

Verfahren zum Nachweis des Sicherheitsfaktors für Rohre aus Polyethylen unter komplexer Beanspruchung

Procedure to determine the safety factor of polyethylene pipes under complex load

Druckrohre aus Polyethylen werden heute auch unter zusätzlich zum Innendruck wirkenden Beanspruchungen eingesetzt. Diese Zusatzbeanspruchungen ergeben sich aus z. B. Vorverformungen der Rohre (abgequetschte Rohre, Ω -Liner, C-Liner) oder Zusatzlasten bei erdverlegten Rohren ohne Sandeinbettung (z. B. Punktlasten).

Die in DIN 8075 genormten Zeitstandkurven beziehen sich auf PE-Rohre unter reinem Innendruck und erfassen demnach nicht die genannten Zusatzbeanspruchungen.

Es wird ein experimentelles Verfahren vorgestellt, das es auch für komplex beanspruchte PE-Druckrohre erlaubt, einen Mindestsicherheitsfaktor unter Einbeziehung der Norm-Zeitstandkurven zu ermitteln und damit eine ingenieurmäßige Dimensionierung durchzuführen. Die Anwendung des Verfahrens wird für Rohre aus PE-HD, PE 80 und PE 100 demonstriert.

Pressure pipes made from polyethylene were also used under additional load. This additional load is caused by pre-deformation of the pipe (e.g. at squeezed off pipe; Ω -Liner, C-Liner) or by external point load due to the installation without sand-embedding.

The creep rupture curves according to DIN 8075 are related to pipes under internal pressure only and therefore do not cover additional load.

An experimental procedure is presented which allows to determine a minimum safety factor at complex loaded PE-pipes taking into account the creep rupture curves in the relevant standards. The application of the procedure is demonstrated at pipes made from PE-HD, PE 80 or PE 100.

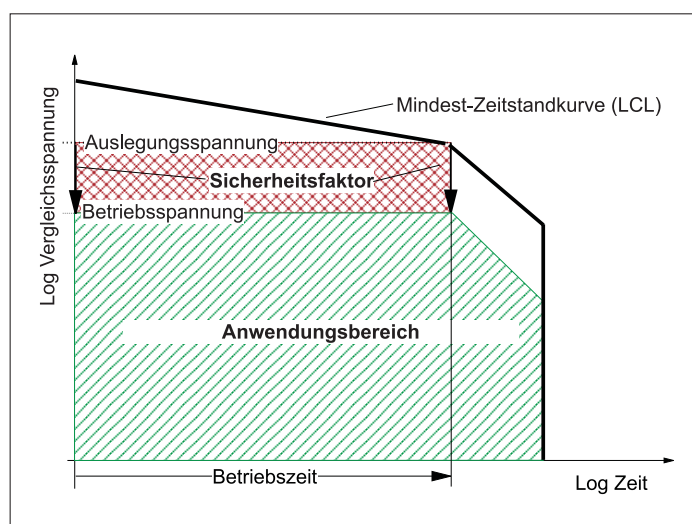


Bild 1: Sicherheitsfaktor bei der Auslegung von Rohren aus Polyethylen

Fig. 1: Safety factors for the design of PE-pipes



Dr.-Ing. Joachim Hessel

HESSEL Ingenieurtechnik GmbH,
Roetgen
Tel. +49(0)2471/920-220
E-Mail: joachim.hessel@
hessel-ingtech.de



**Dipl.-Ing. (FH)
Johannes Grieser**

HESSEL Ingenieurtechnik GmbH,
Roetgen, Tel. +49(0) 2471/920-
E-Mail: johannes.grieser@
hessel-ingtech.de

Einleitung

Das Bedürfnis nach Sicherheit findet in nichttechnischen und technischen Bereichen durch den „Abstand“ zu einem unerwünschten Ereignis seinen Ausdruck.

Zwei Beispiele aus dem „Nichtrohrbereich“ sind der Sicherheitsabstand zwischen zwei Fahrzeugen im Straßenverkehr oder der Abstand zwischen der höchsten schädlichen Dosis eines Zusatzmittels in Lebensmitteln und dem 100-fachen niedrigeren ADI-Wert (Acceptable Daily Intake). Der ADI-Wert stellt die akzeptable tägliche Aufnahmemenge eines Zusatzstoffes in Milligramm pro Kilogramm Körpergewicht dar, die ein Mensch lebenslanglich verzehren kann, ohne gesundheitliche Schäden davonzutragen.

Bei der Betrachtung des Sicherheitsfaktors für Rohre aus Polyethylen wird im doppelt logarithmischen Zeitstandinnendruck-Diagramm der Abstand zwischen zulässiger Belastung und Werkstoffkennwert anschaulich durch eine Strecke dargestellt (**Bild 1**).

Die etablierten Ingenieurverfahren zur Ermittlung der zulässigen Bauteilbelastungen gehen von der Grundbeziehung der Festigkeitsberechnung aus:

Wirkende Beanspruchung ≤ *Zulässige Beanspruchung*.

Dabei ist die zulässige Beanspruchung definiert als

Zulässige Beanspruchung = *Werkstoffkennwert/Sicherheitsfaktor*.

Der Sicherheitsfaktor wird abhängig vom Gefährdungspotential im Versagensfall [1] und der Werkstoffcharakteristik unterschiedlich hoch gewählt. Ein vergleichsweise niedriger Sicherheitsfaktor kann bei duktilen, verformungsfähigen Werkstoffen gewählt werden, da inhärente, nicht quantifizierbare Auslastungsreserven vorhanden sind. Bei sprödem Werkstoffverhalten muss ein höherer Sicherheitsfaktor gewählt werden, da hier ein Versagen durch Spröbruch zu unterstellen ist [2].

Tab. 1: Sicherheitsfaktoren für Rohre aus Polyethylen (Wasser) nach DIN 8075 bzw. EN 1778

Table 1: Safety factors for PE-pipes (water) according to DIN 8075 or EN 1778

Werkstoff	Lower Confidence Limit (LCL) (*)	Sicherheitsfaktor (Wasser)	Zeitfaktor aus Sicherheitsfaktor
PE-HD	8	1,6	2,78
PE 63	6,3	1,25	1,97
PE 80	8	1,25	2,10
PE 100	10	1,25	2,73

*) 20 °C; 50 Jahre; Wasser

Neben der Festlegung des Zahlenwertes für den Sicherheitsfaktor, ist es demnach für die sichere Auslegung von z. B. Rohrsystemen aus Polyethylen erforderlich, dass der Werkstoffkennwert bekannt ist und dass die Belastungen in ihrer Höhe und Dauer ebenfalls quantifizierbar sind.

Berechenbare Rohrsysteme aus Polyethylen

Die Grundlage für die Berechnung von Rohrsystemen aus Polyethylen stellen die Zeitstandinnendruckkurven dar, wie sie z. B. für PE-HD, PE 63, PE 80 und PE 100 in DIN 8075 oder EN 1778 festgelegt sind.

Diese Kurven stellen Mindestkurven dar, wobei statistisch 97,5 % aller gemessenen Werte über den Mindestkurven liegen [3].

Aufgrund des Zeitstandverhaltens von Rohren aus Polyethylen kann sowohl der (üblicherweise verwendete) spannungsbezogene Sicherheitsfaktor angegeben werden, als auch ein zeitbezogener Sicherheitsfaktor berechnet werden (Tabelle 1).

Die Zeitstanddiagramme nach DIN 8075 können für Rohre aus Polyethylen zur Förderung von Wasser bzw. Gas (oder bei Medien, die auf Polyethylen wie Wasser wirken) ohne weitere Einschränkungen verwendet werden [4].

Für Medien, die gegenüber Wasser zeitstandverkürzend wirken, werden bei der Dimensionierung Abminderungsfaktoren verwendet, die für eine Vielzahl von Substanzen zur Verfügung stehen [5].

Im Hinblick auf den für die Dimensionierung von Druckrohren aus Polyethylen heranzuziehenden „Werkstoffkennwert“ sind damit die wesentlichen Größen bekannt und durch jahrzehntelange Erfahrung abgesichert [6].

Nicht exakt berechenbare Rohrsysteme aus Polyethylen

Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung der Polyethylen-Rohstoffe in Richtung verbesserter Zeitstandfestigkeit haben sich neben konventionell betriebenen und verlegten Rohrsystemen aus Polyethylen Rohrsysteme am Markt etabliert, die neben der reinen Innendruckbelastung weitere Belastungskomponenten in Kauf nehmen. Bei diesen Anwendungen wird davon ausgegangen, dass die Leistungsreserven der modernen Poly-

thylenrohstoffe gegenüber den Mindestkurven die auftretenden Zusatzlasten kompensieren.

Beispiele für Polyethylen-Druckrohre mit Zusatzlasten sind abgequetschte Rohre (Bild 2), gefaltete Rohre (C-Liner; Ω -Liner) zum Einziehen in vorhandene Rohrleitungen und durch äußere Punktlasten zusätzlich beanspruchte Druckrohre (Bild 3).

Bei den genannten Beispielen ist die Belastungskomponente aus dem konstanten Innendruck (Retardation) bekannt. Der zeitlich abnehmende Belastungsanteil aus der Vorverformung des Rohres oder der Punktlast (Relaxation) entzieht sich einer realitätsnahen Berechnung.

Ebenfalls nicht exakt berechenbare Rohrleitungskomponenten stellen Formteile (z. B. T-Stücke, Heizwendelformteile) und geometrisch kompliziert geformte Sonderteile dar. Bei diesen Rohrleitungsteilen wird bisher durch eine mehr oder weniger große Überdimensionierung die gleiche Betriebssicherheit wie für das Rohr hergestellt.

Experimenteller Nachweis zur Bestimmung des Sicherheitsfaktor bei nichtberechenbaren Rohrsystemen

Üblicherweise wird der bei der Dimensionierung von Polyethylen-Rohrsystemen verwendete Mindestwert für die Zeitstandfestigkeit durch den Sicherheitsfaktor verringert („abgemindert“), so dass sich eine reduzierte Betriebsbelastung ergibt.

Bild 2: Abgequetschtes Rohr aus PE 100 (Quelle: Frank Gmbh, Mörfelden)

Fig. 2: Squeezed off pipe from PE 100 (Source: Frank Gmbh, Mörfelden)

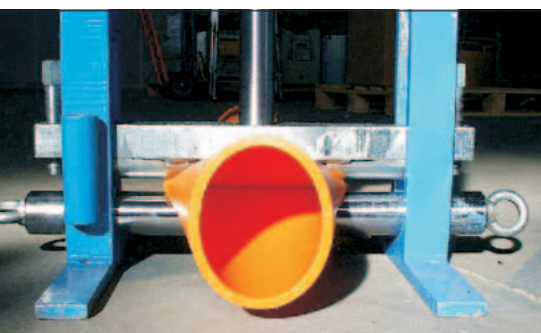
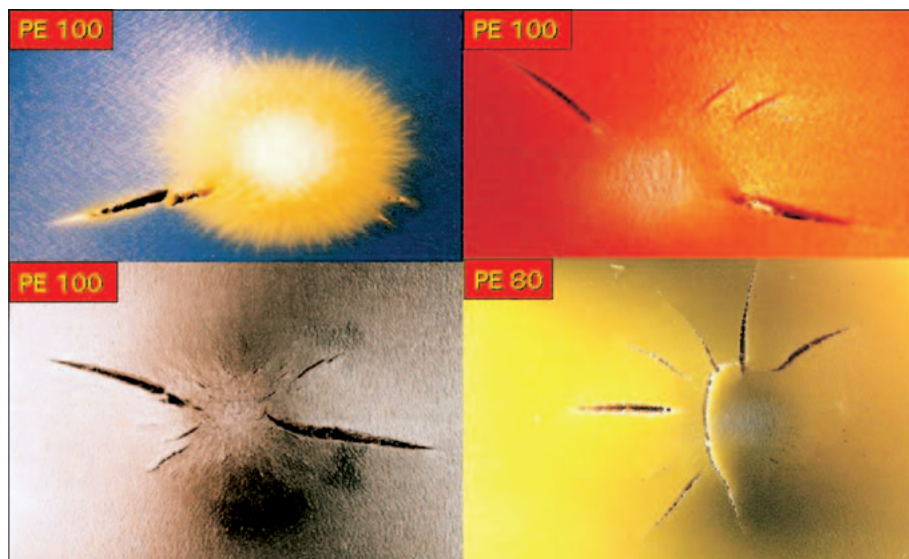


Bild 3: Rohrinneinnenseite von Rohren nach dem Punktlastversuch [9]

Fig. 3: Cracks in the inside wall of a PE pipes subjected to an external point load and internal pressure



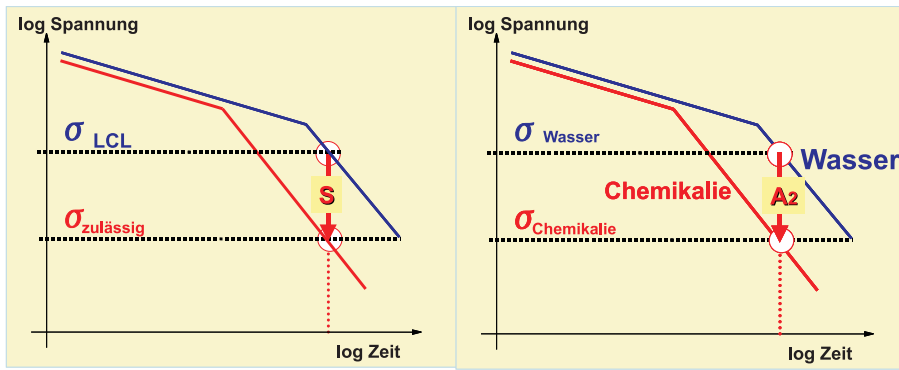


Bild 4: Definition von Sicherheitsfaktor und Abminderungsfaktor für Medieneinfluss
Fig. 4: Definition of the safety factor and the reduction factor for the influence of media

Eine analoge Situation findet man bei der Einwirkung von zeitstandverkürzenden Medien, wo durch Berücksichtigung des Abminderungsfaktors gegenüber Medieneinfluss die Betriebsbelastung reduziert wird.

Ein geeignetes Medium zur experimentellen Bestimmung des Abminderungsfaktors (= Sicherheitsfaktor) stellen wässrige Netz-

mittellösungen dar, da durch die Einwirkung dieser Substanzen eine Parallelverschiebung der Zeitstandkurven zu kürzeren Zeiten erfolgt [7].

Die gleichartige Wirkung von Sicherheitsfaktor bzw. Abminderungsfaktor durch Netzmitteleinwirkung bei der Dimensionierung ist in **Bild 4** veranschaulicht.

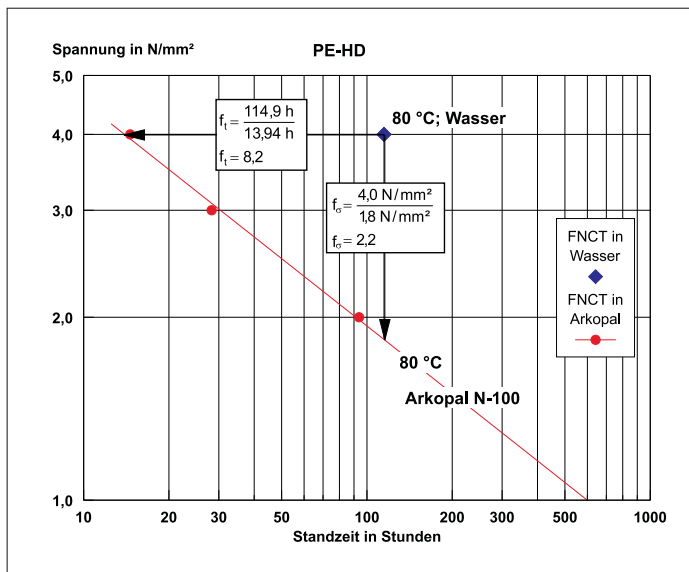


Bild 5: Bestimmung des Abminderungsfaktors für den Medieneinfluss (2 % Arkopal N-100) auf PE-HD
Fig. 5: Determination of the reduction factor for the influence of 2 % Arkopal N-100 at PE-HD

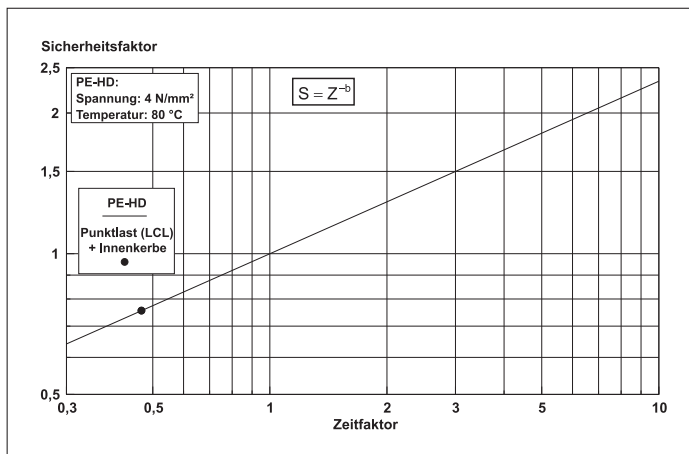


Bild 6: Experimentell ermittelter Zusammenhang zwischen spannungsbezogenem und zeitbezogenem Sicherheitsfaktor für PE-HD
Fig. 6: Experimentally determined relation between the stress related and time related safety factors at PE-HD

Tab. 2: Spannungs- bzw. zeitbezogene Abminderungsfaktoren für den Einfluss einer wässrigen Lösung mit 2 % Arkopal N-100

Table 2: Stress- or time-related reduction factors describing the influence of an aqueous solution of 2 % Arkopal N-100

Werkstoff	Abminderungsfaktor (spannungsbezogen)	Abminderungsfaktor (zeitbezogen)
PE-HD	2,18	8,24
PE 80	3,91*)	21,0*)
PE 100	2,39*)	17,5*)

*) vorläufige Werte aus laufenden Versuchen

Zur Bestimmung des Abminderungsfaktors gegenüber der Einwirkung von wässriger Netzmittellösung hat sich der FNCT bewährt. Es sind einerseits Prüfungen mit Wasser als Umgebungsmedium notwendig, andererseits ist die Berechnung der Zeitstandkurve aus Messung unter Einwirkung von Netzmittel erforderlich. In **Bild 5** sind die Ergebnisse exemplarisch für ein Rohr aus PE-HD dargestellt. **Bild 6** zeigt den Zusammenhang zwischen spannungs- bzw. zeitbezogenen Sicherheitsfaktoren für Rohre aus PE-HD.

Es ergeben sich bei analoger Vorgehensweise für PE-HD, PE 80 und PE 100 mit dem Netzmittel „Arkopal N-100“ die in **Tabelle 2** angegebenen spannungs- bzw. zeitbezogenen Abminderungsfaktoren.

Anwendung des Nachweises zum experimentell ermittelten Sicherheitsfaktor

Unter der Annahme, dass die Abminderungsfaktoren aus Tabelle 2 nur vom Werkstoff und dem Medium abhängig sind und somit auch für punktblastete Rohre gelten, können die Sicherheitsfaktoren für die in [8] untersuchten Rohre angegeben werden (**Tabelle 3**).

Hierzu werden die jeweiligen Normanforderungen bei 80 °C z. B. nach DIN 8075 durch den zeitbezogenen Abminderungsfaktor dividiert und somit eine „Normanforderung“ für Netzmitteleinwirkung („t_G“; G = Grenzbedingung) konstruiert.

Erreichen die punktblasteten Rohre gerade diese „Normanforderung“ für Netzmitteleinwirkung (t_G), beträgt der Sicherheitsfaktor 1. Sind die Standzeiten der punktblasteten Rohre größer als die „Normanforderung“ für Netzmitteleinwirkung ein Sicherheitsfaktor für 80 °C berechnen¹⁾.

Die Vorgehensweise wird in **Bild 7** erläutert.

Zu Beginn der Betrachtungen steht die Klassifizierung des Polyethylen-Rohstoffs ge-

Tab. 3: Sicherheitsfaktoren für punktblastete Rohre (Da 110 mm, SDR 11) aus [8]

Table 3: Safety factors for point loaded pipes (Da 110 mm, SDR 11) according to [8]

¹ ISO/TR 9080

² 80 °C, Vergleichsspannung 4 N/mm², 2 % Arkopal N-100

³ ISO 527 (Zugbeanspruchung)

⁴ ISO 178 (Biegebeanspruchung)

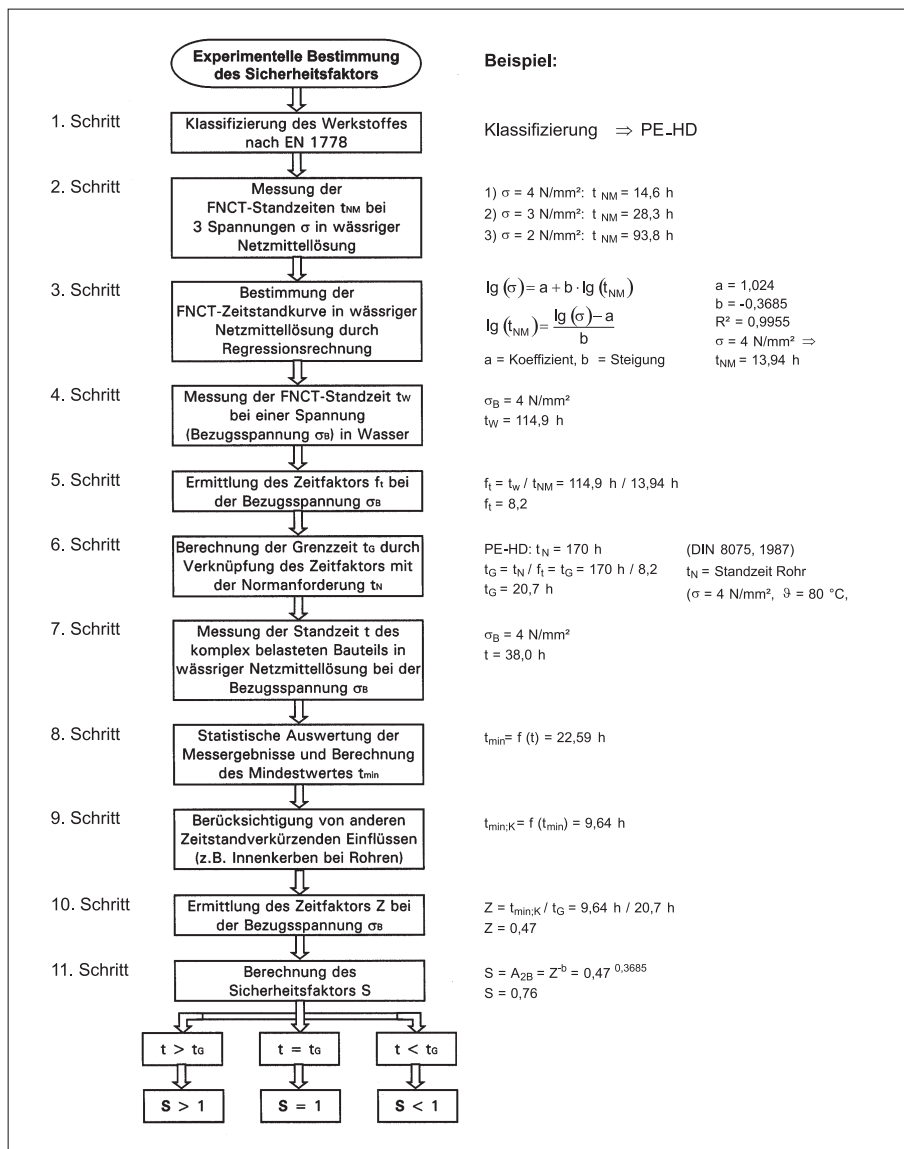
⁵ LCL-Kurve für Rohre mit Innenkerben (-riefen)

⁶ Grenze der Wärmealterung erreicht

Prüfserie	Werkstoffklasse ¹	E-Modul (N/mm ²)	Farbe	Standzeit mit Punktlast (h) ²	Experimentell ermittelter Sicherheitsfaktor ⁵
1	PE 63	950 ³	schwarz	20	0,68
2	PE 80	800 ³	schwarz	101	0,98
3	PE 80	1050 ³	schwarz	127	1,17
4	PE 80	700 ³	gelb	1013	1,68
5	PE 80	950 ³	schwarz	240	1,39
6	PE 100	1300 ⁴	blau	1564	1,07
7	PE 100	1400 ⁴	orange	873	0,97
8	PE 100	1400 ⁴	schwarz	1060	1,09
9	PE 100	900 ³	schwarz	1121	1,19
10	PE 100	1100 ³	schwarz	2958	1,39
11	PE 100	1130 ³	schwarz	1943	1,29
12	PE 100	1130 ³	schwarz	10905	1,81
13	PE 100	1100 ³	orange	9263	2,10 ⁶
14	PE 100	1100 ³	orange	10125	2,10 ⁶
15	PE 100	1100 ³	blau	11203	2,10 ⁶
16	PE 100	1100 ³	blau	9907	2,10 ⁶
17	PE 100	1100 ³	blau	9421	2,10 ⁶

Bild 7: Ablaufschema zur experimentellen Bestimmung von Sicherheitsfaktoren

Fig. 7: Flow chart to determine the safety factors by experiments



mäß den verfügbaren Zeitstandkurven (z. B. in EN 1778). Diese Zeitstandkurven liefern die Referenzwerte bei der Berechnung des Sicherheitsfaktors (1. Schritt in Bild 7).

Zur Bestimmung der zeitstandverkürzten Wirkung der wässrigen Netzmittellösung werden danach die Zeitstandkurve unter Netzmittleinwirkung und bei der höchsten möglichen Prüfspannung der Referenzwert für Wasser gemessen. Die Auswertung erfolgt wie bei der allgemeinen Bestimmung der Abminderungsfaktoren für Medieneinfluss (2. bis 5. Schritt in Bild 7).

Als brauchbares Verfahren hat sich zur Bestimmung des Medieneinflusses der Full Notch Creep Test (FNCT) bewährt, da hier mit überschaubarem Aufwand das Langzeitverhalten unter dem zusätzlichen Einfluss von Spannungsspitzen (durch die Kerben) gemessen werden kann.

Die ausreichend genaue Übertragbarkeit der im FNCT gefundenen Ergebnisse auf komplex belastete Rohre unter Innendruck wird in **Bild 8** gezeigt, wo die Ergebnisse von Rohren unter Innendruck mit zusätzlicher äußerer Punktlast sowie Innenlängskerben an der Punktlaststelle den Resultaten aus dem FNCT gegenübergestellt sind [8].

Beim Innendruckversuch wird der Querschnitt zwischen der Kerbspitze an der Rohrwandinnenseite und der Rohraußenwand durch die in Umfangsrichtung des Rohres wirkende SpannungsKomponente beansprucht.

¹⁾ Sind die gemessenen Prüfzeiten unter Netzmittleinwirkung kleiner als die Anforderung „ t_G “, würde dieses Bauteil vor Erreichen der Mindestkurve nach DIN 8075 brechen.

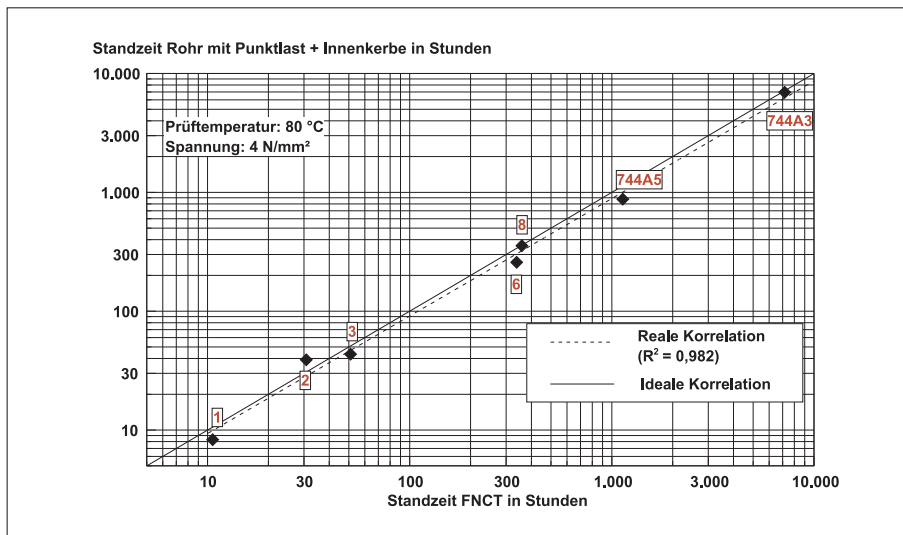


Bild 8: Korrelation von Rohr-Innendruckversuch und FNCT

Fig. 8: Correlation between internal pressure tests on pipes and FNCT

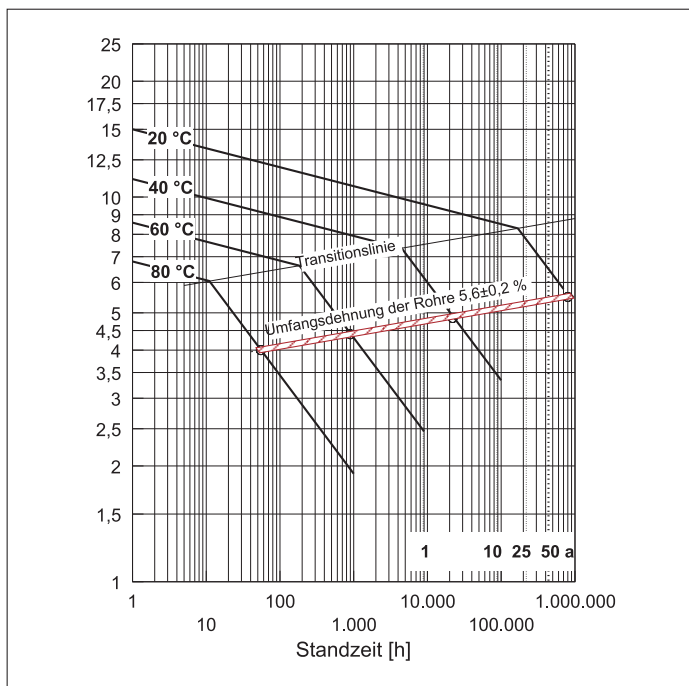


Bild 9: Extrapolationsverfahren bei konstanter Dehnung (Rohre aus Hostalen GM5010 unter Innendruck nach [10])

Fig. 9: Extrapolation procedure with the condition of constant elongation (Pipes made from Hostalen GM5010 under internal pressure [10])

Bei den FNCT-Proben wird der Querschnitt zwischen den Kerbspitzen in Rohrlängsrichtung beansprucht.

Aus den im Rahmen der ingenieurtechnischen Anwendung genügenden Übereinstimmung der Standzeiten aus beiden Versuchen können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

1. An gekerbten Proben werden im Rohrinndruckversuch und im FNCT nahezu gleiche Ergebnisse gefunden, so dass z. B. die im FNCT gemessene Medieneinwirkung direkt auf Rohre unter Innendruck übertragbar ist.

2. Der Widerstand gegenüber langsamem Rissfortschritt an Proben von Rohren Da 110 mm, SDR 11 ist in Rohrumfangsrichtung und Rohrlängsrichtung gleich groß. Es liegt also weitgehend isotropes Verhalten vor.

Der mit dem FNCT ermittelte zeitbezogene Abminderungsfaktor wird mit der Anforderung aus dem Zeitstanddiagramm in der entsprechenden Norm bei der zugehörigen Prüfspannung (z. B. 170 Stunden für PE-HD bzw. 1000 Stunden für PE 80 in DIN 8075) verknüpft und daraus eine „Grenzanforderung“ für das zu betrachtende Bauteil unter

der Einwirkung von Netzmittel definiert (6. Schritt in Bild 7).

Diese „Grenzanforderung“ steht nun als Vergleichsgrundlage bei der Bewertung von Messergebnissen für das zu betrachtende Bauteil unter Netzmitteleinwirkung zur Verfügung (7. Schritt in Bild 7).

Da bei allen Zeitstandversuchen mit einer gewissen Streuung der Messwerte gerechnet werden muss, ist für eine „auf der sicheren Seite liegenden“ Betrachtung die Berechnung von Mindestwerten unter Berücksichtigung einer 2,5%igen Versagenswahrscheinlichkeit notwendig (8. Schritt in Bild 7).

Können Riefen an der Innenoberfläche des Rohres nicht ausgeschlossen werden, steht zur Beurteilung dieses Sachverhalts der Zusammenhang aus Bild 11 in [9] zur Verfügung (9. Schritt in Bild 7).

Die aus der statistisch ermittelten Mindestbruchzeit des untersuchten Rohres und unter der Annahme von Kerben auf der Rohrrinnen-seite berechnete Standzeit wird mit der Grenzzeit ins Verhältnis gesetzt und daraus ein Zeitfaktor Z ermittelt (10. Schritt in Bild 7).

Unter Verwendung von Bild 6 wird aus dem Zeitfaktor Z der Sicherheitsfaktor S ermittelt (11. Schritt in Bild 7).

Temperaturabhängigkeit des Sicherheitsfaktors

Zur Bestimmung des Sicherheitsfaktors bei 20 °C ist die Kenntnis der Aktivierungsenergie („Zeit-Temperatur-Verschiebung“) erforderlich.

Für ein Rohr aus PE 63 unter Innendruck (Umfangsspannung 4 N/mm²) und zusätzlicher äußerer Punktlast liegen Versuchsergebnisse zwischen 80 °C und 20 °C vor. Die hieraus berechenbare Aktivierungsenergie beträgt 74 kJ/mol. Dieser Wert entspricht einem Zeitfaktor (Standzeit bei 20 °C : Standzeit bei 80 °C) von 175.

Unter der Voraussetzung, dass die Aktivierungsenergie bei identischem Bruchmechanismus invariant gegenüber der mechanischen Belastung ist, können die Sicherheitsfaktoren für jede Temperatur berechnet werden.

Hierzu wird ein Schnitt durch das Zeitstanddiagramm parallel zur Transitionslinie (Verbindung der Knickpunkte der Zeitstandkurven) gelegt (Bild 9). Dieses Verfahren basiert auf der Voraussetzung gleicher Dehnung bei den verschiedenen Temperaturen, d. h. die Spannungen steigen entsprechend mit abnehmender Temperatur.

Man erhält bei verschiedenen Temperaturen die jeweils zu der 80 °C-Prüfbedingung korrespondierende Spannung. Diese den Normanforderungen bei 80 °C entsprechenden Spannungen werden ebenfalls durch den zeitbezogenen Abminderungsfaktor dividiert. Somit werden die „Normanforderun-

gen“ für Netzmittleinwirkung bei jeder Temperatur erhalten und es können die Sicherheitsfaktoren in analoger Weise, wie für die Prüfungen bei 80 °C beschrieben, berechnet werden.

Über die geschilderte Vorgehensweise wird demnächst ausführlich berichtet werden.

Anwendungsmöglichkeiten des experimentell ermittelten Sicherheitsfaktors

Das vorgenannte Verfahren kann zum Beispiel angewendet werden bei:

- Wanddickenoptimierung von nicht berechenbaren Formteilen
- Geschweißten Formteilen (Bögen, T-Stücke)

- Rohren mit unbekanntem Zusatzlasten (Vorverformte Rohre, punktblastete Rohre)
- Restlebensdauerbestimmung von Rohren.

Literatur

- [1] DVS-Richtlinie 2205-1 „Berechnung von Behältern und Apparaten aus Thermoplasten“ (2002-04)
- [2] Roos, E.: Integritätsanalyse von Druckrohrleitungen in Pumpspeicherwerken mit bruchmechanischen Methoden, Materialprüfungsanstalt MPA Stuttgart, 9. Werkstofftagung (TU Graz), 11/2004
- [3] ISO 9080, 2003: “Plastics piping and ducting systems – Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation”
- [4] DIN 8075 „Rohre aus Polyethylen (PE); PE 63, PE 80, PE 100, PE-HD; Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung“ 1999-08)

- [5] DIBt- Medienlisten 40 (Januar 2004)
- [6] Gaube, E. et al.: Zeitstandfestigkeit und Alterung von Rohren aus HDPE; Erfahrungen aus 30 Jahren Rohrprüfung. Kunststoffe 7 (1985) S. 412/415
- [7] Hessel, J.; Hausdörfer, D.; Kempe, B.: The influence of oxidizing, surface active and swelling fluids on welded PE-HD joints (Zum Einfluss von oxidierenden, oberflächenaktiven und quellenden Medien auf Schweißverbindungen aus PE-HD). IIW-Doc. XVI-453-84
- [8] Hessel, J.: Aktueller Stand der Erkenntnisse bei sandbettlos verlegbaren PE-Rohren, Wiesbadener Kunststoff Rohrtage 2004, Wiesbaden, 28 und 29.04.2004
- [9] Hessel, J.: Mindestlebensdauer von erdverlegten Rohren aus Polyethylen ohne Sandeinbettung; Teil 2. 3R international (2001) Nr. 6, S. 360 - 366
- [10] Gaube, E., Diedrich, G. und Müller, W.: Rohre aus thermoplastischen Kunststoffen; Erfahrungen aus 20 Jahren Zeitstandprüfung. Kunststoffe 1 (1976) S. 2/8