



# Die Langzeitqualität von Kunststoffbauteilen sichern

## Beschleunigte Prüfmethode zur Vorhersage des Alterungsverhaltens

Für Kunststoffbauteile werden stetig höhere Anforderungen an deren Nutzungsdauer gestellt. Klassische Methoden zur Bestimmung des Langzeit- und Alterungsverhaltens stoßen immer häufiger aufgrund der sehr langen Prüfzeiten an ihre Grenzen. Eine Reihe von zum Teil neu entwickelten beschleunigten Prüfverfahren schaffen Abhilfe.

Kurt Engelsing

**D**er Siegeszug von Kunststoffprodukten in unterschiedlichsten Anwendungen ist u. a. begründet in den Vorteilen von Kunststoffen bezüglich Gewichtseinsparung, Funktionsintegration und kosteneffizienten Verarbeitungstechnologien verglichen mit klassischen Werkstoffen wie Metall. Kunststoffprodukte sind allerdings nur dann dauerhaft am Markt er-

folgreich, wenn die Bauteileigenschaften die Erwartungen des Kunden über die komplette Nutzungsdauer erfüllen. Die von Kunststoffbauteilen geforderte Mindestnutzungsdauer hängt stark von der jeweiligen Anwendung ab. Im Automobilbereich liegt diese typischerweise im Bereich von 15 Jahren, bei Kunststoffrohren oder Kunststoffdichtungsbahnen reicht diese mittler-

weile bis zu 100 Jahre. Gleichzeitig werden die Entwicklungszeiten neuer Produkte immer kürzer, weshalb Unternehmen zunehmend vor der Herausforderung stehen, gesicherte Aussagen zum Langzeit- und Alterungsverhalten ihrer Bauteile mit möglichst geringem Zeit- und Kostenaufwand treffen zu müssen.

Im Folgenden wird anhand von Beispielen

len aufgezeigt, welche Möglichkeiten und Prüfmethode es zur beschleunigten Ermittlung des Langzeit- und Alterungsverhaltens von Kunststoffen gibt.

### Vorhersage des Langzeitverformungsverhaltens

Kunststoffe weisen im Vergleich zu klassischen Konstruktionswerkstoffen wie Stahl aufgrund ihrer viskoelastischen Eigenschaften eine starke Abhängigkeit des mechanischen Verhaltens von der Temperatur und der Beanspruchungsdauer auf. Dies macht sich z. B. in Phänomenen wie dem Kriechen, d. h. der zeitlichen Zunahme der Verformung unter konstanter Last, bemerkbar. Klassische Langzeit-Kriechversuche über mehrere Jahre sind aus Zeit- und Kostengründen nicht praktikabel. Um dennoch Aussagen über das Kriechverhalten von Kunststoffen über mehrere Jahre zu erhalten, werden meist zusätzliche Messungen bei erhöhten Temperaturen durchgeführt (Bild 1). Durch Anwendung des Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips, welches besagt, dass das Relaxationszeitspektrum des Materials durch Temperaturerhöhung zu kürzeren Zeiten verschoben wird, lassen sich Masterkurven bilden, welche das Materialverhalten auch für Zeiten viel größer als die eigentlichen Messzeiten vorhersagen. So lange durch die Temperaturerhöhung kein Wechsel im Versagensmechanismus hervorgerufen wird, ist die Anwendung dieses Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips, zumindest für ingenieurmäßige Zwecke, häufig möglich und in der Vergangenheit für eine Vielzahl von Kunststoffen nachgewiesen worden. In vielen Fällen lassen sich die Verschiebungsfaktoren, welche ein Maß für die Temperaturabhängigkeit der Zeitverschiebung darstellen, über eine Arrhenius-Beziehung beschreiben.

Eine Weiterentwicklung des Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips stellt die Stepped Isothermal Method (SIM) dar, bei der nicht mehrere Proben bei unterschiedlichen Temperaturen geprüft werden müssen, sondern an einer Probe bei konstanter Spannung Temperaturstufen durchfahren werden und gleichzeitig die Dehnung aufgezeichnet wird, um anschließend wieder eine Masterkurve für sehr lange Zeiten zu generieren (Bild 2). Mit der SIM-Methode lassen sich so über Messungen mit einer



Bild 1. Motorische Zeitstandapparatur am SKZ zur zeitraffenden Ermittlung des Kriechverhaltens © SKZ

Dauer von ein bis drei Tagen Kriechkurven für Zeiten bis über 50 Jahre generieren. Die Methode eignet sich zur zeitraffenden Ermittlung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens (Kriechkurven) als auch des Versagensverhaltens (Zeitstandkurven). Eine alternative bzw. ergänzende Methode, welche die Spannung anstelle der Temperatur zur Beschleunigung benutzt, stellt die Stepped isoStress Method (SSM) dar. Bei der SSM durchlaufen die Prüfkörper während der Prüfung bei konstanter Temperatur stufenartig mehrere Spannungsstufen. Aus dem resultierenden Dehnungsverlauf lässt sich anschließend unter Anwendung des Zeit-Spannungs-Verschiebungsprinzips wieder eine Masterkurve generieren, welche sehr lange Zeiten abbildet. Die Nutzung des Zeit-Spannungs-Verschiebungsprinzips anstelle des Zeit-Tem-

peratur-Verschiebungsprinzips hat insbesondere dann Vorteile, wenn das Kriechverhalten in der Nähe der Glasübergangstemperatur ermittelt werden soll und damit eine Temperaturerhöhung nicht sinnvoll anwendbar ist. Dies ist z. B. häufig bei der Prüfung von Polyamiden der Fall.

### Vorhersage des Spannungsrissversagens

Die Spannungsrissbildung stellt mit etwa 25 Prozent die häufigste Schadensursache aller dokumentierten Schadensfälle bei Kunststoffen dar. Durch gleichzeitiges Einwirken von Spannungen (externe Lasten oder Eigenspannungen) und spannungsfördernden Medien können die Versagenszeiten von Kunststoffbauteilen deutlich reduziert sein. In den meisten Fäl- >>>

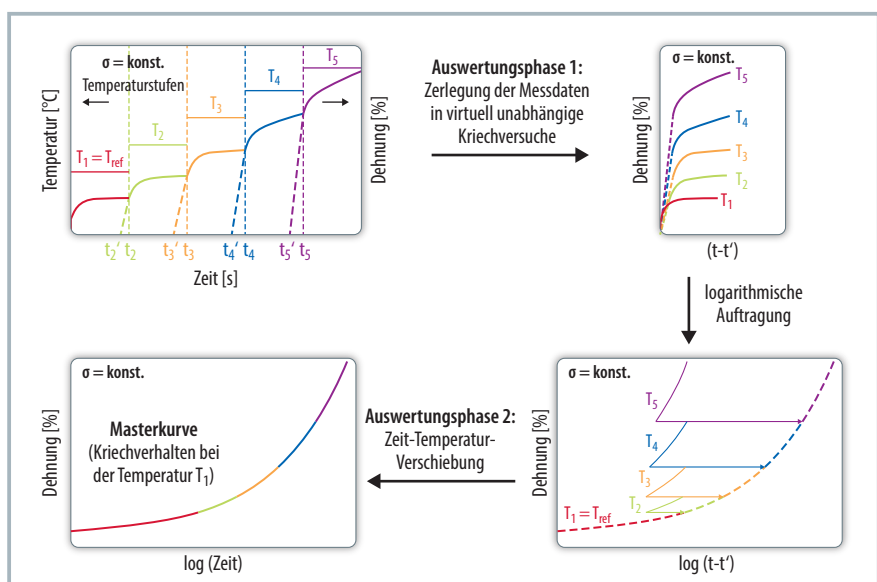


Bild 2. Prinzip der Stepped Isothermal Method (SIM) zur zeitraffenden Ermittlung des Kriechverhaltens

Quelle: SJZ © Hanser

len bleibt zwar der prinzipielle Schadensmechanismus (Rissinitiierung, Risswachstum und Bruch) erhalten, läuft aber innerhalb einer wesentlich kürzeren Zeitskala oder bereits bei deutlich geringeren mechanischen Belastungen ab. Mit der Normenreihe ISO 22088 gibt es unterschiedliche genormte Testmethoden zur Bestimmung der Spannungsrissbeständigkeit von Kunststoffen, die in erster Linie ein Ranking unterschiedlicher Kunststoff-Medien-Kombinationen erlauben. Für die Absicherung von Polyethylen-Rohren gegen Spannungsrissversagen findet meist der Full Notch Creep Test (FNCT, ISO 16770) Anwendung. Dort werden bei einem Zeitstand-Zugversuch zur Versagensbeschleunigung definierte Kerben in die Probekörper eingebracht, bei erhöhten Temperaturen (meist 80 °C) geprüft sowie spannungsrissfördernde Medien (eine wässrige Netzmittellösung) verwendet. Dadurch lassen sich die Phasen der Rissinitiierung und des Risswachstums deutlich verkürzen. Inzwischen wurden allerdings die Materialqualitäten soweit weiterentwickelt, dass selbst unter diesen beschleunigten Prüfbedingungen kein Versagen nach einem Jahr eintritt. Diese rissbeständigen PE 100-RC-Rohrwerkstoffe (Resistant to Crack, RC) werden insbesondere bei grabenlosen Verlegetechniken eingesetzt, wenn es am Rohr zu Punktlasten durch ein-

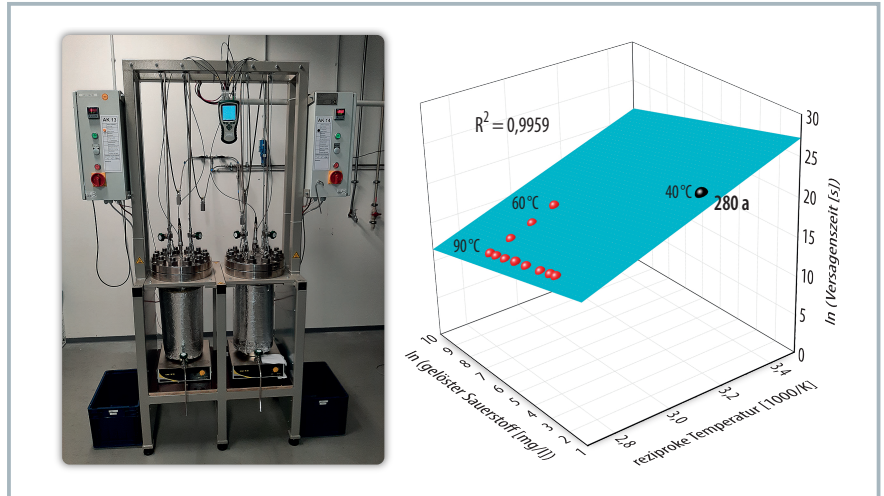


Bild 3: Prüfstand mit zwei Hochdruckautoklaven; rechts: Extrapolation der im HPAT ermittelten Versagenszeiten (rote Symbole) auf Anwendungsbedingungen (schwarzes Symbol) mittels einer um den Sauerstoffdruck erweiterten Arrhenius-Auftragung Quelle: SKZ © Hanser

drückende Steine oder Scherben kommen kann. In den letzten Jahren fanden deshalb mit dem Cracked Round Bar Test (CRB, ISO 18489) und dem Strain Hardening Test (SHT, ISO 18488) zwei neue beschleunigte Prüfmethode Einzug in die Normung. Im CRB werden an gekerbten Rundstäben Dauerschwingprüfungen in Zug-Schwellbelastung durchgeführt und Bruchschwingspielzahlen ermittelt. Beim SHT wird in einem Zugversuch bei erhöhter Temperatur (80 °C) der Dehnverfestigungsmodul bei hohen Verstreckgraden ermittelt, der ein Maß für die Spannungsrissbeständigkeit darstellt. Die Prüfzeit für solche Messungen beträgt nur wenige Stunden (SHT) bis einige Tage (CRB). Sowohl der im SHT ermittelte Dehnverfestigungsmodul als auch die im CRB Test ermittelte Bruchschwingspielzahl korrelieren mit den in wesentlich zeitaufwendigeren Medien-Zeitstandversuchen (FNCT) ermittelten Versagenszeiten.

### Vorhersage des Alterungsverhaltens

Die Alterung von Kunststoffprodukten kann durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren wie Wärme, UV-Strahlung und Medien hervorgerufen werden und hängt in hohem Maße von den Betriebs- und Umgebungsbedingungen des Kunststoffproduktes ab. Beim Einsatz von Kunststoffprodukten im Freien sind diese der Bewitterung (Strahlung, Temperatur und Nässe) ausgesetzt. Mittels genormter Laborbewitterungen (z. B. ISO 4892-1) ist zum einen eine gegenüber dem Freien beschleunigte Alterung

möglich, zum anderen entfallen Unterschiede durch orts- und jahreszeitlich unterschiedliche Wetterbedingungen. In einem aktuellen Forschungsprojekt untersucht das SKZ wie sich unterschiedliche Klimazonen durch Anpassung der Einstellparameter im Laborbewitterungsgerät (z. B. Strahlenstärke, Schwarzstandardtemperatur und Nass-/Trocken-Zyklen) bestmöglich nachbilden lassen bei gleichzeitig möglichst hoher Zeitraffung der Alterungsvorgänge gegenüber einer (unbeschleunigten) Freibewitterung.

Um Kunststoffe vor thermo-oxidativem Abbau zu schützen, welcher mit einem Polymerkettenabbau und einer Versprödung des Kunststoffs einhergeht, werden diese für die Langzeitanwendung meist mit Antioxidantien stabilisiert. Die klassische Prüfmethode zur Beurteilung der thermo-oxidativen Stabilität ist die Ofenalterung bei unterschiedlichen erhöhten Temperaturen und anschließende Extrapolation auf Anwendungstemperatur mittels einer Arrheniusbeziehung. Nachteilig dabei sind die z. T. immer noch langen Prüfzeiten durch notwendige Grenzen bei der Temperaturerhöhung, um nicht durch eine zu starke Erhöhung der Temperatur unrealistische Alterungseffekte zu erzielen oder bereits in den Bereich der Schmelze zu kommen. Eine noch recht neue Prüfmethode, die thermo-oxidative Nutzungsdauer von Kunststoffprodukten festzustellen, ist die Hochdruckautoklavenmethode (high pressure autoclave test HPAT, ISO 13438). Dabei wird das Kunststoffprodukt in einem Druckbehälter

## INFORMATION & SERVICE

### AUTOR

**Dr.-Ing. Kurt Engelsing**, geb. 1970, ist Leiter der Forschergruppe Bauteileigenschaften im SKZ Würzburg.

### ÜBER DAS SKZ

Als größtes Kunststoff-Institut Deutschlands bietet das SKZ seit über 60 Jahren praxisgerechte Lösungen für Fragestellungen aus den Bereichen Herstellung, Verarbeitung und Anwendung von Kunststoffen und Verbundmaterialien. Das SKZ ist Mitglied der Zuse-Gemeinschaft. Sie ist ein Verbund unabhängiger, industrienaher Forschungseinrichtungen, die das Ziel verfolgen, die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der Industrie, insbesondere des Mittelstandes, durch Innovation und Vernetzung zu verbessern.

### KONTAKT

**Dr.-Ing. Kurt Engelsing**  
k.engelsing@skz.de

simultan einer moderat erhöhten Temperatur und erhöhtem Sauerstoffdruck ausgesetzt. Beide Parameter beschleunigen den thermo-oxidativen Abbau. Werden die Versuche bei verschiedenen Prüfbedingungen (Temperatur, Sauerstoffdruck) durchgeführt, kann anschließend eine Extrapolation auf Anwendungsbedingungen (z. B. 40 °C und Atmosphärendruck) über eine modifizierte Arrhenius-Gleichung erfolgen und so die Dauer bis zum thermo-oxidativen Versagen unter Einsatzbedingungen bestimmt werden (Bild 3).

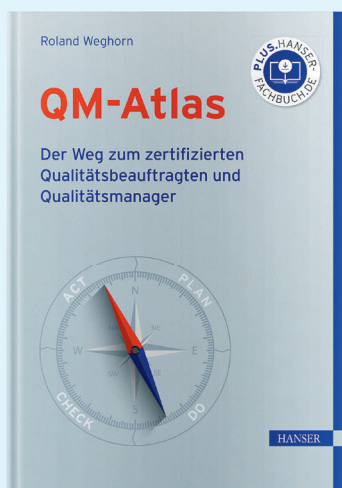
### Herausforderungen bei der Lebensdauervorhersage

Eine exakte Lebensdauervorhersage von Kunststoffbauteilen ist aufgrund des ausgeprägten viskoelastischen Verhaltens von Kunststoffen und der verschiedenen z. T.

auch synergistisch wirkenden Alterungseffekte kein einfaches Unterfangen, da es keine allgemeingültige Prüfmethode gibt, die sich generell auf alle Kunststoffe und Alterungsmechanismen anwenden lässt. Wie so oft hat jede Methode spezifische Anwendungsgebiete, Vorteile aber auch Limitationen. Die wohl wichtigste Voraussetzung für eine erfolgreiche Lebensdauerabschätzung ist die möglichst genaue Kenntnis über die in der Praxis auf das Bauteil wirkenden Belastungen (mechanische und physikalisch-chemische Einflüsse) und deren prinzipiellen Auswirkungen auf die relevanten Bauteileigenschaften (Bewertungskriterien). Bei der beschleunigten Prüfung ist wichtig zu überprüfen, dass der richtige Versagensmechanismus abgeprüft wird und nicht durch eine zu aggressive Prüfung eine Änderung des Versagensmechanismus statt-

findet. Die zur ingenieurmäßigen Abschätzung der Lebensdauer sicherlich am häufigsten eingesetzte Methode ist die Zeitraffung über Temperaturerhöhung entsprechend dem Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip unter Anwendung physikalisch-chemischer Vorhersagemodelle wie dem Arrhenius-Modell. Darüber hinaus gibt es aber eine ganze Reihe weiterer beschleunigter Prüfmethoden und Vorhersagemodelle, auf welche hier lediglich beispielhaft eingegangen werden konnte. Durch seine breite Kunststoff-Kompetenz und langjährige Erfahrung in der Absicherung der Lebensdauer unterschiedlichster Kunststoffprodukte ist das SKZ kompetenter Ansprechpartner, wenn es darum geht, die Langzeitqualität von Kunststoffbauteilen mit möglichst geringem Zeit- und Kostenaufwand abzusichern. ■

# Die idealen QM-Begleiter



Weghorn  
**QM-Atlas**

€ 49,99 | ISBN 978-3-446-47249-5

Die Ausbildung zum Qualitätsbeauftragten oder zum Qualitätsmanager ist vielfältig und komplex. Von Methodenwissen oder fundierten Normenkenntnissen bis hin zu Statistik oder grundlegenden Managementaufgaben – wer im Qualitätsbereich tätig sein will, muss vieles wissen und vieles können!

Der »QM-Atlas« zeigt, worauf es bei der Ausbildung ankommt, was genau der Lernstoff umfasst und was nötig ist, um die entsprechenden Ausbildungsmodule erfolgreich abschließen zu können.

- Verständlich, kompakt, anschaulich und zugleich praxisorientiert
- Optimale Prüfungsvorbereitung
- Zum Download: Prüfungsfragen und Lösungen, Inhalte der ISO 9001 im Überblick sowie weitere hilfreiche Arbeitsmittel
- Basiert auf dem Leitfaden der VAZ



Sommerhoff  
**QM im Wandel**

€ 49,99 | ISBN 978-3-446-45573-3