

# Kosten- und zeitsparendes Verfahren zur Erzeugung von Zeitstandkurven für Rohre aus Kunststoffen

Costs- and timesaving procedure to generate creep rupture curves for plastics pipes

Von Dr. Joachim Hessel

*Die Erzeugung von Zeitstand-Bruchkurven von Rohren zur Dimensionierung von mehrachsig belasteten Bauteilen erfordert bei flach verlaufenden einfachlinearen Zeitstandkurven sowohl in experimenteller als auch in regressionsanalytischer Hinsicht einen hohen Aufwand. Das hier beschriebene Verfahren der „linearen Drucksteigerung“ erlaubt die Berechnung der Zeitstand-Bruchkurven von Rohren mit geringerem Aufwand in kürzerer Zeit. Die Anwendungsmöglichkeiten sowie die theoretischen Hintergründe des Modells werden in dieser Arbeit beschrieben.*

*The generation of creep rupture curves of pipes under internal pressure used for the design of multiaxial loaded constructions requires both from the experimental and from the regressionanalytical point of view a big effort if the creep rupture curve is flat and monoliner. The „linear pressure raising method“ described in this report allows the calculation of creep rupture curves with limited experimental effort in shorter testing times. The possible applications and the theoretical background of the method are described in this report.*

## Einleitung

Die festigkeitsbezogene Dimensionierung von selbsttragenden Konstruktionen aus Kunststoffen (z. B. Apparate, Behälter, Rohre) bei der statischen Berechnung erfolgt üblicherweise durch die Verwendung von Zeitstand-Bruchkurven. Aufgrund des im Allgemeinen mehrachsigen Spannungszustandes realer Konstruktionen wird dabei auf die Zeitstandinnendruckkurven von Rohren zurückgegriffen, da hier bei der Prüfung ebenfalls ein mehrachsiger Spannungszustand in der Rohrwand herrscht.

Für die meisten thermoplastischen Konstruktionswerkstoffe sind die Mindest-Zeitstandkurven in Normen [1] oder Richtlinien [2] verfügbar. Die Mindest-Zeitstandkurven decken statistisch 97,5 % aller Brüche ab. In ISO 9080 [3] wird eine Prüfmethode zur Erzeugung von Zeitstandinnendruckkurven für Rohre aus Thermoplasten beschrieben,

wobei die zu prüfenden Rohre bei verschiedenen Prüftemperaturen unter konstantem Innendruck bis zum Bruch belastet werden.

Insbesondere bei flach verlaufenden Zeitstandkurven werden relativ große Messwertstreuungen beobachtet, so dass die berechnete Steigung der Zeitstandgeraden im doppelt logarithmischen Maßstab mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Bei einer üblichen Prüfzeit von 1,4 Jahren und einer Extrapolation der bis dahin festgestellten Zeitstandgeraden auf 50 Jahre kann eine unsichere Steigung auf die Zielgröße (z. B. Mindestspannung bei 20 °C und 50 Jahren) erhebliche Auswirkungen haben.

Der vorliegende Aufsatz beschreibt eine Prüfmethode, die zu gering streuenden Messwerten führt und damit eine weit sicherere Berechnung von linearen Zeitstandkurven ermöglicht.

## Allgemeines zum Zeitstand-Bruchverhalten von thermoplastischen Kunststoffen

Rohre aus thermoplastischen Kunststoffen haben ein zeitabhängiges Festigkeitsverhalten, das allgemein im **Bild 1** dargestellt ist.

Im Bereich I werden bei hohen Rohrendrücken große Verformungen beobachtet („flacher Kurvenast“). Der Bereich II ist gekennzeichnet durch das Auftreten von Spannungsrissen bei geringen Rohrverformungen und Zugspannungen weit unterhalb der Streckspannung. Im Bereich III tritt durch Wärmealterung eine Versprödung des Werkstoffs ein mit der Folge eines nahezu spannungsunabhängigen Versagens. Gegenstand der nachfolgenden Betrachtungen ist der Bereich I der Zeitstandkurve und eine Methode zur Bestimmung der Steigung unter der Voraussetzung eines linearen Verlaufs der Zeitstandkurve bis mindestens zum Ende der Betriebszeit (50 Jahre). In **Tabelle 1** sind einige Beispiele aufgeführt, die die vorgenannte Bedingung z. B. bei dem Kontakt mit Wasser oder Gas bzw. Medien mit  $A^{2B} = 1^1$  erfüllen.

Die Steigung der Zeitstandkurven für Rohre aus den in Tabelle 1 genannten Werkstoffen kann durch die nachfolgend beschriebene Drucksteigerungsmethode (DSM) in relativ kurzer Zeit und wesentlich geringerem Aufwand als z. B. nach ISO 9080 bestimmt werden.

1 Gemäß Medienlisten des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBT), Berlin

## Die Drucksteigerungsmethode – Beschreibung und theoretische Grundlagen

Die Drucksteigerungsmethode wurde von J. Ehrbar im Rahmen von Untersuchungen an Röhren aus PVC, PVDF und Polyethylen vorgeschlagen. Die seinerzeitige Zielrichtung war es, die „Chemischen Resistenzfaktoren  $f_{cr}$ “ zu bestimmen [4].

Bei der Drucksteigerungsmethode werden Röhre mit linear ansteigendem Innendruck bis zum Bruch beaufschlagt, wobei verschiedene Drucksteigerungsraten ( $dp/dt$ ) zu verschiedenen Bruchzeiten führen. Die niedrigen Drucksteigerungsraten führen zu längeren Bruchzeiten als die höheren Drucksteigerungsraten, da die Versagenszeiten entsprechend später erreicht werden.

Die aus den Bruchzeiten der Drucksteigerungsversuche berechenbare Zeitstandkurve liegt höher als die z. B. nach ISO 9080 ermittelte Zeitstandkurve.

Dies liegt darin begründet, dass das Belastungskollektiv bei den Drucksteigerungsversuchen einer Dreieckfläche, bei dem konventionellen Zeitstandinnendruckversuch einer Rechteckfläche entspricht (**Bild 2**).

Unter der Voraussetzung, dass die Theorie der kumulativen Schädigung (Miner'sche Regel) [2, 5] bei den in Tabelle 1 genannten Werkstoffen gilt, liegen die Versagensdrücke im Drucksteigerungsversuch um eine konstanten Faktor über den Versagensdrücken im konventionellen Zeitstandinnendruckversuch.

Bei verschiedenen Drucksteigerungsraten (**Bild 3**) und konstanten Faktoren (K) zwischen den Versagensdrücken im Drucksteigerungsversuch und denen im konventionellen Zeitstandinnendruckversuch ergeben sich somit Zeitstandkurven für beide Versuchsarten mit identischer Steigung ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ) bei der üblichen doppelt logarithmischen Darstellung (**Bild 4**).

Der wesentliche Vorteil von Drucksteigerungsversuchen liegt in der geringeren Streuung der Versagenszeiten.

Während beim konventionellen Zeitstandinnendruckversuch eine zeitliche Streuung der Versagenszeiten – insbesondere bei flach verlaufenden Zeitstandkurven – um eine oder mehrere Dekaden beobachtet wird, reduziert sich die zeitliche Streuung der Versagenszeiten beim Drucksteigerungsversuch auf weniger als 5 % der zeitliche Streuung beim konventionellen Zeitstandinnendruckversuch.

Damit ist eine wesentlich genauere Berechnung der Steigung möglich.

## Berechnung von Mindest-Zeitstandkurven

Für die ingenieurmäßige Auslegung von Röhren unter Innendruck sind Mindest-Zeitstandkurven erforderlich, wie sie z. B. für die meisten der in Tabelle 1 genannten Werkstoffe als „Norm“-Kurven vorliegen.

Bei der Erzeugung von Mindest-Zeitstandkurven für neue oder modifizierte Werkstoffe bzw. neue Rohrkonstruktionen wird auf Basis der vorgenannten Ausführungen folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1. Bestimmung der Steigung in Drucksteigerungsversuchen bei 20 °C
2. Bestimmung der „Pseudo“-Aktivierungsenergie durch zusätzliche Versuche bei einer weiteren Temperatur unter Zugrundelegung des MAC-Konzepts [6]
3. Bestimmung der Standardabweichung bei logarithmischer Normalverteilung im konventionellen Zeitstandinnendruckversuchen
4. Berechnung der Mindestkurven für eine Versagenswahrscheinlichkeit von 2,5 % aus den Schritten 1 bis 3.

Der experimentelle Aufwand im Vergleich zu der Erstellung von Zeitstandkurven nach ISO 9080 beträgt bei dem beschriebenen Verfahren 20 Proben zu 60 Proben, d. h. 33 %.

Der zeitliche Aufwand reduziert sich auf 10 % da für die o. g. Vorgehensweise max. 1.000 Stunden benötigt werden, dagegen bei Prüfungen nach ISO 9080 10.000 Stunden Prüfzeit erforderlich sind.

## Literatur

- [1] DIN 8061 „Röhre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U) - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung“ DIN 8075 „Röhre aus Polyethylen (PE) - PE 63, PE 80, PE 100, PE-HD - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfungen“ DIN 8078 „Röhre aus Polypropylen (PP) - PP-H, PP-B, PP-R, PP-RCT - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung“
- [2] DVS 2205-1 „Berechnung von Behältern und Apparaten aus Thermoplasten Richtlinie“ (2002-04)
- [3] ISO 9080 „Kunststoff-Rohrleitungs- und Schutzrohrsysteme - Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens von thermoplastischen Rohrwerkstoffen durch Extrapolation (ISO 9080:2003); Deutsche Fassung EN ISO 9080:2003“
- [4] Barth, E.; Hessel, J. und Kempe, B.: Die Bestimmung der chemischen Widerstandsfähigkeit von Röhren aus Thermoplasten; Materials and Corrosion 48 (1997) S. 273-288
- [5] ISO 13760 „1998 Kunststoffrohre für den Transport von Fluiden unter Druck – Minersche Regel – Berechnungsverfahren für kumulative Schädigungen“
- [6] DVS 2203-4 Beiblatt 3 „Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Röhren aus thermoplastischen Kunststoffen - Zeitstandzugversuch - Überprüfung des geforderten Zeitstandzug-

Schweißfaktors und der Mindestlebensdauer von Schweißverbindungen aus Polyethylenen (PE 80 und PE 100)“

## Autor:

**Dr.-Ing. Joachim Hessel**  
HESSEL Ingenieurtechnik GmbH,  
Roetgen



Tel. +49(0)2471/920-2211  
E-Mail: joachim.hessel@hessel-ingtech.de

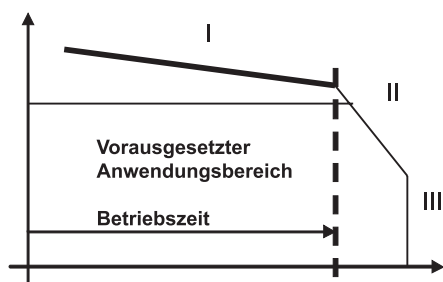
## (Footnotes)

- 1 PAS: Publicly Available Specification; Beuth-Verlag, Berlin
- 2 RTP: Reinforced Thermoplastics

**Tab 1:** Beispiele für Zeitstandbruchkurven mit einfach-linearem Verlauf

**Table 1:** Examples of monolinear creep rupture curves

Nr.	Werkstoff	Bezug	Randbedingung	Bemerkung
1	PE 100-RC	PAS 1075 <sup>1</sup>	Bis 80 °C	
2	PE 100	DIN 8075/ DVS 2205-1 Beiblatt 6	Bis 40 °C	
3	PE 80	DIN 8075/ DVS 2205-1 Beiblatt 6	Bis 40 °C	
4	PP-H, Typ 1	DIN 8078	Bis 60 °C	
5	PP-B, Typ 2	DIN 8078	Bis 40 °C	
6	PP-R, Typ 3	DIN 8078	Bis 60 °C	
7	PVDF-Homopolymerisat	DVS 2205-1	Bis 80 °C	
7	PVDF-Copolymerisat	DVS 2205-1 Beiblatt 25	Bis 40 °C	
8	PTFE	DVS 2205		
9	ECTFE	DVS 2205-1 Beiblatt 18	Bis 95 °C	
10	PVC-U	DIN 8061/DVS 2205-1	Bis 60 °C	
11	PVC-HI, Typ 1	DIN 8061/DVS 2205-1	Bis 60 °C	
12	PVC-HI, Typ 2	DIN 8061/DVS 2205-1	Bis 60 °C	
13	PVC-C	DVS 2205-1 Beiblatt 11	Bis 60 °C	Rohre
14	PVC-C	DVS 2205-1 Beiblatt 12	Bis 60 °C	Formstücke
1	RTP <sup>2</sup>	Herstellerangaben	Bis 80 °C	



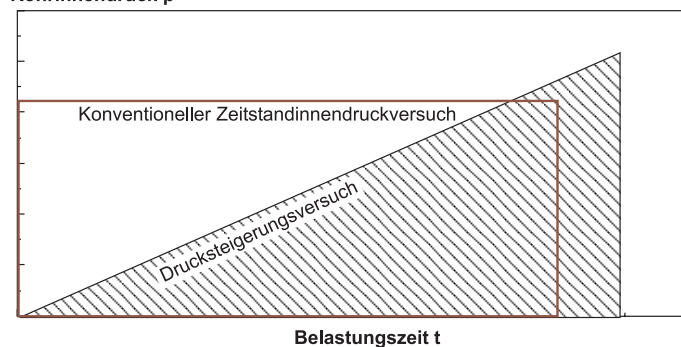
**Bild 1:** Allgemeine schematische Darstellung des Zeitstandverhaltens von Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen

I: Verformungsbrüche; II: Spannungsrisse; III: Wärmealterung

**Fig. 1:** Schematic diagram of the creep rupture behaviour of thermoplastics pipes

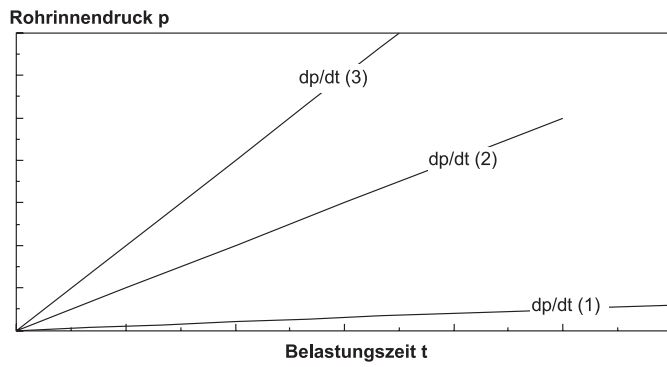
I: Ductile failure; II: Stress cracking; III: Thermal ageing

**Rohrinnendruck p**



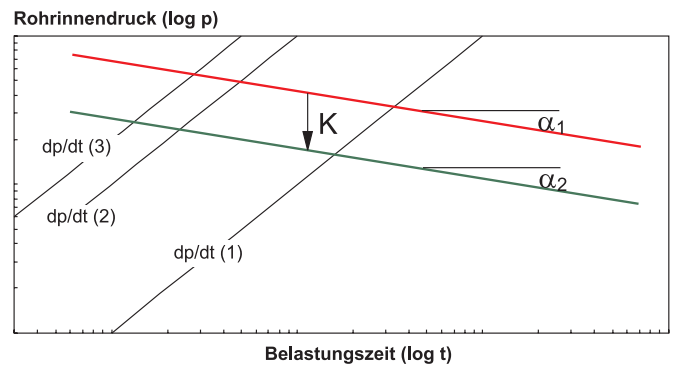
**Bild 2:** Belastungskollektive beim konventionellen Zeitstandinnendruckversuch bzw. Drucksteigerungsversuch

**Fig. 2:** Load spectrum of conventional internal pressure tests and pressure raising tests



**Bild 3:** Schematische Darstellung des zeitlichen Druckverlaufs bei Drucksteigerungsversuchen mit verschiedenen Drucksteigerungsraten

**Fig. 3:** Schematic representation of the pressure profiles at pressure raising tests with different rates



**Bild 4:** Schematische Darstellung von Zeitstandkurven bei Drucksteigerungsversuchen mit verschiedenen Drucksteigerungsraten bzw. konventionellen Zeitstandinnendruckversuchen

**Fig. 4:** Schematic representation of creep rupture curves generated by conventional internal pressure tests and pressure raising tests respectively