

Bauelemente aus Kunststoffen

Autor(en): **Brandenberger, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **75 (1957)**

Heft 32

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-63399>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Bauelemente aus Kunststoffen

DK 679.5:69

Von Prof. Dr. E. Brandenberger, EMPA/ETH, Zürich

In dem Masse, wie neuerdings Kunststoffe mehr und mehr auch zur Herstellung selbständiger, *lasttragender* Bauelemente verwendet werden und damit ständigen oder oft wiederholten, mechanischen Beanspruchungen standhalten sollen, kann die bisher übliche Kennzeichnung ihres Festigkeitsverhaltens mit einigen wenigen, einfachen Grössen wie Zug-, Biege-, Druck- und Schlagfestigkeit nicht länger genügen. Nicht nur wird damit vom Wesen der Kunststoffe Entscheidendes von Grund auf übersehen, sondern zugleich der Konstrukteur zu um so bedenklicheren Trugschlüssen verleitet, je mehr er dazu neigt, ihm von andern Baumaterialien her geläufige, festigkeitstechnische Annahmen unbesehen auf den Fall der Kunststoffe zu übertragen. Mag es für manche andere Anwendung von Kunststoffen durchaus hinreichen, in erster Linie ihre Vorzüge — geringes spezifisches Gewicht bei dennoch beachtlicher Festigkeit, ihr Isolationsvermögen gegen Elektrizität, in geeignete Form gebracht auch gegen Wärme und Schall, ihre allgemein gute Chemikalienbeständigkeit, die leichte Verarbeit- und Bearbeitbarkeit, sodann individuelle Merkmale einzelner Sonderqualitäten wie Durchsichtigkeit, geringe Reibung usw. — ins Auge zu fassen, so kann sich ein Einsatz von Kunststoffen, wie er im folgenden betrachtet werden soll, damit nicht begnügen, sondern verlangt ausserdem eine einlässlichere Untersuchung vorab ihres mechanischen Verhaltens.¹⁾

Allgemein sind es vor allem zwei Umstände, derentwegen die an Kunststoffen mit den üblichen Kurzzeitversuchen (wie Zugversuch, Schlagbiegeversuch u. dgl.) ermittelten Festigkeitsgrössen bestenfalls rohe Richtwerte, nie aber eine einwandfreie Grundlage zum *Konstruieren mit Kunststoffen* abgeben können:

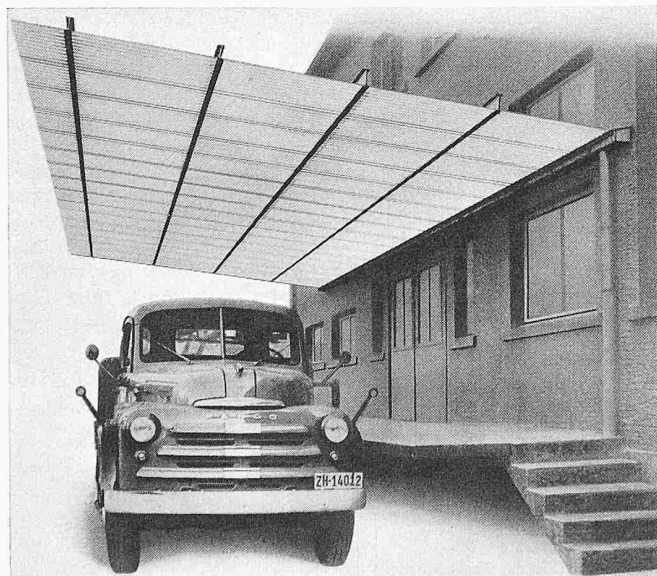
Zum ersten, weil das mechanische Verhalten der Kunststoffe nicht allein von der Grösse der ihnen widerfahrenden Beanspruchung abhängt, sondern ebenso sehr von der Zeit, während welcher diese Belastung wirkt, von der Geschwindigkeit, mit der sie aufgebracht wird, und endlich von der Temperatur, bei welcher die Beanspruchung stattfindet. Die Festig-

keitseigenschaften von Kunststoffen sind deshalb allgemein in weit stärkerem Masse *von Zeit und Temperatur abhängig* als im Falle anderer Baustoffe. Ein beispielsweise bei einem Zugversuch gefundenes Spannungs-Dehnungsdiagramm im Sinne einer Beziehung $\epsilon = f(\sigma)$ (ϵ die unter der Spannung σ eintretende, relative Formänderung der Probe) kann daher nur für *bestimmte* Werte von Temperatur T , Lastanstieg v und Belastungsdauer t gelten — also nicht für einen grösseren Bereich dieser Parameter, der (wie etwa im Falle der Metalle) weitgehend oder doch einigermaßen umfasst, was unter den in der Praxis üblichen Bedingungen vorkommen kann. Daran wird auch dadurch nicht das Geringste geändert, dass angesichts dieser wesentlichen Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Festigkeitswerte von Kunststoffen für die genormten Versuche Temperatur, Belastungsdauer und Lastanstieg (bzw. Verformungsgeschwindigkeit) genau vorgeschrieben sind. Wohl werden infolgedessen Messungen an verschiedenen Kunststoffen und von verschiedenen Laboratorien miteinander direkt vergleichbar, deswegen jedoch die bei solchen Normversuchen gefundenen Werte nicht verlässlicher für das, was sich an Bauelementen aus Kunststoffen bei ihrer zumeist recht wechselvollen Beanspruchung tatsächlich ereignet. Notwendig wäre vielmehr, anstelle des einfachen Zusammenhanges $\epsilon = f(\sigma)$ durchwegs mindestens die umfassendere Funktion $\epsilon = f(\sigma, T, v, t)$ zu kennen — eine Forderung, die allerdings weit ausgedehntere experimentelle Untersuchungen voraussetzt als die allgemein geläufigen, einfachen Festigkeitsversuche mit ihren völlig konventionell gewählten Versuchsbedingungen in bezug auf T , t und v .

Als zweites kommt hinzu, dass die meisten Eigenschaften der Kunststoffe — auf jeden Fall alle ihre mechanischen — in besonderer Weise durch *Alterungserscheinungen* und *Umwelteinflüsse* mitbestimmt werden, so dass sie sich auch aus diesem Grunde im Laufe der Zeit weit mehr ändern können als jene der meisten andern Baumaterialien. Zugleich ist in diesem Zusammenhang zu bedenken, wie weitgehend sich das Verhalten von Kunststoffen durch zahlreiche Massnahmen (so vor allem durch Zusätze der verschiedensten Art und Wirkungsweise wie Weichmacher, Füllstoffe, Farbstoffe, Stabilisatoren usw. oder durch geeignete Nachbehandlung, sei es mehr chemischer oder rein physikalischer Natur) den Ansprüchen des Verbrauchers besonders anpassen lässt. So sehr die damit mögliche Fülle der Materialqualitäten ohne Zweifel einen der besondern Vorteile dieser neuen Baustoffe bildet, so sehr können demzufolge Stoffbezeichnungen wie Polyvinylchlorid (PVC), Polystyrol, Polymethacrylat (Plexiglas), Polyesterharze, Phenoplaste, Aminoplaste u. dgl. *nie* eindeutig *definierte* Stoffqualitäten bedeuten, sondern umfassen notwendig stets ganze Stoffkategorien. Daher braucht das an einer bestimmten Sorte von PVC beobachtete Verhalten durchaus *nicht* bei *jeder andern* PVC-Qualität ebenfalls zu gelten, sondern bedarf es stets einlässlicher Ueberprüfung, was gemeinsames Merkmal *aller* Vertreter einer Kunststofftype darstellt und wie die einzelnen Gütewerte, vorab die mechanischen, sich im Rahmen einer solchen Kategorie von Kunststoffen mehr oder weniger stark variieren lassen.

I.

So liegt der für den Konstrukteur allgemein so bedeutsame *Elastizitäts-Modul* im Falle der Kunststoffe allgemein wesentlich niedriger als bei den üblichen Baustoffen und zeigt dazu, und zwar auch noch innerhalb der verschiedenen Kunststoff-Typen, eine beachtliche Variabilität. Ja selbst bei der *einzelnen* Kunststoffqualität erweist er sich noch immer als eine Grösse, die sich keineswegs mit einer einzigen Zahl hinreichend kennzeichnen lässt, indem gleichfalls der *E-Modul* eines Kunststoffes in entscheidender Weise von Art, Höhe und Dauer der Beanspruchung, dazu von der Temperatur sowie



Glasfaserverstärktes Kunstharz (Well-Scobalit) verwendet zu Dachungszwecken (Aufnahme der Scobalit AG., Zürich).

¹⁾ Zum vertieften Studium der hier naturgemäss nur gestreiften Fragen können das Buch von T. Alfrey jr., *Mechanical Behaviour of High Polymers*, 1948 sowie zahlreiche Abhandlungen in den Zeitschriften «Kunststoffe» und «Modern Plastics» dienen.

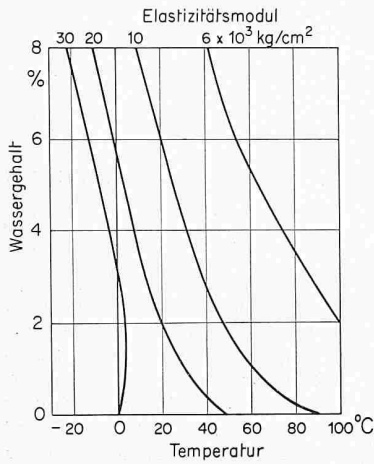


Bild 1. Abhängigkeit des E -Moduls eines Polyamids von Temperatur und Wassergehalt (nach W. Weidmann)

von zahlreichen Alterungs- und Umwelteffekten abhängt. Als Regel gilt, dass der E -Modul mit zunehmender Belastungsdauer und steigender Temperatur, aber auch infolge grösserem Feuchtigkeitsgehalt abfällt (siehe ein Beispiel hiezu Bild 1). In der Tat wurde beispielsweise an einem Polyamid bei 20° C und einem Wassergehalt von 3 % ein E -Modul von 15 000 kg/cm² beobachtet gegenüber einem solchen von bloss 5500 kg/cm² bei 60° C und einem Wassergehalt von 6 %, von 10 000 kg/cm² bei 20° C und 6 % H₂O oder von 7500 kg/cm² bei 60° C und 3 % H₂O (letztere Zahlen ein Hinweis darauf, wie Erhöhung der Temperatur und Erniedrigung des Wassergehalts sich in ihrer Auswirkung mindestens teilweise kompensieren können).

Sodann fällt der Unterschied zwischen *statischem* und *dynamischem* E -Modul, welcher bei den Metallen in der Regel vernachlässigbar klein ist, bei den Kunststoffen durchwegs erheblich ins Gewicht, wobei auch der hierfür massgebende dynamische Verlustfaktor wiederum wesentlich von Temperatur und Belastungsdauer wie von Alterung und Milieu abhängt.

Genau besehen zeigen im übrigen sämtliche bisher näher untersuchten Kunststoffe bei einer von Null aus ansteigenden Belastung nie *strenge* Proportionalität zwischen Formänderung und Spannung im Sinne des Hooke'schen Gesetzes, sondern machen sich bereits im Bereich *kleinster* Beanspruchungen Abweichungen hiervon geltend, und zwar nach Bild 2 um so mehr, je höher die Temperatur und je grösser die Dauer der Belastung (bzw. je kleiner die Belastungsgeschwindigkeit) ist.

Vor allem eigentliche Thermoplaste (so z. B. Cellulose-derivate wie Celluloseacetat, -butyrat u. dgl., weich gemachte Polyvinylverbindungen usw.), aber auch hornartige Stoffe (wie etwa Polyäthylen) zeigen nämlich bereits bei Raumtemperatur unter länger *dauernder* oder gar ständiger mechanischer Beanspruchung die Erscheinung des sog. *kalten Flusses*. So wie im Falle von Stählen und andern Metallen bei höhern Temperaturen kommt auch hier, nunmehr aber bereits bei gewöhnlicher oder nur wenig erhöhter Temperatur, die unter einer bestimmten Belastung sich ergebende Dehnung nicht zum Stillstand, sondern nimmt im Laufe der Zeit weiterhin zu. Der zeitliche Verlauf dieser, auch bei den Kunststoffen zweckmässig als *Kriechen* bezeichneten Formänderung ist nach Bild 3 bei den einzelnen Kunststoffgattungen recht verschieden: Fällen, wo gemäss Kurve a von Bild 3 nach relativ kurzer Zeit das Kriechen aufhört und sich damit für eine bestimmte Temperatur und Beanspruchung ein bestimmtes *Kriechmass* ϵ_e angeben lässt, stehen zunächst die Kriechkurven b und c gegenüber: bei Kurve b das vorerst beträchtliche Kriechen zwar allmählich abklingend, indes auch nach längerer Zeit immer noch in merklichem Ausmass bestehend und einer konstanten Kriechgeschwindigkeit ($d\epsilon/dt$) zustrebend; im Falle der Kurve c dagegen zu Anfang ein mässiges Kriechen, daraufhin ein starkes Ansteigen desselben, um nach einer gewissen Zeit wieder abzunehmen und sich von da weg ebenfalls mit konstanter Geschwindigkeit fortzusetzen. Neben solchen stetigen Kriechkurven werden aber auch *unstetig* verlaufende (z. B. bei Phenoplasten und Poly-

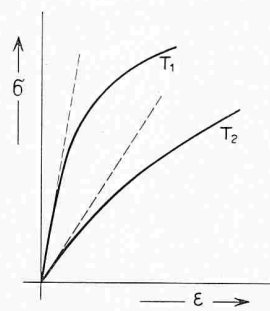


Bild 2. Verformung eines Kunststoffes unter geringer Belastung bei einer niedrigeren Temperatur T_1 und einer höhern T_2

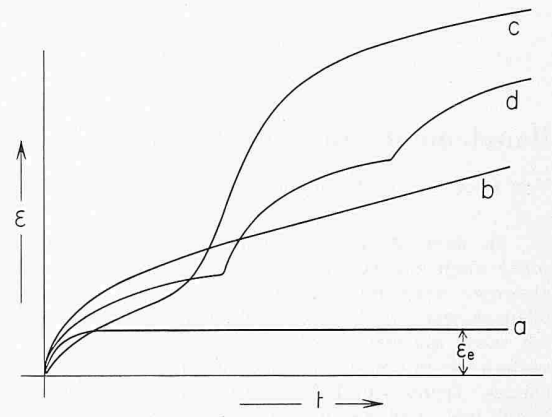


Bild 3. Typische Kriechkurven von Kunststoffen, die relative Formänderung ϵ in Funktion der Zeit t darstellend

methacrylat) nach Art der Kurve d beobachtet, wobei oft ein definierter Bereich mittlerer Temperatur- und Spannungswerte zu bestehen scheint, in welchem statt eines stetigen ein un-stetig verlaufendes Kriechen auftritt. Dass der Kunststoff-Erzeuger seinerseits nach Mitteln sucht, diese Erscheinung des kalten Flusses (also eines Kriechens bei gewöhnlicher oder nur wenig erhöhten Temperaturen) möglichst auszuschalten und darin auch manchen Erfolg verzeichnen kann, liegt auf der Hand.

Infolge eines solchen Kriechens der Kunststoffe kann sich im Laufe der Zeit bei Beanspruchung auf Zug, Torsion oder Biegung ein Bruch ergeben, obschon die fragliche Beanspruchung *wesentlich geringer* war als die entsprechende Kurzzeitfestigkeit. Die dabei bis zum Bruch benötigte Zeit fällt allgemeiner Erfahrung nach umso grösser aus, je niedriger Beanspruchung und Temperatur gewählt werden. Unter den wenigen, bisher näher untersuchten Fällen gibt es solche (wie zum Beispiel auf Zug beanspruchtes, hartes PVC), wo nach einer bestimmten Belastungsdauer t_e (z. B. rund 2000 Stunden) im Sinne der Kurve a von Bild 4 der Festigkeitsabfall aufhört, so dass sich eine hinreichend definierte *Dauerstandfestigkeit* σ_∞ angeben lässt — diese allerdings beim betrachteten Beispiel weniger als 40 % der Kurzzeitfestigkeit σ_0 betragend. Bei andern Kunststoffen, so etwa bei Polymethacrylat und Polyäthylen, besteht dagegen selbst bei den grössten bisher gewählten Versuchszeiten noch immer ein stetiger Abfall der *Zeitstandfestigkeit* σ_t und kann über die Grösse einer allenfalls existierenden Dauerstandfestigkeit σ_∞ noch nichts ausgesagt werden (Kurve b in Bild 4): So z. B. im Falle von Polyäthylen, wo Dauer-Innendruckversuche an Rohren ergaben, dass diese bei einer Beanspruchungsdauer von 10 000 Stunden ein Innendruck von weniger als 100 kg/cm² zum Bersten bringt, während dazu beim Kurzzeitversuch mehr als 200 kg/cm² erforderlich sind; ebenso bei Acrylglas, dessen Kurzzeitfestigkeit σ_0 gegen 800 kg/cm², dessen *Zeitstandfestigkeit* σ_t für 10 000 Stunden dagegen nur um 300 kg/cm² betragen.

Aufschlussreicher als die Aussagen von Bild 4 sind naturgemäss die aus Bild 5 hervorgehenden, deren obere Teilfigur zeigt, wie sich eine bestimmte bleibende *Dehnung* bei um so geringerer Spannung einstellt, je länger der betreffende Kunststoff belastet wird (so eine bleibende Dehnung von z. B. 2 % bereits bei einer Spannung von 20 kg/mm², falls 1100 Stunden lang belastet wird, während dazu 40 kg/mm² not-

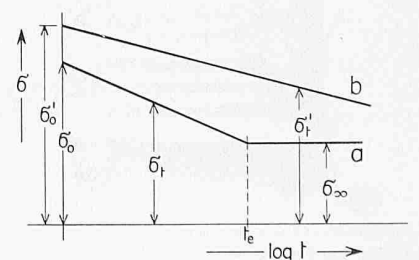


Bild 4. Kurzzeitfestigkeit σ_0 , Zeitstandfestigkeit σ_t und Dauerstandfestigkeit σ_∞

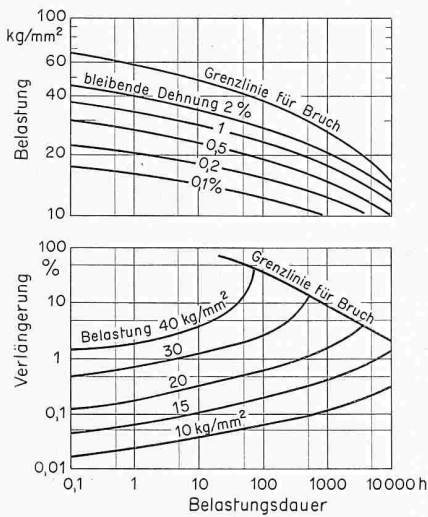


Bild 5. Zeitdehnkurven für Polyäthylen (nach K. Richard)

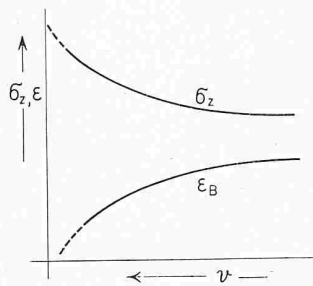
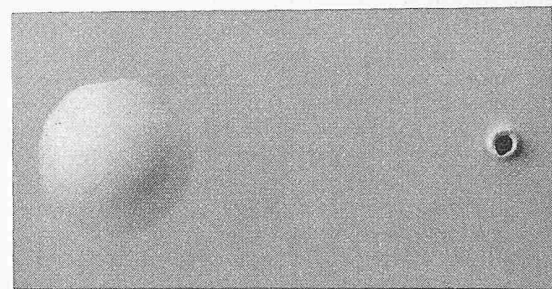
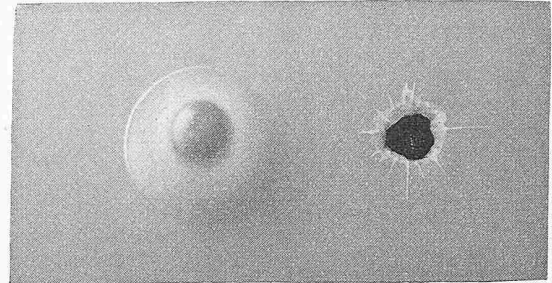
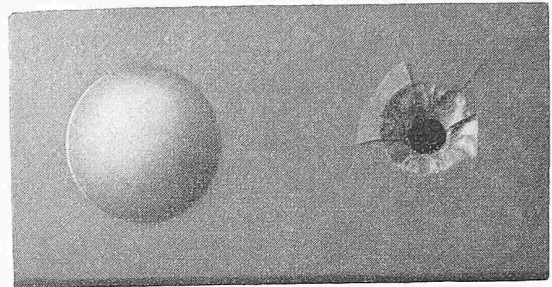


Bild 6. Einfluss der Belastungs- (Verformungs-)Geschwindigkeit v auf Reissfestigkeit σ_z und Bruchdehnung ϵ_B

Bild 7 (rechts). Verhalten von hartem PVC (oben), einem in UV-Licht gealterten Polyamid (Mitte) und Polyäthylen (unten) bei langsamer Formänderung (Tiefziehversuch, links) und eigentlich dynamischer Beanspruchung (Schussversuch, rechts)



wendig sind bei einer bloss eine Stunde dauernden Belastung). Den in Bild 5 eingetragenen sog. *Zeitdehn-* bzw. *Zeit-Bruchgrenzen* sind sodann jene kritischen Dehnungs- bzw. Spannungswerte zu entnehmen, welche bei einer gegebenen Belastungsdauer zum Bruch führen (im Falle einer Belastung von 100 Stunden Dauer beispielsweise 40 % bzw. 38 kg/mm² ausmachend). Vermehrte Kenntnis und Beachtung solcher Zeitdehnkurven für verschiedene Belastungen sind vor allem erforderlich, weil ja auch Bauelemente aus Kunststoffen *ihre Form bewahren* sollen, d. h. die sich an ihnen unter dem Einfluss der auf sie wirkenden Kräfte momentan wie im Laufe der Zeit ergebenden Formänderungen eine bestimmte Grösse nicht überschreiten dürfen.

II.

Aber auch die Geschwindigkeit, mit welcher die Last aufgebracht wird — also der Umstand, ob Kunststoffe *statisch* oder *dynamisch beansprucht* werden — bedingt selbst in einem relativ kleinen Intervall verschiedener Belastungs- bzw. *Verformungsgeschwindigkeiten* bereits merkliche Verschiebungen im mechanischen Verhalten (z. B. in Zugfestigkeit und Bruchdehnung), und zwar allgemein derart, dass nach Bild 6 bei grösserer Belastungsgeschwindigkeit höhere σ_z - und kleinere ϵ_B -Werte erhalten werden. Unter noch extremen Verformungsbedingungen kann sich gar, wie es die Beispiele von Bild 7 anschaulich belegen, am gleichen Material anstelle guter Verformbarkeit (also eines eigentlich zähen Verhaltens) bei statischer Beanspruchung im Falle dynamischer ein ausgesprochen sprödes Aufbrechen ergeben.

Hinsichtlich der *Ermüdungsfestigkeit* von Kunststoffen — und analog auch ihrer Vielschlagzähigkeit — ist mit den üblichen Versuchen insofern nicht immer auszukommen, als manche unter ihnen (so vor allem zahlreiche Thermoplaste) bei grösseren Lastspielfrequenzen allzu sehr erwärmt werden und die am derart erweichten Material für Wechsel- bzw. Ursprungsfestigkeit gefundenen Werte nichts Schlüssiges über das praktische Verhalten mit wesentlich niedrigeren Frequenzen der Lastwechsel und entsprechend nur sehr geringer Erwärmung aussagen. Bei hinreichend «warmfesten» Qualitäten besteht nach den bisher allerdings erst spärlich durchgeführten Untersuchungen manche Analogie zum Ermüden der Metalle, so oft auch eine sehr wesentliche Kerbempfindlichkeit.

III.

Hinsichtlich der *Temperaturabhängigkeit* einfacher *statischer Festigkeitswerte* wie Zug-, Biege- oder Druckfestigkeit stehen nach Bild 8 Kunststoffen mit einem bereits bei Raumtemperatur, ja selbst bei noch tieferen Temperaturen bestehenden Festigkeitsabfall jene andern Kunststoffsorten gegenüber, deren Festigkeit sich erst nach Ueberschreiten einer kritischen Temperatur T_k nennenswert zu verringern anfängt (T_k dabei z. B. im Bereich von 60 ÷ 80° C gelegen, wäh-

rend die entsprechende Temperatur im Falle der Stähle 400° C und mehr beträgt). Vertreter der ersten Gruppe mit einem Verhalten nach Kurve a von Bild 8 sind unter den bekannten Kunststoffen Polymethacrylat, PVC, Polystyrol, Polyäthylen, die verschiedenen Polyamide wie sämtliche Cellulose-derivate, während sich vor allem Kunstharze — unter diesen etwa Phenoplaste, Aminoplaste, Polyesterharze, Epoxydharze (wie Araldit) und endlich Silikonharze — bevorzugt im Sinne der Kurve b verhalten.

Einen ähnlichen Gang mit steigender Temperatur zeigen neben der Zugfestigkeit (Reissfestigkeit) auch *Streckgrenze*, *Reck-* und *Fliessgrenze*, während die *Bruchdehnung* und analog auch die *Streckgrenzendehnung* mit sinkender Temperatur abfallen, bei Erhöhung der Temperatur dagegen oft ein markantes Maximum durchlaufen (Bild 8). Daher können denn auch Spannungs-Dehnungsdiagramme an Kunststoffen einen recht verschiedenen Verlauf zeigen und nach Bild 9 in stetiger Folge alle Uebergänge zwischen den extremen Kurven u und o bestehen. Der Wechsel von der einen zur andern oder zu einer intermediären Kurve (wie h, i, k oder l) wird sich aus verschiedenen Gründen ergeben: bald durch Anstieg der

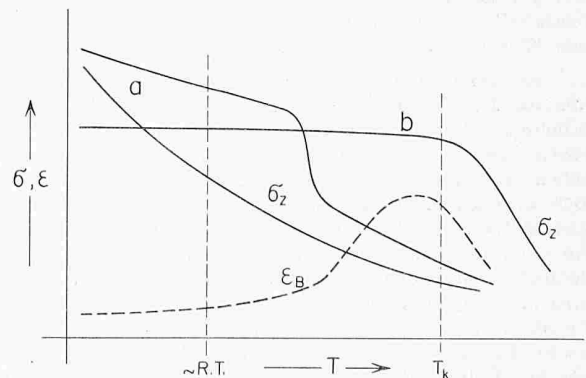


Bild 8. Temperaturabhängigkeit der Zugfestigkeit σ_z und Bruchdehnung ϵ_B verschiedener Kunststoffe

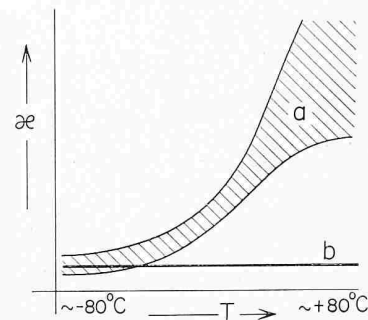
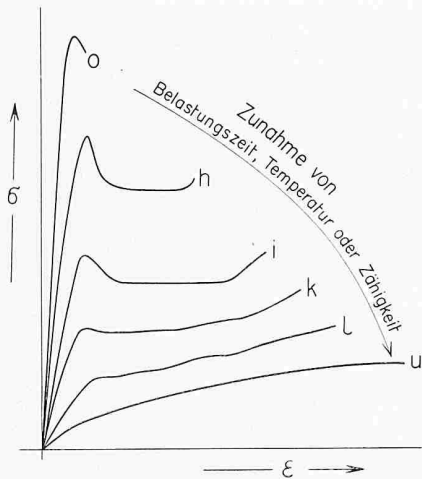


Bild 10. Temperaturabhängigkeit der Kerbschlagzähigkeit κ verschiedener Kunststoffe

Bild 9 (links). Spannungs-Dehnungsdiagramme von Kunststoffen

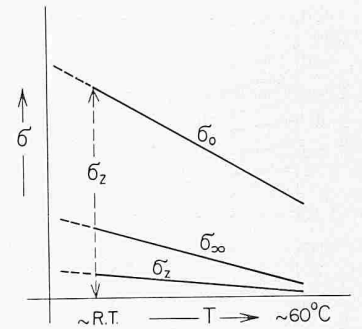


Bild 11. Abhängigkeit der Kurzzeit-Zugfestigkeit σ_0 , der Dauerstandfestigkeit σ_∞ und der zulässigen Zugspannung σ_z von der Temperatur

Temperatur, dann wieder infolge der Erhöhung von Belastungsgeschwindigkeit bzw. Belastungsdauer bei gleichbleibender Temperatur, sodann in Abhängigkeit der Zähigkeit, die einer gegebenen Kunststoffqualität unter normalen Bedingungen (nämlich bei Raumtemperatur und den für die Normversuche festgelegten Belastungsbedingungen) eigen ist, usw. So bilden etwa für Polymethacrylat und Polystyrol Diagramme vom Typus o den Normalfall, bei Polyäthylen oft solche nach Art der Kurve k, für hartes PVC dagegen Diagramme mit einem Verlauf nach Kurve i, usw.

Auch hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit der Kerbschlagzähigkeit und damit der Empfindlichkeit gegenüber Schlag- und Stossbeanspruchung lassen sich zwei Haupttypen von Kunststoffen unterscheiden: ein erster (Bild 10, Kurve a) mit starkem Abfall der Kerbschlagzähigkeit bei fallender Temperatur, wozu PVC, Polyamide, Phenoplaste, Cellulosederivate gehören, und jener zweite (Kurve b) mit an sich wesentlich geringerer, indes weitgehend temperaturunabhängiger Kerbschlagzähigkeit (z. B. Polymethacrylat und Polystyrol). Bei Temperaturen unter 0°C besteht daher eine weitgehende Angleichung sämtlicher Kunststoffe hinsichtlich ihres Schlagverhaltens und damit auch ihrer Empfindlichkeit gegen dynamische Beanspruchung. — Neben diesen allgemeinen Regeln über den Einfluss der Temperatur auf die Festigkeitseigenschaften von Kunststoffen gibt es allerdings auch mancherlei Sondererscheinungen; so beispielsweise Kunststoffsorten, welche trotz Erhöhung der Temperatur ihre gute Reißfestigkeit bewahren, zugleich aber einem starken Verlust an Biegsamkeit anheimfallen — solches und anderes oftmals die Folge bestimmter Füllstoffe, wobei insbesondere faserförmige wie Glas- und Asbestfasern das Festigkeitsverhalten in der «Wärme» günstig beeinflussen können.

Werden Kunststoffe bei höheren Temperaturen einer Dauerbelastung unterworfen, so muss naturgemäss der ebenfalls bei der Zeitstandfestigkeit geltende, wesentliche Rückgang mit steigender Temperatur beachtet werden und können sich infolge einer solchen gleichzeitigen Wirkung von Zeit und Temperatur für die zulässige Dauerbeanspruchung Werte ergeben, welche nach der schematischen Darstellung von Bild 11 weniger als 10%, oft nur noch einige % der Kurzzeit-Zugfestigkeit bei Raumtemperatur (dem häufig allein angegebenen Wert) ausmachen.

Ebenso bedeutsam ist schliesslich die Tatsache, dass Erhöhung der Temperatur bei Bauelementen aus Kunststoffen erhebliche Formänderungen nicht nur infolge der mechanischen Beanspruchung bedingt, sondern neben diesen — elastischen und plastischen, momentan und im Laufe der Zeit sich ergebenden Deformationen — noch weitere, und zwar gleichfalls reversible oder bleibende Verformungen bestehen: An reversibeln zunächst stets die durch die erhebliche Wärmedehnung von Kunststoffen bedingte Dilatation (lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten mit $< 5 \cdot 10^{-5}$ pro °C relativ klein bei Phenoplasten, Aminoplasten und Polyester, mit $5 \div 10 \cdot 10^{-5}$ pro °C bereits grösser bei PVC, Polystyrol u. a., um bei Polyäthylen, Cellulosederivaten u. a. bis $2 \cdot 10^{-4}$ und mehr pro °C anzusteigen), diese thermische Ausdehnung allenfalls unterstützt oder teilweise kompensiert durch ein Quel-

len oder Schwinden der Kunststoffe infolge reversibler Zustandsänderungen (wie z. B. Wasseraufnahme oder Wasserabgabe); dazu an bleibenden, nämlich irreversibeln Formänderungen in erster Linie alle jene, wie sie durch Alterungseffekte (Substanzverlust in der Wärme, Strukturänderungen, Schrumpfen usw.) bedingt werden (Bild 12). All das bedarf insofern der besonders Aufmerksamkeit seitens des Konstrukteurs, als er ja erst damit beurteilen kann, welche Längenänderungen an einem Kunststoffteil infolge von Temperaturschwankungen zu erwarten sind; dazu aber auch, welche Kräfte sich für ein Bauelement bei dessen Dilatation ohne oder mit nur beschränkter Gelegenheit zum Ausdehnen ergeben, welche dagegen im Falle einer Kontraktion, und endlich, ob der gewählte Kunststoff auch bei mechanischer Beanspruchung und gleichzeitiger Erwärmung oder Abkühlung Form und Kohäsion selbst über längere Zeiten hinreichend bewahren wird. So zu verfahren, verlangt jedoch, dass der Kunststoffhersteller seine Produkte zukünftig noch wesentlich mehr und dazu auf gehörig erweiterter, der Eigenart einer jeden Stoffqualität tunlichst abgestimmten Basis systematischen Untersuchungen unterzieht, um dem Konstrukteur jene Unterlagen zu bieten, welche erst den werkstoffgerechten und zugleich rationellen Einsatz von Kunststoffen für tragende Bauelemente gestatten. Nicht von ungefähr sind denn auch die an Kunststoffen bisher bekannt gewordenen Schäden zumeist die Folge der kombinierten Wirkung mehrerer Einflüsse, indem beispielsweise eine gleichzeitige Kontraktion infolge Abkühlung und Schwinden übermässige Verformungen ergibt oder — oft begünstigt durch innere Spannungen — ein Reißen und damit vollständiges Versagen eines Kunststoffteiles bewirkt. Um solches zu verhüten, ist ohne umfassende Kenntnis des Verhaltens des betreffenden Kunststoffes bei tiefen Temperaturen, dazu aber auch der Betriebsbedingungen selber, nicht auszukommen und auch allen, sich aus der Kombination von Kunststoffen mit andern Materialien aufdrängenden, besonders konstruktiven Massnahmen grössere Beachtung zu schenken, als es heute zumeist geschieht.

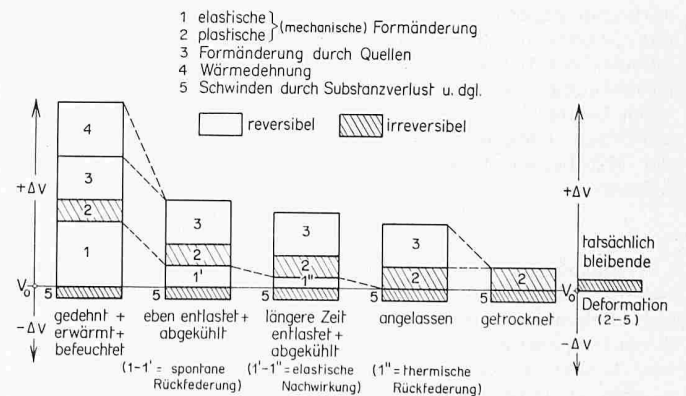


Bild 12. Formänderung an Kunststoffen infolge mechanischer Beanspruchung, Erwärmung und Befeuchtung

Muss angesichts von alledem bereits der Möglichkeit einer geringen Erwärmung von Kunststoffbauelementen, gelegentlich gar den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen Rechnung getragen werden, so wird damit jedoch erst angedeutet, was sich infolge der geringen Wärmebeständigkeit der meisten Kunststoffe bei einer eigentlichen *Erwärmung* ergibt: Im Falle der Thermoplaste zunächst ein allmähliches Erweichen bis zum Verlust jeglicher Formbeständigkeit und eigentlichem Fliessen (Erweichungsintervall bei Polymethacrylat von 70° C an, bei PVC allgemein ab 60÷70° C, bei Polystyrol oberhalb 85° C), während hornartige Kunststoffe einem scharfen Schmelzen unterliegen («Schmelzpunkt» von Polyäthylenprodukten je nach Herstellung bei 100÷115° C bzw. 125÷135° C, von Polyamiden allgemein bei 210÷230° C und höher, usw.). Mit zunehmender Temperatur kommt es hier wie bei den vorerst keine wesentliche Erweichung zeigenden Thermoplasten zur fortschreitenden chemischen Zersetzung, welche schliesslich in ein Entflammen und Abbrennen (Fall der brennbaren Kunststoffe wie Polyäthylen, Phenoplaste, Aminoplaste oder Celluloid) oder ein Verkohlen und Veraschen unter gleichzeitiger Bildung flüchtiger Zersetzungsprodukte übergeht. Beispiele solcher schwer brennbarer Kunststoffe sind etwa Polyvinylchlorid, beschwerte Phenoplaste, glasfaserverstärkte Polyesterharze, u. a. m., während vor allem stark halogenierte Chlor- und Fluorkunststoffe und Silikone als unbrennbar gelten dürfen. Dabei liefern allerdings gerade einzelne solcher — sei es ihrer Natur nach oder dank geeigneten Zusätzen — schwerer brennbarer Kunststoffe bei ihrer thermischen Zerstörung oft Zersetzungsprodukte besonderer Giftigkeit und korrosiver Aggressivität, weshalb ihnen zu deren «Bindung», allenfalls bereits zur Stabilisierung überhaupt, weitere Stoffe beigemischt werden wie z. B. Blei- oder Calciumkarbonat und Antimonoxyd, um Chlorwasserstoff zu binden. Dass daher Kunststoffbauteile im Hinblick auf Brandfälle spezifischer, insbesondere auch konstruktiver Schutzvorkehrungen bedürfen, um diese in der Natur der Kunststoffe begründete Schwäche wettzumachen, liegt nahe und wird denn auch jeder darin erzielte, weitere Erfolg wesentliches zur vermehrten Anwendung der Kunststoffe als eigentliche Konstruktionsmaterialien beitragen.

IV.

Wiewohl nach allem zuvor Gesagten das Festigkeitsverhalten der Kunststoffe, vorab wenn es unter dem Aspekt seiner ganzen Mannigfaltigkeit betrachtet wird, sich in recht weiten Grenzen bewegen kann, so ergibt sich die eigentliche Individualität der Kunststoffe erst daraus, dass diese oft spezifischen Alterungsvorgängen und einer ebenso eigenartigen wie mannigfachen Beeinflussung durch Umwelteinflüsse unterliegen. Dabei muss auch in diesem Zusammenhang in erster Linie interessieren, wie sich Kunststoffe verhalten, falls sie während ihrer Belastung — sei es einer dauernden oder einer oft wiederholten — altern oder dem Einfluss von Wärme und Licht, der Atmosphäre, von Wasser oder irgendwelchen besondern Agenzien (anorganischen wie besonders organischen), allenfalls einfach der Witterung schlechthin ausgesetzt sind, so dass sich an ihnen nunmehr neben ihrer Verformung die verschiedensten weiteren Vorgänge — diese oftmals ähnlich den Korrosionsprozessen an der Oberfläche ansetzend, um mehr und mehr ins Innere fortzuschreiten — abspielen. Ein nur mittelbares Interesse hat demgegenüber für den Konstruktionsingenieur

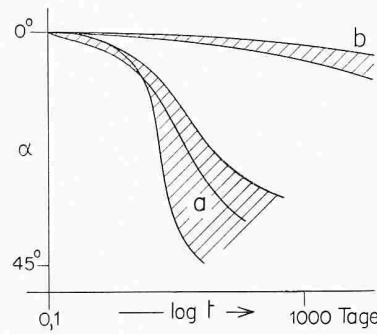


Bild 13. Verbiegung verschiedener Kunststoffe unter der Dauerwirkung einer konstanten Biegebeanspruchung und der Witterung (nach G. O. Grimm)

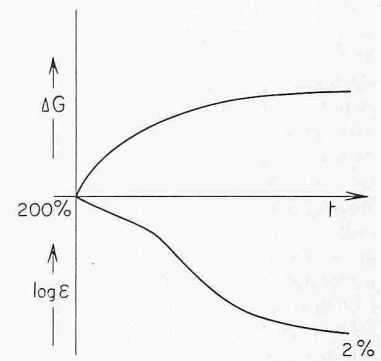


Bild 14. Beziehung zwischen dem bei Wärmealterung an PVC eintretenden Substanzverlust ΔG und der Bruchdehnung ϵ_B

teur der im Laboratorium allgemein häufiger studierte Fall, da man Kunststoffe *zunächst* in bestimmter Weise lagert, künstlich altert bzw. bestimmten physikalischen oder chemischen Einwirkungen unterwirft, um erst *anschliessend* die eingetretenen Aenderungen der mechanischen Eigenschaften festzustellen.

Trotz des betont individuellen Charakters aller dieser, bisher eher dürftig untersuchten Beziehungen kann dennoch als Regel gelten, dass eine *Aufnahme von Feuchtigkeit*, wie sie vor allem für Polyamide, Cellulosederivate wie Celluloseazetat, Celluloid u. dgl., ferner einzelne Aminoplaste, Kunsthorn u. dgl. typisch ist, zu einem Rückgang von *E-Modul*, Streckgrenze und Reissfestigkeit sowie der Härte führt, während die Verformbarkeit (insbesondere die Bruchdehnung) gleichzeitig ansteigt. Andererseits bewirkt eine *thermische Alterung* von Kunststoffen in manchen Fällen einen gleichzeitigen Abfall von Reissfestigkeit und Verformbarkeit²⁾ und besteht hierbei oft ein direkter Zusammenhang zu dem durch die Wärmebehandlung hervorgerufenen Substanzverlust (Beispiele hierzu siehe Bilder 13 und 14).

V.

An letzter Stelle sei endlich der Tatsache gedacht, dass an einem Kunststoffbauelement dessen mechanische Eigenschaften durchaus nicht überall die nämlichen sein müssen, dass dazu oftmals ausgeprägte Anisotropieerscheinungen bestehen, einem Bauteil überdies innere Spannungen anhaften können, usw. Deshalb wird auch hier die *materialtechnische Prüfung der Bauelemente und Werkstücke selber* ebenso wichtig wie die blosse Kennzeichnung des verwendeten Kunststoffes und ergeben sich damit auch für den Fall der Kunststoffteile prüftechnische Aufgaben, wie sie uns bei gegossenen Werkstücken, bei Betonelementen und manchen keramischen Erzeugnissen längst geläufig sind. Versuche mit *ganzen* Kunststoffelementen werden stets in besonderer Weise nachzuahmen suchen, was bei der praktischen Verwendung an Beanspruchungen und Einwirkungen aller Art zu erwarten ist, dabei allerdings angesichts der vielfachen und entscheidenden Bedeutung des Zeitfaktors häufig allein als *Langzeitversuche* eine zuverlässige Beurteilung abgeben.

²⁾ Daneben auch Beispiele, da Weichmacher-Verluste die Verformbarkeit herabsetzen, die Reissfestigkeit dagegen erhöhen.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. E. Brandenberger, Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, Leonhardstr. 27, Zürich 1.

Brief an eine vorstädtische Landgemeinde über den Umbau ihrer alten Dorfkirche DK 726.004.68

In ländlichen Gemeinden in der Nachbarschaft rasch wachsender Industriestädte stellt sich heute immer wieder die Frage, ob die vorhandene Dorfkirche vergrössert werden soll. Der fiktive Brief enthält Auszüge aus verschiedenen Meinungsäusserungen zu Händen umbaufreudiger Gemeinden und bringt Fragen zur Erörterung, die sich immer wieder stellen.

... Auf den Plänen Ihres Architekten steht «Umbau der Dorfkirche von...», aber ich bitte Sie, von vornherein darüber im klaren zu sein, dass es sich bei den geplanten Veränderungen

gen keineswegs um eine blosse «Vergrösserung» oder einen «Umbau» der bestehenden Kirche handelt, denn im Endergebnis wird von der alten Substanz schlechthin nichts mehr fühlbar sein, mit Ausnahme der Aussenansicht der Westfassade. Durch die Streckung des Raumes, die Anfügung eines eigenen Chorraumes, die Veränderung der Fenster und der Decke wird nicht nur die Form des Raumes, sondern auch sein ganzer Charakter und Masstab radikal verändert: Sie bekommen einen totalen Neubau, der einige Reste alten Gemäuers ent-