeständigkeitstemperaturen besteht wegen unterschiedlichen Prüf-anordnungen kein direkter Zusammenhang. Die Formbeständigkeit charakterisiert das Zeitverhalten. Mit der Beständigkeit eines Kunststoffes gegen länger dauernde Wärmeeinwirkung, z.B. Wärmealterung, besteht kein Zusammenhang.

[°C]

ISO/R75
ASTM D648

3.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ gibt an, welche Wärmemenge in einer Stunde durch einen Probekörper mit einer 1.0 m² Fläche (A) und einer 1.0 m Schichtdicke (s) hindurch geleitet wird. Dabei muss der Temperaturunterschied zwischen den beiden Oberflächen 1.0 K betragen.



Je kleiner die Wärmeleitfähigkeit, desto besser ist die Wärmedämmeigenschaft des Werkstoffs. Die Wärmeleitfähigkeit wird von der Dichte des Werkstoffes und der Feuchtigkeit beeinflusst. Je mehr Poren ein Werkstoff hat, desto geringer ist die Wärmeleitfähigkeit, da Luft gut dämmt. Je mehr Feuchtigkeit ein Werkstoff hat, desto höher ist die Wärmeleitfähigkeit. Ein Werkstoff mit einer geringen Dichte und einer geringen Feuchtigkeit hat also gute Dämmeigenschaften.

λ	= Wärmeleitfähigkeit [W/m K]
Q	= Wärmemenge [J]
s	= Werkstoffdicke [m]
A	= Fläche [m ²]
T_x	= Oberflächentemperatur [K]
t	= Zeit [s]
l	= Länge des Rohrs [m]
d	= Durchmesser des Rohrs [m]

Ebene Wand

$$\lambda = \frac{Q \cdot s}{A \cdot (T_1 - T_2) \cdot t}$$

[W/m K]

DIN 52 612

Dünnwandiges Rohr

$$\lambda = \frac{Q \cdot s}{\pi \cdot d \cdot l \cdot (T_1 - T_2) \cdot t}$$

[W/m K]

DIN 52 612

3.4 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität gibt an, wie viel Energie benötigt wird, um 1 kg des Werkstoffs um 1.0 K zu erwärmen oder abzukühlen.

$$c = \frac{Q}{m \cdot (T_1 - T_2)}$$

c = spez. Wärmekapazität [J/kg K]

m = Masse [kg]

T = Temperatur [K]

[J/kg K]

3.5 Längenausdehnungskoeffizient

Der Längenausdehnungskoeffizient wird bestimmt durch die Änderung der Länge (Δl) eines Probekörpers mit Bezugslänge l_1 zwischen zwei Temperaturen T_1 und T_2 .

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_1 \cdot \Delta T}$$

α = Längenausdehnungskoeffizient [1/K] [1/K]

Δl = Längenänderung [m]

l_1 = Anfangslänge des Körpers bei T_1 [m]

ΔT = Temperaturunterschied [K]

4 Elektrische Werte

4.1 Spezifischer Durchgangswiderstand

Der spezifische Durchgangswiderstand ρ_D ist bei geometrisch einfachen Probekörpern und Elektroden definiert durch die Beziehung des gemessenen Durchgangswiderstands multipliziert mit der Messfläche dividiert durch die Probelänge.

$$\rho_D = R_D \cdot \frac{A}{l}$$

[Ω m]

In der Praxis ist der spezifische Durchgangswiderstand der auf ein kubisches Volumen bezogene Durchgangswiderstand.

DIN 53 482

ρ_D = spezifischer Durchgangswiderstand

l = Elektrisch durchströmte Länge des Prüfkörpers [m]

A = Elektrisch durchströmte Querschnittsfläche [m²]

R_D = Durchgangswiderstand [Ω]

4.2 Oberflächenwiderstand

Der Oberflächenwiderstand R_o ist der Widerstand zwischen zwei in festgelegtem Abstand auf die Oberfläche des Prüfkörpers angebrachte Elektroden bestimmter Abmessungen.

[Ω]

DIN 53 482

Bei einer solchen Widerstandsmessung wird gleichzeitig auch der Widerstand im Werkstoffinnern zu einem bestimmten Teil miterfasst.

4.3 Durchschlagsfestigkeit

Die Durchschlagfestigkeit E_d ist der Quotient aus Durchschlagspannung (U_d) und dem Abstand (s) der beiden Elektroden, zwischen denen die Spannung angelegt ist. Dabei ist die Durchschlagspannung derjenige Wert einer sinusförmigen Wechselfeldspannung, bei der die Spannung zwischen zwei Elektroden unter Zerstörung des Isolierwerkstoffes zusammenbricht. Die Durchschlagspannung wird als Effektivwert angegeben.

E_d = Durchschlagfestigkeit [kV/mm]
 U_d = Durchschlagspannung [kV]
 s = Abstand [mm]

$$E_d = \frac{U_d}{s}$$

[kV/mm]

4.4 Kriechstromfestigkeit

Eine wichtige Kennzahl zur Bestimmung der Eignung eines Werkstoffes als Isolierstoff ist die Kriechstromfestigkeit. Diese beschreibt die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffes gegenüber Kriechstrombildung. Der CTI-Wert ist die höchste Prüfspannung in Volt nach Auftropfen einer Prüflösung ohne die Ausbildung eines Kriechstroms. Das Auftropfen der Prüflösung simuliert eine Verunreinigung. Getestet wird in Schritten von 25

V, maximal bis 600 V. Der CTI-M-Wert stellt eine Verschärfung der Prüfbedingungen dar, welche einer aggressiveren Verunreinigung entspricht. Zu beachten ist, dass die Kriechstromfestigkeit durch Werkstoffzusätze, insbesondere Farbpigmente, beeinflusst wird. Dunkle Farben führen im Allgemeinen zu einer Verschlechterung, helle Farben zu einer Verbesserung.

4.5 Dielektrizitätszahl

Die Dielektrizitätszahl ϵ_r eines Werkstoffs ist der Quotient aus Kapazität C_x eines Kondensators, bei dem Raum zwischen den Elektroden völlig und ausschliesslich mit dem betreffenden Werkstoff ausgefüllt ist. Die Kapazität C_0 gilt bei der leeren Elektrodenanordnung im Vakuum. Die Dielektrizitätszahl ist ein Mass für die Stärke der Polarisierung des Werkstoffs.

ϵ_r = Dielektrizitätszahl
 C_x = Kapazität (Isolierstoff)
 C_0 = Kapazität (Vakuum)

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}$$

[-]

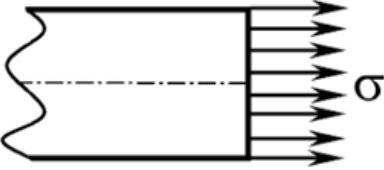
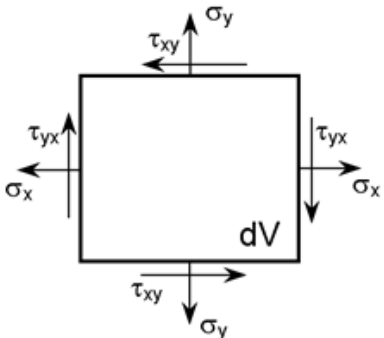
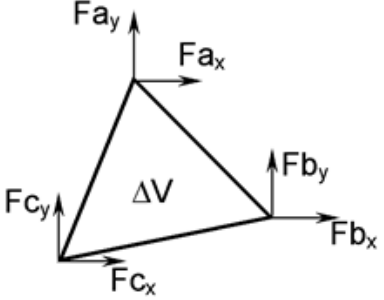
4.6 Dielektrischer Verlustfaktor \tan

Der dielektrische Verlustfaktor eines Werkstoffs ist der Tangens des Fehlwinkels δ (Verlustwinkel), um den die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung im Kondensator von $\pi/2$

abweicht, wenn das Dielektrikum (Isolator) des Kondensators ausschliesslich aus dem Werkstoff besteht. Er ist ein Mass für den vom Werkstoff bewirkten Energieverlust im elektrischen Feld.

5 Grundlegende Berechnungen von Kunststoffkonstruktionen

5.1 Berechnungsmöglichkeiten

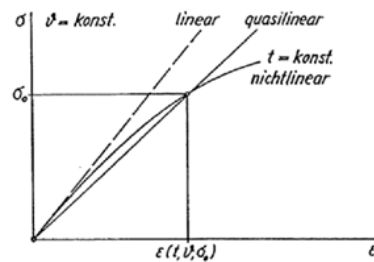
Methode	Mathematische Mittel	Möglichkeiten
Elementar 	<ul style="list-style-type: none"> Grundrechnungsarten 	<ul style="list-style-type: none"> Einfache Bauteile Zug/Druck Ebene Flächenpressung Lochleibung Abscherung
Analytisch 	<ul style="list-style-type: none"> Differenzial- und Integralrechnungen Differenzialgleichungen 	<ul style="list-style-type: none"> Biegung Torsion Scheiben Platten Schalen Stabilitätsprobleme Kontaktprobleme
Numerisch (FEM) 	<ul style="list-style-type: none"> Numerische Mathematik Matrizenrechnung 	<ul style="list-style-type: none"> Beliebige Bauteilgeometrien Geometrische und physikalische Nichtlinearität Isotropie/Anisotropie

5.2 Spannungs- und Verformungsbedingungen

5.2.1 Lineares-, Nichtlineares Verformungsverhalten

Lineares Verformungsverhalten:

Viele Kunststoffe verhalten sich nahezu linear bzw. können ohne grosse Fehler linearisiert werden. Dadurch können Spannungen und Verformungen einfach anhand der zahlreichen bekannten Lösungen der Fachliteratur bestimmt werden. Es ist zu beachten, dass anstelle des E-Moduls der Kriechmodul eingesetzt werden muss.



Nichtlineares Verformungsverhalten:

Bei starker Abweichung von der Linearität können die Lösungen aus der Fachliteratur nur noch als Näherung gelten. Dies gilt insbesondere bei unregelmässiger Spannungsteilung im Querschnitt, wie z.B. bei Biegung, Torsion oder Kerbwirkung.

5.2.2 Verformungsbedingungen

Bei Anwendung des Versagenskriteriums Rissbildung dürfen die entsprechenden Dehnungsgrenzwerte an keiner Stelle im Bauteil überschritten werden und zwar unabhängig, ob der Spannungszustand ein- oder mehrachsig, die Belastung statisch oder schwingend ist.

Verformungsbedingungen:

$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \leq \varepsilon_{\text{zul}} = \varepsilon_G \cdot \frac{C}{S}$$

- ε_{\max} = Maximale Dehnung [%]
- ε_{zul} = Zulässige Dehnung [%]
- ε_i = Dehnung in Hauptrichtungen (i = 1,2,3) [%]
- ε_G = Dehnungsgrenzwert [%]
- C = Einflussfaktor, meist C = 1.0
- S = Sicherheitsfaktor, meist S = 1.0

Zur Bestimmung der maximalen Dehnung aus den drei Hauptdehnungen:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1e} - \mu \cdot (\varepsilon_{2e} + \varepsilon_{3e}) = \frac{\sigma_1}{E_{c1}} - \mu \cdot \left(\frac{\sigma_2}{E_{c2}} + \frac{\sigma_3}{E_{c3}} \right)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{2e} - \mu \cdot (\varepsilon_{3e} + \varepsilon_{1e}) = \frac{\sigma_2}{E_{c2}} - \mu \cdot \left(\frac{\sigma_3}{E_{c3}} + \frac{\sigma_1}{E_{c1}} \right)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{3e} - \mu \cdot (\varepsilon_{1e} + \varepsilon_{2e}) = \frac{\sigma_3}{E_{c3}} - \mu \cdot \left(\frac{\sigma_1}{E_{c1}} + \frac{\sigma_2}{E_{c2}} \right)$$

μ = Poisson-, Querkontraktionszahl [-]
 σ_i = Hauptspannungen (i = 1,2,3)
 E_c = Kriechmodul [N/mm²]

Kurzzeitbelastung: t = 10⁻² [h]

Folgerungen:

- Die grösste Dehnung tritt stets in Richtung der Spannung auf
- Rissbildung tritt immer senkrecht zur grössten Dehnung auf, beim Druckstab also axial.

5.2.3 Statische Belastung

Als statisch gelten Belastungen, unter denen keine dynamischen Effekte auftreten, also auch die als quasistatisch bezeichneten Vorgänge der

zünftig verlaufenden Belastungen oder der Relaxation.

Sprödes Verhalten unter Druck \Rightarrow Trennbruch:
 Normalspannungshypothese (NSH)

$$\sigma_v = \text{Max}(\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3)$$

Sprödes Verhalten unter Druck \Rightarrow Gleitbruch, sowie
 Zähes Verhalten unter Zug/Druck \Rightarrow Verformungsbruch oder Verstreckung:
 Schubspannungshypothese (SSH)

$$\sigma_v = \text{Max}(|\sigma_1 - \sigma_2| / |\sigma_2 - \sigma_3| / |\sigma_3 - \sigma_1|)$$

Zähes Verhalten unter Zug/Druck \Rightarrow Verformungsbruch oder Verstreckung:
 Gestaltänderungshypothese (GEH)

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

σ_v = Hauptspannungen (i= 1, 2, 3) [N/mm²]

5.2.4 Schwingende Belastung

Bei schwingender Belastung und Versagenskriterium Dauerschwingbruch herrschen folgende zwei Festigkeitsbedingungen:

Maximalspannung:

$$\sigma_{\max} = \max(|\sigma_o|, |\sigma_u|) \leq \sigma_{zul} = \sigma_G \cdot \frac{C}{S}$$

Amplitudenspannung:

$$\sigma_a \leq \sigma_{a,zul} = \sigma_A(N) \cdot \frac{C}{S_D}$$

σ_{\max} = Maximale Spannung [N/mm²]

σ_o = Oberspannung [N/mm²]

σ_u = Unterspannung [N/mm²]

σ_{zul} = Zulässige Spannung [N/mm²]

σ_G = Spannungs-Grenzwert [N/mm²]

σ_a = Amplitudenspannung [N/mm²]

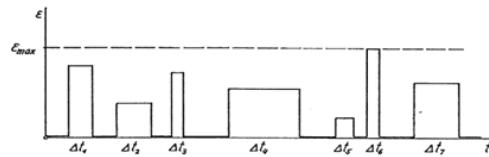
$\sigma_{a,zul}$ = Zulässige Amplitudenspannung [N/mm²]

$\sigma_A(N)$ = Dauer-, Zeitfestigkeitsamplitude als Spannungs-Grenzwert [N/mm²]

S_D = Sicherheit gegen Dauerbruch

5.2.5 Intermittierende Belastung

Bei intermittierender Belastung wechseln in unbestimmter Folge Lastphasen von unterschiedlicher Höhe und Dauer mit lastfreien Phasen unterschiedlicher Dauer ab.



Zwei Fälle:

1. Die höchste auftretende Belastung führt nicht zu einer Werkstoffschädigung und die lastfreien Phasen dauern ausreichend lange für eine völlige Rückverformung. Dann gilt:

$$t = \max(\Delta t_i) \quad \text{und} \quad F = \max(F_i)$$

2. In allen anderen Fällen, d.h. wenn einzelne Lastphasen zur Werkstoffschädigung führt, und/oder die Restitutionsphasen (Erholungsphasen) zu kurz sind, muss mit einer Kumulation (Anhäufung) der Verformung und Schädigung gerechnet werden. Dann gilt:

$$F = \max(F_i) \quad \text{und} \quad F = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$$

5.2.6 Schlagartige Belastung

Schlag- oder stossartig ist eine Belastung, wenn sie in sehr kurzer Zeit aufgebracht und dabei die kinetische Schlagenergie in Verformungsarbeit umgesetzt wird. Dabei ist beim Kunststoff ein Anstieg der Steifig- und Festigkeit und eine Abnahme der Verformbarkeit festzustellen. Die

Erfahrung zeigt, dass die bis zum Versagen unter Schlagbelastung verrichtete Verformungsarbeit pro Volumeneinheit (w) bei Thermoplasten im Minimum eine Grössenordnung von etwa 1.5 bis 2.5 Nmm/mm³ erreicht.

Spezifische Verformungsarbeit:

Einachsrig:

$$W = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E}$$

E = Kurzzeit-Elastizitätsmodul [N/mm²]
 μ = Poisson-, Querkontraktionszahl [-]

Mehrachsrig:

$$W = \frac{1-2\mu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

$$W = \frac{E}{2(1+\mu)} \left[\frac{\mu}{1-2\mu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 \right]$$

5.2.7 Stabilitätsprobleme

Auf Druck beanspruchte, schlanke Kunststoff-Bauteile können ausser durch Überschreiten von Festigkeits- oder Verformungsgrenzen auch

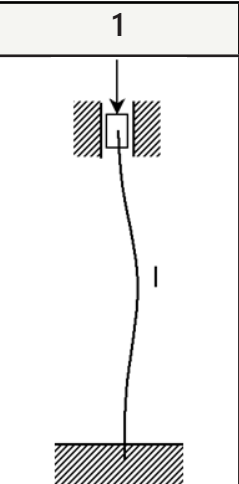
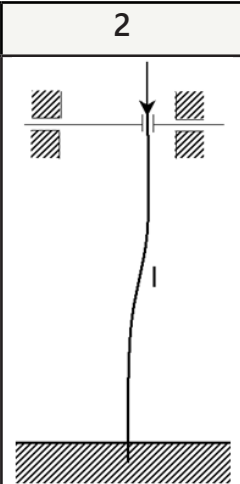
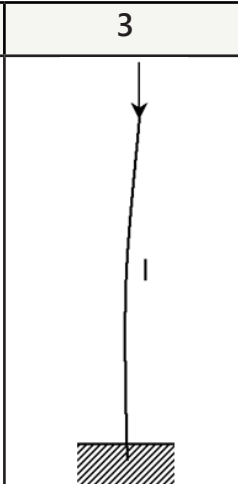
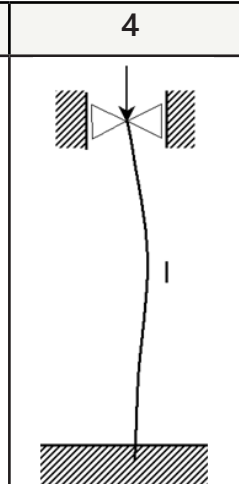
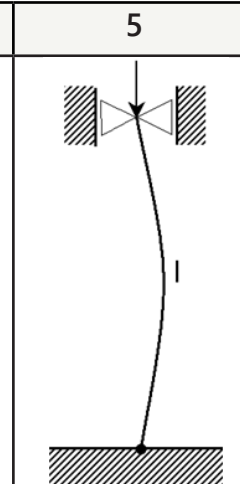
dadurch versagen, dass das Gleichgewicht der äusseren Kräfte vom stabilen in den instabilen Zustand übergeht.

Knickkraft $F_K = \pi^2 \cdot \frac{E_C \cdot I}{s^2}$

Knickspannung $\sigma_K = \frac{F_K}{A} = \pi^2 \cdot \frac{E_C \cdot I}{s^2 \cdot A}$

Knickdehnung $\epsilon_K = \frac{\sigma_K}{E_C} = \pi^2 \cdot \frac{I}{s^2 \cdot A}$

E_C = Kriechmodul [N/mm²]
 I = Axiales Flächenträgheitsmoment [mm⁴]
 A = Querschnittsfläche [mm²]
 s = Freie Knicklänge [mm] (siehe unten)

Fall	1	2	3	4	5
					
s	0.5 l	l	2 l	≈ 0.7 l	l

Stabilitätsbedingung

$$\sigma \leq \sigma_{zul} = \sigma_K \cdot \frac{C}{S_K}$$

$$\epsilon \leq \epsilon_{zul} = \epsilon_K \cdot \frac{C}{S_K}$$

- σ = Druckspannung [N/mm²]
- σ_{zul} = Zulässige Druckspannung [N/mm²]
- σ_K = Kritische-, Knickspannung [N/mm²]
- ϵ = Dehnung unter Druck, Stauchung [%]
- ϵ_{zul} = Zulässige Dehnung [%]
- ϵ_K = Kritische-, Knickdehnung [%]
- C = Einflussfaktor, meist C = 1.0
- S_K = Sicherheit gegen Instabilität [-]

6 Verschiedene Werte

6.1 Wasseraufnahme

Wasseraufnahme ist die Fähigkeit eines Werkstoffs, durch Diffusion Wasser auf zu nehmen. Die Prüfung dient dazu, die Wasseraufnahme vom Probekörper aus Kunststoff nach der Lagerung in Wasser bei 23°C zu bestimmen.

Die Wasseraufnahme eines Kunststoffs verursacht eine Längenänderung des Prüfkörpers. Diese Längenänderung verursacht bei 1% Wasseraufnahme $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ % Längenzuwachs. Bei Normal-klima: Prozentuale Gewichtszunahme des Kunststoffs durch Wasseraufnahme bei der Lagerung im Normklima (Temperatur 23°C, Luftfeuchtigkeit 50 %).

Bei Wasserlagerung: Prozentuale Gewichtszunahme des Kunststoffs durch Wasseraufnahme bei der Lagerung im Wasser.

6.2 Feuchtigkeitsaufnahme

Feuchtigkeitsaufnahme ist die Fähigkeit eines Werkstoffs, aus der Luft Feuchtigkeit auf zu nehmen. Die Prüfung dient dazu, die Wasseraufnahme von Probekörpern aus Kunststoff zu

bestimmen, die bei einer bestimmten Temperatur, bei einer definierter Luftfeuchtigkeit und einer gewissen Zeit gelagert worden sind.

[mg]

DIN 53 492

6.3 Brennbarkeit

Die Einordnung von Stoffen anhand ihrer Brennbarkeit ist eine wichtige Aufgabe beim Brandschutz. Eine erste Einteilung erfolgt, ob der Stoff brennbar oder nicht brennbar ist. Zur Überprüfung

des Brennverhaltens von Kunststoffen wird in der Regel die international gebräuchliche Brennbarkeitsprüfung nach UL 94 durchgeführt.

UL94-HB

Dieses Verfahren dient zur Bestimmung der Brennbarkeitsklasse nach HB über die Brenngeschwindigkeit V an Probekörpern.

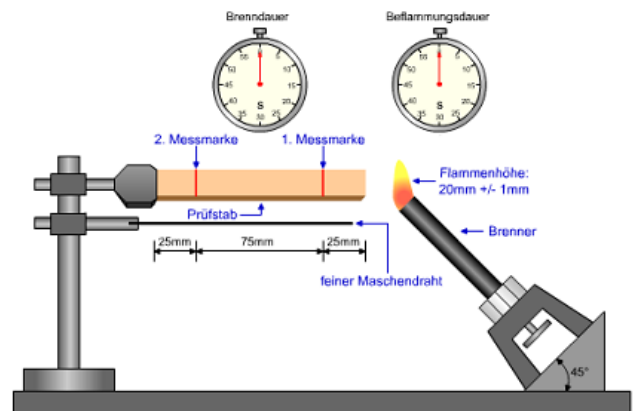
Vorbehandlung:

48 h / 23°C / 50% relative Feuchtigkeit

Beflammung: Mit 20 mm hoher Tirill
brennflamme

Beflammungszeit: 30s

Erreicht die Flammenfront von 30s die erste Messmarke, wird die Beflammung beendet.



	Brenngeschwindigkeit v	Brennbarkeitsklasse
Probekörperdicke 3-13 mm	$V \leq 40 \text{ mm/min}$	HB
Probekörperdicke < 3 mm	$V \leq 75 \text{ mm/min}$	HB
Erlischt die Flamme vor der ersten Messmarke	$V = 0 \text{ mm/min}$	HB

UL94-V5

Dieses Verfahren wird angewendet zu Ermittlung der Brennbarkeitsklassen UL94-5VA und -5VB.

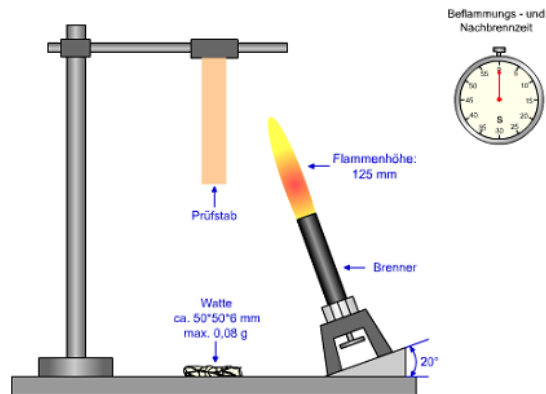
Vorbehandlung:

2 Tage / 23°C / 50% relative Feuchtigkeit

7 Tage / 70 °C / Warmluftofen

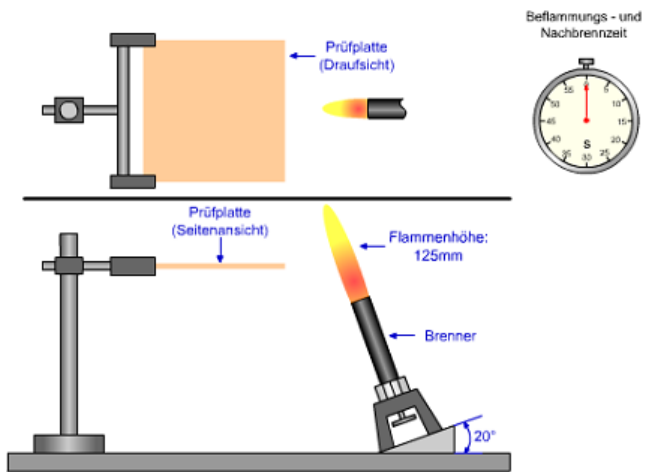
Beflammung: Mit 125 mm Flammenhöhe
(40 mm Innenkegel)

Beflammungszeit: 2 x 10s



Brennbarkeitsklassen UL 94

Prüfkriterium (Stäbe)	5VA	5VB
Nachbrennen und Nachglühen der Proben nach der 5. Beflammung [s]	≤ 60 s	≤ 60 s
Brennendes Abtropfen	Nein	Nein



Prüfkriterium (Platten)

Lochbildung	Nein	Ja
-------------	------	----

7 Anhang

7.1 Literaturverzeichnis

- [1] **Festigkeitslehre 1 und 2**
Lehrskript von Herrn Professor Johannes Kunz (HSR Rapperswil)
- [2] **Kunststoff 1 und 2**
Lehrskript von Herrn Professor Johannes Kunz (HSR Rapperswil)
- [3] **Dubbel**
Taschenbuch für Maschinenbau, 20. Auflage, Springer Verlag, ISBN: 3-540-6777-1
- [4] **Bayer Material Science**
www.bayermaterialscience.com

7.2 Danke

An dieser Stelle einen herzlichen Dank an Herrn Professor Johannes Kunz, Dozent für Kunststofftechnik und Festigkeitslehre an der Fachhochschule für Technik (HSR) Rapperswil. Das zur

Verfügung stellen seines Lehr-Skripts, Skriptzeichnungen und dem Support, trugen für das Gelingen dieser technischen Begriffserklärungs-Dokumentation bei.

Alle Angaben zu unseren Produkten entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse. Informationen über Materialeigenschaften stammen von unseren Lieferanten und sind von uns nicht überprüft worden. Die Angaben sind nicht als Zusicherungen für bestimmte Eigenschaften unserer Produkte zu verstehen. Die Angaben sowie unsere konkreten anwendungstechnischen Hinweise in Wort und Schrift befreien Sie nicht von einer eigenen Prüfung der Produkte auf ihre Eignung für den von Ihnen beabsichtigten Einsatzzweck. Unsere Angaben sind unverbindlich - auch soweit sie Schutzrechte Dritter betreffen - und können zu keiner Haftung führen. Die Gewährleistung für die Qualität unserer Produkte sowie unsere Haftung richten sich im Übrigen nach den Ihnen bekannten Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen der KUNDERT AG.