

Restlebensdauer von Kunststoffrohren nach einer Betriebszeit von 41 Jahren

Remaining service life of plastic pipes after 41 years in service

Von Ulrich Schulte und Dr. Joachim Hessel

Die ersten Rohre aus Niederdruckpolyethylen bzw. Polyethylen hoher Dichte wurden 1954 in industriellem Maßstab hergestellt [1]. Im Bereich der Energieversorgung der Farbwerke Hoechst, vormals Meister Lucius und Brüning, Frankfurt-Höchst, wurden 1961 Rohre aus Hostalen GM5010 zur Wasserversorgung eingesetzt (Bild 1). Diese Rohre waren bis 2002 ständig im Betrieb.

Die graphische Extrapolation des Zeitstandinnendruckverhaltens von Rohren aus diesem Material [2] ließ seinerzeit eine Mindestlebensdauer von 50 Jahren erwarten. Die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen zur Restlebensdauer haben zum Ziel, diese Vorhersage zu überprüfen.

Pipes made from Hostalen GM5010 were installed 1961 for water supply at Farbwerke Hoechst, Frankfurt (Figure 1). These pipes had been in service continuously until the year 2002.

The remaining service life of pipes made from this material after 41 years in service was investigated using the Modified Arrhenius Concept (MAC). A remaining calculatory service life of at least 27 years for the investigated pipes can be demonstrated.

Zeitstandverhalten von Hostalen GM5010

An Rohren aus Hostalen GM5010 wurde eine Vielzahl von Zeitstandinnendruckversuchen im Temperaturbereich von 80 °C bis 20 °C durchgeführt. Die dabei erhobenen Daten ergeben bei deren Auswertung [3] das in Bild 2 gezeigte Zeitstanddiagramm. Die Regressionskurven wurden durch mehrfach lineare Regressionsrechnung ermittelt. Es ergeben sich folgende für die weitere Betrachtung maßgebenden Zusammenhänge:

1. Die Zeitstandkurven verlaufen parallel
2. Die Abstände der Zeitstandkurven sind proportional zur reziproken absoluten Temperatur
3. Die zeitbezogene Streuung der Messwerte zwischen Mittelwertkurve und Mindestkurve umgerechnet in eine spannungsbezogene Streuung beträgt 1,25 (Kehrwert von 0,8; Spannung aus der Mittelwertkurve geteilt durch Spannung aus der Mindestkurve bei 50 Jahren).

Aus 1. und 2. ergibt sich, dass die Aktivierungsenergie für den verformungsarmen Zeitstandbruch („2. Ast“) invariant gegenüber der Prüfspannung ist. Beide Gesetzmäßigkeiten finden sich auch bei den Zeitstandkurven für PE 63, PE 80 und PE 100 nach DIN 8075 bzw. EN 1778 wieder. Damit ist eine Betrachtung des temperaturabhängigen Festigkeitsverhaltens innerhalb ein und desselben Bruchmodus bei variabler Spannung zulässig, wenn die Spannung proportional zur reziproken absoluten Temperatur festgelegt wird. Diese Betrachtungsweise ist als „MAC-Konzept“ (Modified Arrhenius Concept) beschrieben [4].

Die Grundidee des MAC-Konzepts besteht in der gleichzeitigen Änderung von Prüfspannung und Prüftemperatur der zu prüfenden Proben bei der Betrachtung des temperaturabhängigen Festigkeitsverhaltens. Der Vorteil des MAC-Konzepts besteht in der beliebigen Wahl einer Ausgangsspannung (Prüfspannung bei erhöhter Temperatur) und der Zielspannung (z. B. Auslegungsspannung oder reale Betriebsspannung bei Betriebstemperatur).

Betriebsbedingungen – 41 Jahre im Dauereinsatz

Vom Betreiber des Rohrleitungssystems (InfraServ GmbH & Co. Höchst KG) werden für die Rohre (Außendurchmesser 75 mm, SDR 11) die nachfolgend genannten Betriebsbedingungen angegeben:

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

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

Die Aktivierungsenergie – Brücke zwischen Prüf- und Betriebsbedingungen

In der Kunststoffprüfung wird das Arrhenius-Gesetz [5] herangezogen, um von kurzen Standzeiten bei hohen Prüftemperaturen auf entsprechend längere Betriebszeiten bei niedrigeren Temperaturen zu extrapolieren. Besteht im Arrhenius-Diagramm zwischen der reziproken absoluten Temperatur und dem Logarithmus der Standzeit – auch bei variabler Spannung – ein linearer Zusammenhang, ist die Aktivierungsenergie EA über den betrachteten Temperaturbereich konstant. Die Berechnung der Aktivierungsenergie kann in Anlehnung an Westphal [6] gemäß nachfolgender Gleichung erfolgen.

$$E_A = 1,9152 \cdot 10^{-2} \frac{\log t_{B1} - \log t_{B2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

E_A = Aktivierungsenergie in (kJ/mol)

t_{B1} = Standzeit bei der Temperatur T_1

t_{B2} = Standzeit bei der Temperatur T_2

T_1, T_2 = absolute Temperatur [K].

Als Beispiel für die Anwendung des MAC-Konzepts sind in Bild 3 Ergebnisse von Zeitstandzugversuchen an gekerbten Proben (2NCT nach DIN EN 12814-3, Anhang A.2) von Rohren aus Hostalen GM5010 im Temperaturbereich von 90 °C bis 10 °C gezeigt. Es wird die ausreichende Linearität des Festigkeitsverhaltens im Arrhenius-Diagramm durch Korrelationskoeffizienten $> 0,99$ sowohl bei der Prüfung in wässriger Netzmittellösung als auch in Wasser belegt. Die Annahmen des MAC-Konzepts werden durch den mit abnehmender Temperatur steigenden Spröbruchanteil der Bruchflächen bestätigt (Bild 4).

Rest-Spannungsrisserverhalten nach 41 Jahren ständigem Betrieb

Die Prüfspannungen zur Bestimmung des Spannungsrisserverhaltens der Rohre im Rohrinndruckversuch gemäß ISO 1167 nach einer Betriebsdauer von 41 Jahren wurden entsprechend dem vorgenannten MAC-Konzept gewählt (Bild 5).

Dabei wurde die aus Bild 1 ersichtliche zeitliche Streuung der Messwerte durch einen entsprechenden Spannungserhöhungsfaktor von 1,25 berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Rohrinndruckversuche sind zusammen mit den 2NCT-Messungen in Wasser in Bild 6 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 %.

Dies könnte bei zukünftigen Restlebensdauerbetrachtungen die Möglichkeit eröffnen, auf Rohrinndruckversuche zu verzichten und die Aktivierungsenergie im 2NCT zu bestimmen (z. B. wenn nur kurze Rohrstücke zur Verfügung stehen oder bei Großrohrabschnitten).

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/mm² (Auslegungsspannung des damaligen PE hart von 6,5 N/mm² x Faktor für Streuung von 1,25 = 8,13 N/mm²).

Zur Berechnung der Restlebensdauer bei der tatsächlichen Betriebslast von 2,25 N/mm² wird die gemessene Standzeit von 20,7 Stunden bei der Ausgangsspannung 5 N/mm² und 80 °C sowie die gemessene

Standzeit der Rohre von 2902,3 Stunden bei 50 °C und 3,85 N/mm² verwendet. Hieraus ergibt sich eine Aktivierungsenergie von 156 kJ/mol und damit eine extrapolierte Restlebensdauer bei Betriebsbedingungen von 124 Jahren ohne Berücksichtigung der Wärmealterung.

Wärmealterung bei Polyethylen

Bereits früh wurde erkannt, dass sich der Wärmealterungsprozess bei Polyethylen durch die Arrhenius-Gleichung sehr gut beschreiben lässt [7]. Dies gilt sowohl für die mechanischen Kenngrößen (z. B. Reißdehnung) als auch für Ergebnisse aus polymerphysikalischen Untersuchungen [8].

Die maximale Einsatzdauer von Polyethylen wird durch die beginnende Wärmealterung begrenzt. Die Zeit bis zu dieser beginnenden Wärmealterung hängt bei vorgegebener Stabilisierung des Polyethylenrohres von der Temperatur, dem Sauerstoffangebot und der Strömungsgeschwindigkeit des flüssigen Mediums ab. Im Beiblatt 19 zur Richtlinie DVS 2205 sind die für Polyethylen allgemein akzeptierten Zeiten für den Beginn der Wärmealterung im Temperaturbereich von 80 °C bis 20 °C angegeben (Bild 7).

Die aus der Steigung der „Arrhenius-Geraden“ in Bild 5 berechenbare Aktivierungsenergie für die Wärmealterung beträgt 93 kJ/mol.

Die Untersuchungen der im Zeitstandinnendruckversuch geprüften Rohre im Hinblick auf deren Wärmealterungszustand wurden im Laboratorium „Polymer Physics & Characterization“ der Basell Polyolefine GmbH durchgeführt. Die Ergebnisse der VN-Messungen (ehemals VZ: Viskositätszahl; Maß für das mittlere Molekulargewicht) nach ISO 1628-3 sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Bei einem Ausgangswert von VN = 385 ml/g, der an einem Rohr im Anlieferungszustand (nach 41-jähriger Betriebszeit) gemessen wurde und einer angenommenen Abnahme des VN-Wertes um 25 % als Indikator für beginnende Wärmealterung, liegen alle Messwerte über dieser Schwelle.

Um dennoch eine Aussage zur beginnenden Wärmealterung machen zu können, werden die Angaben in DVS 2205-1 Beiblatt 19 herangezogen.

Obwohl bisher aus den VN-Messungen an Rohren aus dem Zeitstandinnendruckversuch nach 41-jährigem Betrieb keine Anzeichen für die beginnende Wärmealterung abgeleitet werden können, wird für eine (konservative) Aussage zum frühestens zu erwartenden Wärmealterungsbeginn die Standzeit der Probe 22 aus Tabelle 1 und eine Aktivierungsenergie von 93 kJ/mol herangezogen.

Für die untersuchten Rohre ergibt sich rechnerisch ein frühestens zu erwartender Wär-

mealterungsbeginn nach weiteren 27 Jahren (nach 41 Jahren Betriebszeit) bei 20 °C.

Schlussfolgerung – Vorhersage „Mindestlebensdauer 50 Jahre“ zutreffend

1. Das vorgestellte MAC-Konzept erlaubt eine zuverlässige Bestimmung der Mindest-Restlebensdauer von Rohren aus Polyethylen. Für die untersuchten Rohre aus Hostalen GM5010 wird eine Mindest-Restlebensdauer von 27 Jahren nach einer Betriebszeit von 41 Jahren festgestellt. Damit wird die prognostizierte Mindestlebensdauer von 50 Jahren bestätigt.
2. Bei modernen Polyethylen-Rohrwerkstoffen mit weit günstigerem Zeitstandverhalten und verbesserter Wärmestabilisierung ist bei fachgerechter Verarbeitung eine rechnerische Mindestlebensdauer von 100 Jahren zu erwarten [9].
3. Die nachgewiesene Gültigkeit des modifizierten Arrhenius Konzepts (MAC) sowie die Einbeziehung der verfügbaren werkstofftechnischen Informationen erlaubt eine Zeit- und Kostenersparnis auf ca. 20 % des Aufwandes nach ISO 9080 bei der Restlebensdauerbestimmung von Rohren aus Polyethylen.

Literatur

- [1] Gaube, E.; Diedrich, G.; Müller, W.: Rohre aus thermoplastischen Kunststoffen – Erfahrungen aus 20 Jahren Zeitstandprüfung, Kunststoffe 66 (1976) Nr. 1, S. 2–8
- [2] Richard, K.; Diedrich, G.; Gaube, E.: Das Problem der Zeitstandfestigkeit und Spannungsrissbildung bei Kunststoffrohrleitungen, Dechema-Monographie Bd. 36 (1958) S. 193–201
- [3] Hessel, J.; Kempe, B.: Verfahren zur Ermittlung der Zeitstandfestigkeit von Rohren aus thermoplastischem Kunststoff, Schweißen und Schneiden 4 (1990)
- [4] Hessel, J.: 50 Jahre Rohre aus Polyethylen – Eine ingenieurtechnische Betrachtung, 3R internat. 45 (2006) Nr. 3/4, S. 128–133
- [5] Svannte Arrhenius: Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren, Zeitschrift für physikalische Chemie (1889) S. 226–248
- [6] Westphal, W. H.: Physikalisches Wörterbuch, Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag, 1952
- [7] Richard, K.; Gaube E.; Diedrich, G.: Die Alterungsbeständigkeit von Zieglerpolyäthylen-Rohren, Materialprüfung 5 (1963) Nr. 6, S. 213–217
- [8] Gebler, H.: Langzeitverhalten und Alterung von PE-HD-Rohren, Kunststoffe 9 (1989) S. 823–826
- [9] Schulte, U.: 100 Jahre Lebensdauer – Langzeitfestigkeit von Druckrohren aus bimodalem PE-HD nach ISO/TR 9080 bestätigt, Kunststoffe 87 (1997) S. 203–206

Tab. 1: Ergebnisse der VN-Messungen an Rohren aus Hostalen GM5010

Table 1: Results of VN-measurements on pipes made from Hostalen GM5010

Probe Nr.	Prüftemperatur in °C	Prüfspannung in N/mm ²	Standzeit in Stunden	VN (ml/g)
B6	80		21,9	400
B4	60		144,67	385
B5	50	6,24	353,0	379
B18	50	3,85	2150,5	398
B10	40		1545,8	380
B11	40		862,2	394

Autoren:

Dipl.-Ing. Ulrich Schulte
BASELL Polyolefine GmbH,
Frankfurt/ Main



Tel. +49(0)69/305-6523
E-Mail: ulrich.schulte@basell.com

Dr.Ing. Joachim Hessel
HESEL Ingenieurtechnik GmbH,
Roetgen



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

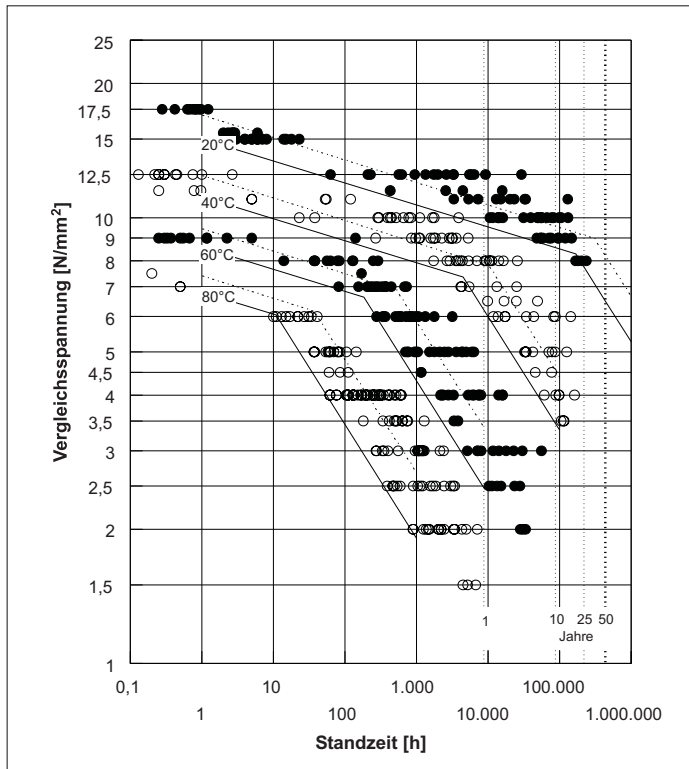


Bild 1: Rohrleitungssystem für Wasser im „Badehaus Hoechst“

Fig. 1: Pipeline for water supply at “Badehaus Hoechst”

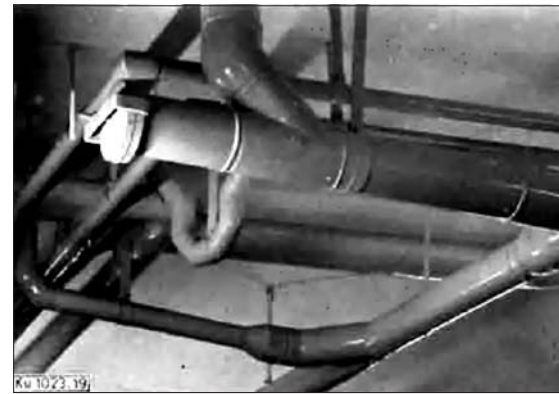


Bild 2: Ergebnisse von Zeitstandinnendruckversuchen an Rohren aus Hostalen GM5010

Fig. 2: Results of internal pressure tests on pipes made from Hostalen GM5010

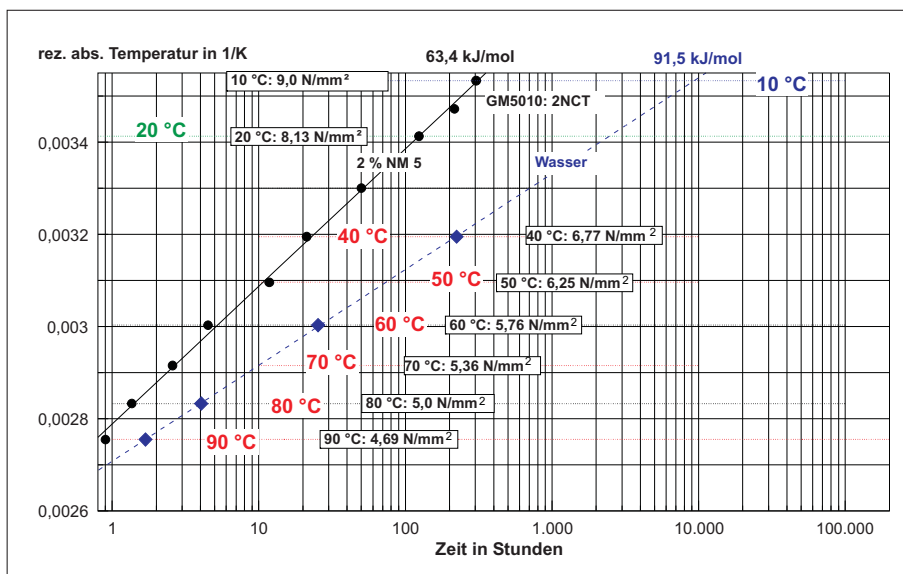


Bild 3: Ergebnisse im 2NCT an Proben von Rohren aus Hostalen GM5010

Fig. 3: Results in the 2NCT of specimens from pipes made from Hostalen GM5010

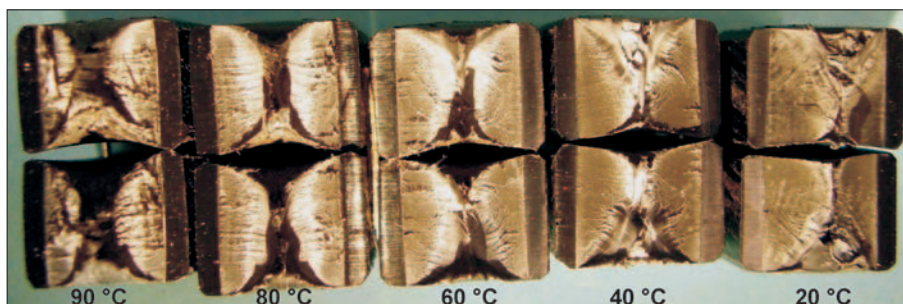


Bild 4: Bruchflächen im 2NCT von Proben aus Rohren

Fig. 4: Fracture surfaces after 2NCT of specimens taken from pipes

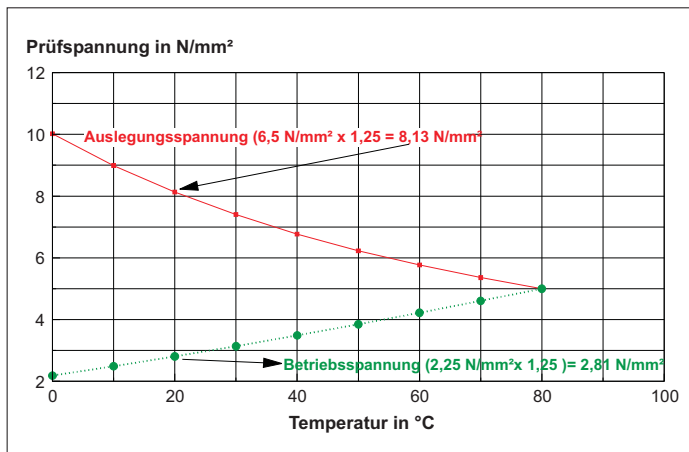


Bild 5: Wahl der Prüfparameter nach dem modifizierten Arrhenius-Konzept
Fig. 5: Selection of the test parameters according to the modified Arrhenius concept

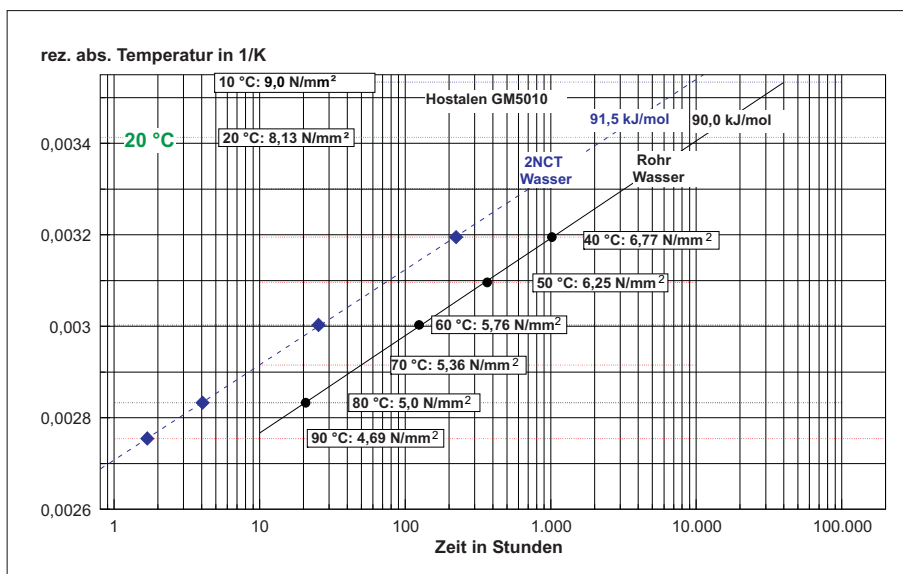


Bild 6: Vergleich der Ergebnisse im 2NCT und im Rohrinwenddruckversuch an Rohren aus Hostalen GM5010
Fig. 6: Comparison between the results in the 2NCT and the internal pressure test of pipes made from Hostalen GM5010

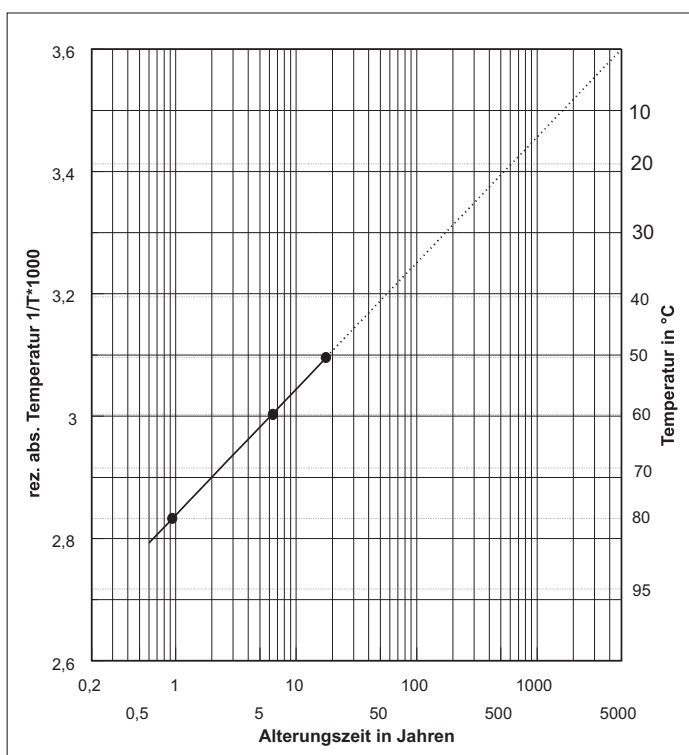


Bild 7: Wärmealterung von Polyethylen gemäß Beiblatt 19 zur Richtlinie DVS 2205-1
Fig. 7: Thermal ageing of polyethylene according to supplement 19 of directive DVS 2205-1