

Langzeitverhalten von extrudiertem Polystyrol-Hartschaum bei konstanter und zyklisch wechselnder Druckbeanspruchung

Dr.-Ing. Norbert Krollmann

Überreicht durch:

FPX

Fachvereinigung Polystyrol-Extruderschaumstoff

Ferdinand-Porsche-Str. 16

60386 Frankfurt/Main

Telefon (0 69) 42 59 01 · Telefax (0 69) 4 19 51 14

Langzeitverhalten von extrudiertem Polystyrol-Hartschaum bei konstanter und zyklisch wechselnder Druckbeanspruchung

In zunehmendem Maß werden Wärmedämmstoffe in Baukonstruktionen eingesetzt, in denen sie langzeitigen Druckbelastungen ausgesetzt sind. Beispiele hierfür sind Perimeterdämmungen, Parkdecks, Flugfeldanlagen, Straßen- und Gleisbau. Zur Abschätzung der dabei auftretenden Langzeitverformung, dem Kriechen, werden üblicherweise Zeitstanddruckversuche durchgeführt. Im Rahmen der Europäischen Normung wurde von CEN TC 88, WG 1, ein Normentwurf [1] zur Bestimmung des Langzeitverhaltens erstellt, in dem sowohl das Meßprinzip als auch ein Verfahren zur mathematischen Beschreibung und der Extrapolation des Langzeitverhaltens dargelegt ist. Am Beispiel von extrudierten Polystyrol-Hartschäumen werden Ergebnisse aus Zeitstanddruckversuchen dargestellt sowie die Anpassungs- bzw. Extrapolationsmöglichkeiten diskutiert. Desweiteren wird auf Untersuchungen eingegangen, die die zyklisch wechselnde Beanspruchung in Parkdecks simulieren.

Long term creep behaviour of extruded polystyrene foam under constant and alternating compression loading. *Thermal insulating products are used more and more in long term load bearing applications. Some examples are perimeter insulation, parking decks, hangars, road and railway constructions. The creep-deformation occurring in these applications is usually calculated on the results of long term compression tests. In the CEN TC 88, WG 1, an European Standard for the determination of compressive creep is initiated, describing the measuring procedure and a mathematical model for the calculation and extrapolation of creep data. In this paper the results of long term compression tests for extruded polystyrene foams (XPS), are discussed, including the method for calculation and extrapolation. Furthermore some investigations are described, dealing with the behaviour of XPS during cyclic loading, comparable to the stress in parking deck insulations.*

1 Probenmaterial und Versuchsdurchführung

1.1 Zeitstanduntersuchung

Erste Zeitstanduntersuchungen an extrudiertem Polystyrol-Hartschaum (XPS) reichen zurück ins Jahr 1968. Für die unterschiedlichsten XPS-Produkte liegen fundierte Erkenntnisse über das Kriechverhalten vor, die auf Prüfzeiten von mindestens 10 000 h bis zu 65 000 h basieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden beispielhaft Zeitstanduntersuchungen an zwei XPS-Typen diskutiert. In Tabelle 1 sind einige druckbeanspruchungsrelevante Kennwerte (Mindestanforderungen) dieser Produkte zusammengestellt.

Dr.-Ing. Norbert Krollmann, BASF AG, ZEW/BBZ-L443, 67056 Ludwigshafen.

Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der Technischen Hochschule Darmstadt, Promotion bei Prof. Kloos am Institut für Werkstoffkunde über die „UV-Alterung von Polyethylen“. Seit 1986 bei der BASF AG, Ludwigshafen, in der Abteilung Technische Entwicklung/Werkstofftechnik tätig und mit der Ermittlung physikalischer Kennwerte und dem Zeitstandverhalten von Polymerwerkstoffen befaßt.

Für die hier beschriebenen Zeitstanddruckversuche wurden die in Tabelle 2 dargestellten Versuchsparameter gewählt, wobei die Auswahl der Belastungsstufen so erfolgte, daß die zu erwartenden Stauchungen in einem praxisrelevanten Bereich bis ca. 5 % liegen.

Die Zeitstanduntersuchung erfolgte in Anlehnung an ISO 7850, die hinsichtlich der Versuchsdurchführung im wesentlichen mit dem Europäischen Normentwurf übereinstimmt.

1.2 Deformationsverhalten bei zyklischer Be- und Entlastung

Die Versuche zur Untersuchung des Dämmstoffverhaltens bei zyklischer Be- und Entlastung dienten der Simulation von Belastungsfällen, wie sie z.B. bei Parkdecks oder Wartungshallen vorliegen. Die Belastung erfolgte in gleicher Weise wie beim Zeitstand-Druckversuch, wobei folgende Produkt- und Versuchsparameter vorlagen (Tabelle 3).

Tabelle 1. Werkstoffkennwerte von XPS-Typ 1 und XPS-Typ 2 [2], [3]

Eigenschaft	XPS-Typ 1	XPS-Typ 2
Druckfestigkeit (MPa) für $d \leq 50$ mm für $d \geq 60$ mm	0,50 0,50	0,60 0,70
Druck-E-Modul (MPa)	30	40
Dauerdruckfestigkeit (MPa) für 1000 h bei 23 °C und Stauchung < 2 %	0,24	0,30
Dauerdruckfestigkeit (MPa) 20 Jahre bei 23 °C und Stauchung < 2 %	0,12	0,16
Dauerdruckfestigkeit (MPa) bei Verkehrslasten	0,16	0,21

Tabelle 2. Produkt- und Prüfparameter für Zeitstanddruckversuche

Produkt- und Prüfparameter	XPS-Typ 1	XPS-Typ 2
Rohdichte (kg/m ³)	44	52
Druckfestigkeit (MPa)	-	1,05
Druckspannung (MPa) bei 10 % Stauchung	0,53	-
Druck-E-Modul (MPa)	32	54
Prüfspannung (MPa) (jeweils ein Probekörper)	0,08	0,18
σ_1		
σ_2	0,12	0,27
σ_3	0,16	0,36
σ_4	0,20	0,45
σ_5	0,24	0,64
σ_6	0,28	-
Maße der Probekörper (mm)	100 × 100 × 100	80 × 80 × 80

Prüfklima: (23 ± 1) °C, (50 ± 5) % rel. Luftfeuchte.

Prüfdauer: min 10 000 h, max. derzeit 65 000 h
(Proben z.T. noch in Prüfung)

Tabelle 3. Produkt- und Prüfparameter für zyklische Be- und Entlastung

Produkt- und Prüfparameter	XPS-Typ 3
Rohdichte (kg/m ³)	32
Druckspannung (MPa) bei 10 % Stauchung	0,35
Druck-E-Modul (MPa)	20
Prüfspannung (MPa)	
Belastungsphase	0,13
Entlastungsphase	0
Maße der Probekörper (mm)	100 × 100 × 80
Prüfklima	(23 ± 1) °C, (50 ± 5) % rel. Luftfeuchte
Zyklusdauer und Anzahl (Be-/Entlastung)	96 h/72 h, 29 Zyklen 500 h/500 h, 6 Zyklen 1000 h/1000 h, 3 Zyklen

2 Auswertung des Zeitstanddruckversuchs

In Bild 1 sind die Meßwerte für die verschiedenen Prüfspannungen als Funktion der Zeit dargestellt. Mit zunehmender Zeit nimmt die Stauchung zu, und dies um so mehr, je größer die Druckbeanspruchung ist. Dieses typische nichtlinear viskoelastische Verhalten ist von polymeren Werkstoffen hinlänglich bekannt und Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Dementsprechend existieren auch viele mathematische Ansätze zur Beschreibung des Kriechverhaltens. Eigene ca. 30jährige Erfahrungen aus Zeitstandzugversuchen an thermoplastischen Kunststoffen zeigen, daß der Potenzansatz nach *Findley* [4], [5] sehr gut zur Beschreibung des Kriechverhaltens geeignet ist. Nachfolgend wird gezeigt, daß dieser Ansatz ebenso für Zeitstanddruckversuche angewendet werden kann.

2.1 Anwendung des Potenzansatzes nach Findley

Der *Findley*-Ansatz berechnet die Gesamtstauchung ϵ wie folgt:

$$\epsilon = \epsilon_0 + m \cdot t^n \tag{1}$$

D. h., die Funktion kann als lineare Beziehung geschrieben werden:

$$\log(\epsilon - \epsilon_0) = \log m + n \cdot \log(t) \tag{1a}$$

Hierbei ist ϵ_0 die Spontandeformation unmittelbar nach Belastung, d.h. der quasi elastische Anteil. Dieser kann auch aus dem im Druckversuch ermittelten E-Modul berechnet werden. Der dimensionslose Ausdruck $m \cdot t^n$ beschreibt den viskosen und viskoelastischen Kriechanteil, wobei t die Belastungszeit, m und n von der Prüfspannung abhängige Werkstoffkonstanten sind.

Zur Bestimmung der Parameter m und n werden die Daten der Stauchung als Funktion der Zeit logarithmiert und mittels linearer Regression die Kurvenanpassung vorgenommen (Bild 2). Hieraus ergeben sich m aus der Steigung und n aus dem Ordinatenabschnitt. Tabelle 4 enthält die auf diese Weise bei XPS-Typ 1 und XPS-Typ 2 für verschiedene Prüfspannungen ermittelten Werte.

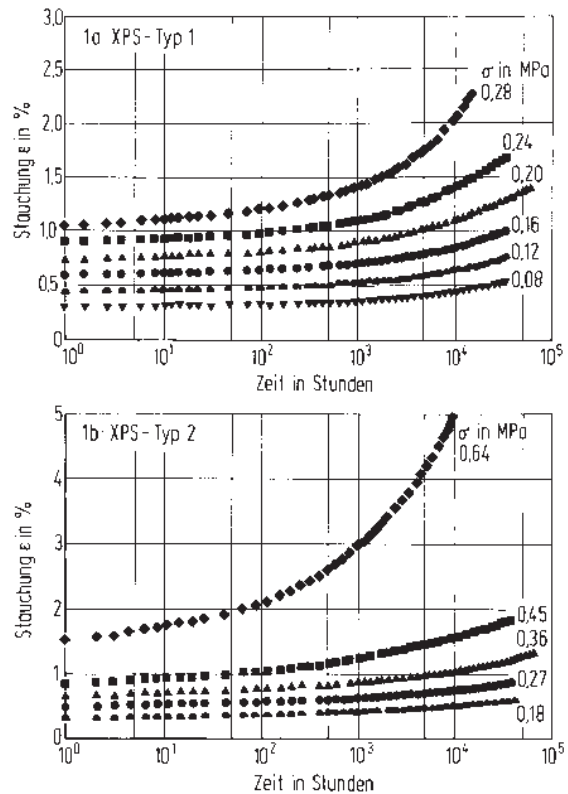


Bild 1. Gesamtstauchung (Meßwerte) als Funktion der Zeit für verschiedene Prüfspannungen

In Bild 3 sind die nach Gleichung (1) berechneten Kriechkurven als Kurvenzüge für die einzelnen Spannungen den jeweiligen Meßwerten zugeordnet.

2.2 Vergleich zwischen Findley- und Struik-Ansatz

Ein weiterer, im Rahmen der Europäischen Normung von Wärmedämmstoffen diskutierter Ansatz nach *Struik* [6] basiert auf folgender Gleichung:

$$\epsilon = \epsilon_0 + a \cdot \log(t) \tag{2}$$

Hier wird der Kriechanteil durch den Ausdruck $a \cdot \log(t)$ beschrieben. Der Ansatz darf nur angewendet werden, wenn sich bei logarithmisch geteilter Abszisse ab einer bestimmten Zeit ein lineares Deformationsverhalten zeigt. Dies tritt aber

Tabelle 4. *Findley*-Parameter m und n für die einzelnen Prüfspannungen

Produkt	Prüfspannung (MPa)	m	n	Bestimmtheitsmaß r^2
XPS-Typ 1	0,08	0,0002051	0,237387	0,960
	0,12	0,0003566	0,215132	0,957
	0,16	0,0005007	0,210782	0,960
	0,20	0,0005945	0,229609	0,976
	0,24	0,0006808	0,244982	0,977
	0,28	0,0008063	0,284399	0,957
XPS-Typ 2	0,18	0,0001508	0,252375	0,989
	0,27	0,0002232	0,251869	0,982
	0,36	0,0003774	0,248318	0,985
	0,45	0,0007544	0,243372	0,997
	0,64	0,0020550	0,312619	0,998

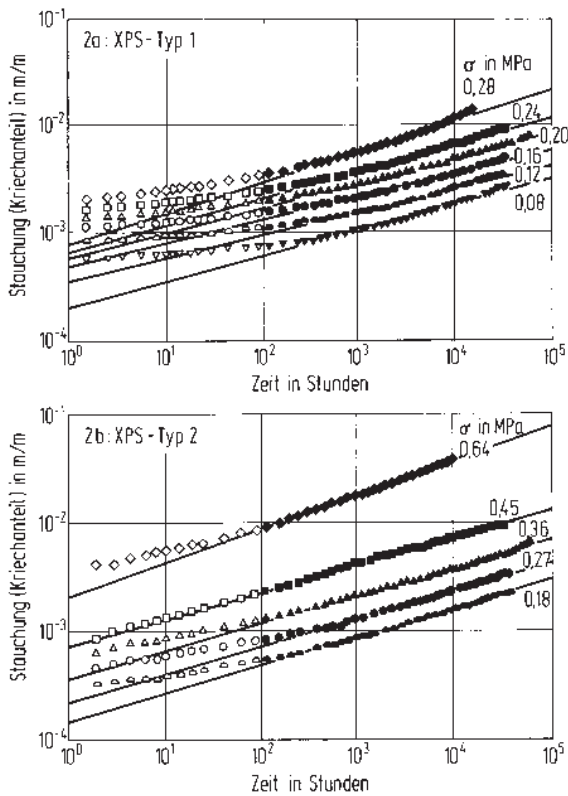


Bild 2. Stauchung (Kriechanteil) als Funktion der Zeit in doppelt-logarithmischer Darstellung zur Berechnung der *Findley*-Parameter m und n für die einzelnen Prüfspannungen entsprechend Gleichung (1a); Berechnung basiert auf den durch ausgefüllte Symbole gekennzeichneten Werten

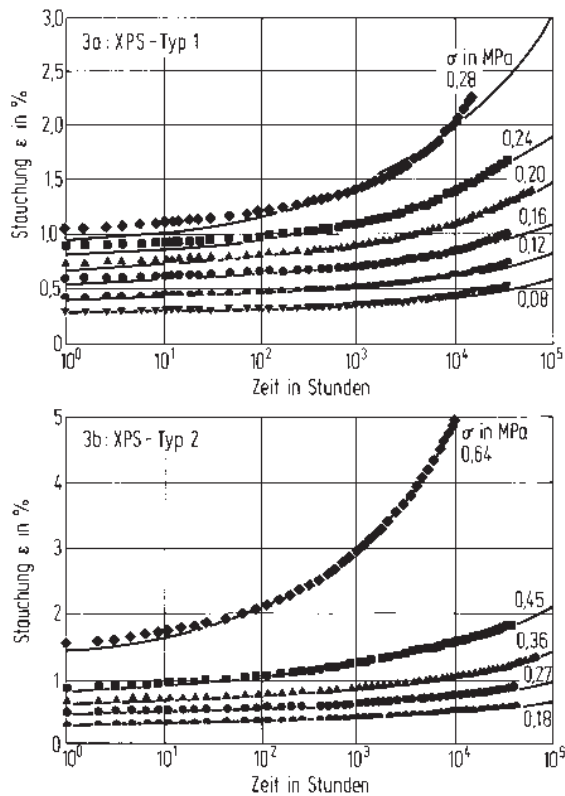


Bild 3. Vergleich zwischen den gemessenen Stauchungswerten und den für die jeweiligen Prüfspannungen berechneten Kriechkurven (Einzelanpassung)

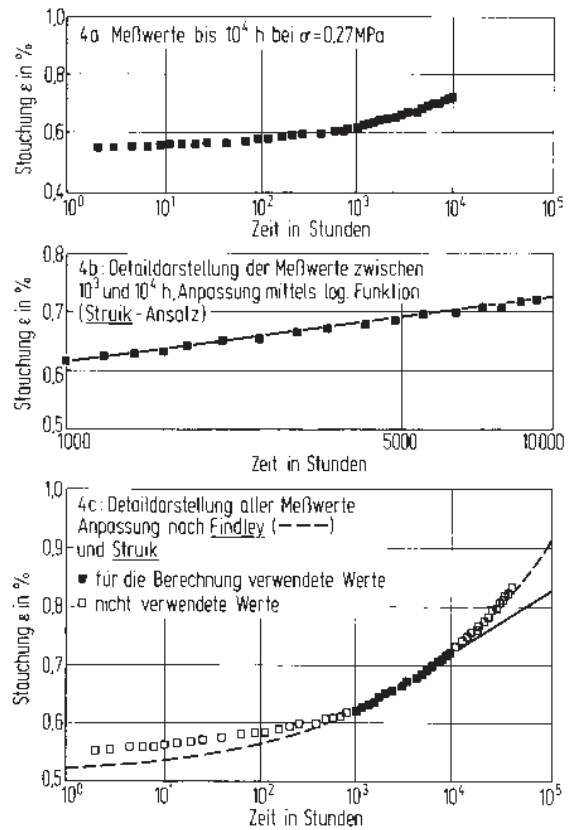


Bild 4. Gegenüberstellung der Berechnungsansätze nach *Findley* und *Struik* am Beispiel XPS-Typ 2, Prüfspannung $\sigma = 0,27$ MPa
 4a: Meßwerte bis 10^4 h bei $\sigma = 0,27$ MPa (Gesamtstauchung)
 4b: Anpassung mittels *Struik*-Ansatz entsprechend Gleichung (2)
 4c: Vergleich zwischen den gemessenen Stauchungswerten und den berechneten Kriechkurven nach *Findley* und *Struik*

bei den untersuchten XPS-Dämmstoffen, und wie aus anderen Untersuchungen bekannt auch bei EPS (expandierter Polystyrol-Hartschaum) sowie bei Polyurethan-Hartschaum, selbst bei extrem langen Versuchszeiten von bis zu 8 Jahren, nachweislich nicht auf. Je nach der Laufzeit der Versuche erscheint die Kriechkurve lediglich in bestimmten Teilen linear und läßt somit eine Anpassungsmöglichkeit vermuten. Zur Überprüfung der Anpassungsqualität werden als Beispiel der Versuch an XPS-Typ 2 bei $\sigma = 0,27$ MPa herangezogen und zunächst nur die Meßwerte bis 10 000 h betrachtet, d.h. es wird ein Versuch nachgestellt, der bei 10 000 h beendet wurde (Bild 4a). In der Detaildarstellung (Bild 4b) zeigt sich dabei ein weitgehend linearer Verlauf für die Meßwerte zwischen 1000 h und 10 000 h. Die Anpassung und Extrapolation, basierend auf diesen Werten mit Gleichung (2), führt zu der linearen Kriechkurve.

In Bild 4c ist der linearen Anpassung nach *Struik* die mittels *Findley*-Ansatz berechnete Kriechkurve, die ebenfalls auf den Werten zwischen 1000 h und 10 000 h basiert, gegenübergestellt, und alle Meßwerte bis zu einer Laufzeit von 58 000 h eingetragen. Es zeigt sich, daß die auf dem *Findley*-Ansatz beruhende Extrapolation über 10 000 h hinaus sich sehr gut mit den tatsächlich gemessenen Werten deckt, wohingegen der *Struik*-Ansatz die Charakteristik des Kriechverhaltens nicht korrekt beschreibt; die tatsächliche Stauchung ist deutlich größer als die berechneten Werte.

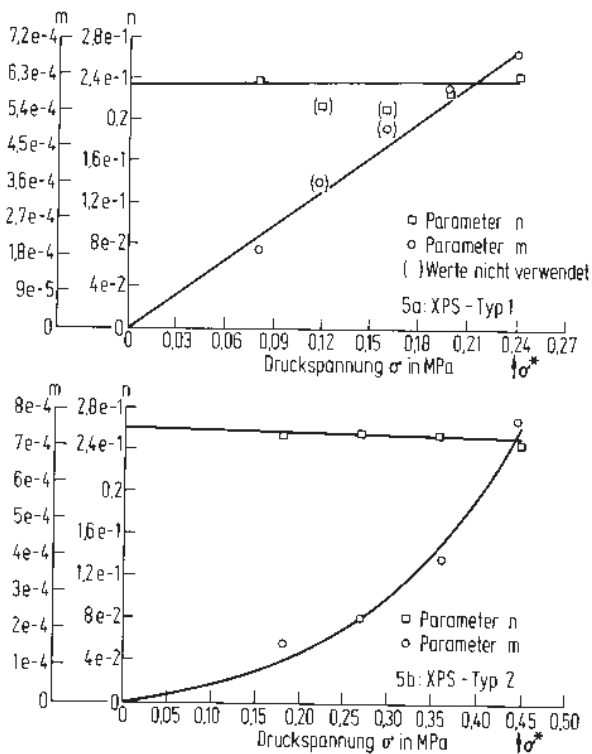


Bild 5. Findley-Parameter m und n (Tabelle 4) als Funktion der Druckspannung (Prüfspannungen)

2.3 Auswertung des spannungsabhängigen Kriechverhaltens

Wie zu Bild 1 bereits erläutert, ist das Kriechverhalten sowohl zeit- als auch spannungsabhängig. Um eine möglichst allgemeingültige Beschreibung des Langzeitverhaltens für ein Produkt zu erreichen, können die mittels Findley-Ansatz für die konkret geprüften Belastungsniveaus berechneten Parameter m und n spannungsabhängig dargestellt und mathematisch beschrieben werden (Bild 5). Damit ist für jede Druckspannung, die unterhalb der sogenannten Grenzspannung σ^* liegt, das Langzeit-Kriechverhalten zu berechnen. Die Grenzspannung σ^* definiert die maximale Spannung bis zu der der Findley-Ansatz angewendet werden kann, ohne daß die Gefahr von belastungsinduzierten Strukturveränderungen beim Werkstoff auftritt. Im allgemeinen zeigt m einen

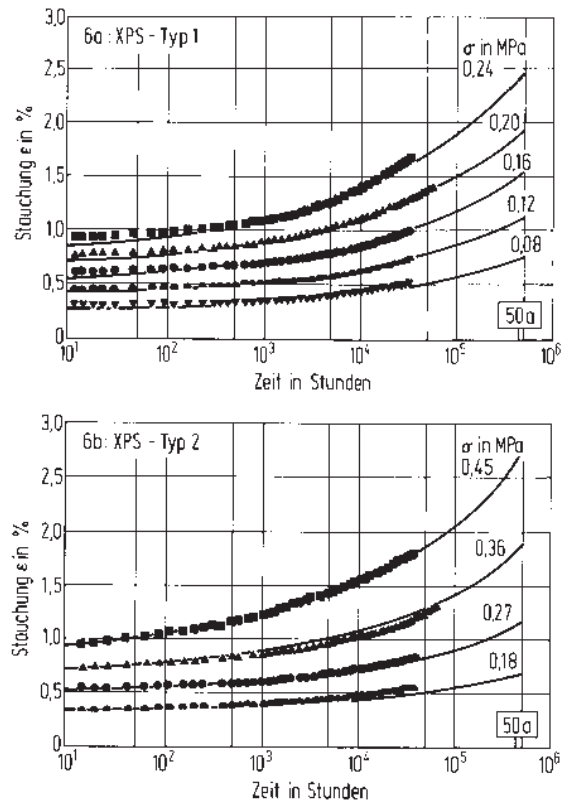


Bild 6. Vergleich zwischen den gemessenen Stauchungswerten und den berechneten Kriechkurven (mit Extrapolation bis 50 Jahre) nach spannungsabhängiger Betrachtung entsprechend Gleichungen (3) und (4) bzw. (5) und (6)

progressiven Anstieg, der mittels Polynom oder Potenzansatz beschrieben werden kann. Für n ergibt sich in der Regel ein linearer Zusammenhang, der ansteigend, abfallend oder auch konstant sein kann. Die Spannungsabhängigkeit sollte auf mindestens drei Spannungen abgestützt sein. Desweiteren ist als Forderung zu beachten, daß im betrachteten Spannungsintervall von 0 bis σ^* die Kurvenzüge eindeutig sind, d.h. jeder Spannung nur ein m- und n-Wert zugeordnet ist, die Funktion für m durch den Koordinatenursprung verläuft, im betrachteten Spannungsintervall keine Wendepunkte hat, und daß die isochronen Spannungs-Stauchungs-

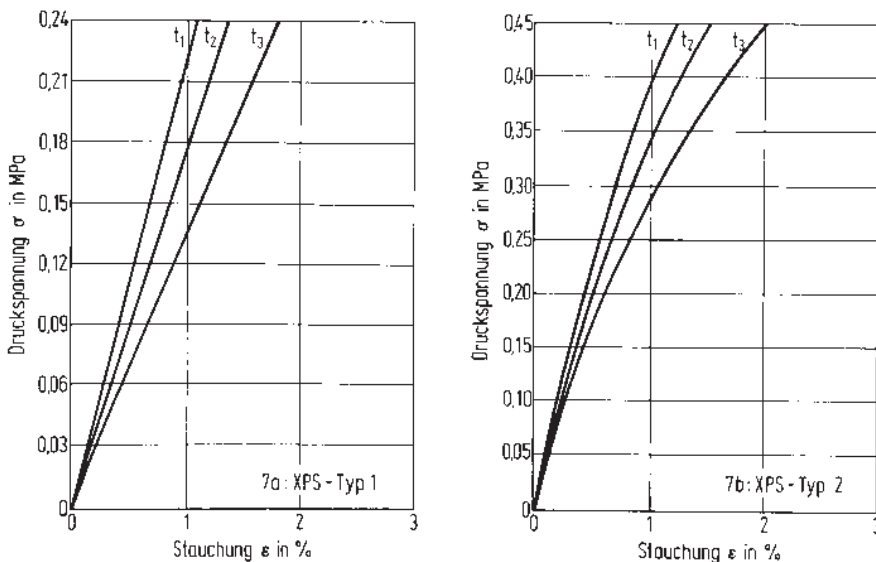


Bild 7. Isochrone Spannungs-Stauchungs-Linien für $t_1 = 10^3$ h, $t_2 = 10^4$ h und $t_3 = 10^5$ h

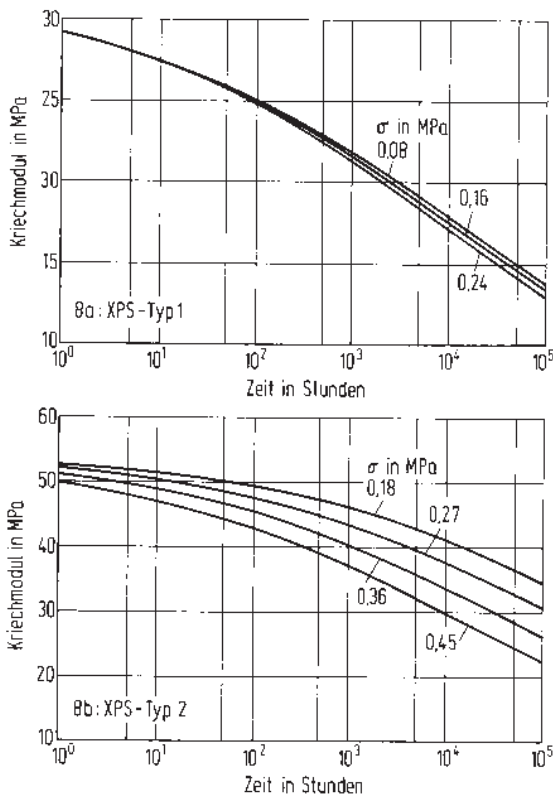


Bild 8. Kriechmodul als Funktion der Zeit für verschiedene Druckspannungen

Linien bei der späteren Auswertung einen degressiven Verlauf ohne Wendepunkte aufweisen.

In der vorliegenden Untersuchung ergeben sich folgende Funktionen zur Beschreibung der Parameter:

$$\text{XPS-Typ 1: } m = 2,7950 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma + 1,6177 \cdot 10^{-12} \cdot \sigma^3 \quad (3)$$

$$n = 0,23359 + 2,1558 \cdot 10^{-5} \sigma \quad (4)$$

$$\text{XPS-Typ 2: } m = 3,9296 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma + 6,0919 \cdot 10^{-12} \cdot \sigma^3 \quad (5)$$

$$n = 0,25968 - 3,3955 \cdot 10^{-5} \sigma \quad (6)$$

Verknüpft man diese Funktionen mit Gleichung (1), erhält man die in Bild 6 dargestellten Kriechkurven, die zwar von denen in Bild 3 geringfügig abweichen, insgesamt aber sehr gut mit den tatsächlichen Meßwerten übereinstimmen. Desweiteren können hieraus die isochronen σ - ϵ -Linien (Bild 7) und der zeit- und spannungsabhängige Kriechmodul E_c (Bild 8) berechnet werden. Für XPS-Typ 2 ergibt sich z.B. bei einer Belastung von 0,4 MPa und einer Beanspruchungsdauer von 50 Jahren (ca. 440 000 h) die folgende Stauchung:

$$\epsilon = \epsilon_0 + m \cdot t^n = 2,1 \%$$

$$\text{mit } \epsilon_0 = \frac{\sigma}{E} = \frac{0,4 \text{ MPa}}{54 \text{ MPa}} = 0,0074 \text{ (mm/mm)}$$

$$m = 0,000547 \text{ aus Gl. (5), } n = 0,246098 \text{ aus Gl. (6)}$$

Als Grenze bei solchen Extrapolationen gilt, daß je nach vorliegender Erfahrung 1 bis maximal 1,5 Dekaden über die tatsächlich gemessene Belastungsdauer hinaus gerechnet werden sollte. Zum Beispiel kann aus einem Versuch, der nach einem Jahr abgebrochen wird, mit dem heutigen Wissen

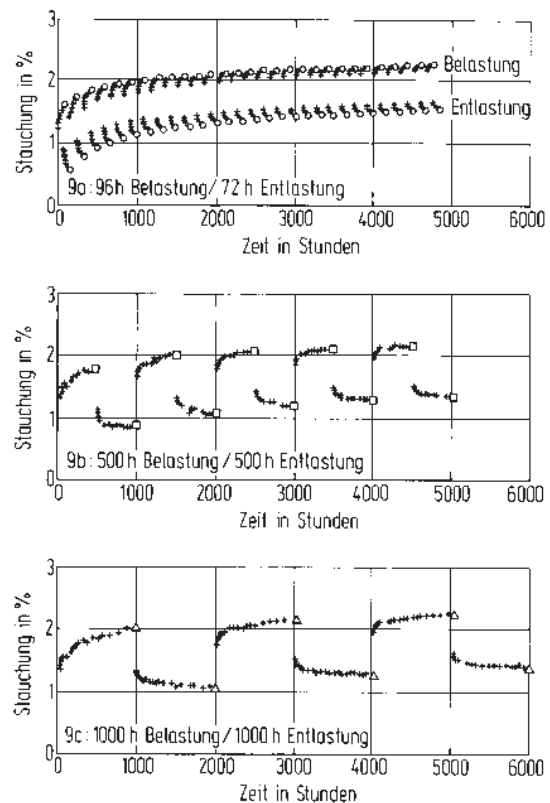


Bild 9. Verformungsverhalten von XPS-Typ 3 bei zyklischer Be- und Entlastung (Druckbelastung $\sigma = 0,13 \text{ MPa}$) als Funktion der Zeit bei verschiedenen Beanspruchungszyklen (\circ, \square, Δ = Stauchungsendwerte der einzelnen Zyklen)

um die Langzeiteigenschaften von XPS- und EPS-Dämmstoffen das Kriechverhalten im praxisrelevanten Stauchungsbereich bis 5 % bis zu 30 Jahren verlässlich bestimmt werden.

3 Auswertung der Be- und Entlastungsversuche

In Bild 9 ist das Verhalten von XPS-Typ 3 bei zyklischer Be- und Entlastung dargestellt (Druckbelastung bei Belastung: 0,13 MPa). Bei einer Zyklusdauer von 96 h Be- und 72 h Entlastung ist mit zunehmenden Zyklen folgendes festzustellen (Bild 9a):

- Die sich einstellende Stauchung am Ende der Be- und Entlastungsphasen nimmt sukzessive zu.
- Die Differenz zwischen „Endwert belastet“ und „Endwert entlastet“ wird kleiner, d.h. die verbleibende Stauchung nach Entlastung nimmt stärker zu als die Stauchung am Ende der Belastungsphasen.

Ein ähnliches Verhalten zeigen die Proben, die mit 500- und 1000stündigen Zyklen (Bilder 9a, 9b) untersucht wurden. Während die Stauchungswerte am Ende der Belastungsphase für alle Zyklustypen auf gleichem Niveau liegen, ergibt sich aufgrund der längeren Erholungszeit bei 500 h und 1000 h eine deutlich geringere Reststauchung am Ende der Entlastungsphase (Bild 10). Dies ist darauf zurückzuführen, daß durch die längere Entlastungszeit der durch die Viskoelelastizität geprägte Stauchungsanteil sich verstärkt zurückstellen kann. Durch die längere Belastungszeit wird dieser Effekt jedoch wieder ausgeglichen.

Vergleicht man die sich einstellende Stauchung am Ende der Belastungsphasen mit dem nach *Findley* berechneten Kriechverhalten, basierend auf den Werten der 1. Belastungsphase der 1000 h-Zyklen, ist klar zu erkennen, daß die zyklische Belastung gegenüber einer konstanten Belastung die geringere Beanspruchung darstellt, d.h. bei konstanter

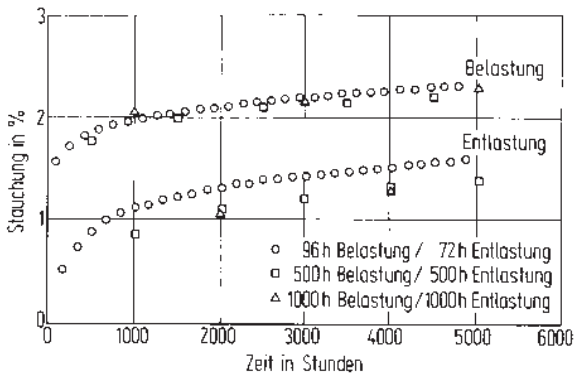


Bild 10. Stauchungsendwerte als Funktion der Zeit für XPS-Typ 3 bei verschiedenen Beanspruchungszyklen

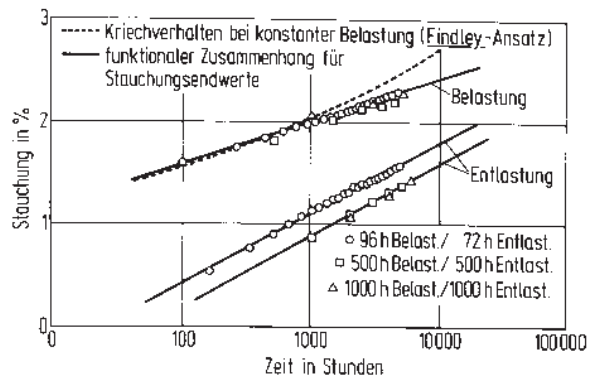


Bild 11. Funktionaler Zusammenhang des zyklusbedingten Verformungsverhaltens (Stauchungsendwerte) im Vergleich mit dem nach Findley berechneten Kriechverhalten von XPS-Typ 3 bei einer konstanten Druckbelastung von 0,13 MPa

Belastung ist die Stauchung, respektive die Stauchungszunahme in Abhängigkeit von der Belastungsdauer, stets größer als die bei wechselnder Be- und Entlastung (Bild 11).

Desweiteren zeigt Bild 11, daß die Stauchungswerte am Ende der Be- und Entlastungsphase durch logarithmische Funktionen beschrieben werden können. Die Belastungswerte liegen dabei auf derselben Geraden, während die Entlastungswerte für die 500- und 1000stündigen Zyklen, wie oben bereits erläutert, deutlich unter denen des 96 h/72 h Zyklus liegen. Eine Allgemeingültigkeit für dieses einer logarithmischen Funktion entsprechende Verhalten bei zyklischer Beanspruchung kann hieraus noch nicht abgeleitet werden, da im vorliegenden Fall die Dauer der Be- und Entlastungsphasen nahezu gleich war.

4 Zusammenfassung

Es werden die Meßergebnisse von Zeitstanddruckversuchen an zwei XPS-Produkten mit einer Laufzeit von bis zu 65 000 Stunden vorgestellt und der Nachweis erbracht, daß das Kriechverhalten, d.h. die zeitabhängige Deformation dieser Wärmedämmstoffe, mittels des *Findley*-Ansatzes korrekt beschrieben werden kann. Ein zweiter Ansatz mit logarithmischer Anpassungsfunktion nach *Struik* erwies sich als nicht geeignet. Basierend auf dem *Findley*-Ansatz kann weiterführend eine Berechnung erfolgen, die das nichtlineare viskoelastische Verhalten, d.h. die Spannungsabhängigkeit des Kriechens beschreibt. Dadurch ist es möglich, unterhalb einer bestimmten Grenzspannung und im Rahmen des für die Extrapolation zulässigen Zeitbereichs

zu jeder Druckspannung die entsprechende Stauchung zu berechnen oder den zeit- und spannungsabhängigen Kriechmodul zu ermitteln.

Die Versuche mit zyklischer Be- und Entlastung zeigen, daß dieser Belastungsfall gegenüber der konstanten Druckbelastung im Zeitstandversuch eine geringere Beanspruchung darstellt. Daraus folgt, daß in der Praxis die Auslegung und Dimensionierung von Wärmedämmungen unter wechselnder Be- und Entlastung auf den Langzeitwerten des Zeitstandversuchs abgestützt werden können, wobei dies einer sehr konservativen Auslegung entspricht.

Literatur:

- [1] CEN TC 88 WG 1-N 474 D: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens unter Druckbeanspruchung. Europäisches Komitee für Normung, Rue de Stassart 36, B-1050 Brüssel
- [2] Technische Information: Styrodur 4000 S, August 1990, TI-HSB/ME-009 d, BASF Aktiengesellschaft, D-67056 Ludwigshafen
- [3] Technische Information: Styrodur 5000 S, August 1990, TI-HSB/ME-010 d, BASF Aktiengesellschaft, D-67056 Ludwigshafen
- [4] Müller, D. u.a.: Untersuchung des Verhaltens von Kunststoffen bei langzeitiger statischer Beanspruchung, Materialprüfung 23 (1981), Nr. 12
- [5] Findley, W. N.: Creep Characteristics of Plastics. Symposium on Plastics, Am. Soc. Testing Mats., 1944
- [6] Struik, L. C. E.: Physical Aging: Influence on the Deformation Behavior of Amorphous Polymers; Failure of Plastics, Brostow and Corneliussen, Hanser Publishers, 1986, New York, S. 209–234