

# 100 Jahre Nutzungsdauer von Rohren aus Polyethylen

## Rückblick und Perspektive

### 100-years service-live for polyethylene pipes

#### Review and prospects

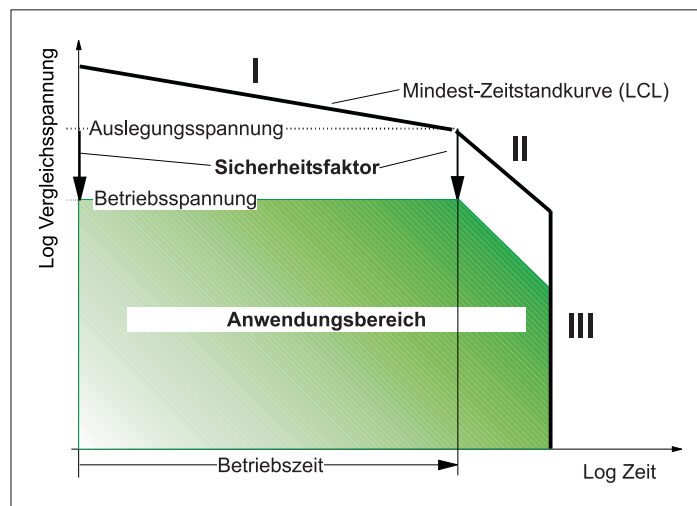
Von Dr. Joachim Hessel

Die ersten Rohre aus Niederdruckpolyethylen bzw. Polyethylen hoher Dichte wurden 1954 in industriellem Maßstab hergestellt [1]. Für die langzeitige Anwendung des korrosionsbeständigen Polyethylens im industriellen Bereich (z. B. für zehn Jahre) oder bei der kommunalen Wasserversorgung (z. B. für 50 Jahre) ergab sich die Notwendigkeit einer zuverlässigen Vorhersage der Eigenschaften bei einer vorliegenden Versuchszeit von nur drei Jahren [2]. Die anfangs graphische Extrapolation war ausreichend genau, weil genügend Messwerte zur Verfügung standen [3] und führte zu demselben Ergebnis wie die auf dem Arrhenius-Gesetz basierende mathematisch-analytische Extrapolation [4].

Die heute angewandten Extrapolationsmethoden (z. B. nach ISO 9080) liefern Mindestfestigkeiten für 50 Jahre bei 20 °C auf der Basis einer Prüfzeit von 10000 Stunden (ca. 1,1 Jahre). Aufgrund derselben physikalischen Gesetzmäßigkeiten („Arrhenius“) ist eine Mindestnutzungsdauer der heute produzierten Rohre aus Polyethylen (PE 80, PE 100) von 100 Jahren wissenschaftlich abgesichert. Dabei sind die maßgebenden Schadensmechanismen „Spannungsrisssbildung“ und „Wärmealterung“ berücksichtigt.

The production of pipes made from high density polyethylene in industrial scale was started in the year 1954 [1]. For the industrial application of polyethylene pipes (e. g. for 10 years) or for the public water supply (e.g. for 50 years) a suitable method was needed to predict the service life after a testing time of only 3 years [2]. The graphical extrapolation at this time was precise enough because a sufficient number of test results were available [3] and provided the same result like the mathematical-analytical extrapolation basing on the Arrhenius-law [4].

The extrapolation methods used today (e.g according to ISO 9080) result in the minimum rupture strength values for 50 years service life at 20 °C based on a testing time of 10000 hours (approx. 1.1 years). Based on the identical mathematical and physical laws (“Arrhenius“) a minimum service life of 100 years can be demonstrated using scientific methods. Both the behaviour to stress cracking and to thermal ageing is taken into account.



**Bild 1:** Schematische Darstellung des Zeitstandverhaltens von Rohren aus Polyethylen (I: Verformungsbrüche; II: Spannungsrisse; III: Wärmealterung)

**Fig. 1:** Schematic drawing of the creep rupture curve of polyethylene pipes (I: Ductile failure; II: Stress cracking; III: Thermal ageing)

## Restlebensdauer – Ein Rückblick

Bei der Bestimmung der Restlebensdauer von Rohrsystemen aus Polyethylen sind die bei bestimmungsgemäßen Betrieb maßgebenden Schadensmechanismen

- Spannungsrisssverhalten (Bereich II in Bild 1) und
- Wärmealterung (Bereich III in Bild 1) zu überprüfen.

Der dominierende Schadensmechanismus hängt von den Betriebsbedingungen und dem Niveau der Zeitstandkurve des betreffenden Polyethylen-Rohrstoffs ab. Im Folgenden werden drei Kategorien von Belastungsarten genannt, die die meisten Anwendungsfälle abdecken. Dies sind:

1. Konstante Zugspannungen durch Betrieb bei Auslegungsdruck – Retardation (z. B. Wasserversorgung)
2. Konstante (geringere) Zugspannungen durch Betrieb bei niedrigem Druck – Retardation – und relaxierende Zugspannungen aus Rohrverformung (z. B. erdverlegte Abwasserleitungen)
3. Reine Relaxationsspannungen durch behinderte Dehnung (z. B. bei Außenbeschichtungen von Stahlrohren mit Polyethylen)

Für Belastungen nach Kategorie 1 werden die Prüfbedingungen nach dem MAC-Konzept [5] derart festgelegt, dass die Prüfungen kostengünstig und zeitsparend durchgeführt werden können.

Unter der Annahme einer Auslegungsspannung von 5 N/mm<sup>2</sup> und einem Sicherheitsfaktor von 1,6 ergibt sich für ein Rohr eine Dimensionierungsspannung von 8 N/mm<sup>2</sup>. Die nach dem MAC-Konzept berechneten Spannungs-Temperatur-Kombinationen zur Bestimmung des Rest-Spannungsrisssverhaltens sind in Bild 2 bzw. Bild 3 gezeigt.

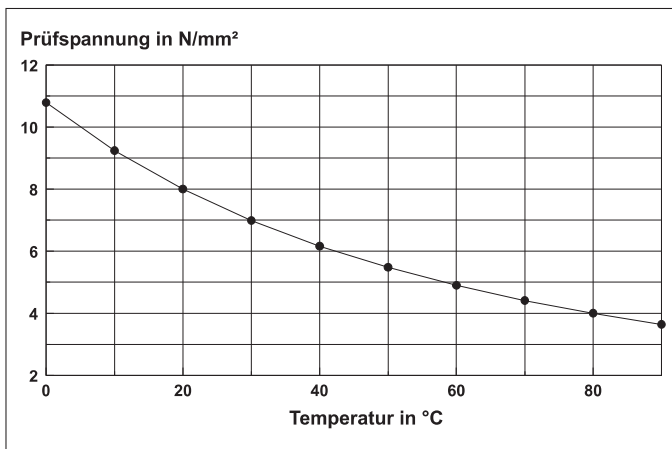
Die in Bild 2 bzw. Bild 3 dargestellten Spannungs-Temperatur-Kombinationen sind unter der Voraussetzung berechnet, dass in Versuch und Praxis Sprödbüche durch Spannungsrisssbildung zu erwarten sind.

An den im Folgenden beschriebenen Beispielen wurde die Restlebensdauer bestimmt.

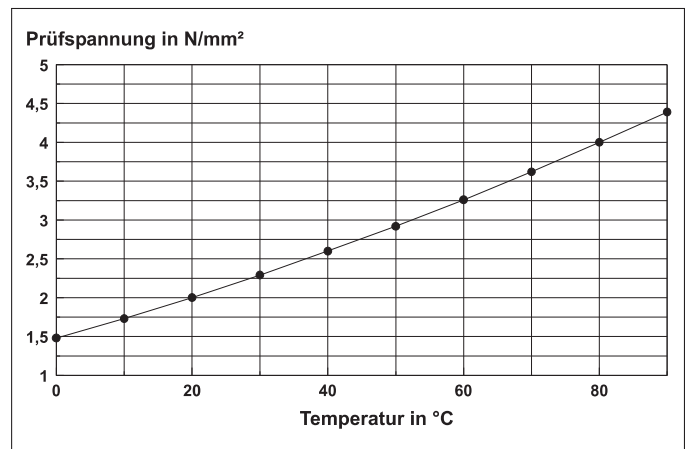
### Beispiel 1: PE-Rohr 41 Jahre im Dauer-einsatz für Wasserversorgung

Vom Betreiber des Rohrleitungssystems werden für die Rohre (Außendurchmesser 75 mm, SDR 11) folgende Betriebsbedingungen angegeben:

- Betriebsort: Badehaus im Industriepark, Frankfurt-Höchst (Bild 4)
- Betriebstemperatur: 20 °C
- Betriebsdruck: 4,5 bar ( $\sigma_v = 2,25 \text{ N/mm}^2$ )
- Betriebsmedium: Wasser
- Betriebszeit: 41 Jahre.



**Bild 2:** Spannungs-Temperatur-Kombinationen nach MAC für hohe Betriebsdrücke  
**Fig. 2:** Stress-temperature-combination according to MAC for high internal service pressure



**Bild 3:** Spannungs-Temperatur-Kombinationen nach MAC für niedrige Betriebsdrücke  
**Fig. 3:** Stress-temperature-combination according to MAC for low internal service pressure

Im Zuge einer Neubaumaßnahme wurde das Rohrleitungssystem entfernt und stand damit für die Bestimmung der Restlebensdauer zur Verfügung.

Die Prüfspannungen zur Bestimmung des Spannungsrisserhaltens der Rohre im Rohrinndruckversuch gemäß ISO 1167 nach einer Betriebsdauer von 41 Jahren wurden entsprechend dem MAC-Konzept gewählt.

Die Ergebnisse der Rohrinndruckversuche sind zusammen mit den 2NCT-Messungen in Wasser in Bild 5 dargestellt.

Der nahezu parallele Verlauf der Kurven zeigt, dass die Aktivierungsenergien im 2NCT bzw. im Rohrinndruckversuch nahezu gleich groß sind. Der Unterschied beträgt weniger als 2 %.

Aus den Ergebnissen der Rohrinndruckversuche ergibt sich bei 20 °C eine berechnete Standzeit (Restlebensdauer) von 10947 Stunden (1,25 Jahre) bei einer Zielspannung von 8,13 N/mm<sup>2</sup> (Auslegungsspannung des damaligen PE hart von 6,5 N/mm<sup>2</sup> x Faktor für Streuung von 1,25 = 8,13 N/mm<sup>2</sup>).

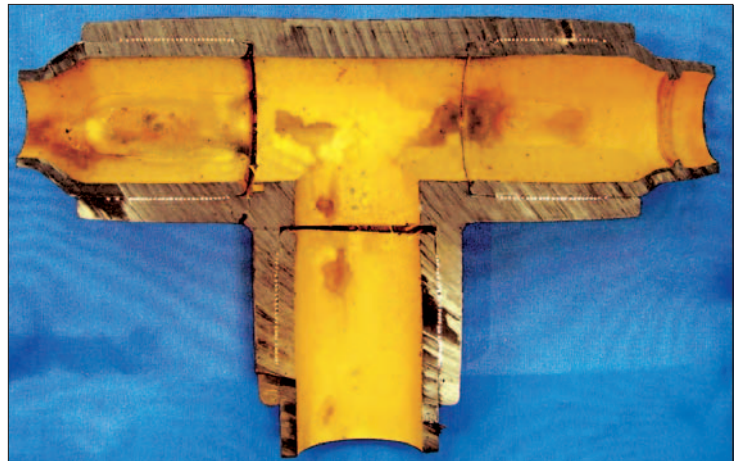
Zur Berechnung der Restlebensdauer bei der tatsächlichen Betriebslast von 2,25 N/mm<sup>2</sup> wird die gemessene Standzeit von 20,7 Stunden bei der Ausgangsspannung 5 N/mm<sup>2</sup> und 80 °C sowie die gemessene Standzeit der Rohre von 2902,3 Stunden bei 50 °C und 3,85 N/mm<sup>2</sup> verwendet. Hieraus ergibt sich eine Aktivierungsenergie von 156 kJ/mol und damit eine extrapolierte Restlebensdauer bei Betriebsbedingungen von 124 Jahren ohne Berücksichtigung der Wärmealterung [6].

**Beispiel 2: PE-Rohr 33 Jahre im Dauer-einsatz für Abwasserentsorgung**

Vom Betreiber des Rohrleitungssystems (Rohraußendurchmesser 355 mm; SDR 17)

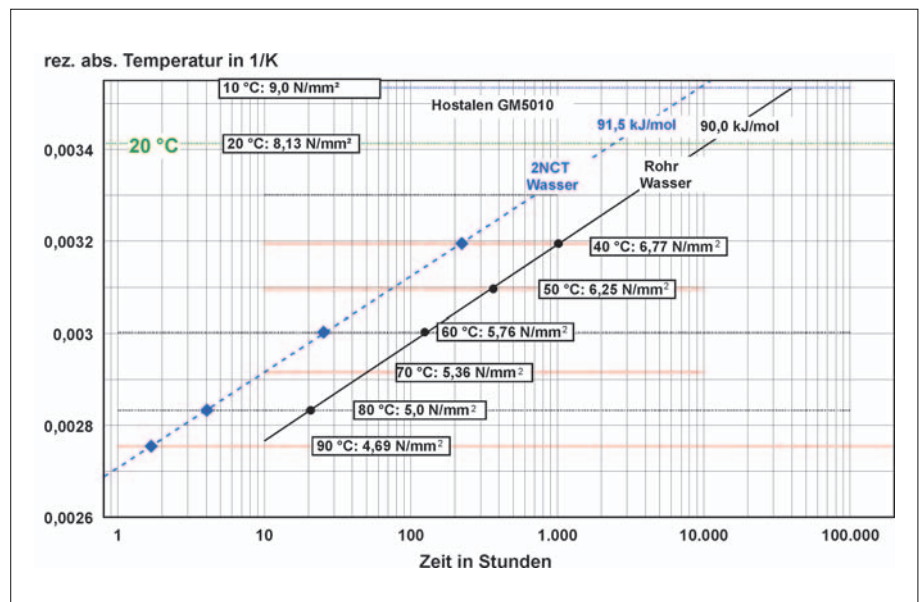
**Bild 4:** Heizwendelverbindungen aus Rohrleitungssystem für Wasser im „Badehaus Hoechst“

**Fig. 4:** Electrofusion joints in a pipeline for water supply at "Badehaus Hoechst"



**Bild 5:** Vergleich der Ergebnisse im 2NCT und im Rohrinndruckversuch an Rohren aus Hostalen GM5010

**Fig. 5:** Comparison between the results in the 2NCT and the internal pressure test of pipes made from Hostalen GM5010



werden folgende Betriebsbedingungen angegeben:

- Inbetriebnahme: ca. 1973
- Nutzung: Bio-Kanaldruckleitung
- Druckstufe: PN 6
- Betriebsdruck: 1,1-1,8 bar

■ Betriebstemperatur: Temperaturkollektiv von z. B.:

- 20 %: 40 °C
- 30 %: 30 °C
- 50 %: 20 °C

■ Betriebsmedium: Abwasser

Da die Innendruckbelastung des Rohres zu einer relativ niedrigen Vergleichsspannung von 0,92 bis 1,5 N/mm<sup>2</sup> führt, ist die Wärmealterung der dominierende Schadensmechanismus.

Die Untersuchung der Reißdehnung an Proben vom Prüfmuster (Bild 6) ergab noch keinen Hinweis auf beginnende Wärmealterung. Um die Zeit bis zur beginnenden Wärmealterung abschätzen zu können, wurden Proben aus dem Prüfmuster in sauerstoffgesättigtes strömendes Wasser bei 80 °C eingehängt und anschließend die Viskositätszahl (VN) gemessen. Bei Berücksichtigung des größten aller Werte, die an einem Rohr gemessen wurden und einer angenommenen Abnahme des VN-Wertes um 25 % als Indikator für beginnende Wärmealterung, liegen alle Messwerte über dieser Schwelle (Bild 7).

Obwohl bisher aus den VN-Messungen kein Anzeichen für die beginnende Wärmealterung abgeleitet werden kann, wird für eine (konservative) Aussage zum frühestens zu erwartenden Wärmealterungsbeginn die längste Einlagerungszeit und eine Aktivierungsenergie von 93 kJ/mol (DVS 2205-1 Beiblatt 19) herangezogen.

Bei dem angenommenen Temperaturkollektiv ergibt sich eine Mindest-Restlebensdauer von zehn Jahren [7].

### Beispiel 3: PE-Stahlrohrbeschichtung

Die in der Vergangenheit verwendeten PE-Werkstoffe für die Beschichtung von Stahlrohren bestehen z. B. aus PE-LD mit monomodaler Molmassenverteilung.

Der dominierende Schadensmechanismus wird – bei genügend hoher Spannungsrisse – „beständigkeit“ – in der Wärmealterung beobachtet.

Bei den vorgenannten Materialien kann der Beginn der Wärmealterung z. B. durch Messung der Schmelzflussrate an Proben mit verschiedenen Wärmealterungszuständen charakterisiert werden.

## Mindestnutzungsdauer 100 Jahre – Eine Perspektive

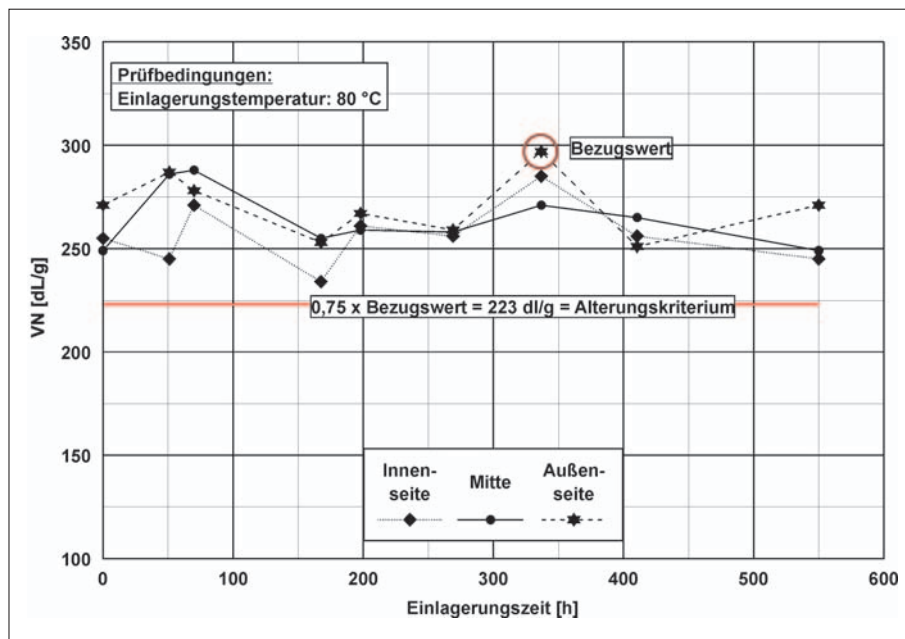
### Spannungsrisserverhalten

Während bei den PE-Rohrwerkstoffen der ersten Generation („PE hart“) die Fragen zum Spannungsrisserverhalten bei der Beurteilung der Rest-Nutzungsdauer im Vordergrund standen, ist aufgrund der Werkstoffentwicklung in den letzten Jahren dieser Schadensmechanismus – zumindest bei der Anwendung im Gas- und Wasserbereich und konventionellen Verlegetechniken – von nachgeordneter Bedeutung.



**Bild 6:** Aufgeschnittenes Rohr aus Bio-Kanaldruckleitung

**Fig. 6:** Pipe from wastewater-pipeline after machining



**Bild 7:** Viskositätszahl (VN) als Kriterium für Wärmealterung

**Fig. 7:** Viscosity number (VN) as a criteria for thermal ageing

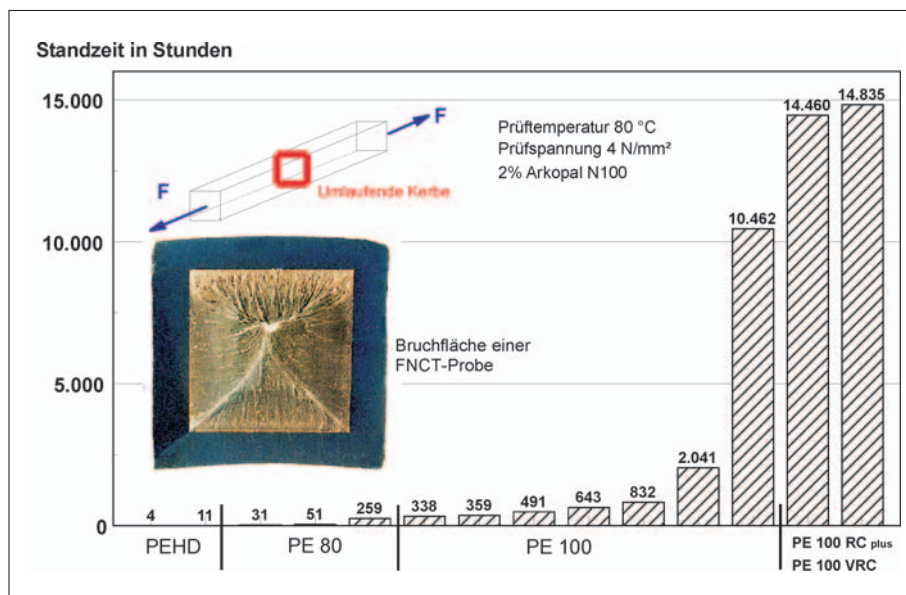
**Tab. 1:** Entwicklung der Mindestanforderungen nach DIN 8075

**Table 1:** Development of the minimum requirements according to DIN 8075

Erscheinungsjahr DIN 8075	Bezeichnung	Prüfanforderung* in Stunden	E-Modul in N/mm <sup>2</sup>	Anmerkung
1960	PE hart	54	1200	Lineare Polymerkette
1987	HDPE; PE-HD	170	800–1000	Verzweigungen (Copolymer)
1999	PE 80	1000	650–900	Mono- und bimodaler Herstellungsprozess
1999	PE 100	3000	1200	Bi- bzw. multimodaler Herstellungsprozess

\* 80 °C, Umfangsspannung 4 N/mm<sup>2</sup>, Wasser





**Bild 8:** Reale Entwicklung des Widerstandes gegenüber Spannungsrissbildung (Herstellung: PEHD ab 1960; PE 80 ab 1977; PE 100 ab 1987; PE 100 RCplus bzw. PE 100 VRC ab 2003)

**Fig. 8:** Development of the actual resistance to stress cracking (Production time: PEHD since 1960; PE 80 since 1977; PE 100 since 1987; PE 100 RCplus and PE 100 VRC since 2003)



**Bild 9:** Durchlaufapparat zur Prüfung der Wärmealterung

**Fig. 9:** Water flow apparatus to test thermal ageing

Die Werkstoffentwicklung wird aus den Anforderungen nach DIN 8075 deutlich (Tabelle 1).

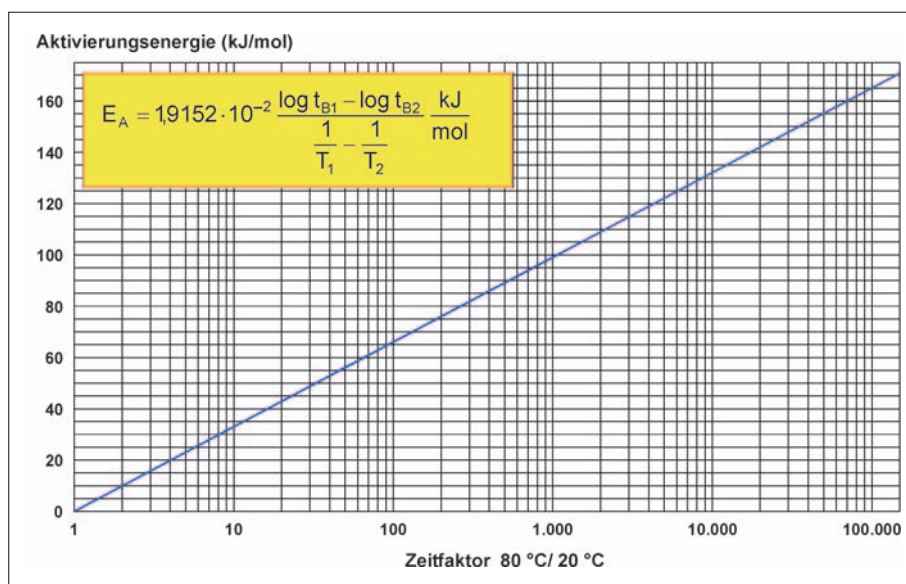
Die reale Entwicklung des Widerstandes gegenüber Spannungsrissbildung kann z. B. mit dem FNCT, dem heute bekannten schnellsten Zeitstandtest von Polyethylen, sehr gut beschrieben werden.

In Bild 8 sind Prüfergebnisse im FNCT für Proben von Rohren aus Polyethylen verschiedener „Generationen“ dargestellt. Die Zahlen über den Balken entsprechen den Standzeiten in Stunden.

Eine Aussage zum Spannungsrissverhalten heutiger Polyethylen-Rohrwerkstoffe ist unter Anwendung des zeit- und kostensparenden MAC-Konzepts bei Schweißverbindungen [8] (Beiblatt 3 zur Richtlinie DVS 2203-4), nicht-konventionell verlegten Rohren („Punktlast“), abgequetschten Rohren sowie bei spannungsrissfördernden Betriebsmedien („Industrieanwendungen“) möglich.

### Wärmealterung

Bereits früh wurde erkannt, dass sich auch der Wärmealterungsprozess bei Polyethylen durch die Arrhenius-Gleichung sehr gut beschreiben lässt [9]. Die Wärmealterung ist mit beginnender Versprödung des PE verbunden. Die Versprödung tritt frühestens ein, wenn die das PE schützenden Stabilisatoren vollständig verbraucht sind. Danach vergeht noch eine gewisse Zeit, bis die Polymerketten z. B. über die  $\beta$ -Wasserstoff-Abstraktion verkürzt werden [10].



**Bild 10:** Beschleunigungsfaktoren zwischen 80 °C und 20 °C nach dem Arrhenius-Gesetz

**Fig. 10:** Acceleration factors between 20° C and 80° C according to the Arrhenius-law

Es ist deshalb verständlich, dass die Geschwindigkeitskonstanten für den Verbrauch der Stabilisatoren, wie sie z. B. durch Messung der Oxidations-Induktions-Zeit (OIT) dargestellt werden kann, keinen Beitrag zur Beschreibung der temperaturabhängigen Reaktionskinetik von Versprödung durch Wärmealterung liefern.

Es ist vielmehr notwendig, die Auswirkung der Wärmealterung auf das mechanische Verhalten von PE z. B. durch die Innendruckprüfung von Rohren bei sehr niedrigen Um-

fangsspannungen und mehreren Prüftemperaturen experimentell zu ermitteln. Die niedrigen Umfangsspannungen stellen sicher, dass die Brüche dem 3. Ast der Zeitstandkurve nach Bild 1 zugeordnet werden können.

Die für die Prüfung der Wärmealterung verwendeten Apparaturen (Bild 9) erlauben die Realisierung der maßgebenden Einflussgrößen Temperatur, Sauerstoffgehalt, Strömungsgeschwindigkeit und Dehnungszustand.

Aus den Bruchzeiten bei verschiedenen Prüf-temperaturen lässt sich die Aktivierungsenergie für den Wärmealterungsprozess nach Gleichung in **Bild 10** berechnen [11].

Für einen PE 100-Werkstoff mit bauaufsichtlicher Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin, wurden Aktivierungsenergien für die Versprödung durch Wärmealterung von 88 bis 90 kJ/mol berechnet [12].

Legt man eine konstante Temperaturdifferenz zwischen Prüftemperatur (z. B. 80 °C) und Anwendungstemperatur (z. B. 20 °C) fest, kann der in Bild 10 gezeigte Zusammenhang zwischen Aktivierungsenergie und Zeitfaktor dargestellt werden. So wird zum Beispiel ein Faktor von 100 zwischen 20 °C und 80 °C erreicht, wenn die Aktivierungsenergie 66,1 kJ/mol beträgt.

Aus dem vorgenannten Wert der Aktivierungsenergie für die Wärmealterung von 88 bis 90 kJ/mol lässt sich eine Zeit bis zur Wärmealterung bei 20 °C von 460 bis 529 Jahren berechnen.

Damit ist der Nachweis für eine Nutzungsdauer der untersuchten PE 100-Rohrwerkstoffe von mindestens 100 Jahren wissenschaftlich nachgewiesen.

## Schlussfolgerungen

Die vor ca. 50 Jahren getroffenen Vorhersagen zur Mindestnutzungsdauer von Rohren aus Polyethylen haben sich als zutreffend erwiesen. Der damalige „Extrapolationsfaktor“ von 10 bei einem Erfahrungszeitraum von drei bis fünf Jahren reduziert sich heute auf einen „Extrapolationsfaktor“ von 2 bei einem Erfahrungszeitraum von 50 Jahren.

Da dieselben physikalischen Gesetzmäßigkeiten auch für die heutigen weit verbesserten PE-Rohrwerkstoffe gelten, kann eine Mindestnutzungsdauer von 100 Jahren als gesichert angesehen werden.

## Literatur:

- [1] Gaube, E.; Diedrich, G. u. Müller, W.: Rohre aus thermoplastischen Kunststoffen – Erfahrungen aus 20 Jahren Zeitstandprüfung – Kunststoffe, 66. Jahrgang (1976) Nr. 1, S. 2-8
- [2] Richard, K.; Diedrich, G.: Standfestigkeit von einigen Hochpolymeren, Kunststoffe, Bd. 45 (1955) S. 429-433
- [3] Richard, K.; Diedrich, G.; Gaube, E.: Das Problem der Zeitstandfestigkeit und Spannungsrissbildung bei Kunststoffrohrleitungen, Dechema-Monographie Bd. 36 (1958) S. 193–201
- [4] Gaube, E.: Anwendung der Larsen-Miller-Korrelation auf Belastungskennwerte von Niederdruckpolyäthylen, Kunststoffe, Bd. 49 (1959) Nr. 3

- [5] VA MAC 2.2-6 (2007-01): Verfahrensweisung für die Festlegung der Prüfbedingungen nach dem MAC-Konzept (MAC: Modified Arrhenius Concept) mit Validierungsnachweis, DAP-PL-3760.00
- [6] Schulte, U.; Hessel, J.: Restlebensdauer von Rohren aus Hostalen GM5010 nach einer Betriebszeit von 41 Jahren, 3R internat.
- [7] Bericht der Hessel Ingenieurtechnik R06 04 1181; Auftraggeber InfraServ GmbH & Co. Höchst KG
- [8] Grieser, J.: Überprüfung des geforderten Zeitstand-Zugschweißfaktors und der Mindestlebensdauer von Schweißverbindungen aus Polyethylen, Joining Plastics (2007) Nr. 1
- [9] Richard, K.; Gaube E.; Diedrich, G.: Die Alterungsbeständigkeit von Zieglerpolyäthylen-Rohren, Materialprüfung 5 (1963) Nr. 6, S. 213–217
- [10] Persönliche Mitteilung von Dr. Heinz Vogt, Basell Polyolefine GmbH
- [11] Westphal, W. H.: Physikalisches Wörterbuch, Berlin/ Göttingen/ Heidelberg: Springer-Verlag, 1952
- [12] Bericht der Hessel Ingenieurtechnik R07 04 1011; Auftraggeber Basell Polyolefine GmbH

## Autor:

**Dr.-Ing. Joachim Hessel**  
Hessel Ingenieurtechnik GmbH



Tel. +49(0)2471/92022-0  
E-Mail: joachim.hessel@hessel-ingtech.de

# Fachinformationen für Ihren Erfolg



### “Dichtungstechnik”

Praxisbezogene Artikel und Informationen über Aufgaben, Entwicklungen und Problemlösungen aus allen Bereichen der Dichtungstechnik: Dichtungen für Behälter und Rohrleitungsflansche, Stopfbuchspackungen für Armaturen und Pumpen, Gleitringdichtungen und Radialwellendichtringe, Stangendichtungen für Hydraulik und Pneumatik, Flüssigdichtungen.

### Taschenbuch Dichtungstechnik

Herausgegeben von W. Tietze und A. Riedl  
2. Auflage 2005, 368 Seiten, DIN A6, Kunststoffeinband, € 39,00

Dieses Taschenbuch enthält in komprimierter Form Informationen zu den Themen Werkstoffe, Statische Dichtungen, Packungen, Gleitringdichtungen, Radialwellendichtringe, Hydraulik- und Pneumatikdichtungen, Berührungsfreie Dichtungen, Spezielle Abdichtelemente und Dichtungszubehör, Sonderdichtungen und neuartige Dichtungslösungen.

### Handbuch Dichtungspraxis

Herausgegeben von W. Tietze  
3. Auflage 2003, 736 Seiten, gebunden, € 110,-

Inhalt: Grundlagen/ Angewandte Werkstoffe der Dichtungstechnik/ Statische Dichtungen/ Stopfbuchspackungen/ Gleitringdichtungen/ Radialwellendichtringe/ Hydraulik- und Pneumatikdichtungen/ Berührungsfreie Dichtungen/ Spezielle Abdichtelemente und Dichtungszubehör/ Sonderdichtungen und neuartige Dichtungslösungen/ Anhang.

### Pocket Book of Seals and Sealing

Herausgegeben von W. Tietze und A. Riedl  
2006, 352 Seiten, Kunststoffeinband, DIN A6, € 39,00  
*Englische Ausgabe des bewährten “Taschenbuch Dichtungstechnik”*

Inhalt: Introduction / Materials/ Static Seal Packings/ Mechanical Seals/ Rotary Shaft Seals/ Hydraulic and Pneumatic Seals/ Non-contacting Seals/ Special Sealing Elements and Accessories/ Special Seals and Novel Seals.

BESTELLSCHEIN FAX +49 (0) 201/82002-34

	<b>PROBEHEFT Dichtungstechnik</b> 2 Ausgaben pro Jahr Jahresabonnement: € 43,00 Jahresversandkosten: € 6,00		Ex. <b>Taschenbuch Dichtungstechnik</b> 2. Auflage 2005, 368 Seiten, DIN A6, Kunststoffeinband, € 39,00
	Ex. <b>Handbuch Dichtungspraxis</b> 3. Auflage 2003, 736 Seiten, gebunden, € 110,-		Ex. <b>Pocket Book of Seals and Sealing</b> 2006, 352 Seiten, Kunststoffeinband, DIN A6, € 39,00

Name / Firma: .....

Anschrift: .....

Datum/Unterschrift: .....

Ihr Kontakt: Silvia Spies Vulkan-Verlag GmbH  
Telefon: +49 (0) 201 82002-14 Postfach 10 39 62  
Telefax: +49 (0) 201 82002-34 45039 Essen  
E-Mail: s.spies@vulkan-verlag.de Germany