

**Dauerhaftigkeit von Polyethylen-
Schutzhüllen externer Spannglieder
an Umlenkstellen bei wechselnden
Beanspruchungszuständen**

T 3080

T 3080

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6861-X

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de

Schlussbericht
(DIBt P 32-5-7.195.1014/02)

Institutsbericht Nr.: 88/2004

Gegenstand: „Dauerhaftigkeit von Polyethylen-Schutzhüllen externer Spannglieder an Umlenkstellen bei wechselnden Beanspruchungszuständen“

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 L
10829 Berlin

erstattet von: Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Dipl.-Ing. Sonja Peters
Dipl.-Ing. Martin Schmitz

Aachen, im Oktober 2004

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND VERANLASSUNG	1
2	GRUNDLAGEN	3
2.1	Eigenschaften von Polyethylen.....	3
2.2	Korrosion von Metallen	5
2.3	Korrosionsschutz bei externen Spanngliedern	5
2.3.1	Polyethylen	5
2.3.2	Korrosionsschutzmasse	6
2.4	Relativverschiebungen zwischen Litze und PE-Schutzhülle.....	6
2.4.1	Verschiebungen infolge Verkehrslasten.....	8
2.4.2	Relativverschiebungen infolge Temperaturwechsel	18
2.4.3	Bewertung der Ergebnisse	22
2.5	Umgebungstemperatur der Spannglieder.....	23
2.6	Verdrillung oder Translation.....	23
3	ZULASSUNGSVERSUCHE UND ANFORDERUNGEN.....	31
4	DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE	33
4.1	Verwendete Ausgangsmaterialien	33
4.2	Versuche zum Temperatureinfluss	35
4.2.1	Allgemeines	35
4.2.2	Umlenkpressung, Temperatur und Belastungsdauer.....	37
4.2.3	Versuchsaufbau	39
4.2.4	Versuchsdurchführung	40
4.2.5	Messtechnik und Auswertung	42
4.2.6	Ergebnisse der Versuchsreihen A-H	43
4.2.7	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse.....	58
4.3	Torsionsversuche	65
4.4	Versuche zum Einfluss von Betriebsbeanspruchungen.....	71
4.4.1	Allgemeines	71
4.4.2	Versuchsaufbau	72
4.4.3	Versuchsdurchführung, Messtechnik und Auswertung	76
4.4.4	Ergebnisse der Versuche.....	77
4.4.5	Auswertung der Versuchsergebnisse.....	86

5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	95
6	LITERATURVERZEICHNIS.....	97
	Anhang: Versuchsergebnisse.....	A-1

1 EINLEITUNG UND VERANLASSUNG

Mit dem Errichten der ersten extern vorgespannten Brücke in Aue/Sachsen im Jahre 1936 wurde ein großer Fortschritt im Brückenbau erzielt. Auch heute ist dieses Konstruktionsprinzip noch zeitgemäß und wirtschaftlich sinnvoll. Erst 1998 wurde die externe Vorspannung als Regelbauweise für Hohlkastenbrücken im Bundesstraßennetz eingeführt. Die besonderen Vorteile der externen Vorspannung gegenüber innenliegenden Spanngliedern sind Inspizierbarkeit, Austausch- und Nachspannbarkeit [1].

Die externen Spannglieder werden entlang der Längsachse polygonal durch den Brückenquerschnitt geführt, um dem Momentenverlauf aus äußeren Lasten entgegenzuwirken. An den Umlenkstellen erfolgt die Kraftübertragung von den Spanngliedern über die Korrosionsschutzhüllen aus Polyethylen (PE), welche die Spannritzen ummanteln. Da diese Mäntel sehr viel weicher als die Spannstähle sind, entstehen durch die Querpressung Eindrückungen im PE, die zu einer Beeinträchtigung des Korrosionsschutzes führen können.

Die Anforderungen an die Funktionstüchtigkeit und Dauerhaftigkeit eines Spannverfahrens für externe Vorspannung sind vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) in [2] festgelegt. Im Rahmen des Zulassungsverfahrens werden zwei Versuche durchgeführt, um die Beanspruchung der PE-Schutzmäntel während des Vorspannens und der Nutzungsdauer im Bauwerk zu simulieren. Diese Versuche werden bei gleichbleibender Temperatur und ohne zyklische Lastwechsel durchgeführt. Beim Spannvorgang im Bauwerk nimmt die Vorspannung während des Verschiebens des Spanngliedes kontinuierlich zu, während in den Zulassungsversuchen die Spannglieder unter voller Vorspannung über einen Umlenksattel gezogen werden. Bislang wird davon ausgegangen, dass diese erhöhte Beanspruchung in den Versuchen die zusätzlichen Einwirkungen infolge von Temperatureinflüssen und Relativverschiebungen abdeckt.

Wie sich konstante Umgebungstemperaturen auf die Dauerhaftigkeit der Polyethylen-Schutzhüllen grundsätzlich auswirken können, konnte bei ersten Testversuchen in [5] abgeschätzt werden. Aufgrund des großen Einflusses von erhöhten Temperaturen auf die Restwanddicken der Schutzhüllen erschien es notwendig, insbesondere die Auswirkungen von Temperaturzyklen und von kurzzeitigen Temperaturspitzenwerten genauer zu untersuchen.

Zum Einfluss von Betriebsbeanspruchungen auf Brückenbauwerke, die zu Relativverschiebungen zwischen den Spannstählen und den PE-Hüllen führen, liegen zur Zeit nur unzurei-

chende Erkenntnisse vor. Bisher wird davon ausgegangen, dass die zusätzliche Schwächung der PE-Ummantelung durch Lastwechsel vernachlässigbar gering ist.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, zum einen anhand von Kleinmodellversuchen den Einfluss von Temperaturzyklen und kurzzeitigen Temperaturspitzenwerten auf die Dauerhaftigkeit der Polyethylen-Schutzhüllen zu untersuchen. Zum anderen sollen Relativverschiebungen in den Spanngliedern infolge von Betriebsbeanspruchungen simuliert werden, um die Auswirkungen der maßgebenden Parameter, wie z.B. Amplitude, Lastspielzahl und Umlenkradius auf die Restwanddicke zu überprüfen.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Eigenschaften von Polyethylen

Kunststoffe sind künstlich hergestellte Werkstoffe. Wichtige Elemente für die Herstellung von Kunststoffen sind Sauerstoff, Wasserstoff, Chlor, Schwefel und Stickstoff. Viele Kunststoffe enthalten zusätzlich Additive, die eine Verbesserung der gewünschten Eigenschaften erzielen. Eingeteilt werden Kunststoffe in folgende Gruppen [3]:

- **Thermoplaste** werden unter Wärmeeinwirkung bis zur Fließbarkeit weich und verformbar und verfestigen sich wieder durch Abkühlen. Dieser Prozess ist wiederholbar.
- **Duromere** besitzen eine sehr temperaturunabhängige Härte und sind nach der ersten Formgebung nachträglich nur eingeschränkt verformbar.
- **Elastomere** verhalten sich in einem großen Temperaturintervall gummielastisch. Sie verformen sich bereits bei geringen Spannungen stark und kehren nach der Entlastung in ihre ursprüngliche Form zurück.
- **Elastoplastische** Kunststoffe werden unter Wärmeeinwirkung weich und verformbar, erreichen aber keine Fließbarkeit.

Polyethylen (PE), das zur Gruppe der Thermoplaste gehört, wird abhängig von seiner Dichte in mehrere Untergruppen unterteilt. Die Schutzhüllen externer Spannglieder werden aus Highdensity-Polyethylen (HDPE oder PE-HD) hergestellt und besitzen eine relativ hohe Dichte. Die wesentlichen Eigenschaften von HDPE sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Wie die meisten Kunststoffe besitzt Polyethylen ein nichtlineares, viskoelastisches und temperaturabhängiges Materialverhalten. Unter Spannungsbeanspruchung kriecht und relaxiert PE, eine Verdopplung der Spannung im gleichen Zeitraum führt zu einer mehr als doppelt so hohen Verformung. Der Betrag der Verformung ist in hohem Maß von der Temperatur abhängig. Durch Erwärmung wird PE weich, d.h. der E-Modul des Materials verringert sich [3], [4]. Die Zugfestigkeit von HDPE ist im Bereich von -40°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ annähernd linear von der Temperatur abhängig (Abbildung 2.1).

Chemische Bezeichnung	- (CH ₂ -CH ₂) _n -
Dichte bei 23°C	0,941 bis 0,960 g/cm ³
Kristallit-Schmelztemperatur	130 bis 135 °C
Streckspannung	
bei 23 °C	ca. 20 N/mm ²
bei 80 °C	4 bis 6 N/mm ²
Dehnung bei Streckspannung	12 %
E-Modul bei 23 °C	900 bis 1500 N/mm ²
Schubmodul	
bei 23 °C	700 bis 1000 N/mm ²
bei 50 °C	400 bis 900 N/mm ²
bei 100 °C	80 bis 200 N/mm ²
Kugleindruckhärte, 30 s bei 23°C	40 bis 54 N/mm ²
Formbeständigkeitstemperatur	
ISO 75 A (1,8 N/mm ²)	ca. 45 °C
B (0,4 N/mm ²)	75 bis 80 °C

Tabelle 2.1: Eigenschaftsrichtwerte für HDPE [4], [5]

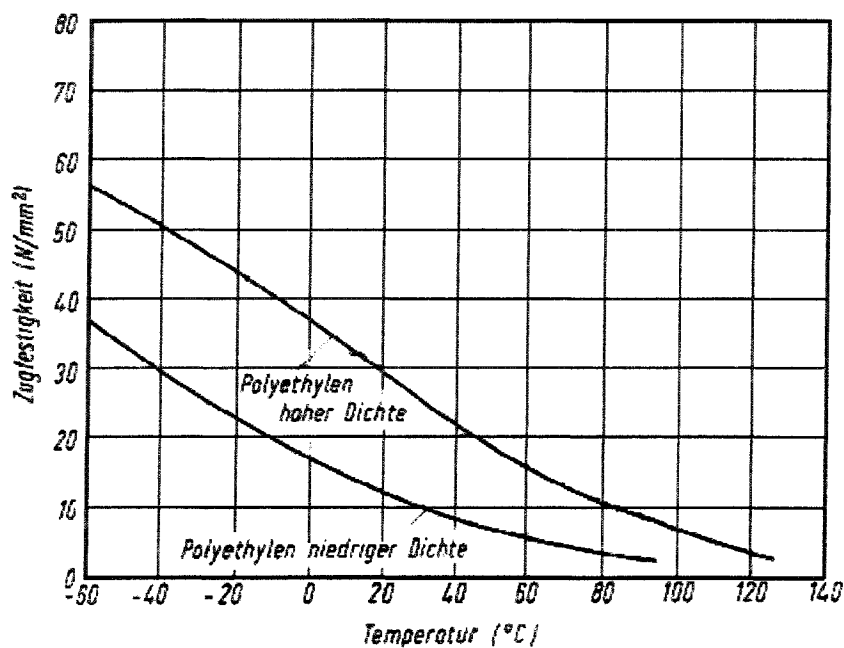


Abbildung 2.1: Temperaturabhängige Zugfestigkeit von Polyethylen [3]

2.2 Korrosion von Metallen

Korrosion ist nach DIN 50900 als „Zerstörung von Werkstoff durch chemische oder elektrochemische Reaktion mit seiner Umgebung“ definiert [6]. Es gibt verschiedene Arten von Korrosion, abhängig vom Werkstoff und seiner Umgebung. Die Stärke der Korrosion eines Metalls ist abhängig von der Reinheit seines natürlichen Vorkommens. Besonders die unedlen Metalle wie Eisen kommen in der Natur nicht in reiner Form, sondern als Metallverbindungen vor. Um sie in eine reine Form zu bringen, muss Energie aufgewendet werden. Dadurch wird das Reinmetall in einen Zwangszustand versetzt. Es ist bestrebt, diesen wieder zu verlassen. Die Rückkehr in den ursprünglichen Zustand nennt man Korrosion [7]. Ist ein Metall in der Natur relativ rein vorzufinden, so ist weniger Energieaufwand notwendig, um es in eine reine Form zu bringen. Es korrodiert unter gleichen Bedingungen weniger stark als ein relativ unrein vorkommendes Metall.

Für das Auftreten von Korrosion müssen sowohl eine wässrige Lösung - hier ist bereits ein sich bei hoher Luftfeuchtigkeit bildender Flüssigkeitsfilm auf der Metalloberfläche ausreichend – als auch ein Oxidationsmittel vorhanden sein, mit dem das Metall reagieren kann. Dieses Oxidationsmittel kann in vielen Fällen Sauerstoff aus der Atmosphäre sein.

2.3 Korrosionsschutz bei externen Spanngliedern

Um einen wirksamen Korrosionsschutz für die Spannglieder externer Vorspannsysteme zu erhalten, müssen die Spannstähe vor Wasserangriff geschützt und möglichst vollständig von der Umgebungsluft abgeschirmt werden.

Der Korrosionsschutz externer Spannglieder wird meist durch ein mehrschichtiges Korrosionsschutzsystem sichergestellt. Hierzu werden die Spannstähe in Hüllrohren geführt, die mit einer Korrosionsschutzmasse ausgepresst werden.

2.3.1 Polyethylen

Polyethylen bietet gegenüber Flüssigkeiten und Gasen einen Barriereeffekt. PE kann als wasserundurchlässig bezeichnet werden, permeabel ist es jedoch gegenüber Wasserdampf und Sauerstoff. Die Permeation von Gasen durch diesen Kunststoff ist nach dem 1. Fick'schen Diffusionsgesetz [8] linear abhängig von dessen Materialdicke:

$$\frac{\delta m}{\delta t} = -D \cdot A \cdot \frac{\delta p}{s} \quad (1)$$

Hierin sind:

$\frac{\delta m}{\delta t}$	Stofftransport pro Zeiteinheit (Permeation)
D	Materialabhängige Diffusionskonstante
A	Oberfläche
δp	Dampfdruckdifferenz
s	Materialstärke

Die PE-Ummantelungen müssen auch im Betriebszustand bei maximaler Gebrauchslast Mindestdicken aufweisen, die vom Deutschen Institut für Bautechnik vorgeschrieben sind (Kapitel 3). Wie dick die Ummantelung für einen dauerhaften Korrosionsschutz tatsächlich sein muss, ist zur Zeit nicht vollständig geklärt.

2.3.2 Korrosionsschutzmasse

Die für den Korrosionsschutz externer Spannglieder eingesetzten Korrosionsschutzmassen werden auf der Basis von Wachsen, Ölen und Fetten hergestellt. Umgibt eine Schicht dieser Korrosionsschutzmassen den Stahl, so wirkt sie als passive Barrierschicht gegenüber Flüssigkeiten und Gasen.

2.4 Relativverschiebungen zwischen Litze und PE-Schutzhülle

Die externe Vorspannung wird hauptsächlich bei Hohlkastenbrücken angewendet. Um für die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens realistische Relativverschiebungen der Litze abzuschätzen, wurde aus den in Deutschland bereits gebauten Brücken mit externer Vorspannung die in Mischbauweise hergestellte Talbrücke Münchberg im Zuge der A9 ausgewählt, da ihre Maße und Kenngrößen als repräsentativ anzusehen sind. An dieser Brücke wurden die auftretenden Durchbiegungen und die damit verbundenen Bewegungen in den Spanngliedern ermittelt.

Die Talbrücke Münchberg wurde im Jahre 2000 fertiggestellt und besteht aus einem 10-feldrigen Durchlaufträger mit einer maximalen Stützweite von 52,00 m. Ihre größte Konstruktionshöhe liegt bei 3,50 m, der Höhenunterschied zwischen den Umlenkstellen der Spannglieder beträgt 2,05 m. Etwa 40% der Vorspannung besteht aus externen Spanngliedern. Im Querschnitt wurden für die externe Vorspannung acht Spannstränge mit jeweils drei bzw. vier Spannbändern des Typs VBF-CMM D vorgesehen. Auf zwei getrennten Überbauten sind pro Fahrtrichtung jeweils drei Fahrbahnen und ein Standstreifen vorgesehen [9]. Weitere An-

gaben zum Brückenquerschnitt und der Spanngliedordnung können aus den Abbildungen 2.2 und 2.3 entnommen werden.

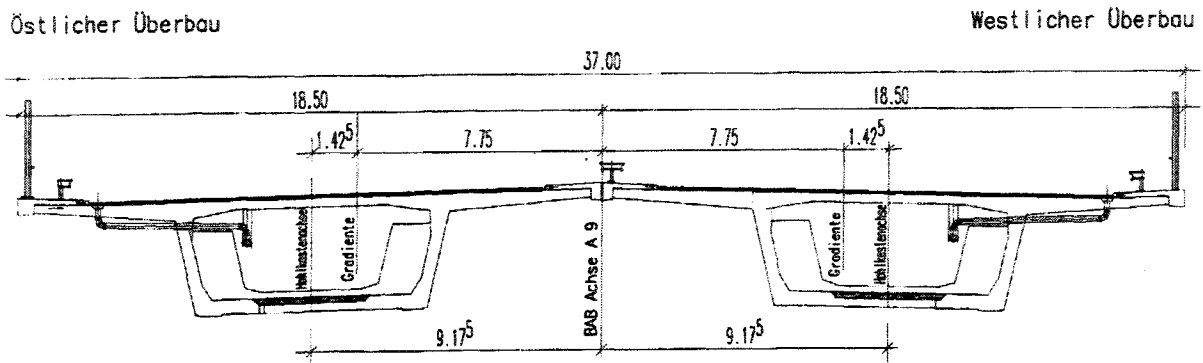


Abbildung 2.2: Querschnitt der Talbrücke Münchberg im Zuge der A9

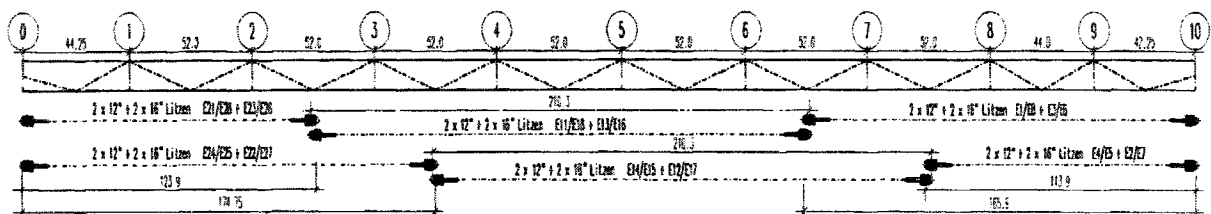


Abbildung 2.3: Übersicht der externen Spannglieder bei der Talbrücke Münchberg (A9)

Relativverschiebungen zwischen den Litzen und den Schutzhüllen treten bei Beanspruchung durch Verkehrslasten und Temperaturwechsel auf. Ständige Lasten können keine Verschiebungen zwischen Litzen und PE-Mänteln erzeugen, da sie bereits mit dem Vorspannen aktiviert werden und sich im Laufe der Zeit nicht verändern.

Im Folgenden sollen diese Verschiebungen infolge von Verkehrslasten und Temperaturwechseln an der Talbrücke Münchberg berechnet werden. Dabei kann es zu innerer Gleitung (die Litzen bewegen sich relativ zu den Schutzhüllen) oder äußerer Gleitung (das gesamte Spannglied bewegt sich) kommen. Nach [10] erzeugt innere Gleitung eine höhere Beanspruchung des Litzenmantels, so dass eine detaillierte Untersuchung dieser Art der Verschiebung erforderlich ist. Daher wurde den Berechnungen die Annahme zugrunde gelegt, dass ausschließlich innere Gleitung entsteht. Die PE-Schutzhüllen können sich nur zwischen zwei Umlenkpunkten verformen, während die Litzen auch über die Umlenkestellen hinaus Verschiebungen erfahren. Ein Nachrutschen der Mäntel über eine Umlenkstelle wird mit dieser Annahme ausgeschlossen. Da das Relaxationsvermögen von PE sehr hoch ist, können Spannungsdifferenzen in den Hüllrohren relativ schnell abgebaut werden, ohne dass Verschiebungen auftreten. Daher sind in den Korrosionsschutzhüllen keine nennenswerten Spannungen durch Längenänderung der Spannglieder infolge von Verkehrslasten und Temperaturbeanspruchung zu erwarten.

ten. Ein Längenausgleich und somit eine Verschiebung über den Umlenksattel ist demnach nicht zu erwarten.

2.4.1 Verschiebungen infolge Verkehrslasten

Für die Berechnung der Relativverschiebungen wurde die im DIN-Fachbericht 101 [11] vorgeschriebene Regelbelastung angesetzt (Abbildung 2.4).

$$P_1 = \alpha_{Q1} \cdot Q_{1k} = 0,8 \cdot 2 \cdot 300 \text{ kN} = 480 \text{ kN}$$

$$P_2 = \alpha_{Q2} \cdot Q_{2k} = 0,8 \cdot 2 \cdot 200 \text{ kN} = 320 \text{ kN}$$

$$q = 2,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 13,00 \text{ m} + 9,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 3,00 \text{ m} = 59,50 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

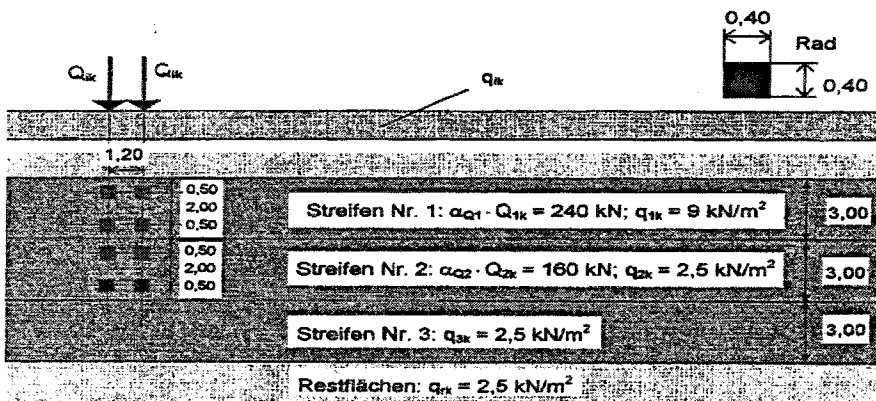


Bild 4.1: Bemessungslastmodell 1 für ULS- und SLS-Nachweise

Abbildung 2.4: Laststellung nach DIN-Fachbericht 101 [11]

Um ein maximales Feldmoment in Brückenmitte zu erhalten, wirkt die Streckenlast in jedem zweiten Feld, die Einzellasten sind laut DIN-Fachbericht 101 einmalig auf dem Brückenüberbau anzusetzen.

Die Flächenträgheitsmomente des Brückenquerschnitts wurden mit 50% angesetzt, um auch im gerissenen Zustand auf der sicheren Seite zu liegen. Als Beton wurde ein C35/45 mit einem E-Modul von $E = 33300 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Es wurden zwei Lastfälle infolge Verkehrslasten untersucht. Im Lastfall 1 (LF1) wurden die Felder 1, 3, 5, 7 und 9 belastet, die übrigen Felder wurden als unbelastet angesehen. Aus dieser Laststellung ergaben sich die maximalen Durchbiegungen in Feldmitte (Abbildung 2.5). Im Lastfall 2 (LF2) wurden die Verkehrslasten ausschließlich in Feld 5 angesetzt, während die anderen Felder unbelastet blieben. In diesem Lastfall wird die Längänderung der Litzen über eine große Länge verteilt, woraus eine möglichst große Relativverschiebung zwischen den Litzen und dem PE-Mantel resultiert (Abbildung 2.5).

Die Durchbiegungen für LF1 und für LF2, die vereinfachend an einem Stabtragwerk bestimmt wurden, sind in den Abbildungen 2.6 und 2.7 dargestellt.

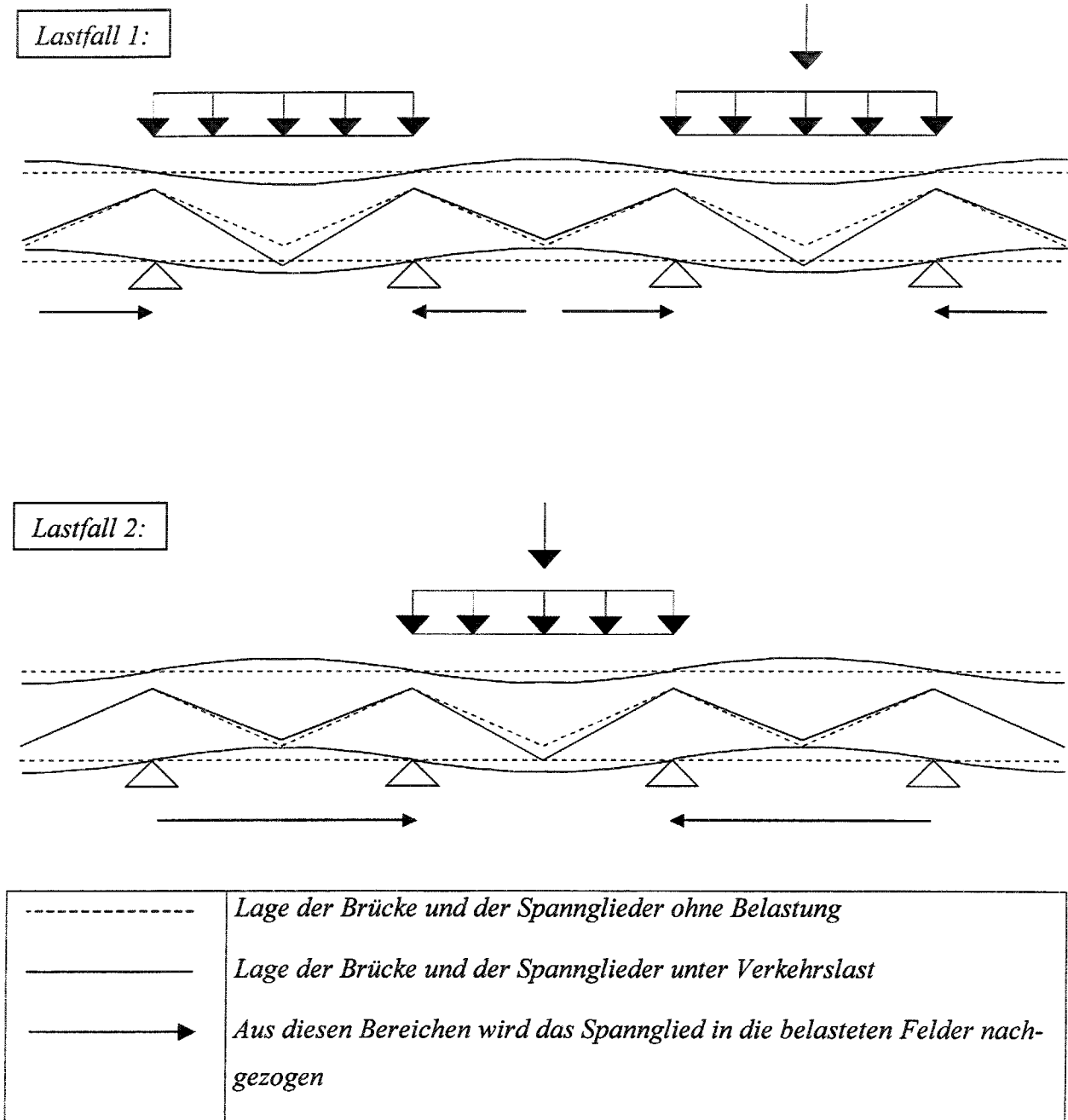


Abbildung 2.5: Verformungsbilder der Brücke und Relativverschiebungen der Spannglieder

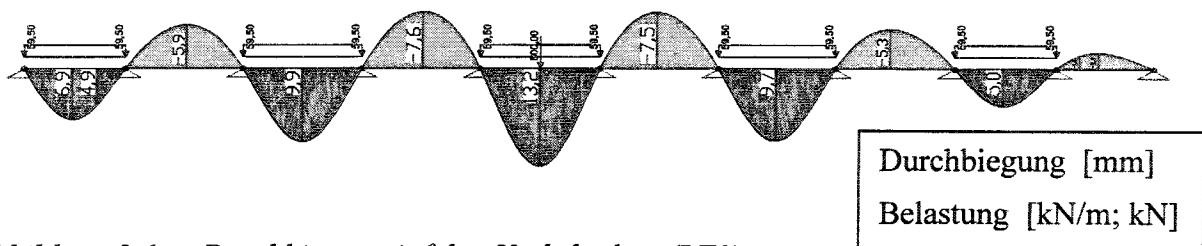
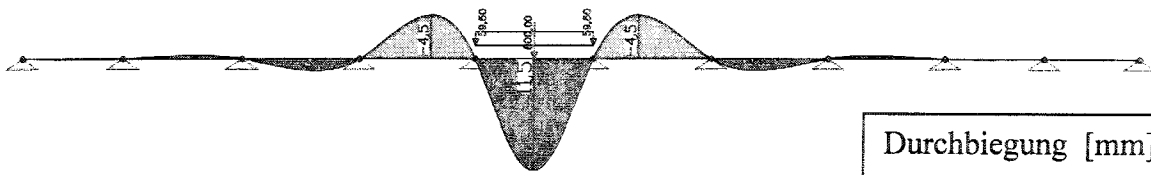


Abbildung 2.6: Durchbiegung infolge Verkehrslast (LF1)



Durchbiegung [mm]
Belastung [kN/m; kN]

Abbildung 2.7: Durchbiegung infolge Verkehrslast (LF2)

Lastfall 1 (LF1)

Im LF1 ergibt sich eine maximale Durchbiegung von $f_5 = 13,2$ mm in Feld 5, in den benachbarten Feldern ergeben sich Durchbiegungen von $f_4 = -7,6$ mm bzw. $f_6 = -7,5$ mm. Die ursprüngliche Länge des Spanngliedes in Feld 5 beträgt:

$$l_{i,t=0} = \frac{52,00 \text{ m}}{\cos \alpha} \quad (2)$$

$$\alpha = \arctan \frac{2,05 \text{ m}}{26,00 \text{ m}} = 4,508^\circ \quad (3)$$

$$l_{i,t=0} = \frac{52,00 \text{ m}}{\cos 4,508^\circ} = 52,16138 \text{ m} \quad (4)$$

Hierin sind:

$l_{i,t=0}$ Länge der Spannglieder je Feld ohne Belastung

α Umlenkwinkel

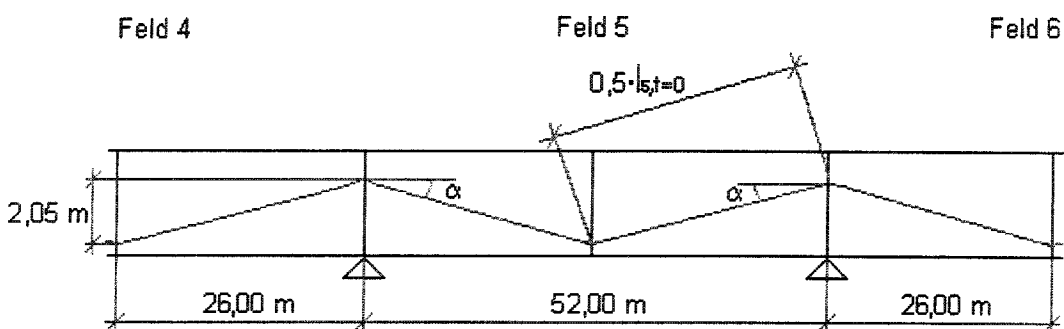


Abbildung 2.8: Brückenlängsschnitt der Talbrücke Münchberg (Auszug)

Die aus den Verkehrslasten resultierende Längenänderung der Litzen lässt sich näherungsweise wie folgt berechnen:

$$l_{5,t=1} = \frac{52,00 \text{ m}}{\cos(\arctan \frac{2,05 \text{ m} + f_5}{26,00 \text{ m}})} = 52,16347 \text{ m} \quad (5)$$

$$l_{4,t=1} = \frac{52,00 \text{ m}}{\cos(\arctan \frac{2,05 \text{ m} + f_4}{26,00 \text{ m}})} = 52,16019 \text{ m} \quad (6)$$

$$\delta l_5 = l_{5,t=1} - l_{5,t=0} = 2,082 \text{ mm} \quad (7)$$

$$\delta l_4 = l_{4,t=1} - l_{4,t=0} = -1,193 \text{ mm} \quad (8)$$

Hierin sind:

f_4 Durchbiegung in Feld 4 (Abbildung 2.6)

f_5 Durchbiegung in Feld 5 (Abbildung 2.6)

$l_{4,t=1}$ Länge der Spannglieder in Feld 4 (bzw. Feld 6) unter Verkehrslast

$l_{5,t=1}$ Länge der Spannglieder in Feld 5 unter Verkehrslast

δl_4 Längenänderung in Feld 4 (bzw. in Feld 6)

δl_5 Längenänderung in Feld 5

Unter der vorgegebenen Laststellung wirken sich die Längenänderungen der Spannlitzen auf das jeweilige Feld und auf die Hälfte der beiden benachbarten Felder aus (Abbildung 2.5).

Aus der Verlängerung der Litzen in Feld 5 um 2,082 mm und die Verkürzung der Litzen in den Feldern 4 und 6 um -1,193 mm lassen sich mit den Ergebnissen aus den Gleichungen (4), (7) und (8) die Spannungsänderungen in den Litzen berechnen:

Feld 5:

$$\varepsilon = \frac{\delta l_5}{l_{5,t=0}} = \frac{2,082 \text{ mm}}{52,16138 \text{ m}} = 3,99146 \cdot 10^{-5} \quad (9)$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = 3,99146 \cdot 10^{-5} \cdot 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 7,98 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (10)$$

$$F = \sigma \cdot A = 7,98 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 4 \cdot 150 \text{ mm}^2 = 4,79 \text{ kN} \quad (11)$$

Felder 4 und 6:

$$\varepsilon = \frac{\delta l_4}{l_{4,t=0}} = \frac{-1,193 \text{ mm}}{52,16138 \text{ m}} = -2,28627 \cdot 10^{-5} \quad (12)$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = -2,28627 \cdot 10^{-5} \cdot 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = -4,57 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (13)$$

$$F = \sigma \cdot A = -4,57 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 4 \cdot 150 \text{ mm}^2 = -2,74 \text{ kN} \quad (14)$$

Hierin sind:

- ε Dehnungsänderung im Spannglied
- σ Spannungsänderung im Spannglied
- E E-Modul der Spannlitzen
- F Änderung der Kraft im Spannglied je Spannband
- A Querschnittsfläche Spannlitze

Im Brückenquerschnitt sind jeweils vier Spannblätter übereinander angeordnet (Abbildung 2.9). Da eine geringe Vorspannkraft zu einer geringeren Reibungskraft zwischen PE und Litzen an den Umlenkstellen, nicht aber zu geringeren Spannungsänderungen durch zusätzliche Dehnung in den Litzen führt, wird im Folgenden auf der sicheren Seite liegend die Annahme getroffen, dass die zulässige Vorspannung von 743,5 kN pro Band unter Verkehrsbelastung zu 90% ausgenutzt wird.

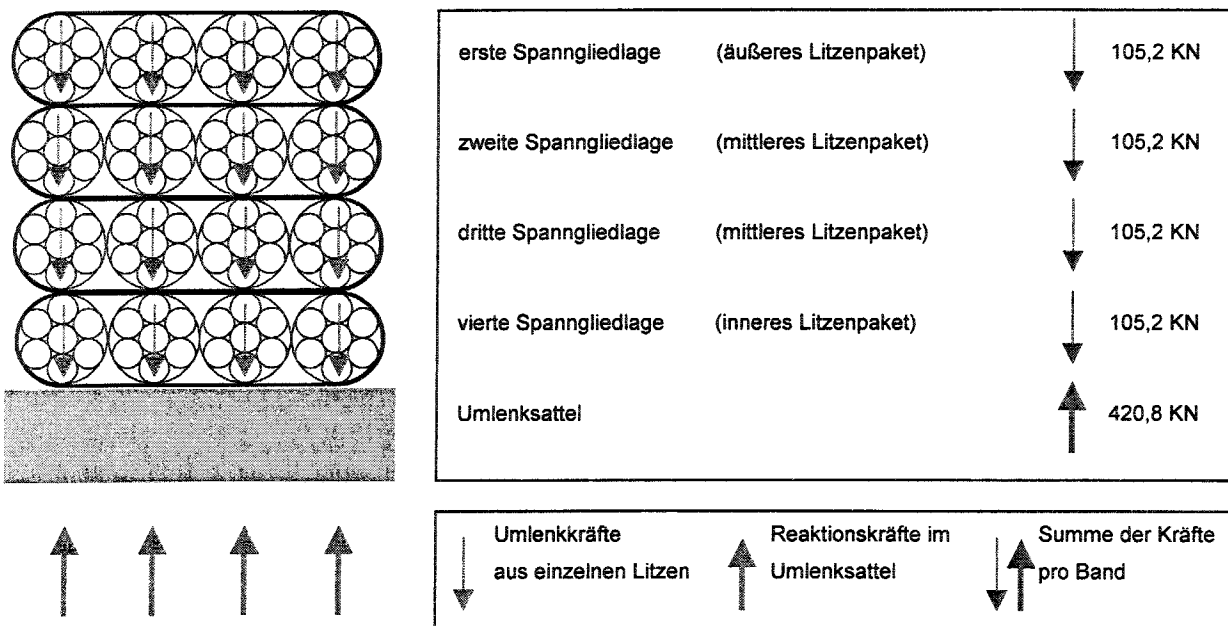


Abbildung 2.9: Lage der Spannblätter und Umlenkkräfte

Laut Zulassung weisen die Spannglieder zwischen Litzen und PE-Mänteln einen Reibungskoeffizienten von $\mu = 0,06$ auf. In den folgenden Rechnungen wurde zusätzlich mit einem Rei-

bungskoeffizienten von $\mu = 0,04$ gerechnet, die Ergebnisse sind jeweils in Klammern angegeben. Es ergeben sich:

Erste Spanngliedlage:

$$F = 0,9 \cdot 743,5 \text{ kN} = 669,2 \text{ kN} \quad (15)$$

$$U = 2 \cdot F \cdot \sin \alpha = 2 \cdot 669,2 \text{ kN} \cdot \sin 4,508^\circ = 105,2 \text{ kN} \quad (16)$$

$$R_1 = \mu \cdot U = 0,06 \cdot 105,19 \text{ kN} = 6,3 \text{ kN} \quad (4,2 \text{ kN}) \quad (17)$$

Hierin sind:

F Vorspannkraft

U Umlenkkraft

R₁ Max. Reibungskraft in der ersten Spanngliedlage

Diese Reibungskraft von 6,3 kN (4,2 kN) ergibt sich im äußeren Litzenpaket. An dieser Stelle ist die auf die Spannglieder wirkende Umlenkkraft und damit die Reibungskraft am geringsten.

Betrachtet man die unteren der vier übereinander eingebauten Bänder, so ergibt sich durch Addition der Vorspannkraft in den Bändern die größte Umlenkkraft. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass in der zweiten, dritten und vierten Spanngliedlage sowohl an der Unterseite als auch an der Oberseite der Litzen ein Kontakt zwischen Litzen und PE-Mänteln unter der Querpressung erfolgt. In der zweiten Spanngliedlage entsteht demnach eine Reibungskraft an der Oberseite der Litzen durch die Umlenkkraft des Spannbandes in der ersten Spanngliedlage, an der Unterseite der Litzen durch die Umlenkkraft aus der ersten und der zweiten Spanngliedlage. Es ergibt sich eine höhere Reibungskraft von:

Zweite Spanngliedlage:

$$F = 0,9 \cdot 743,5 \text{ kN} = 669,2 \text{ kN} \quad (18)$$

$$U = 2 \cdot F \cdot \sin \alpha = 2 \cdot 669,2 \text{ kN} \cdot \sin 4,508^\circ = 105,2 \text{ kN} \quad (19)$$

$$R_2 = \mu \cdot (1 + 2) \cdot U = 0,06 \cdot 3 \cdot 105,2 \text{ kN} = 18,9 \text{ kN} \quad (12,6 \text{ kN}) \quad (20)$$

Hierin ist:

R₂ Max. Reibungskraft in der zweiten Spanngliedlage

Dritte Spanngliedlage:

$$F = 0,9 \cdot 743,5 \text{ kN} = 669,2 \text{ kN} \quad (21)$$

$$U = 2 \cdot F \cdot \sin \alpha = 2 \cdot 669,2 \text{ kN} \cdot \sin 4,508^\circ = 105,2 \text{ kN} \quad (22)$$

$$R_3 = \mu \cdot (2 + 3) \cdot U = 0,06 \cdot 5 \cdot 105,2 \text{ kN} = 31,6 \text{ kN} \quad (21,0 \text{ kN}) \quad (23)$$

Hierin ist:

R_3 Max. Reibungskraft in der dritten Spanngliedlage

Vierte Spanngliedlage:

$$F = 0,9 \cdot 743,5 \text{ kN} = 669,2 \text{ kN} \quad (24)$$

$$U = 2 \cdot F \cdot \sin \alpha = 2 \cdot 669,2 \text{ kN} \cdot \sin 4,508^\circ = 105,2 \text{ kN} \quad (25)$$

$$R_4 = \mu \cdot (3 + 4) \cdot U = 0,06 \cdot 7 \cdot 105,2 \text{ kN} = 44,2 \text{ kN} \quad (29,5 \text{ kN}) \quad (26)$$

Hierin ist:

R_4 Max. Reibungskraft in der vierten Spanngliedlage

Betrachtet wird im Folgenden die Situation im äußeren Litzenpaket. Vor dem Nachrutschen der Litzen über den Umlenksattel, der Relativverschiebung zwischen PE-Mantel und Litze, ergibt sich aus den Gleichungen (11), (14) und (17) die in Abbildung 2.10 gezeigte Kräfteverteilung:

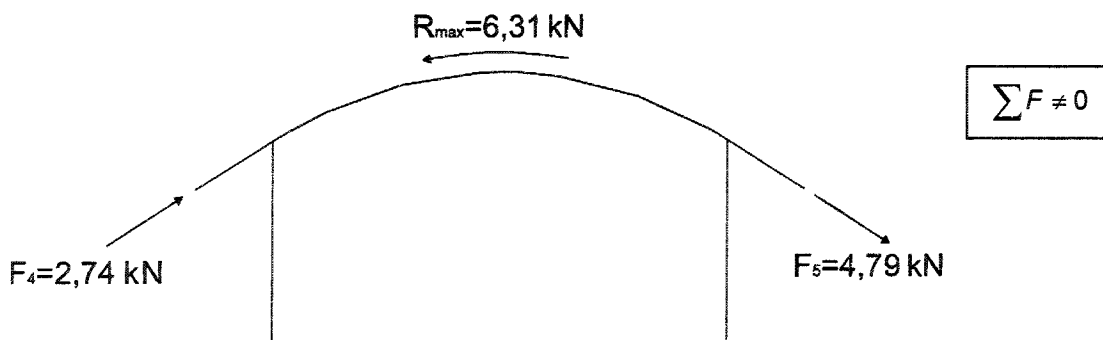


Abbildung 2.10: Kräfteverteilung vor dem Nachrutschen

Durch das Kräftegleichgewicht wird die Litze von links nach rechts über den Sattel gezogen, bis sich ein Kräftegleichgewicht einstellt. Die Veränderung der Kräfte während des Rutschvorgangs wird vernachlässigt. Geht man von einer gleichmäßigen Verteilung der Reibungskraft über den Umlenksattel aus, so stellt sich nach der Relativverschiebung folgende Kräfteverteilung ein:

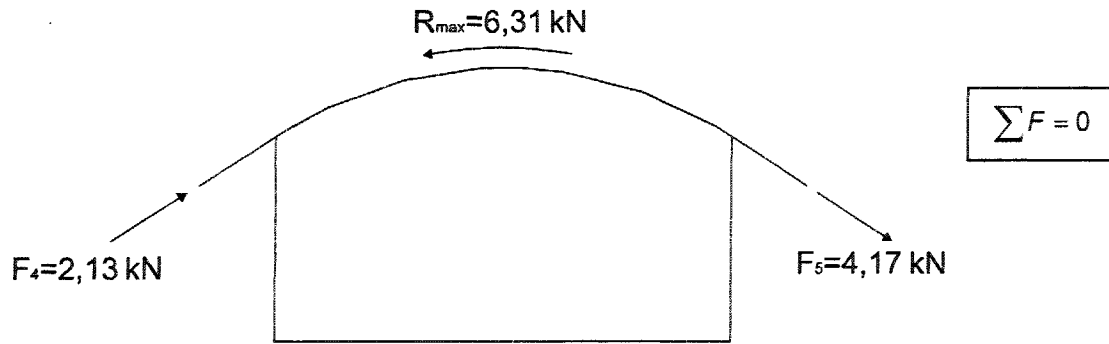


Abbildung 2.11: Kräfteverteilung nach Einstellen des Gleichgewichts

Auf beiden Seiten ergibt sich somit infolge der Verschiebung eine Abnahme der Kraft in den Litzen um $0,6108 \text{ kN}$. Diese Kraft kann in eine Längenänderung der Litze umgerechnet werden. Sie entspricht dem Betrag, um den die Litzen infolge Verkehrslast über den Umlenksattel gezogen werden.

$$\delta F = \frac{4,79 \text{ kN} + 2,74 \text{ kN} - 6,31 \text{ kN}}{2} = 0,61 \text{ kN} \quad (1,7 \text{ kN}) \quad (27)$$

$$\delta \sigma = \frac{\delta F}{A} = \frac{0,61 \text{ kN}}{4 \cdot 150 \text{ mm}^2} = 1,02 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (2,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}) \quad (28)$$

$$\delta l = \frac{l_{s,t=1}}{2} \cdot \frac{\sigma}{E} = \frac{26,08170 \text{ m} \cdot 1,02 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,133 \text{ mm} \quad (0,36 \text{ mm}) \quad (29)$$

Hierin sind:

δF Abnahme der Kraft in den Litzen am Umlenksattel

$\delta \sigma$ Spannungsänderung in den Litzen durch Nachrutschen der Spannlitzen

δl Betrag des Nachrutschens

Da beim Übergang der Verkehrslast in das benachbarte Feld die selben Verschiebungen auftreten, ist zur Ermittlung der Gesamtverschiebung der errechnete Betrag zu verdoppeln. Danach ergibt sich für die hier getroffenen Rechenannahmen in der ersten Spanngliedlage eine maximale Relativverschiebung infolge Verkehrslast von:

$$\delta l = 0,133 \text{ mm} \cdot 2 = 0,266 \text{ mm} \quad (0,72 \text{ mm})$$

Betrachtet man die Situation in der zweiten Spanngliedlage, so stellen sich infolge der erhöhten Reibungskraft folgende Werte ein:

$$\delta F = \frac{4,79 \text{ kN} + 2,74 \text{ kN} - 18,93 \text{ kN}}{2} = -5,63 \text{ kN} < 0 \quad (-2,48 \text{ kN} < 0) \quad (30)$$

Hierin ist:

δF Abnahme der Kraft in den Spannlitzen durch Nachrutschen der Litzen über den Umlenksattel

Nach Gleichung (30) ist die maximale Reibungskraft größer als die Kraftdifferenzen in den Litzen, d.h. es stellt sich für die hier untersuchten Randbedingungen keine Relativverschiebung ein.

Lastfall 2 (LF2)

Im LF2 stellt sich eine maximale Durchbiegung in Feld 5 von 11,5 mm ein, in den Feldern 4 und 6 ergeben sich Durchbiegungen von jeweils -4,5 mm (Abbildung 2.7). Nach Gleichung (4) beträgt die Länge der Spannlitze ohne Verkehrslasten 52,16138 m. Durch die Laststellung im LF2 verlängern sich die Litzen in Feld 5, sie verkürzen sich in den Feldern 4 und 6. Längenänderungen in den übrigen Feldern werden vernachlässigt, da ihr Einfluss auf die Relativverschiebungen sehr gering ist. Um das durch die Längenänderung entstandene Kräftegleichgewicht zwischen den Feldern zu kompensieren, können die Litzen nicht - wie im LF1 - nur aus der Hälfte der unmittelbar benachbarten Felder nachrutschen, sondern auch aus den weiter entfernten Bereichen (Abbildung 2.5). Nachrutschen können die Litzen so weit, bis die Reibungskraft zwischen Litzen und Mänteln größer ist als die Kräftedifferenz der Litzen in den unmittelbar benachbarten Feldern.

Die aus den Verkehrslasten resultierende Längenänderung der Litzen lässt sich wie folgt berechnen:

$$l_{5,t=1} = \frac{52,00 \text{ m}}{\cos(\arctan \frac{2,05 \text{ m} + f_5}{26,00 \text{ m}})} = 52,16320 \text{ m} \quad (31)$$

$$l_{4,t=1} = \frac{52,00 \text{ m}}{\cos(\arctan \frac{2,05 \text{ m} + f_4}{26,00 \text{ m}})} = 52,16068 \text{ m} \quad (32)$$

$$\delta l_5 = l_{5,t=1} - l_{5,t=0} = 1,813 \text{ mm} \quad (33)$$

$$\delta l_4 = l_{4,t=1} - l_{4,t=0} = -0,707 \text{ mm} \quad (34)$$

Hierin sind:

$f_{4,6}$ Durchbiegung in den Feldern 4 und 6 (Abbildung 2.7)

f_5 Durchbiegung in Feld 5 (Abbildung 2.7)

$\delta l_{4,6}$ Längenänderung in den Feldern 4 und 6

δl_5 Längenänderung in Feld 5

Wie im LF1 können auch im LF2 zu den Längenänderungen äquivalente Spannungen und Kräfte in den Litzen berechnet werden:

Feld 5:

$$\varepsilon = \frac{\delta l_5}{l_{5,t=0}} = \frac{1,813 \text{ mm}}{52,16138 \text{ m}} = 3,4755 \cdot 10^{-5} \quad (35)$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = 3,4755 \cdot 10^{-5} \cdot 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 6,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (36)$$

$$F = \sigma \cdot A = 6,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 4 \cdot 150 \text{ mm}^2 = 4,17 \text{ kN} \quad (37)$$

Feld 4 und 6:

$$\varepsilon = \frac{\delta l_4}{l_{4,t=0}} = \frac{-0,707 \text{ mm}}{52,16138 \text{ m}} = -1,3547 \cdot 10^{-5} \quad (38)$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = -1,3547 \cdot 10^{-5} \cdot 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = -2,71 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (39)$$

$$F = \sigma \cdot A = -2,71 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 4 \cdot 150 \text{ mm}^2 = -1,62 \text{ kN} \quad (40)$$

Hierin sind:

ε Dehnungszuwachs im Spannglied

σ Spannungszuwachs im Spannglied

E E-Modul der Spannlitzen

F Zuwachs der Kraft im Spannglied

A Querschnittsfläche Spannlitze

Für LF1 wurde bereits die maximale Reibungskraft in der ersten Spanngliedlage zu 6,31 kN (4,2 kN) berechnet. Die Differenz zwischen den treibenden Kräften infolge Längenänderung der Litzen und haltender Kraft durch die Reibung am Umlenksattel beträgt pro Seite:

$$\delta F = \frac{4,17 \text{ kN} + 1,62 \text{ kN} - 6,31 \text{ kN}}{2} = -0,26 \text{ kN} < 0 \quad (0,8 \text{ kN} > 0) \quad (41)$$

Somit ist die Reibungskraft bei einem angenommenen Reibungsbeiwert von $\mu = 0,06$ groß genug, um die Kräfteänderung aus den Litzendehnungen aufzunehmen. Die Kräfteverteilung am Umlenksattel ist in der folgenden Abbildung 2.12 dargestellt:

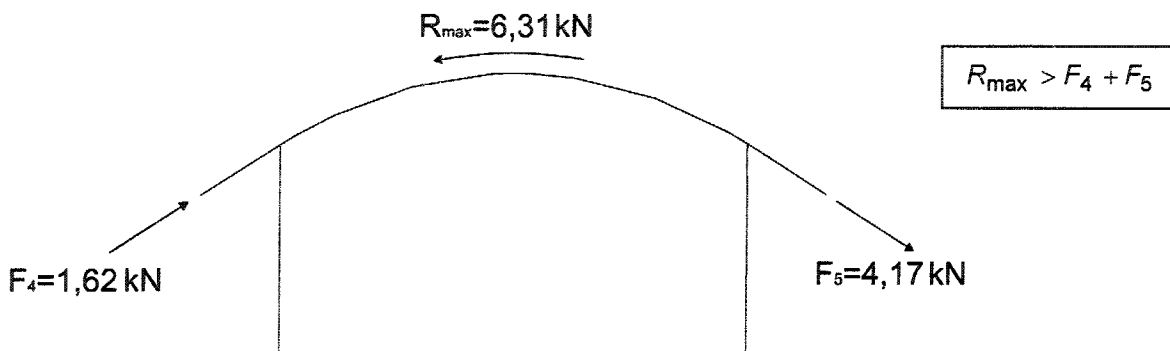


Abbildung 2.12: Kräfteverteilung am Umlenksattel

Da die Kräfteänderung in den Litzen kleiner ist als die maximale Reibungskraft an den Umlenkstellen, erfahren die Litzen rechnerisch keine Relativverschiebungen zu den PE-Schutzhüllen. Bei einem Reibungsbeiwert von $\mu = 0,04$ ist die Reibungskraft kleiner als die Kräfteänderung aus den Litzendehnungen, die Differenz ist jedoch kleiner als im Lastfall LF 1. Somit wird LF 2 nicht maßgebend.

2.4.2 Relativverschiebungen infolge Temperaturwechsel

Verändert sich die Temperatur über den Querschnitt der Brücke konstant, so tritt eine reine Verformung in Richtung der Brückenlängsachse auf. Hieraus folgt, dass sich Litzen und PE-Hüllrohre gleichermaßen verformen und somit keine Relativverschiebungen auftreten.

Erwärmt sich die Oberseite des Brückenquerschnitts (z.B. durch Sonneneinstrahlung), während die Temperatur an der Unterseite annähernd konstant bleibt, treten auch bei statisch unbestimmter Lagerung Verformungen auf. Die für die Bemessung von Hohlkastenbrücken anzusetzende Temperaturdifferenz ist nach DIN-Fachbericht 101 [11] von der Dicke des Fahrbahnbelags abhängig:

$$\delta T_M = (\delta T_{M+} - \delta T_{M-}) \cdot k_{sur} = 15^\circ\text{K} \cdot k_{sur} \quad (42)$$

Hierin sind:

δT_M Temperaturunterschied zwischen Ober- und Unterseite des Hohlkastens

δT_{M+} Temperaturunterschied zwischen Oberseite und Mitte des Hohlkastens

δT_{M-} Temperaturunterschied zwischen Unterseite und Mitte des Hohlkastens

k_{sur} Faktor zur Berücksichtigung der Fahrbahnbelagdicke

Bei einer Fahrbahnbelagdicke von 80 mm beträgt der Faktor k_{sur} 0,82, bei Belagdicken von 0 bis 600 mm kann er zwischen 0,6 und 1,5 variieren. Für die weitere Berechnung wurde auf der sicheren Seite liegend ein Temperaturunterschied von 20 K angenommen, die daraus resultierende Verformungskurve der Talbrücke Münchberg ist Abbildung 2.13 zu entnehmen.

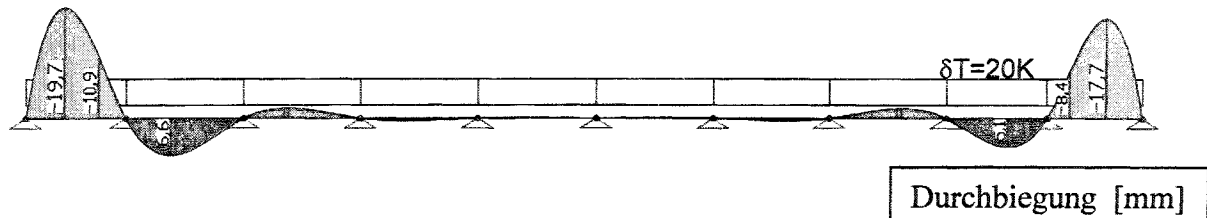


Abbildung 2.13: Durchbiegung infolge Temperatur $T_o - T_u = 20K$

Die maximalen Verformungen treten wegen der gelenkigen Lagerung am Brückende in Feld 1 auf, sie betragen -19,7 mm. Im benachbarten Feld 2 betragen sie noch 6,6 mm. Die Relativverschiebungen lassen sich wie in den Lastfällen Verkehr bestimmen. Zu beachten ist, dass die Litzen bei einer Verkürzung in Feld 1 nur einseitig aus den rechts anschließenden Feldern nachrutschen können. Die Länge der Spannlitzen in Feld 1 ohne Belastung ergibt sich zu:

$$l_{1,t=0} = \frac{44,25 \text{ m}}{\cos \alpha} \quad (43)$$

$$\alpha = \arctan \frac{2,05 \text{ m}}{22,125 \text{ m}} = 5,294^\circ \quad (44)$$

$$l_{1,t=0} = \frac{44,25 \text{ m}}{\cos 5,294^\circ} = 44,43954 \text{ m} \quad (45)$$

$$l_{2,t=0} = \frac{52,00 \text{ m}}{\cos 4,508^\circ} = 52,16138 \text{ m} \quad (46)$$

Hierin sind:

$l_{1,t=0}$ Länge des Spanngliedes ohne Belastung

$l_{2,t=0}$ Länge des Spanngliedes ohne Belastung

α Umlenkwinkel an Stütze 2

Die Längenänderung der Litzen infolge Temperaturbeanspruchung ergibt sich aus:

$$l_{1,t=1} = \frac{44,25 \text{ m}}{\cos(\arctan \frac{2,05 \text{ m} + f_1}{22,125 \text{ m}})} = 44,43592 \text{ m} \quad (47)$$

$$l_{2,t=1} = \frac{52,00 \text{ m}}{\cos(\arctan \frac{2,05 \text{ m} + f_2}{26,00 \text{ m}})} = 52,16242 \text{ m} \quad (48)$$

$$\delta l_1 = l_{1,t=1} - l_{1,t=0} = -3,620 \text{ mm} \quad (49)$$

$$\delta l_2 = l_{2,t=1} - l_{2,t=0} = 1,043 \text{ mm} \quad (50)$$

Hierin sind:

f_1 Durchbiegung in Feld 1 (Abbildung 2.13)

f_2 Durchbiegung in Feld 2 (Abbildung 2.13)

δl_1 Längenänderung in Feld 1

δl_2 Längenänderung in Feld 2

Die äquivalenten Spannungen und Kräfte in den Litzen betragen:

Feld 1:

$$\varepsilon = \frac{\delta l_1}{l_{1,t=0}} = \frac{-3,620 \text{ mm}}{44,43954 \text{ m}} = -8,146250 \cdot 10^{-5} \quad (51)$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = -8,146250 \cdot 10^{-5} \cdot 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = -16,29 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (52)$$

$$F = \sigma \cdot A = -16,29 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 4 \cdot 150 \text{ mm}^2 = -9,78 \text{ kN} \quad (53)$$

Feld 2:

$$\varepsilon = \frac{\delta l_2}{l_{2,t=0}} = \frac{1,043 \text{ mm}}{52,1614 \text{ m}} = 1,999563 \cdot 10^{-5} \quad (54)$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = 1,9996 \cdot 10^{-5} \cdot 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 4,00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (55)$$

$$F = \sigma \cdot A = 4,00 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 4 \cdot 150 \text{ mm}^2 = 2,40 \text{ kN} \quad (56)$$

Hierin sind:

ε Dehnungszuwachs im Spannglied

σ Spannungszuwachs im Spannglied

E E-Modul der Spannlitzen

F Zuwachs der Kraft im Spannglied

A Querschnittsfläche Spannlitze

In Kapitel 2.4.1 wurde für LF1 bereits die maximale Reibungskraft in der ersten Spanngliedlage zu 6,31 kN (4,2 kN) berechnet. Die Kräftedifferenz am Umlenksattel zwischen treibender und haltender Kraft beträgt:

$$\delta F = \frac{9,77 \text{ kN} + 2,39 \text{ kN} - 6,31 \text{ kN}}{2} = 2,93 \text{ kN} \quad (4,0 \text{ kN}) \quad (57)$$

Die Kräfteverteilungen vor bzw. nach dem Nachrutschen ergeben sich mit den Gleichungen (53) und (56) und sind in den Abbildungen 2.14 und 2.15 dargestellt:

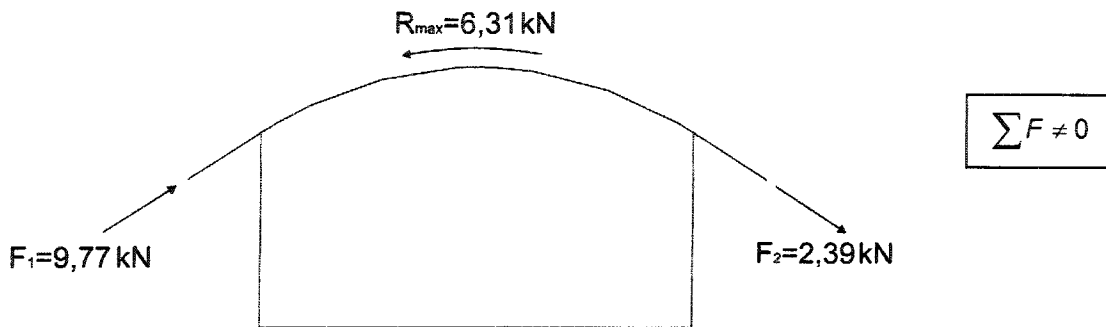


Abbildung 2.14: Kraftverteilung vor dem Nachrutschen

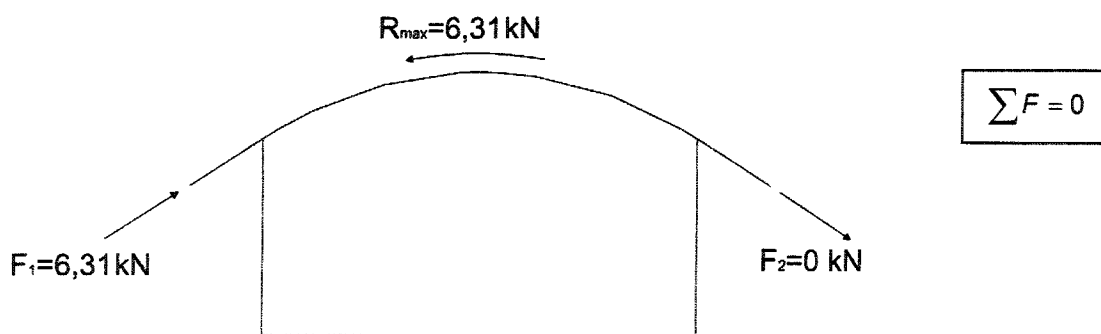


Abbildung 2.15: Kraftverteilung nach Einstellen des Gleichgewichts

$$\sigma = \frac{\delta F}{A} = \frac{2,93 \text{ kN}}{4 \cdot 150 \text{ mm}^2} = 4,89 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (6,6 \text{ kN}) \quad (58)$$

$$\delta l = \frac{l_{1,t=1}}{2} \cdot \frac{\sigma}{E} = \frac{22,22160 \text{ m} \cdot 4,89 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,543 \text{ mm} \quad (0,74 \text{ mm}) \quad (59)$$

Hierin ist:

δF Abnahme der Kraft in den Spannritzen durch Nachrutschen der Litzen über den Umlenksattel

Nach Gleichung (59) ergibt sich eine Relativverschiebung von **0,543 mm (0,74 mm)**. Während ein Temperaturunterschied von 20 K zwischen Ober- und Unterseite der Brücke durchaus realistisch ist, kann jedoch von wesentlich geringeren Lastspielzahlen als bei Verkehrsbelastungen ausgegangen werden. Selbst mit der deutlich auf der sicheren Seite liegenden Annahme von 100 Tagen mit einem $\Delta T = 20 \text{ K}$, ergeben sich bei einer rechnerischen Nutzungsdauer von 100 Jahren maximal:

$$n = 100 \cdot 100 = 10000 \text{ Lastwechsel} \quad (60)$$

In der zweiten Spanngliedlage kann nach Gleichung (20) eine maximale Reibungskraft von $R = 18,93 \text{ kN}$ aufgebaut werden. Hiermit ergibt sich eine Kraftdifferenz von:

$$\delta F = \frac{9,78 \text{ kN} + 2,40 \text{ kN} - 18,93 \text{ kN}}{2} = -3,38 \text{ kN} < 0 \quad (-0,21 \text{ kN} < 0) \quad (61)$$

Hierin ist:

δF Abnahme der Kraft in den Spannlitzen durch Nachrutschen der Litzen über den Umlenksattel

Die maximale Reibungskraft ist größer als die Kräftedifferenz in den Spannlitzen, somit ergibt sich rechnerisch keine Relativverschiebung in der zweiten Spanngliedlage. Die Reibungskräfte in der dritten und vierten Spanngliedlage sind ebenfalls größer als die in der ersten Spanngliedlage. Damit ist unter den hier getroffenen Annahmen auch in diesen Lagen nicht mit einer Relativverschiebung zu rechnen.

2.4.3 Bewertung der Ergebnisse

Den vorgestellten Berechnungen liegen eine Reihe von Vereinfachungen zu Grunde und Annahmen, die kritisch zu bewerten sind. Die Verformungen der Brücke werden an einem vereinfachten Stabtragwerk bestimmt, die Reibungskräfte an den Umlenkstellen werden als punktförmig angreifend angenommen, die Lasten wirken statisch und zusätzliche Beanspruchungen durch eventuell auftretende Schwingungen der Brücke infolge der Verkehrslasten werden vernachlässigt. Außerdem lässt die vorgestellte Betrachtung elastische Verformung bis zum Überschreiten der Reibungskraft außer Betracht.

Um gesicherte Werte für die auftretenden Relativverschiebungen zu erhalten, sind Messungen an den Spanngliedern bestehender extern vorgespannter Brücken erforderlich.

In [13] wird auf die Berechnung von Bundesbahnbrücken verwiesen, bei denen Relativverschiebungen an Umlenkstellen von etwa 0,4 mm bestimmt wurden, entsprechende Messungen an der mit Monolitzen vorgespannten Brücke Verbindungskurve Bruchsal ergaben geringere Werte. In dieser Brücke liegen die Litzen an den Umlenkstellen nebeneinander, dies entspricht bei Spannbändern der Situation in der ersten Spanngliedlage.

2.5 Umgebungstemperatur der Spannglieder

Um eine Aussage über die zu erwartenden Temperaturen im Innenraum einer Hohlkastenbrücke zu treffen, werden die in [14] veröffentlichten Ergebnisse herangezogen. Danach ist von folgenden Grenzwerten auszugehen:

- Die höchste Bauwerksmitteltemperatur für Hohlkastenbrücken mit üblichen Abmessungen beträgt in Deutschland etwa $\vartheta_{\max} = 40 \text{ °C}$.
- Die niedrigste Bauwerksmitteltemperatur von Hohlkastenbrücken kann Werte von etwa $\vartheta_{\min} = -20 \text{ °C}$ erreichen.

Diese Angaben lassen sich abhängig vom Aufbau und der Umgebung der betrachteten Brücke einschränken. Hauptparameter sind unter anderem der Straßenbelag, eventuelle Beschattung der Brücke und die Bauteildicken des Kastenquerschnitts (Abbildung 2.16).

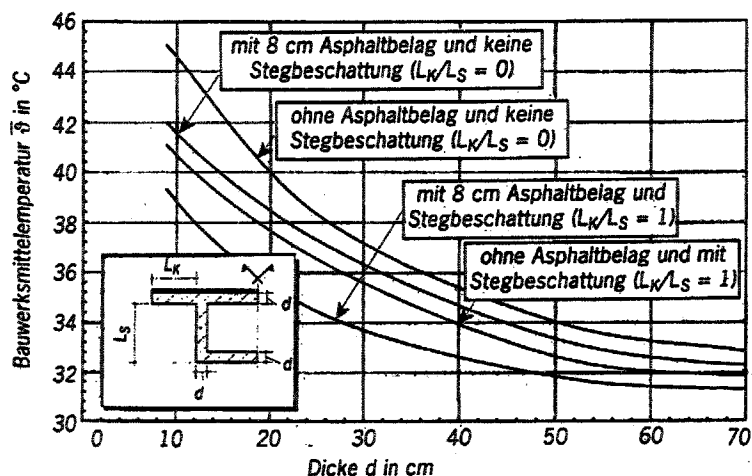


Abbildung 2.16: Bauwerksinnentemperatur in Abhängigkeit von der Bauwerksdicke [14]

Die tiefste zu erwartende Innentemperatur im Brückenbauwerk stimmt in etwa mit der Außenlufttemperatur überein und ist somit weitestgehend unabhängig vom Aufbau des Querschnitts. Sie beträgt $\vartheta_{\min} = -20 \text{ °C}$.

2.6 Verdrillung oder Translation

Verschieben sich die Litzen an einer Umlenkstelle relativ zum PE-Mantel, so kann dies auf verschiedene Arten geschehen (Abbildung 2.17):

- (1) Die Litzen bewegen sich translatorisch entlang ihrer Längsachse.
- (2) Die Litzen bewegen sich translatorisch diagonal zu ihrer Längsachse.
- (3) Die Litzen drehen sich schraubenartig in die inneren Schutzhüllen ein.

Bei einer Bewegung nach (1) folgen die Litzen ohne Rotationsbewegung dem Verlauf der inneren Hüllrohre. Bei einer Bewegung translatorisch diagonal zu ihrer Längsachse (2) folgen die Litzen den Riefen auf der Unterseite der inneren Hüllrohre und verlassen ihre ursprüngliche Lage, indem sie sich seitlich in die PE-Hüllrohre eindrücken, oder diese zur Seite drücken. Bei einer Bewegung nach (3) folgen die Litzen den Riefen auf Ober- und Unterseite der inneren Schutzhüllen, die wie ein Gewinde wirken, in dem sich die Litzen drehen können.

Bei Vorversuchen an etwa drei Meter langen Spannbändern in der eigenen Kleinmodellversuchsanlage [5] wurde bei einer aufgebrachten Vorspannung von ca. 40 kN pro Litze, einer Querbelastung von 100 kN auf einer Länge von 20 cm (entspricht der maximalen Umlenkraft eines 3000 kN-Spanngliedes mit 6,00 m Umlenkradius) und einer Relativverschiebung von 1 mm eine schraubenartige Bewegung beobachtet. Wie sich die Litzen im Bauwerk verhalten können, soll im Folgenden untersucht werden.

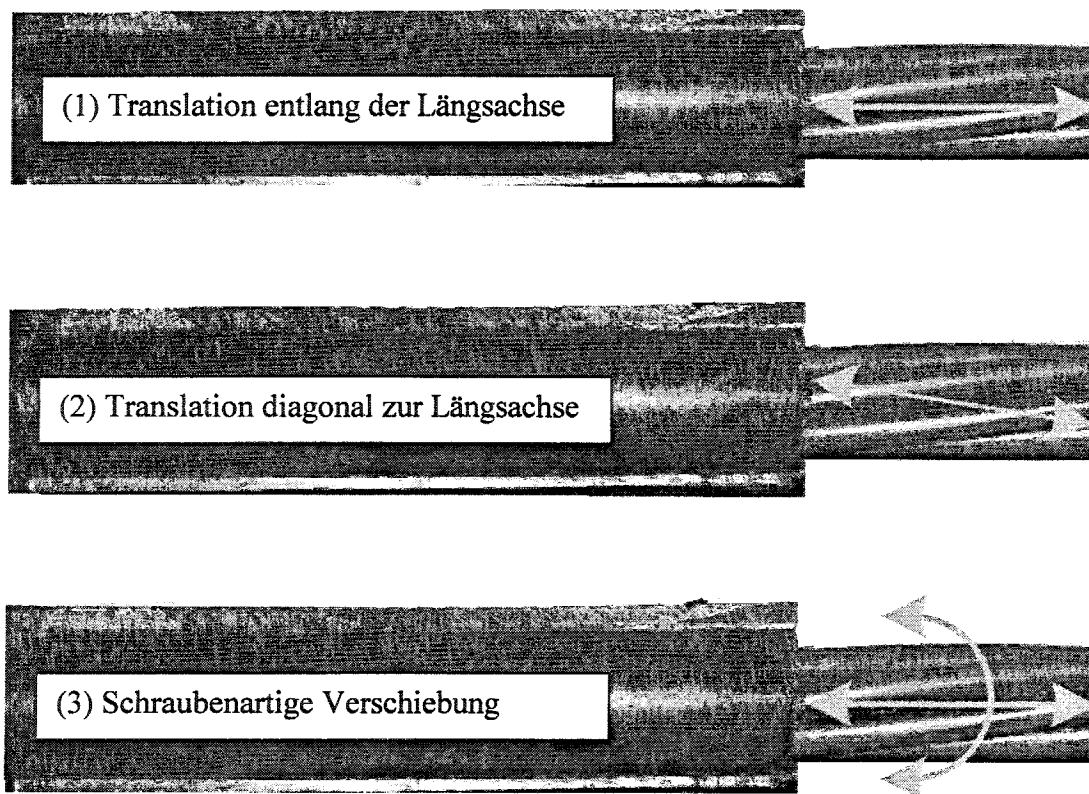
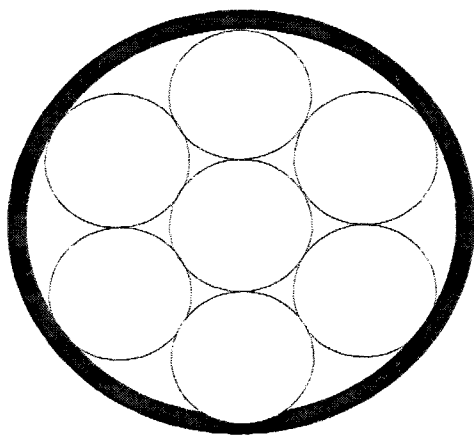


Abbildung 2.17: Bewegungsmöglichkeiten der Litzen im Bauwerk

Nach dem Vorspannen der Spannglieder drücken sich die Litzen aufgrund der auf die PE-Mäntel wirkenden Umlenkkräfte in diese ein und es kommt zu einer Riefenbildung auf der Innenseite der Schutzhüllen. Diese Riefen entstehen im äußeren Litzenband auf der Unterseite der PE-Mäntel, in den anderen Bändern auf Ober- und Unterseite. Aufgrund der spiralförmig angeordneten äußeren Drähte der Litzen verlaufen die Riefen diagonal zur Längsachse der Litzen.

Litze im äußeren Litzenpaket



Litze in einem mittleren bzw.
im innern Litzenpaket

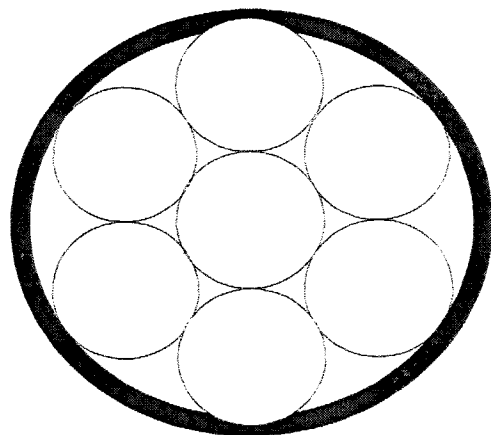


Abbildung 2.18: Riefenbildung an den PE-Mänteln

Werden die Litzen nun an der Umlenkstelle durch die sie umgebenden Mäntel gezogen, so können die Riefen im Polyethylen eine Führungswirkung übernehmen. Die äußeren Drähte der Litze folgen dann bei einer Verschiebung diesen Rillen und werden so von einer Bewegung entlang der Längsachse abgelenkt. Die dafür benötigten Kräfte werden von den Riefen im PE auf die Litzen übertragen (Abbildung 2.19). In der äußeren Spanngliedlage wirken sie ausschließlich auf der Unterseite (R_u), in den anderen Lagen auf Ober- (R_o) und Unterseite (R_u) der PE-Ummantelung. Als U_o wird die Umlenkraft aus oberhalb gelegenen Litzen bezeichnet, U stellt die Umlenkraft aus der betrachteten Litze dar und U_u die Reaktionskraft der Litzen auf die unterhalb liegende Litzenlage bzw. auf den Umlenksattel dar.

Litze im äußeren Litzenpaket

Litze in einem mittleren Litzenpaket

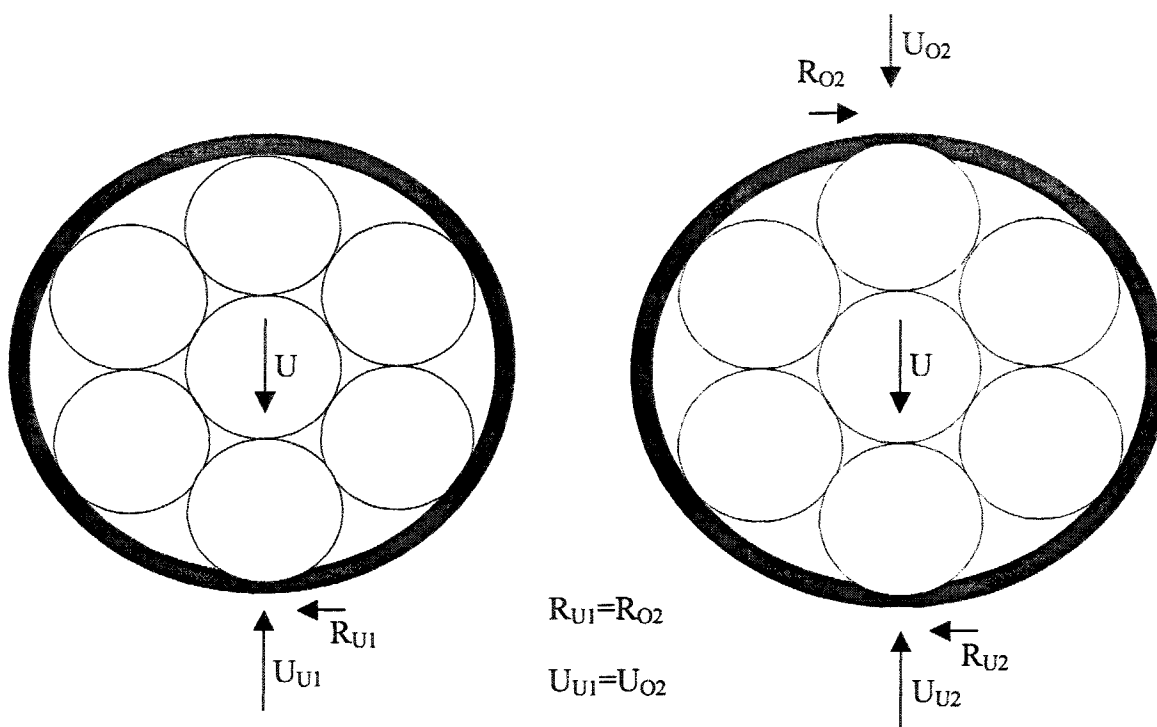


Abbildung 2.19: Kraftangriff an den Litzen

Um einen einfachen Ansatz für die Berechnung der an den Riefen maximal übertragbaren Kräfte zu finden, soll im Folgenden ausschließlich von einer Reibungskraft zwischen Litzen und PE ausgegangen werden. Die Schienenwirkung der Rillen kann zwar eine anfängliche Auslenkung bewirken, eine Erhöhung der anschließend wirkenden Reibungskräfte soll aber vernachlässigt werden. Die so ermittelten Kräfte sind folglich etwas geringer als die in Wirklichkeit zu erwartenden Kräfte.

Zunächst soll das Verhalten der Litzen in der äußeren Spanngliedlage betrachtet werden. Folgen die Litzen bei einer Relativverschiebung dem Verlauf der im PE entstandenen Rillen, so werden sie von ihrem ursprünglichen Verlauf durch den Hohlkasten der Brücke horizontal abgelenkt. Durch die aufgebrauchte Vorspannung entsteht eine Rückstellkraft F , die bei Umlenkung in der Mitte des Spanngliedes jeweils zur Hälfte von den Verankerungen aufgenommen wird.

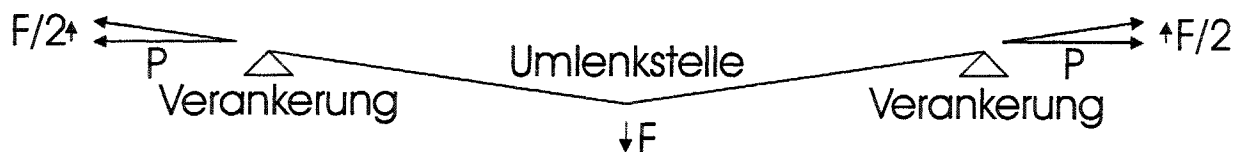


Abbildung 2.20: Rückstellkraft (Betrachtung des Grundrisses)

Ist diese Rückstellkraft geringer als die an den Umlenkstellen durch Reibung maximal wirkende Kraft, so kehren die Litzen nicht in ihre Ausgangsposition zurück, sondern behalten die ihnen aufgezwungene Verformung.

Die Reibungskraft an den Umlenkstellen ist linear abhängig von der quer zu den Spannbändern aufgebrauchten Kraft:

$$R_i = \mu \cdot U_i \quad (62)$$

Hierin sind:

R_i Reibungskraft

μ Reibungsbeiwert

U_i Umlenkkraft

Im Zulassungsbescheid der verwendeten Spannglieder wird ein Reibungsbeiwert für Verschiebungen zwischen Litzen und PE-Mäntel von $\mu = 0,06$ angegeben [15]. Die Umlenkkraft an der Talbrücke Münchberg beträgt unter voller Ausnutzung des Spannstahls pro Spanngliedband:

$$F = 743,5 \text{ kN} \quad (63)$$

$$\alpha = \arctan \frac{2,05 \text{ m}}{26,00 \text{ m}} = 4,508^\circ \quad (64)$$

$$U = 2 \cdot F \cdot \sin \alpha = 2 \cdot 743,5 \text{ kN} \cdot \sin 4,508^\circ = 116,88 \text{ kN} \quad (65)$$

Hierin sind:

F Vorspannkraft pro Litzenband

U Umlenkkraft im äußeren Litzenband

α Umlenkwinkel

Ein Spanngliedband besteht aus vier Litzen, somit ergibt sich eine maximale Reibungskraft pro Litze von:

$$R = \frac{1}{4} \cdot 0,06 \cdot 116,88 \text{ kN} = 1,75 \text{ kN} \quad (66)$$

Die durch die horizontale Auslenkung der Litzen entstehenden Rückstellkräfte sind von der Relativverschiebung der Litzen zu den PE-Schutzhüllen und der Geometrie der Litzen abhängig.

Für die externe Vorspannung der Talbrücke Münchberg wurden Spannglieder der Firma VBF Ratingen mit 0,6“ Litzen eingesetzt. Die Litzen bestehen aus jeweils 7 Drähten, von denen ein Draht geradlinig in der Längsachse der Litze liegt, während ihn die anderen Drähte spiralförmig umlaufen. Die äußeren Drähte verlaufen in einem Winkel von ca. 10° zur Längsachse des

Mitteldrahtes. Geht man von einer schräg zur Längsachse des Spanngliedes verlaufenden translatorischen Verschiebung aus, so kann man diese Verschiebung, wie in Abbildung 2.21 dargestellt, in die Richtungskomponenten senkrecht und parallel zur Längsachse der Litze aufteilen.

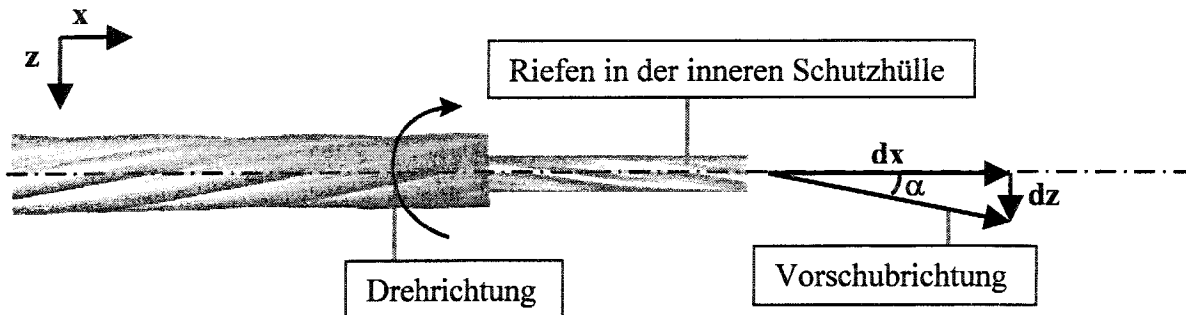


Abbildung 2.21: Verschiebungsbetrachtung am Umlenksattel

Eine Verschiebung in x-Richtung nach Gleichung (59) um ca. 0,5 mm an der mittleren Umlenkstelle verursacht eine Verschiebung in z-Richtung um:

$$\delta z = \delta x \cdot \tan \alpha = 0,543 \text{ mm} \cdot \tan(10^\circ) = 0,096 \text{ mm} \approx 0,1 \text{ mm} \quad (67)$$

Bei der hier näher untersuchten Talbrücke beträgt die Spannweite 52,00 m. Betrachtet man zwei benachbarte Felder, so ergibt diese Verschiebung der Litze in x-Richtung eine in z-Richtung wirkende Kraft von:

$$F = 2 \cdot 180 \text{ kN} \cdot \sin(\arctan(\frac{0,096 \text{ mm}}{26,00 \text{ m}})) = 0,00133 \text{ kN} = 1,33 \text{ N} \quad (68)$$

Diese Rückstellkraft von ca. 1,33 N ist somit wesentlich geringer als die maximal wirkende Reibungskraft an den Umlenkstellen von 1,75 kN.

In der ersten Spanngliedlage stellt sich eine Torsion der Litzen ein, wenn die Torsionssteifigkeit der Litzen geringer ist als das treibende Moment aus den angreifenden Kräften. Neben der in den Riefen übertragenen Kraft R_u wirken Horizontalkräfte q_m seitlich entlang der Litzen, die durch die Stützwirkung des äußeren Mantels und einer eventuellen seitlichen Fixierung der Litzenbänder im Bauwerk erzeugt werden. Die Resultierende dieser Kräfte wird hier Q_m genannt. Die Vorspannkraft wird als punktuell in der Mitte der Litze angreifend angenommen. Die durch die seitliche Auslenkung entstehende Kraft senkrecht zum Litzenverlauf soll mit P_v bezeichnet werden. Die beschriebene Kräfteverteilung ist in Abbildung 2.22 dargestellt.

Bei der angenommenen Kräfteverteilung liegen die Kräfte P_v und Q_m auf einer Wirkungslinie, während R_u einen Hebelarm zu dieser Wirkungslinie besitzt. Bei seitlicher Auslenkung der Litze kann somit R_u ein Torsionsmoment um die Längsachse der Litze erzeugen. Ist dieses Moment größer als die Torsionssteifigkeit der Litze, so wird die Litze eine schraubenförmige Relativverschiebung beschreiben. Die Wirkungslinie der Umlenkkraft U dagegen verläuft durch den Mittelpunkt der Litze und kann somit kein Moment um die Längsachse der Litze erzeugen.

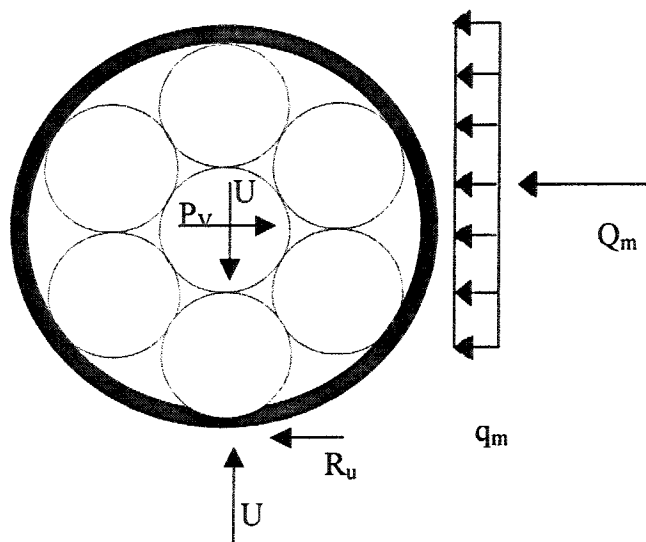


Abbildung 2.22: Kraftangriff an einer Litze des äußeren Spannbandes

Die Größe dieser seitlichen Kräfte ist weitgehend vom Einbau der Spannbänder im Bauwerk abhängig und kann daher nicht exakt bestimmt werden. Die Torsionssteifigkeit wurde in Torsionsversuchen an vorgespannten Litzen ermittelt. Die genaue Versuchsbeschreibung und Auswertung dieser Versuche sowie ein Lösungsansatz für die Ermittlung der tatsächlich auftretenden Bewegungsart werden in Kapitel 4.3 erläutert.

Die Relativverschiebungen in der zweiten bis vierten Spanngliedlage (Abbildung 2.9) werden durch Kräfte an der Ober- und Unterseite der PE-Mäntel beeinflusst, da sowohl die obere als auch die untere Hälfte der Schutzhüllen durch Querpressungen belastet werden (Abbildung 2.19).

Bei der Ermittlung von möglichen Verschiebungsarten soll auch im Weiteren nach einer anfänglichen Beeinflussung der Litzenbewegung von der erhöhten Kraftübertragung in den Rillen abgesehen und ausschließlich die Reibungskraft zwischen Litzen und Mänteln angesetzt werden. Bei der Verschiebung einer Litze in Richtung ihrer Längsachse kommt es zu einer Kraftübertragung zwischen Litze und Mantel auf ihrer Ober- und Unterseite. Vernachlässigt man eine Zunahme der Querpressung des Polyethylen durch die Vorspannung in der jeweili-

gen Spanngliedlage, so heben sich die horizontal wirkenden Kräfte gegenseitig betragsmäßig auf, bewirken jedoch durch ihren Ansatz an Ober- bzw. Unterseite ein Moment auf die Litze. In der zweiten Spanngliedlage beträgt dieses Moment maximal:

Oberseite zweite Spanngliedlage:

$$F = 743,5 \text{ kN} \quad (69)$$

$$U = 2 \cdot F \cdot \sin \alpha = 2 \cdot 743,5 \text{ kN} \cdot \sin 4,508^\circ = 116,88 \text{ kN} \quad (70)$$

$$R_2 = \mu \cdot U = 0,06 \cdot 116,88 \text{ kN} = 7,01 \text{ kN} \quad (71)$$

$$M = 2 \cdot R_2 \cdot r = 2 \cdot \mu \cdot U \cdot r \quad (72)$$

$$M = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot 7,01 \text{ kN} \cdot 0,75 \text{ cm} = 26,3 \text{ Nm} \quad (73)$$

Hierin sind:

- F Vorspannkraft pro Litzenband
- U Umlenkkraft im äußeren Litzenband
- R_2 Max. Reibungskraft
- M Gegenmoment
- R Reibungskraft
- r Radius der Litze
- μ Reibungsbeiwert

Ist dieses Moment größer als das durch eine Verdrehung der Litzen erzeugte Rückstellmoment, so kann von einer Torsion und somit von einer schraubenartigen Relativverschiebung zwischen Litzen und Mänteln ausgegangen werden. Die Litzen der dritten und vierten Spanngliedlage würden sich dann ebenso verhalten, da die erhöhten Querpressungen höhere Reibungskräfte bewirken und auch stärkere Torsionskräfte aufnehmen können.

In Versuchen zur Torsionssteifigkeit der untersuchten Litzen soll das infolge einer Verdrillung auf die Litzen aufgebrauchte Moment ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Versuche und die weitergehende Untersuchung der Relativverschiebungen sind in Kapitel 4.3 beschrieben.

3 ZULASSUNGSVERSUCHE UND ANFORDERUNGEN

Für die Zulassung von Spannverfahren für externe Vorspannung wurden vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) zwei Versuchsarten entwickelt [2], [10], in denen Funktionstüchtigkeit, Robustheit und ausreichender Korrosionsschutz nachgewiesen werden müssen:

- (1) Prüfung mit großer Umlenkung
- (2) Prüfung mit kleiner Umlenkung

Bei der Prüfung mit großer Umlenkung wird das Spannglied unter voller Vorspannung um 800 mm über einen Umlenksattel mit einer Umlenkung von mindestens 14° gezogen. Dabei zieht die Presse auf der aktiven Seite das Spannglied, während die Presse auf der passiven Seite kontinuierlich nachgibt (Abbildung 3.1).

Der Sattelradius muss dem für die Zulassung beantragten Mindestradius entsprechen. Da während des gesamten Ziehvorganges eine Vorspannung von $0,7 f_{pk}$ herrschen muss, was gegenüber des allmählichen Spannungszuwachses während des Spannvorganges im Bauwerk eine erhebliche Verschärfung darstellt, kann laut DIBt auf zusätzliche Maßnahmen zur Berücksichtigung von Temperatureinflüssen und zyklischen Beanspruchungen verzichtet werden [10]. Nach dem Ziehvorgang bleibt das Spannglied unter voller Vorspannung 21 Tage in der Prüfeinrichtung.

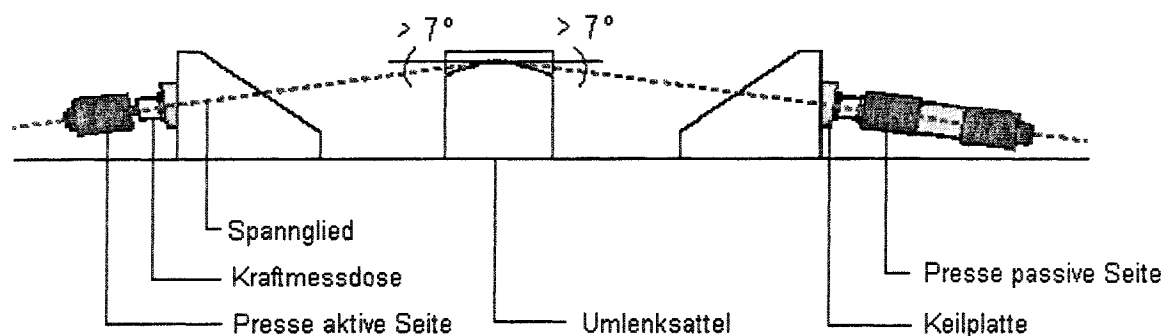


Abbildung 3.1: Zulassungsversuch Prüfung mit großer Umlenkung [5]

Bei der Prüfung mit kleiner Umlenkung wird die Umlenkung mit kleinem Radius durch das Ziehen des Spanngliedes über einen Knick simuliert. Im Bauwerk kann dies unter anderem durch eine fehlerhafte Ausbildung der Umlenkstellen auftreten. Wie bei der Prüfung mit großer Umlenkung verbleibt das Spannglied nach einem Ziehweg von 800 mm anschließend 21 Tage unter Vollast in der Prüfeinrichtung. Nach Abbildung 3.2 wird das Spannglied über einen geradlinigen Sattel mit einer Länge von mindestens 700 mm so geführt, dass es auf beiden Seiten des Sattels durch einen Knick von jeweils 2° umgelenkt wird [10].

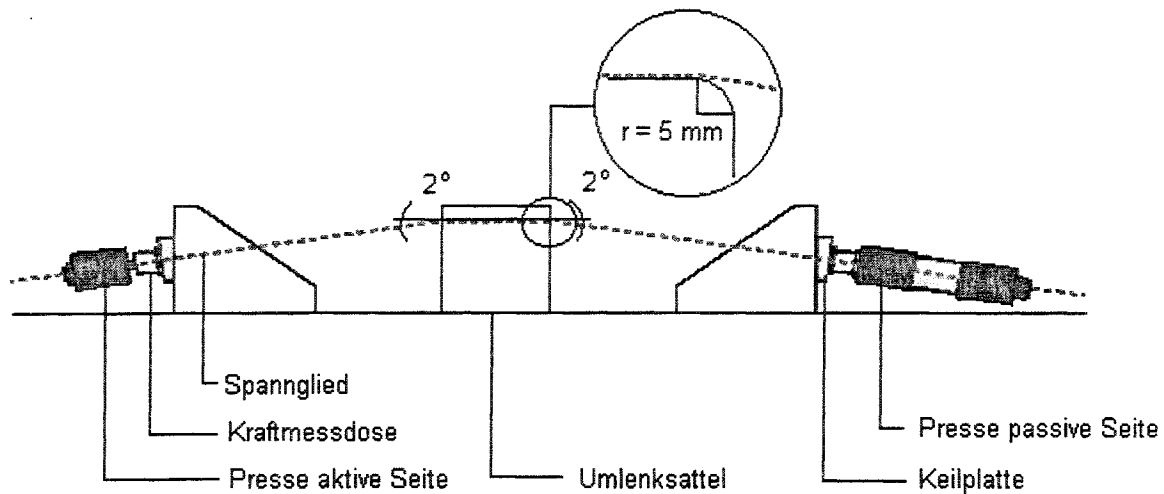


Abbildung 3.2: Zulassungsversuch Prüfung mit kleiner Umlenkung [2]

Nach beiden Prüfungen sind die Wandstärken der PE-Schutzhüllen zu untersuchen, die folgende Anforderungen an die Korrosionsschutzmäntel erfüllen müssen:

- Die innere PE-Hülle muss an jeder Stelle eine Restwanddicke von mindestens 1,0 mm bzw. 50 % der Ausgangswanddicke aufweisen.
- Die äußere PE-Hülle muss an jeder Stelle eine Restwanddicke von mindestens 2,0 mm bzw. 75 % der Ausgangswanddicke aufweisen.
- An keiner Stelle darf Fett aus den Hüllen austreten.

4 DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE

4.1 Verwendete Ausgangsmaterialien

In allen durchgeführten Versuchen wurden externe Spannglieder der Firma VBF Ratingen GmbH eingesetzt (Abbildung 4.1), die als Band aus vier 7-drähtigen 0,6“ Spanndrahtlitzen St 1570/1770 bestehen. Jede Monolitze ist von einer inneren Schutzhülle aus HDPE umgeben. Jeweils vier ummantelte Litzen werden mit einem äußeren Mantel aus HDPE zu einem Band zusammengefasst. Die technischen Eigenschaften der Litzen sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

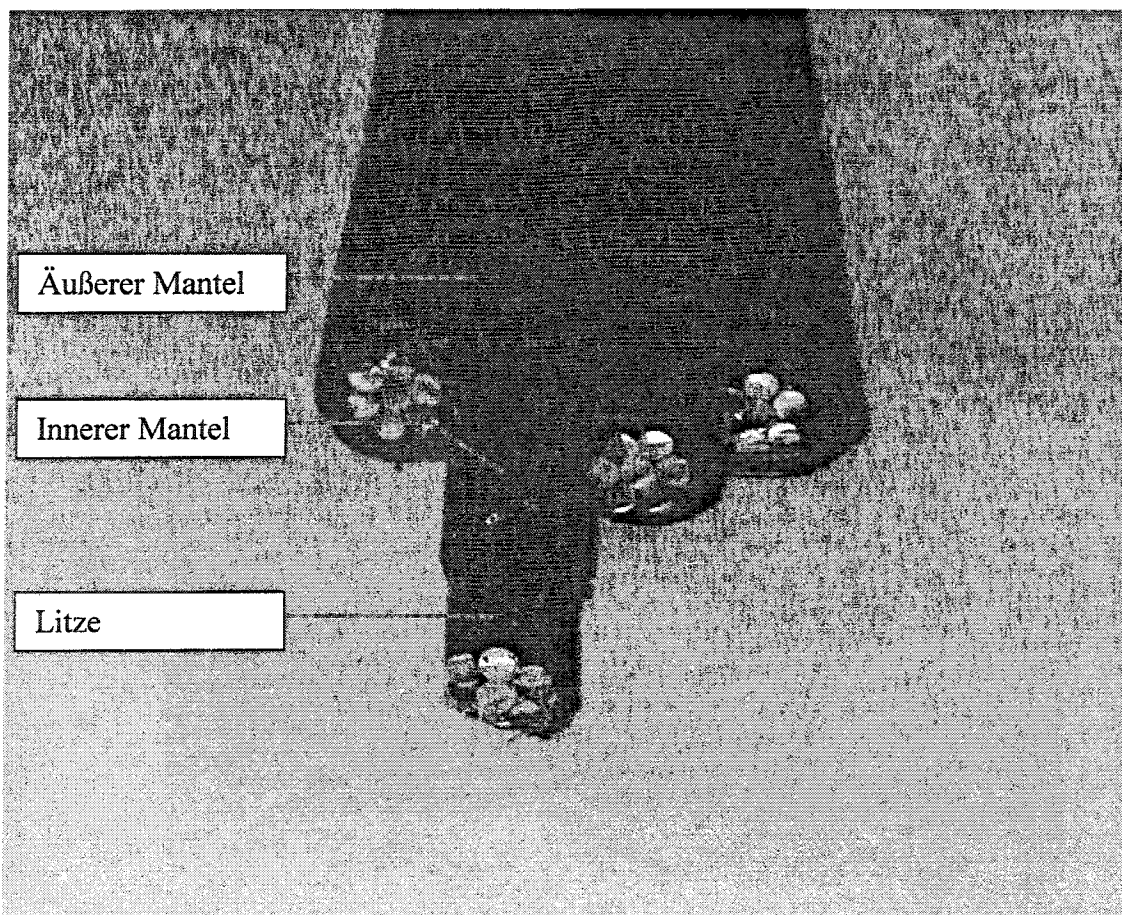


Abbildung 4.1: Spannglieder VBF-CMM 04-150 D

Bezeichnung	VBF-CMM 04-150 D
Zulassungsnummer	Z-13.3-90
Außendrahtdurchmesser	5,2 mm
Kerndrahtdurchmesser	5,3 bis 5,4 mm
Nenn Durchmesser (2 Außendrähte + 1 Kerndraht)	15,7 mm bzw. 0,6"
Nennquerschnitt	150 mm ²

Tabelle 4.1: Technische Daten des Litzenspannverfahrens VBF-CMM D [15]

Zur Herstellung der HDPE-Schutzhüllen sind vom DIBt die Ausgangsmaterialien Borealis NCPE 2415, Vestolen A 5041 R und Finathene 3802 B PEHD zugelassen. Die technischen und physikalischen Eigenschaften dieser Materialien werden vom Hersteller oder durch Fremdüberwachung nachgewiesen (Tabelle 4.2).

	Einheit	Borealis ME 2418 HDPE	Vestolen A 5041 R HDPE	Finathene 3802 B PEHD
Dichte bei 23 °C	g/cm ³	0,944 bis 0,954	0,945 bis 0,958	0,943 bis 0,953
Schmelzindex	g/10min	0,65 bis 0,85	0,40 bis 0,60	0,80 bis 1,00
Streckspannung, Rohr	N/mm ²	17 bis 21	19 bis 23	keine Angaben
Streckspannung, Platte	N/mm ²	keine Angaben	23 bis 26	16 bis 20
Zug-E-Modul	N/mm ²	580 bis 620	keine Angaben	680 bis 720
Kugeleindruckhärte	N/mm ²	47 bis 53	42 bis 45	45 bis 51
Versprödungstemperatur	°C	< -70	keine Angaben	keine Angaben

Tabelle 4.2: Technische Eigenschaften der PE-Hüllrohre [15]

Die innere Schutzhülle besitzt laut Zulassung Z-13.3-90 vom 16.8.1999 eine Ausgangswanddicke von mindestens 1,75 mm, die äußere Schutzhülle von mindestens 3,00 mm.

Die Hohlräume zwischen den Litzen und den inneren Schutzhüllen werden beim Herstellen der Spannglieder mit einer Korrosionsschutzmasse verpresst. Laut Zulassungsbescheid wird hierfür die lithiumverseifte Korrosionsschutzmasse auf Mineralölbasis Shell Alvania R eingesetzt. Einige der Kennwerte dieser Masse sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst [15].

	Einheit	Wert
Grundölanteil	%-Masse	ca. 80-85
Grundölviskosität bei 40°C	Mm ² /s	72-76
Tropfpunkt	°C	> 95
Gesamtschwefel	%-Masse	< 0,15
Natriumnitrid	%-Masse	2

Tabelle 4.3: Technische Eigenschaften der Korrosionsschutzmasse [15]

Die Mindestmenge der Korrosionsschutzmasse pro laufendem Meter Litze beträgt nach [15] 50 g. Dieser Wert wird sowohl durch werkseigene Kontrolle des Herstellers als auch durch Fremdüberwachung kontrolliert.

4.2 Versuche zum Temperatureinfluss

4.2.1 Allgemeines

Um den Einfluss der Temperatur auf die Dauerhaftigkeit der Polyethylen-Schutzhüllen zu untersuchen, wurden nach Vorversuchen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen insgesamt 64 Versuche durchgeführt. Eingeteilt wurden sie in die Versuchsreihen A bis H, die sich entsprechend Abbildung 4.2 durch die Temperaturverläufe unterschieden. Die Versuchsparameter sowie die gemessenen Ergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen. Bei den Versuchen wurden folgende Parameter variiert:

- Umgebungstemperatur
- Temperaturzyklus
- Belastungsdauer
- Umlenkradius

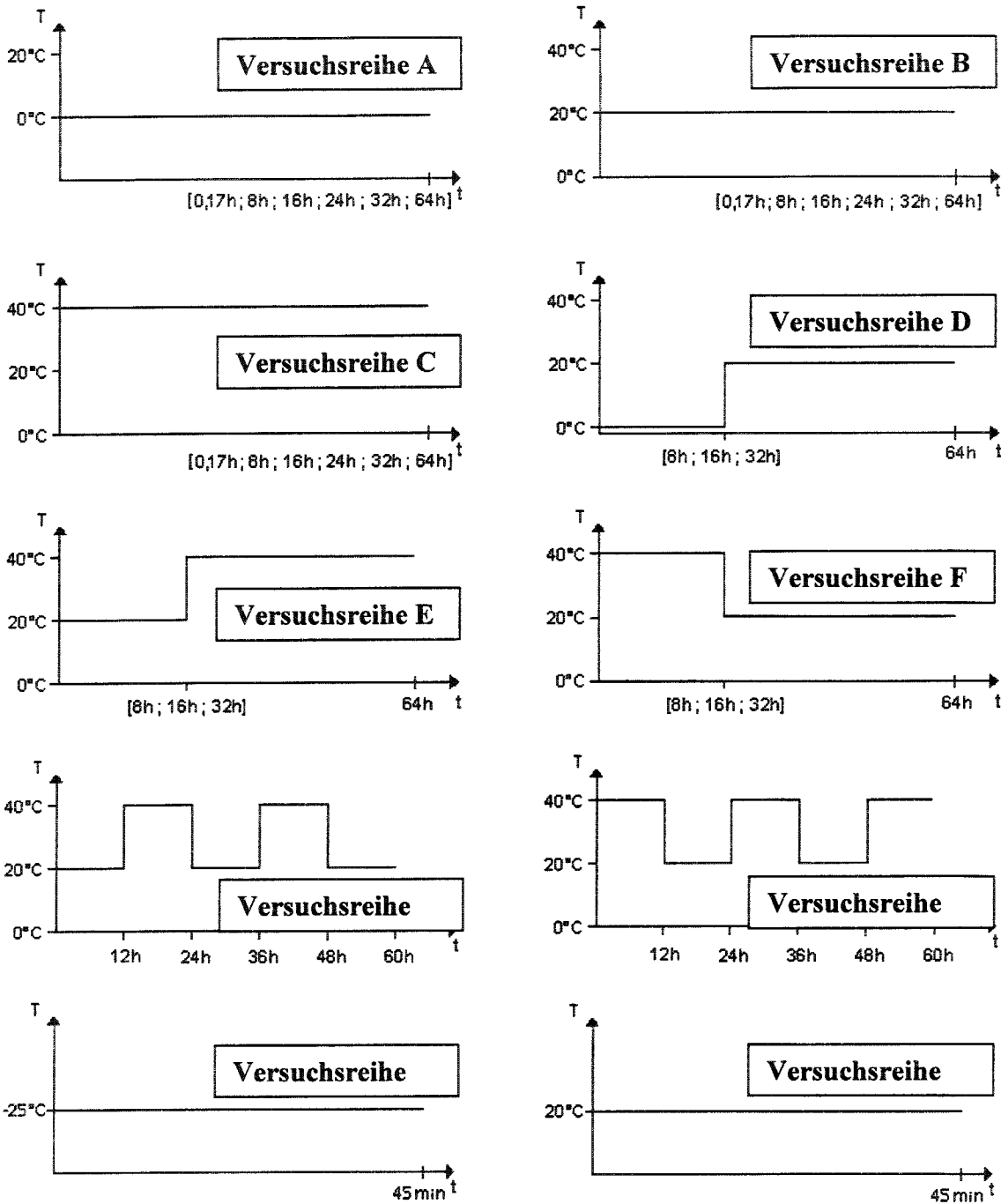
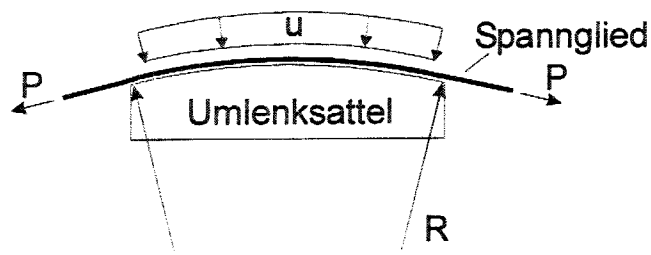


Abbildung 4.2: Temperaturverläufe der Versuchsreihen A-H

Simuliert wird die Belastung der Spannglieder durch Umlenkkräfte an Umlenkstellen. Da ein gekrümmter Einbau der Litzen nur sehr aufwändig zu verwirklichen ist, wurden die Litzen geradlinig in den Versuchsstand eingebaut. Die Umlenkkraft wurde als Querpressung von einem Hydraulikzylinder aufgebracht, der rechtwinklig zu den Spannbändern angeordnet ist (Abbildung 4.3).

Bauwerk



Versuch

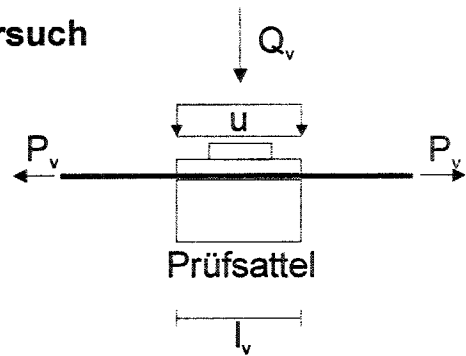


Abbildung 4.3: Funktionsprinzip des Versuchsstandes

Beurteilt wird der Einfluss der untersuchten Parameter durch das Messen der Restwanddicken der inneren und äußeren Hüllrohre im Bereich der Eindrückungen, welche die Litzen im PE hinterlassen. Diese Werte werden mit den anfänglichen Wandstärken in Relation gesetzt. Unter der Querpressung drücken sich die Stahllitzen in das relativ weiche PE der Hüllrohre ein und hinterlassen dort ellipsenförmige Riefen. An den Probestücken mit einer Länge von 20 cm ergaben sich je Litze 5 Eindrückungen, damit waren pro Versuch 40 Stellen auszuwerten.

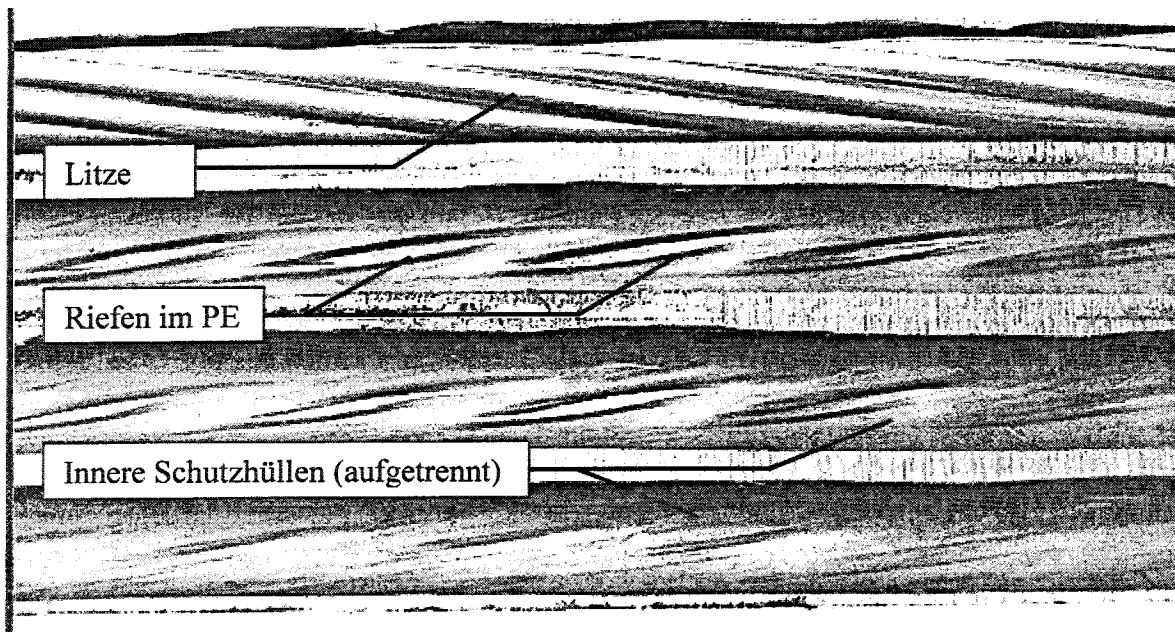


Abbildung 4.4: Eindrückfigur der inneren Schutzhüllen

4.2.2 Umlenkpressung, Temperatur und Belastungsdauer

Nach [14] sind in Deutschland im Inneren einer Hohlkastenbrücke Extremtemperaturen von -20°C bis 40°C zu erwarten. Maßgebend für die Dauerhaftigkeit der Spannglieder ist wegen der mit steigender Temperatur abnehmenden Druckfestigkeit der PE-Ummantelung die

Höchsttemperatur. Ein Versagen der Schutzhüllen aufgrund einer Versprödung des Polyethylens kann ausgeschlossen werden, da hierfür Umgebungstemperaturen von weniger als -50°C notwendig sind [5]. Die niedrigste in Deutschland gemessene Temperatur betrug 1929 in Niederbayern $-37,8^{\circ}\text{C}$ [16], niedrigere Temperaturen sind in Deutschland nicht zu erwarten.

Um ein relativ großes Spektrum zum Einfluss der Umgebungstemperaturen abzudecken, wurden für die durchgeführten Versuche Umgebungstemperaturen von -25°C , 0°C , 20°C und 40°C ausgewählt.

Das zeitabhängige Materialverhalten von PE-Schutzhüllen unter gleichbleibender Belastung und konstanter Temperatur wurde bereits in [5] untersucht. Die Versuche zeigten, dass bereits innerhalb der ersten 24 Stunden über 95% der Verformungen, die nach drei Wochen gemessen wurden, abgeschlossen waren. Um genauere Angaben über das Verformungsverhalten der Schutzhüllen innerhalb dieser frühen Belastungsphase zu erhalten, wurden die Belastungsdauern für die neuen Versuche auf 10 min, 45 min, 8 h, 16 h, 24 h, 32 h und 64 h festgelegt.

Die aufgebrachte Querpressung resultiert aus der Umlenkraft, die vom Umlenkradius und der Vorspannkraft abhängig ist. Bei der Ermittlung der Umlenkraft wurden vier übereinander liegende Litzenbänder mit je vier 0,6“ Litzen und einer Querschnittfläche von insgesamt 600 mm^2 betrachtet. Die zugelassene Vorspannkraft pro Band beträgt $743,5\text{ kN}$ und der minimale Umlenkradius bei vier übereinander angeordneten Bändern $4,00\text{ m}$.

Die Umlenkpressungen ergeben sich nach der Kesselformel zu:

$$U = \frac{P}{R} = \frac{743,5\text{ kN} \cdot 4}{4,00\text{ m}} = 743,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (74)$$

Hierin sind:

U Umlenkpressung

P Vorspannkraft

R Umlenkradius

Bei einer Probenlänge von 20 cm ergibt sich eine Umlenkraft an der Unterseite des inneren Litzenbandes von:

$$Q = u \cdot 0,20\text{ m} = 743,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 0,20\text{ m} = 148,7\text{ kN} \quad (75)$$

Bei einem Umlenkradius von 6,00 m ergibt sich eine Umlenkkraft von:

$$Q = \frac{743,5 \text{ kN} \cdot 4 \cdot 0,20 \text{ m}}{6,00 \text{ m}} = 99,1 \text{ kN} \quad (76)$$

Für die durchgeführten Versuche wurden Umlenkkräfte von 100 kN und 150 kN gewählt.

4.2.3 Versuchsaufbau

Es wurden zwei Versuchsstände eingesetzt. Der Versuchsstand 1 (VS1) besteht aus einem zwischen zwei massiven Stahlplatten eingebauten Hydraulikzylinder der Firma Lukas, der über eine Handpumpe gesteuert wird (Abbildung 4.5). Nach Erreichen der erforderlichen Querpressung kann diese Handpumpe abgeriegelt werden, der Druck im Prüfzylinder wird dann in einem Relaxationsprüfstand konstant gehalten. Dieser besteht hauptsächlich aus einer Gasflasche, die jeweils zur Hälfte mit Hydrauliköl und mit Stickstoff gefüllt ist und an den Hydraulikzylinder angeschlossen ist. Relaxiert der eingebaute Prüfkörper unter der aufgebrachtten Spannung, wird Öl aus der Gasflasche durch den Druck des Stickstoffs in den Zylinder geleitet. Der Druckverlust im Stickstoffpolster durch die entstehende Volumenvergrößerung ist vernachlässigbar gering. Die Kontrolle der aufgebrachtten Kraft erfolgt mit einer Druckmessdose und einem Mk-Gerät der Firma Hottinger-Baldwin-Messtechnik.

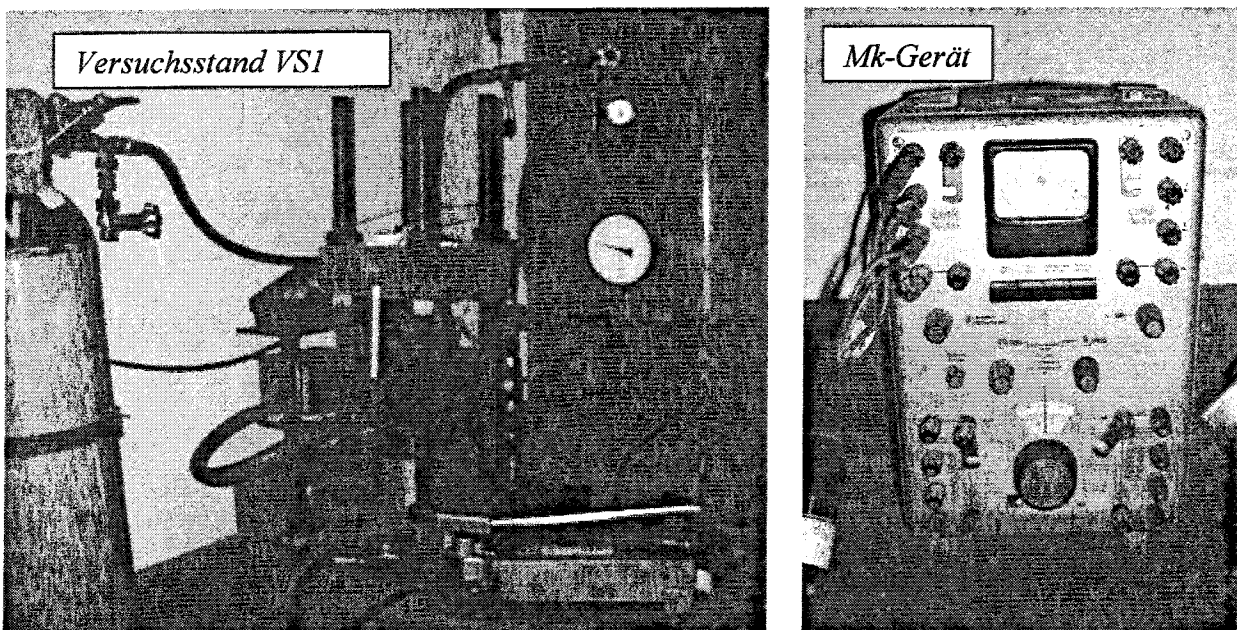


Abbildung 4.5: Versuchsaufbau VS1 mit Mk-Gerät

Im Versuchsstand 2 (VS2) kann der erforderliche Druck computergesteuert durch einen Hydraulikzylinder der Firma Instron Schenck IST auf die Probe aufgebracht werden. Der Zylinder ist mit einer Stahltraverse verschraubt und lotrecht angeordnet (Abbildung 4.6).

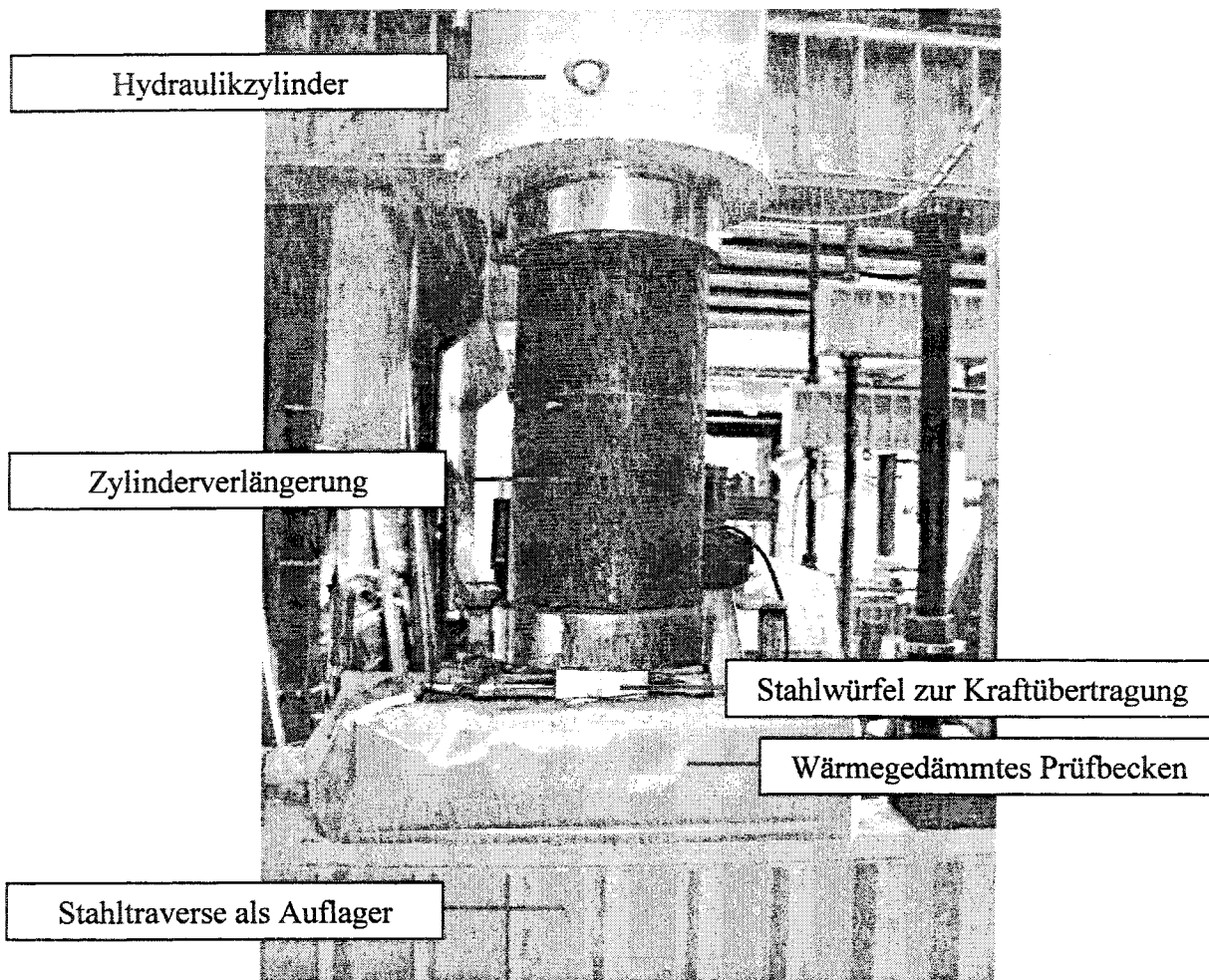


Abbildung 4.6: Versuchsstand VS2, Prüfzylinder und Auflager

4.2.4 Versuchsdurchführung

Die untersuchten Proben aller Versuchsreihen bestehen aus ca. 30 cm langen, nicht vorgespannten Litzen, die von 20 cm langen PE-Hüllrohren ummantelt sind. Auf die Enden der Litzen wurden Einfädelhülsen geschoben, um die Formstabilität der Litzen gewährleisten zu können. In Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass die Litzen ohne diese Hülsen durch die Querpressung plattgedrückt werden können und dann verfälschte Ergebnisse zu erwarten wären. Im Brückenbauwerk wird die Formstabilität durch die große Länge der Litzen und die aufgebrauchte Vorspannung sichergestellt.

Um eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu erreichen, diente in allen Versuchsreihen eine 8 mm starke Platte aus HDPE als Unterlage. Die Einleitung der Querpressung in das Litzenpaket erfolgte über eine 2 cm dicke Stahlplatte, auf der zentrisch ein Stahlwürfel mit einer Kantenlänge von 10 cm angebracht wurde, der die Verbindung zum Stempel des Prüfzylinders herstellte. Die Querpressung wurde kraftgesteuert innerhalb von 60 Sekunden auf die Proben aufgebracht, entlastet wurde innerhalb von 20 Sekunden.

Die Versuchskörper lagen während der Versuchsdurchführung in einem temperierten Wasserbad. So konnte die erforderliche Temperatur des Polyethylens konstant gehalten werden.

In den Versuchsreihen A und D wurden die Proben einer Temperatur von 0°C unterworfen (Kapitel 4.2.6.1 und 4.2.6.4). Um diese Umgebungstemperatur zu erreichen, wurde ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel auf Ethanolbasis in einer Tiefkühltruhe auf 0°C abgekühlt und in einem geschlossenen Kreislauf durch ein Edelstahlbecken gepumpt, in dem die Proben belastet werden konnten. An den Seiten und an der Oberseite wurde das Becken mit 4 cm dicken Platten aus Polystyrol-Extruderschäum ($\lambda_R \sim 0,03 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) ummantelt. Das Auflager bildete eine 1 cm dicke Stahlplatte, die auf eine 3 cm dicke Hartholzplatte ($\lambda_R \sim 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) aufgelegt wurde. Die Temperatur des Versuchskörpers konnte mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ eingestellt werden.

In den Versuchsreihen B, C, D, E, F, G wurde die Wassertemperatur auf 20°C, bzw. 40°C eingestellt. Das aus dem Edelstahlbecken herausfließende Wasser wurde zunächst in einer Tiefkühltruhe auf ca. 15°C abgekühlt, um anschließend mit einem Heizgerät der Firma JOBO auf die erforderliche Temperatur erwärmt und in das Versuchsbecken gepumpt zu werden. Auch für diese Temperaturstufen konnte eine Genauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ erreicht werden.

Um die Versuche der Reihe H durchführen zu können, mussten die Proben auf -25°C abgekühlt und unter dieser konstanten Temperatur belastet werden. Dazu wurden die Versuchskörper in einer Gefriertruhe auf etwa -15°C vorgekühlt und anschließend in den Versuchsstand VS2 eingebaut werden. Das Prüfbecken des VS2 wurde mit Isopropanol gefüllt, dessen Gefrierpunkt bei etwa -65°C liegt. Die Temperatur des Alkohols konnte durch Zugabe von Trockeneis konstant auf $-25^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ gehalten werden. Eine Beeinträchtigung der Hüllrohre durch die Zugabe von Ethanol und Isopropanol kann ausgeschlossen werden, da Polyethylen eine gute Beständigkeit gegenüber Alkoholen aufweist [17].

Die Proben wurden in das temperierte Wasserbad eingesetzt und nach ca. 30 Minuten belastet. Ausgebaut und ausgemessen wurden alle Proben unmittelbar nach dem Ende der Belastung, um ein Verfälschen der Versuchsergebnisse durch zeitabhängiges Rückverformen der PE-Hüllrohre zu vermeiden. Hierzu wurden die Hülsen von den Litzenenden entfernt und die Litzen aus den Mänteln herausgezogen. Um die Restwanddicke bestimmen zu können, wurden die Korrosionsschutzmäntel mit einer Bandsäge der Länge nach aufgetrennt (Abbildung 4.4).

4.2.5 Messtechnik und Auswertung

Der aufgebrauchte Druck wurde bei den Versuchsreihen im Versuchsstand VS1 mit einer über dem Stahlwürfel angebrachten Druckmessdose und einem Mk-Gerät der Firma Hottinger-Baldwin-Messtechnik gemessen. Bei der Versuchsdurchführung im Versuchsstand VS2 erfolgte die Kraftmessung computergesteuert über eine im Versuchszylinder integrierte Kraftmesseinheit. Im VS2 wurde zusätzlich zum zeitlichen Spannungsverlauf der vom Zylinder gefahrene Weg und somit das Zusammendrücken der PE-Hüllrohre aufgezeichnet.

Gemessen wurden die Restwanddicken der jeweils unteren Hälften der inneren Hüllrohre bzw. des äußeren Mantels mit einem Tiefentaster der Firma Hahn/Kolb (Abbildung 4.7), der eine Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm aufweist. Maßgebend dabei war die tiefste Eindrückung jeder Riefe, die sich durch die Verformung des PE unter der Auflast ergeben hatte. Jede Litze hinterließ fünf Eindrückungen in den Hüllrohren, pro Probe ergaben sich somit 40 Messwerte.

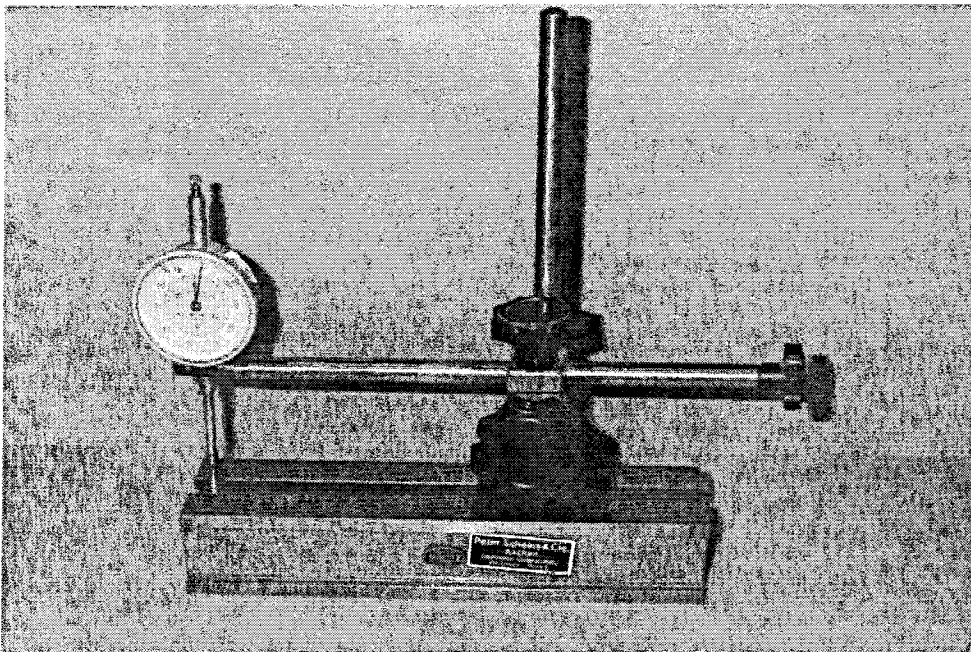


Abbildung 4.7: Tiefentaster

Neben den Restwanddicken nach der Belastung wurden die Ausgangswanddicken bestimmt. Dazu wurden neben und zwischen den sichtbaren Eindrückungen die Wanddicken gemessen und über die Fläche eines Hüllrohres gemittelt. Für jede Probe wurden auf diese Art vier Werte für die Ausgangswanddicken der inneren und vier Werte für die Ausgangswanddicken der äußeren Hüllrohre bestimmt.

4.2.6 Ergebnisse der Versuchsreihen A-H

Um die Einflüsse von verschiedenen Temperaturen und Belastungsdauern bestimmen zu können, war es notwendig, eine möglichst einheitliche Messgröße zu definieren. Aus diesem Grund wurde in jeder sichtbaren Eindrückung jeweils die geringste Restwanddicke der Schutzhüllen bestimmt. Diese Messwerte zeigen relativ große Streuungen, da die unterschiedlichen Ausgangswanddicken der Probekörper nicht berücksichtigt worden sind. Daher wurden die Messwerte anschließend in Relation zu den Ausgangswanddicken des jeweiligen Hüllrohres gesetzt, um den Einfluss der von einander abweichenden anfänglichen Wanddicken zu erfassen. So konnte die Restwanddicke bezogen auf die anfängliche Wanddicke an jeder Stelle angegeben werden.

In den Versuchsreihen A bis H wurden jeweils zwei bis zwölf Versuche gefahren. Je Versuch wurden 20 Messwerte ermittelt.

4.2.6.1 Versuchsreihe A

In der Versuchsreihe A wurden die Proben in zwölf Versuchen bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 0°C belastet. Die Ausgangswanddicken der verwendeten Polyethylen-Schutzhüllrohre und deren Mittelwerte sind in Abbildung 4.8 dargestellt.

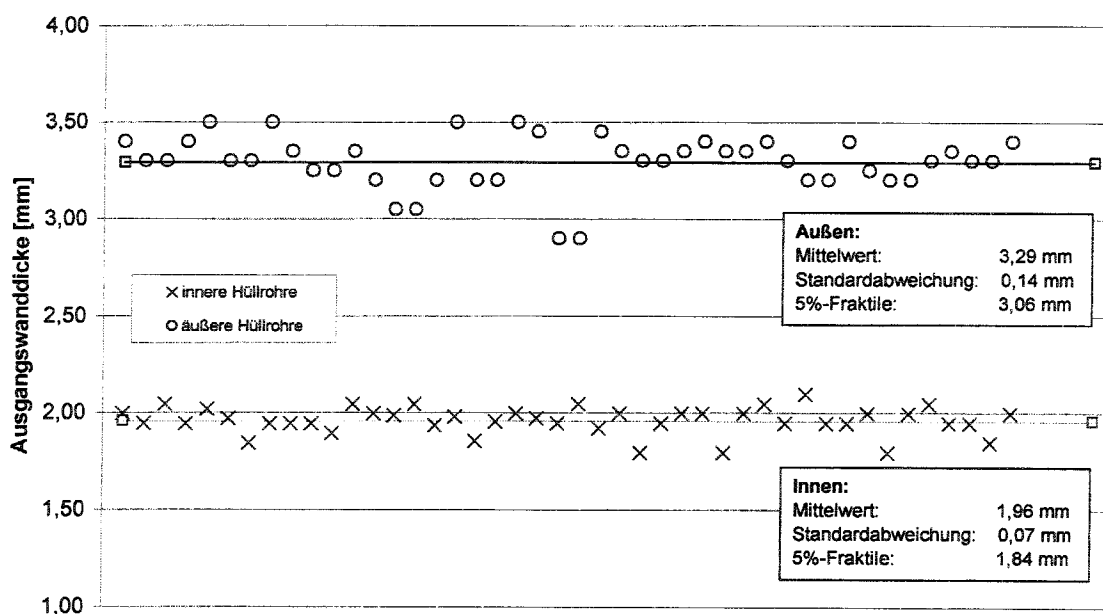


Abbildung 4.8: Ausgangswanddicken der Versuchsreihe A

Die Restwanddicken wurden unmittelbar nach der Entlastung gemessen und sind in den Abbildungen 4.9 und 4.10 in Abhängigkeit von der Belastungsdauer aufgetragen.

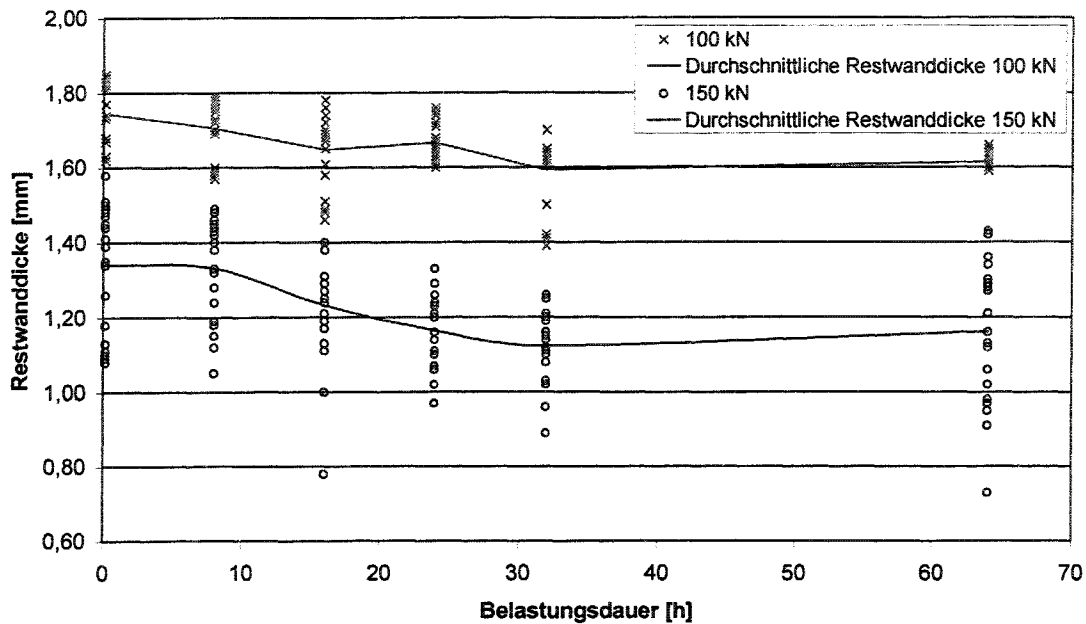


Abbildung 4.9: Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei 0°C

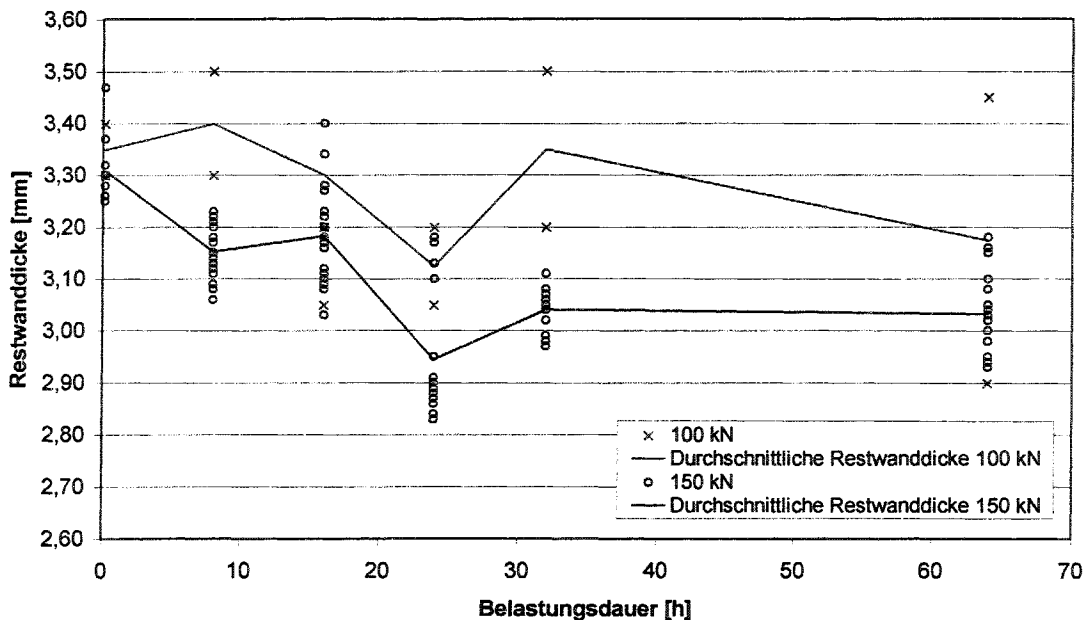


Abbildung 4.10: Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen bei 0°C

Die Restwanddicken sind in den beiden folgenden Diagrammen zu den Ausgangswanddicken in Relation gesetzt worden. 100% entsprechen der ursprünglichen Manteldicke an der Stelle einer gemessenen Riefe.

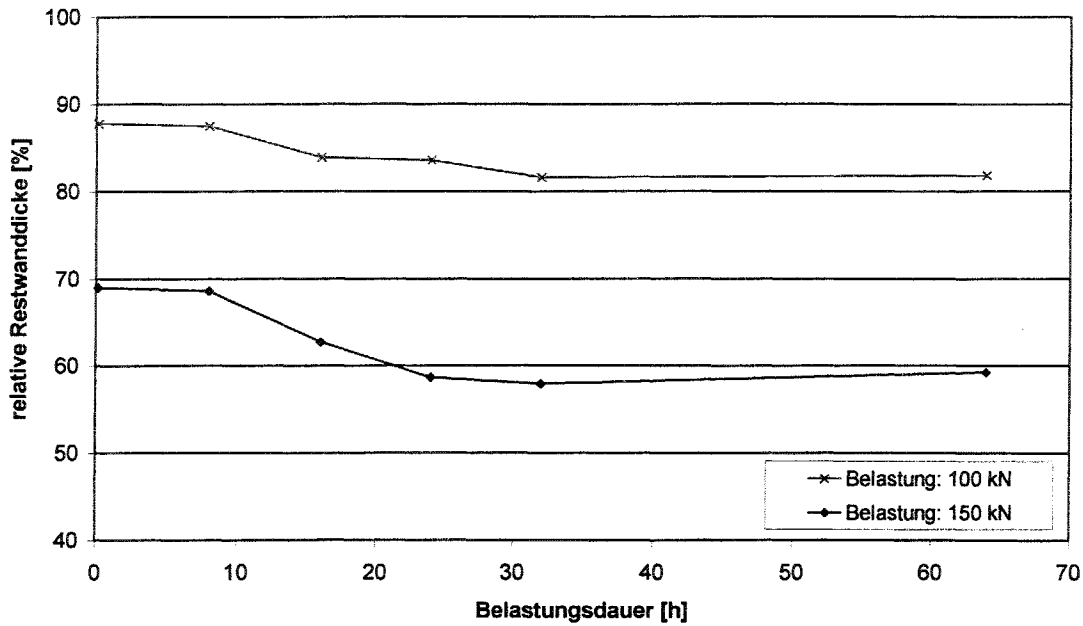


Abbildung 4.11: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei 0°C

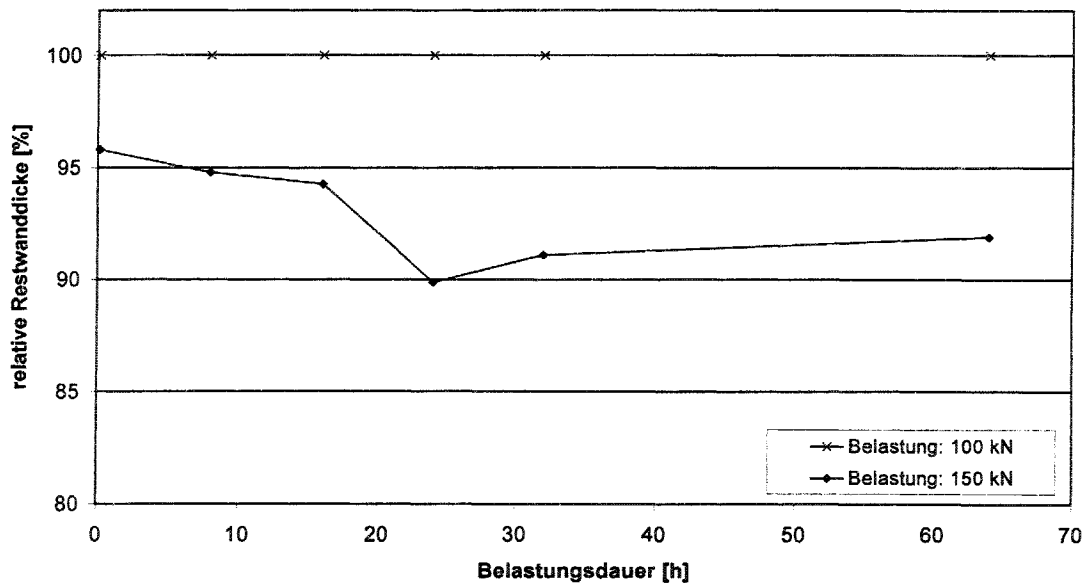


Abbildung 4.12: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen bei 0°C

4.2.6.2 Versuchsreihe B

In der Versuchsreihe B wurden zwölf Versuche bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 20°C durchgeführt. Die Ausgangswanddicken der verwendeten Polyethylen-Schutzhüllrohre sind in Abbildung 4.13 aufgetragen, die absoluten Restwanddicken unmittelbar nach Entlastung sind in den Abbildungen 4.14 und 4.15 abgebildet. Wie bei den Ergebnis-

sen der Versuchsreihe A wurden die Restwanddicken sowohl als Absolutwerte als auch in Relation zur Anfangswanddicke aufgetragen. Die relativen Restwanddicken sind den Abbildungen 4.16 und 4.17 zu entnehmen.

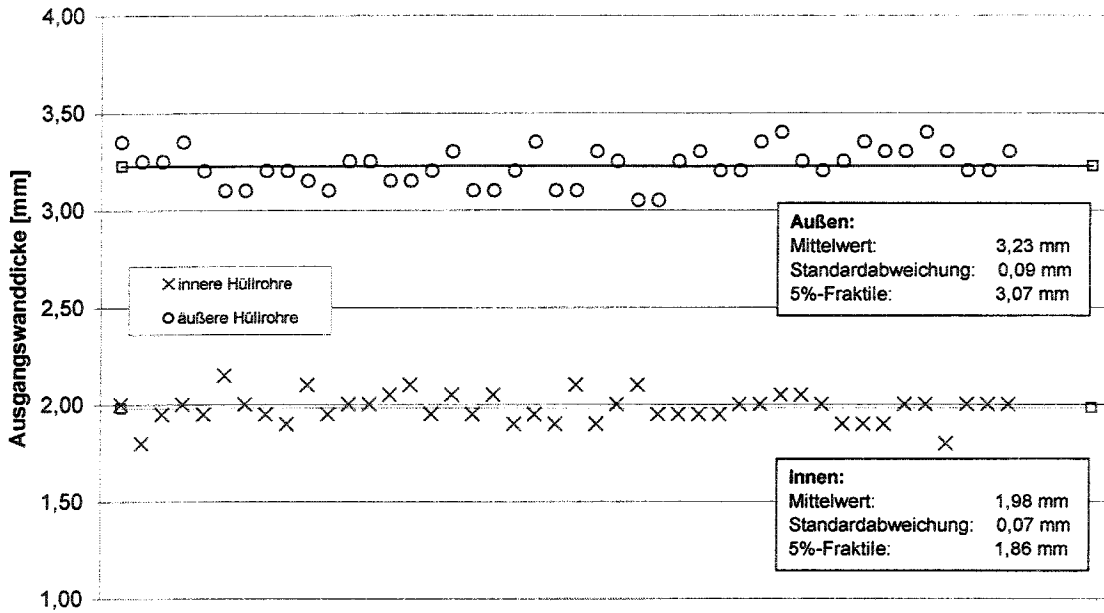


Abbildung 4.13: Ausgangswanddicken der Versuchsreihe B

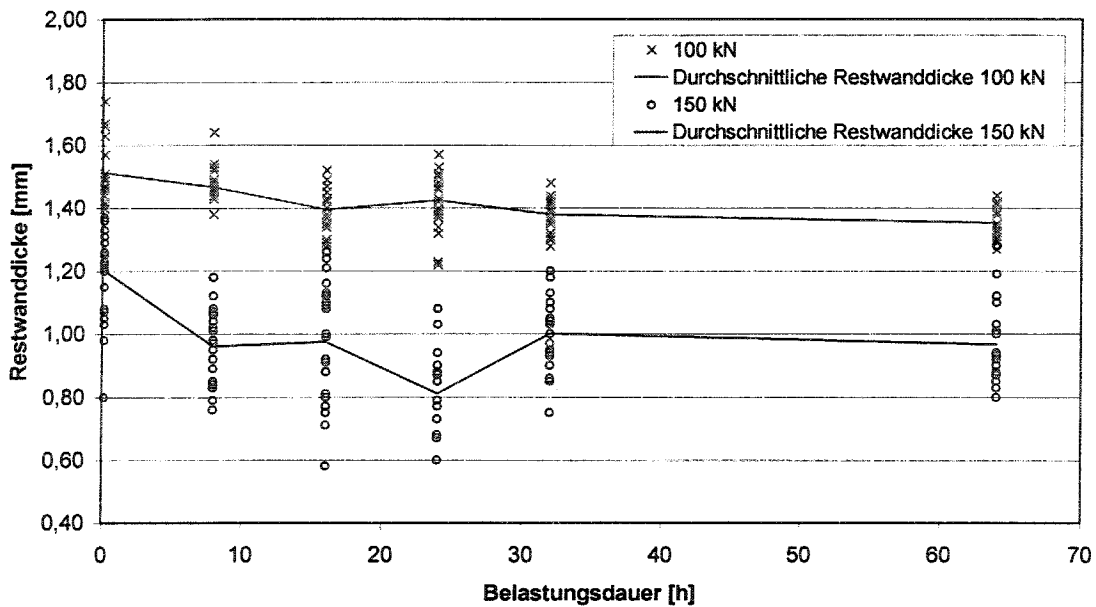


Abbildung 4.14: Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei 20°C

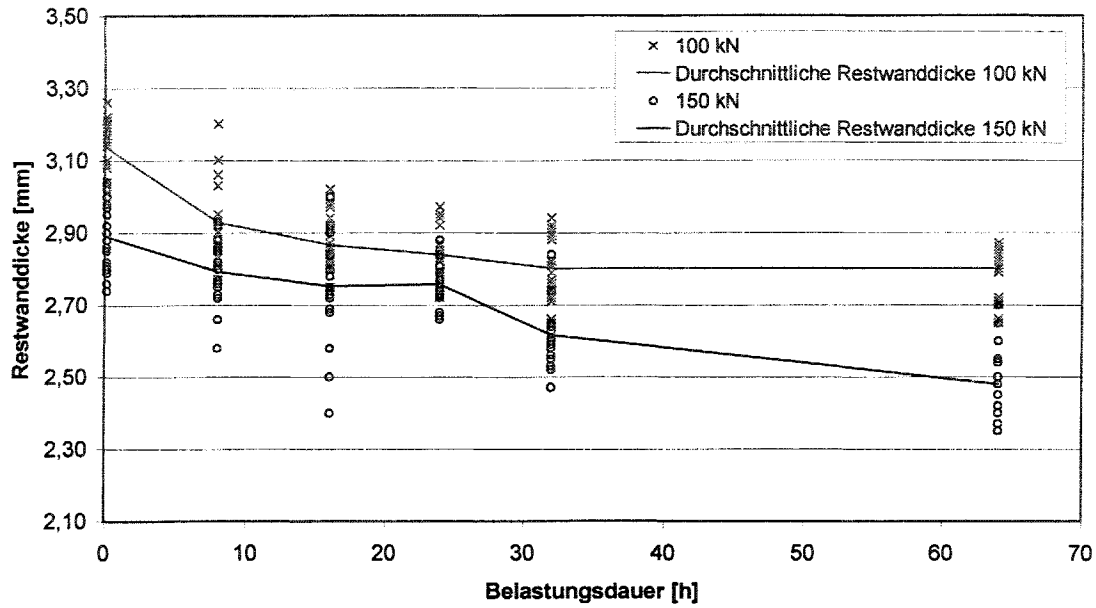


Abbildung 4.15: Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen bei 20°C

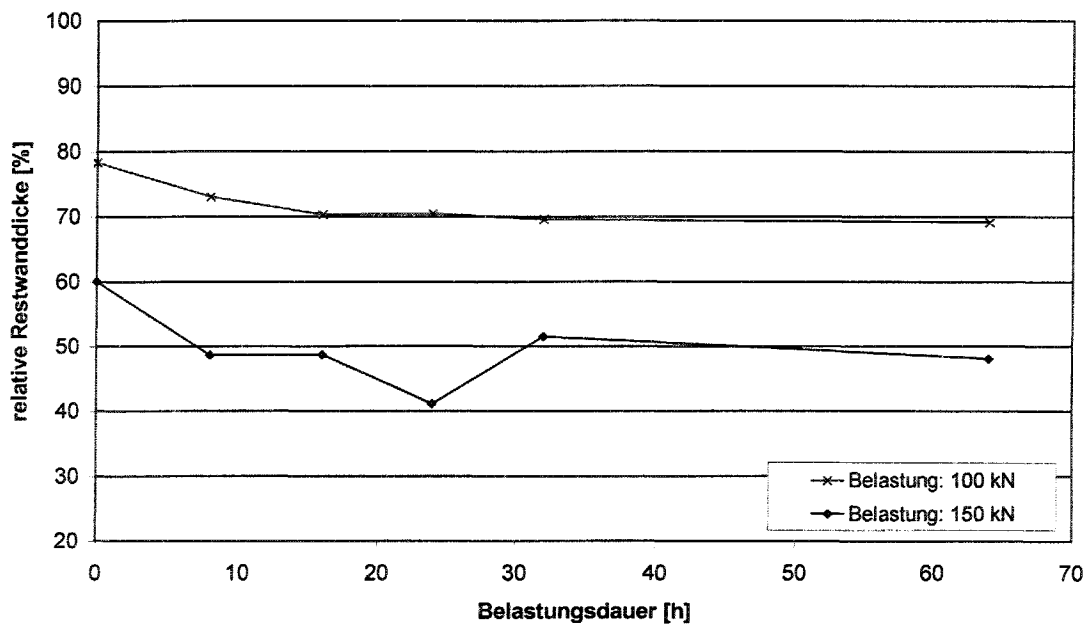


Abbildung 4.16: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei 20°C

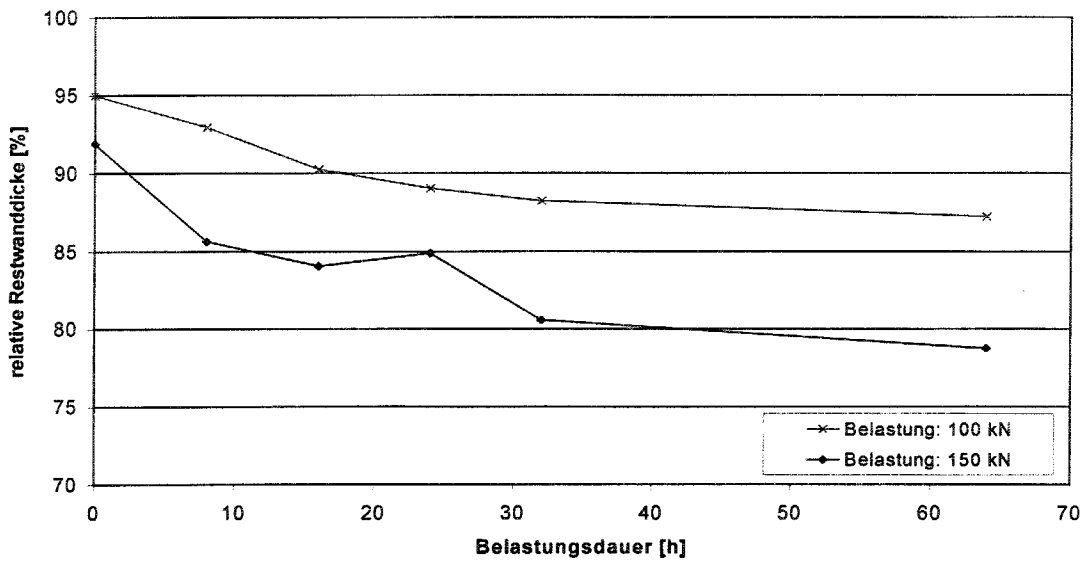


Abbildung 4.17: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen bei 20°C

4.2.6.3 Versuchsreihe C

In der Versuchsreihe C wurden die Proben bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 40°C belastet. Die Ausgangswanddicken der verwendeten Polyethylen-Schutzhüllrohre sind in Abbildung 4.18 dargestellt.

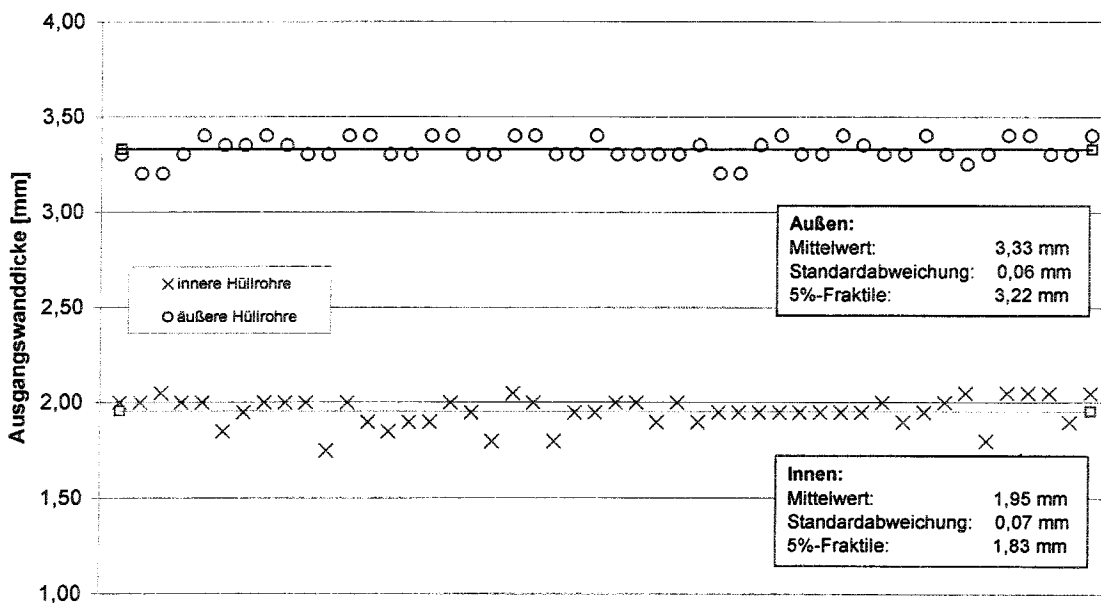


Abbildung 4.18: Ausgangswanddicken der Versuchsreihe C

In den folgenden Diagrammen sind die Restwanddicken der Proben aus Versuchsreihe C als Absolutwerte (Abbildungen 4.19 und 4.20) und in Relation zur Anfangswanddicke (Abbildung 4.21 und 4.22) in Abhängigkeit von der Belastungsdauer aufgetragen.

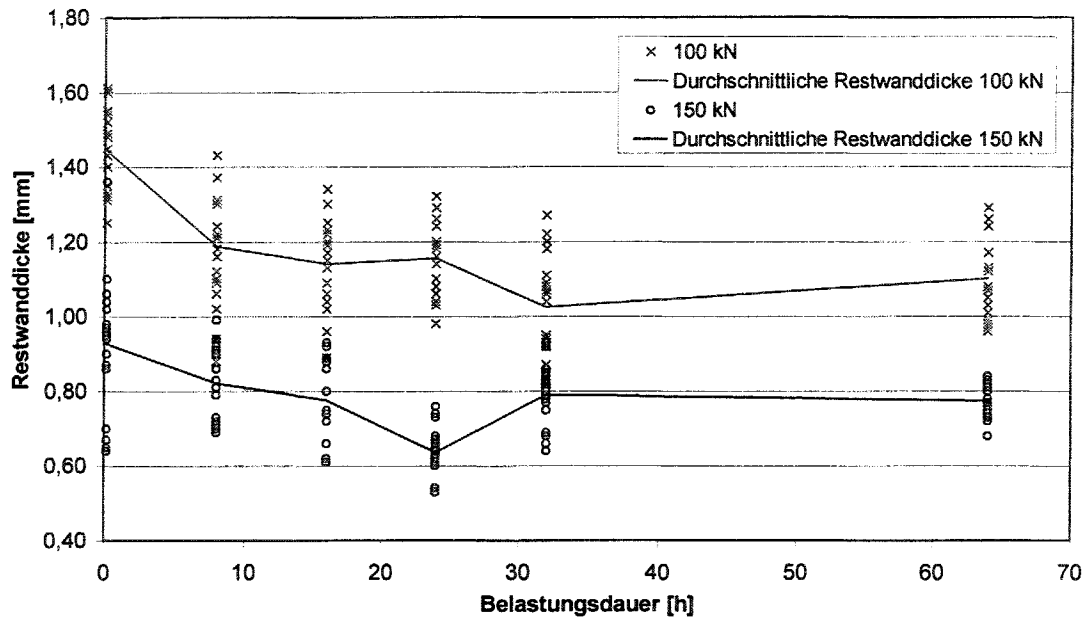


Abbildung 4.19: Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei 40°C

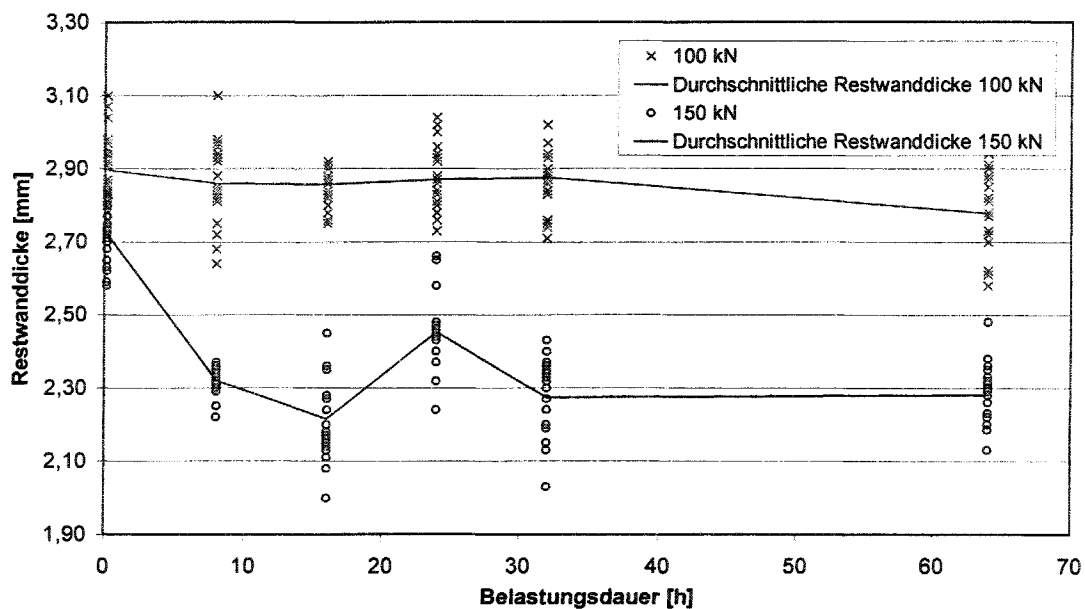


Abbildung 4.20: Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen bei 40°C

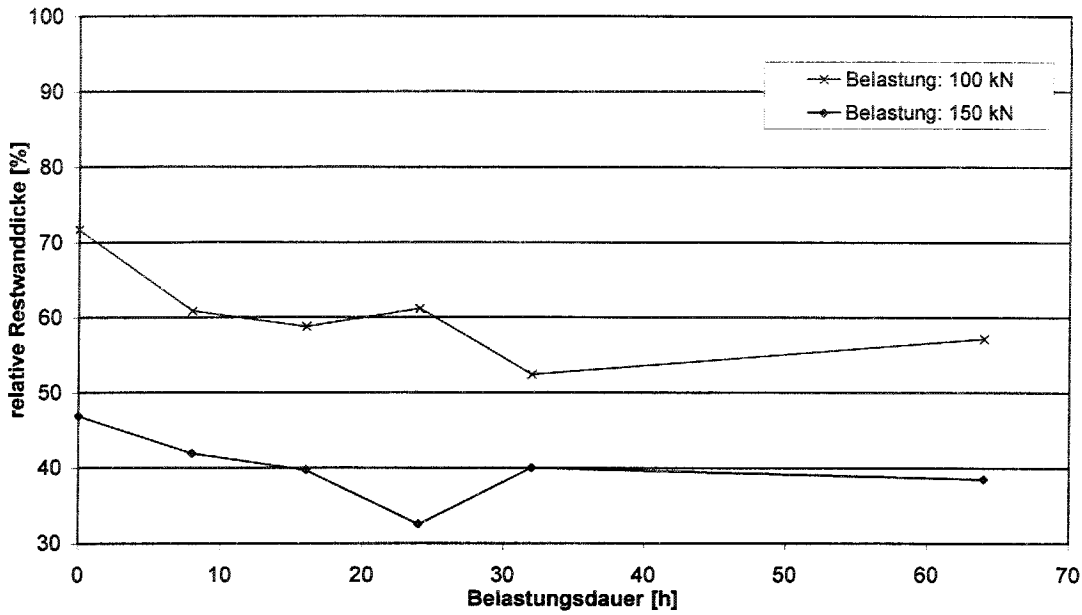


Abbildung 4.21: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei 40°C

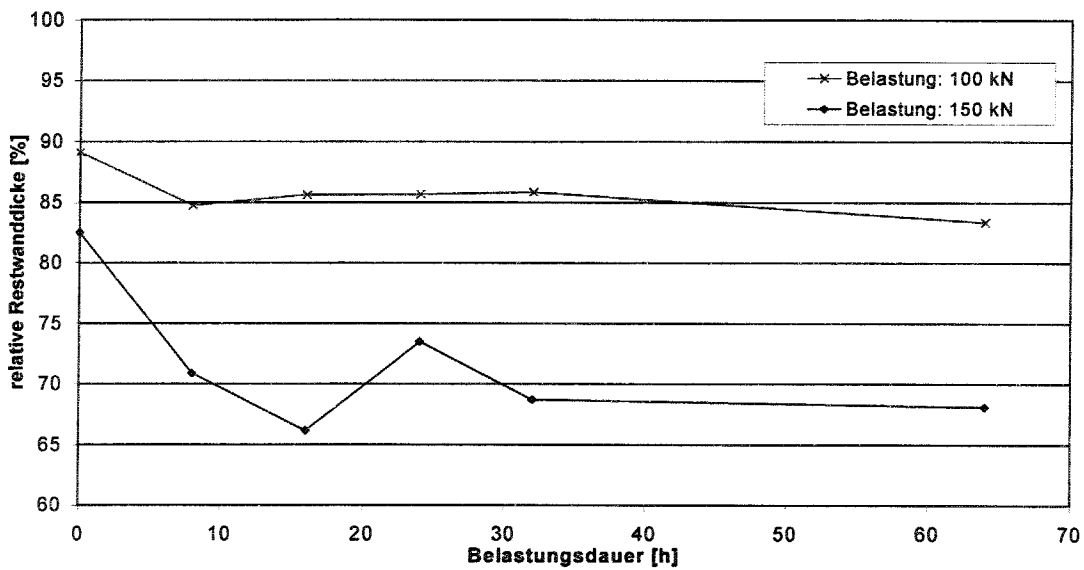


Abbildung 4.22: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen bei 40°C

4.2.6.4 Versuchsreihe D

In der Versuchsreihe D wurden die Proben zunächst bei einer Umgebungstemperatur von 0°C, anschließend bei einer Temperatur von 20°C belastet (Abbildung 4.2). Die variierenden Ausgangswanddicken der verwendeten Polyethylen-Schutzhüllrohre sind in Abbildung 4.23 aufgetragen.

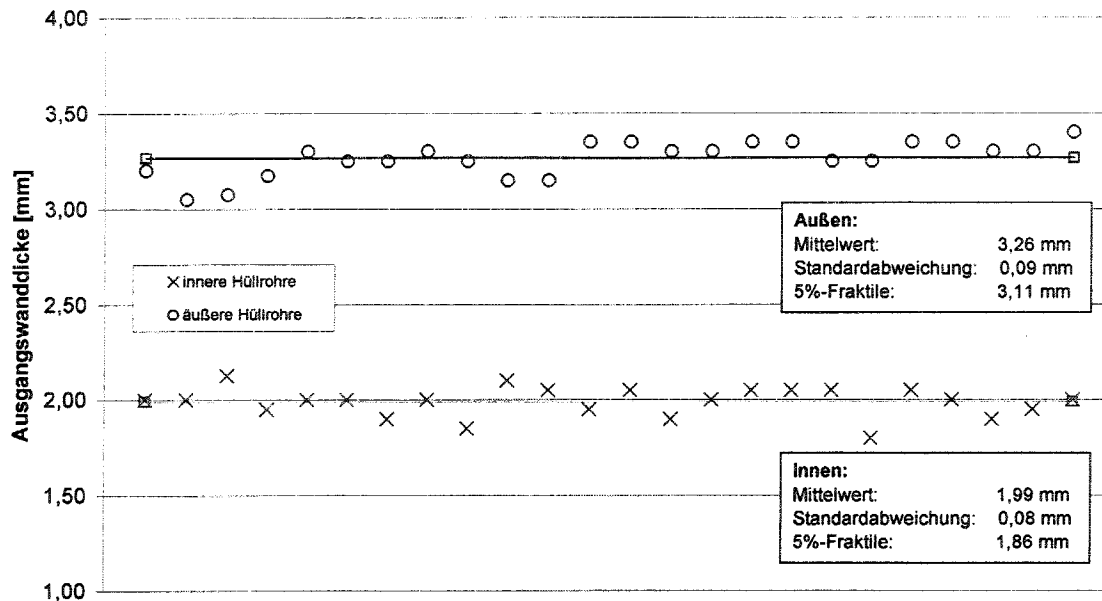


Abbildung 4.23: Ausgangswanddicken der Versuchsreihe D

Die Messwerte der Versuchsreihen D bis H streuen in ähnlichem Ausmaß wie die der Versuchsreihen A bis C. Daher wird im Folgenden auf eine Abbildung der einzelnen absoluten Restwanddicken verzichtet, sie können dem Anhang entnommen werden. In den folgenden Diagrammen sind die Restwanddicken in Relation zu den Ausgangswanddicken in Abhängigkeit von der Belastungsdauer nach der Temperaturumstellung, also bei der Umgebungstemperatur von 20°C, aufgetragen.

Zum Vergleich sind die Messwerte der Versuchsreihe B (konstante Umgebungstemperatur 20°C) eingetragen. Die Proben der Versuchsreihe D wurden jeweils 64 Stunden belastet, die Proben der Vergleichsmessungen B sind so lange belastet worden, wie die Proben der Versuchsreihe D unter der höheren Temperatur 20°C, also nach dem Temperaturwechsel.

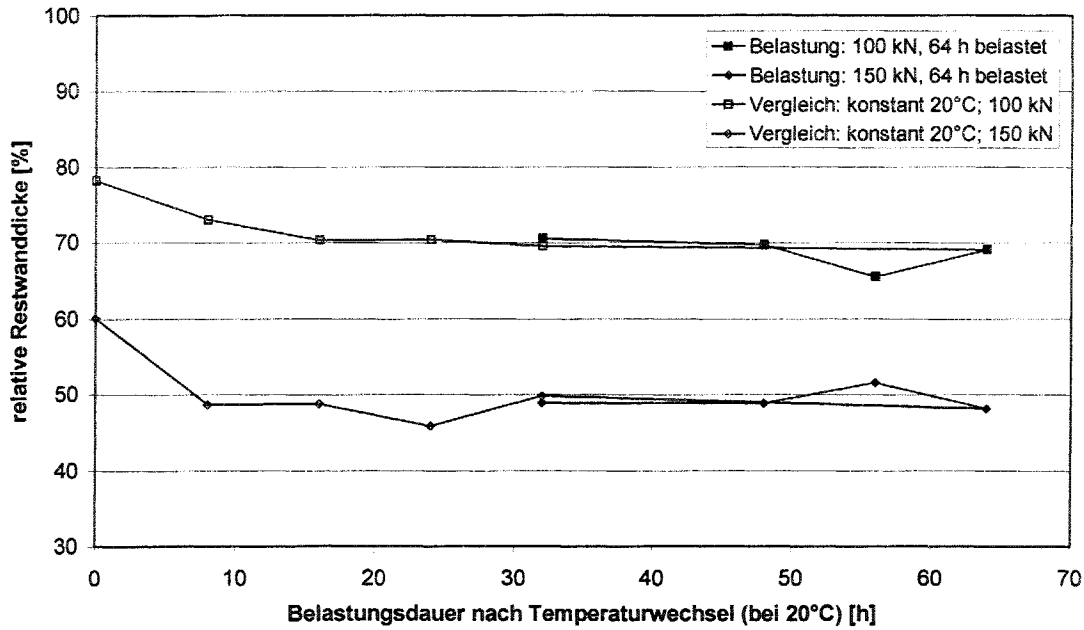


Abbildung 4.24: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei Temperaturwechsel 0°C-20°C

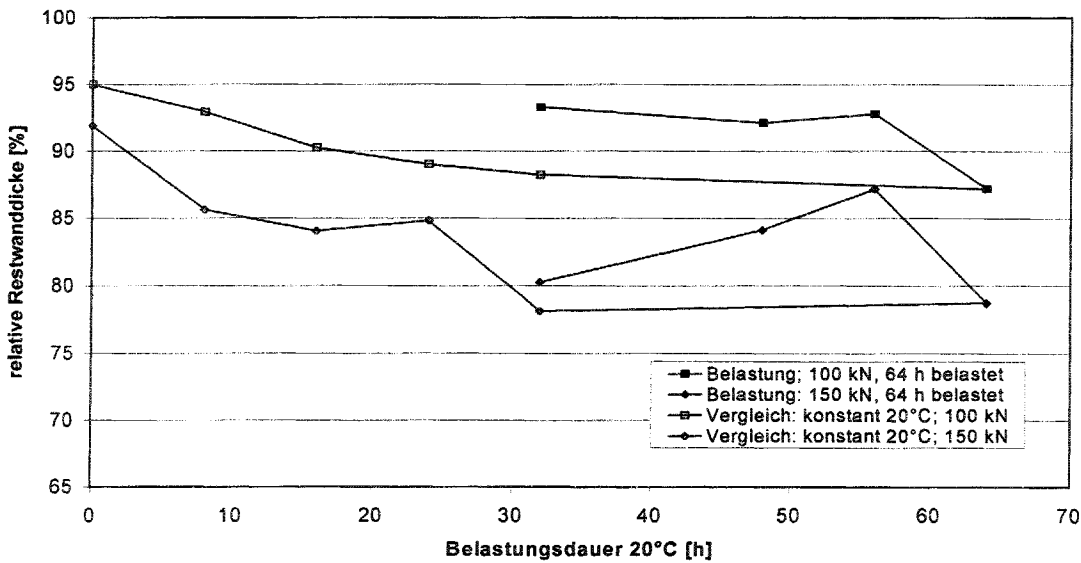


Abbildung 4.25: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen bei Temperaturwechsel 0°C-20°C

4.2.6.5 Versuchsreihe E

In der Versuchsreihe E wurden die Proben zunächst bei einer Umgebungstemperatur von 20°C, anschließend bei einer Temperatur von 40°C belastet (Abbildung 4.2). Die Ausgangs-

wanddicken der verwendeten Polyethylen-Schutzhüllrohre sind in Abbildung 4.26 aufgetragen.

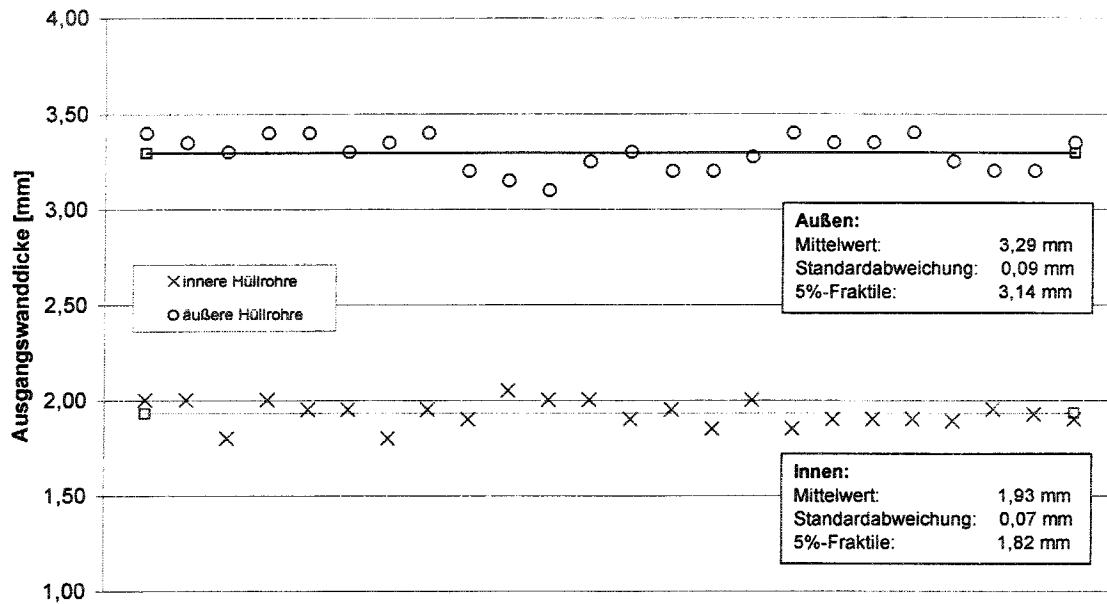


Abbildung 4.26: Ausgangswanddicken der Versuchsreihe E

Wie die Ergebnisse der Versuchsreihe D sind in den folgenden Diagrammen die Restwanddicken in Relation zu den Ausgangswanddicken in Abhängigkeit von der Belastungsdauer nach der Temperaturumstellung, also bei der Umgebungstemperatur von 40°C, aufgetragen.

Zum Vergleich sind die Messwerte der Versuchsreihe C (konstante Umgebungstemperatur 40°C) eingetragen.

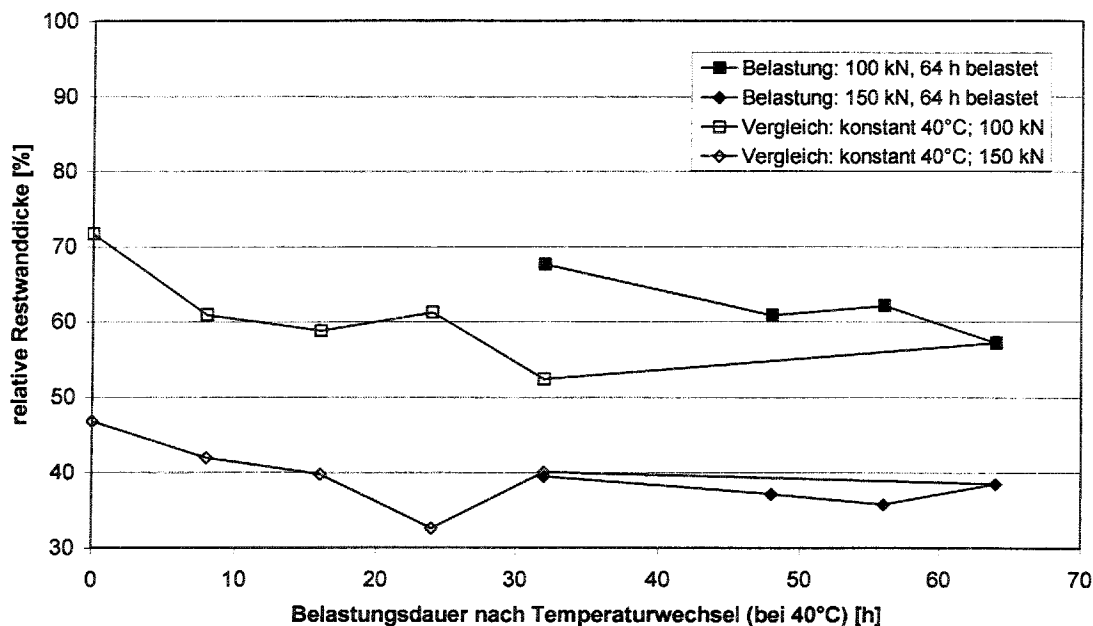


Abbildung 4.27: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei Temperaturwechsel 20°C-40°C

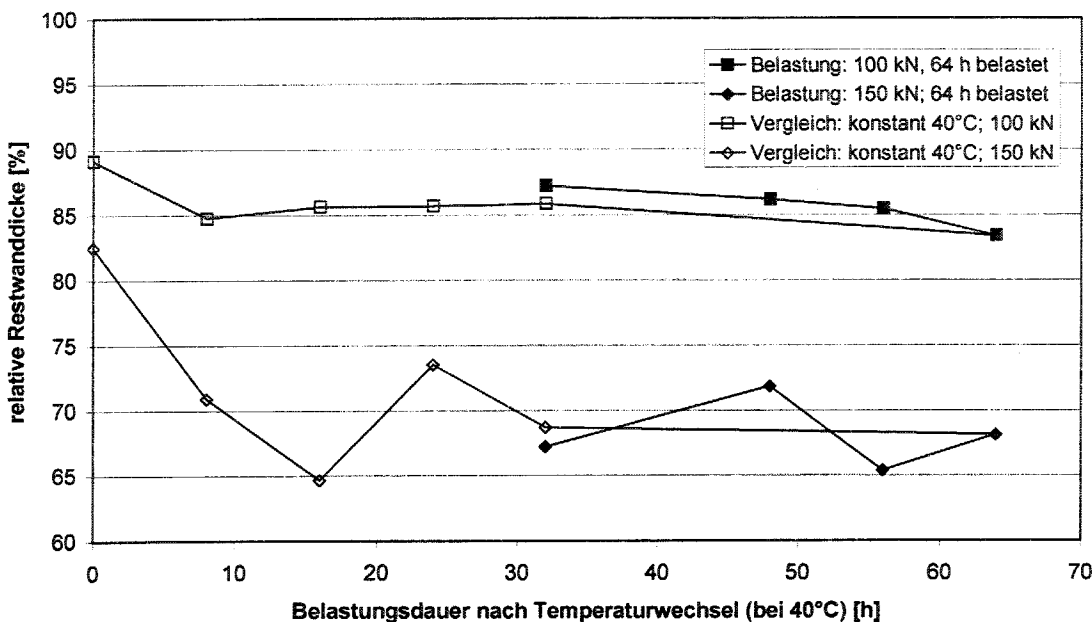


Abbildung 4.28: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhülle bei Temperaturwechsel 20°C-40°C

4.2.6.6 Versuchsreihe F

In der Versuchsreihe F wurden die Proben zunächst bei einer Umgebungstemperatur von 40°C, anschließend bei einer Temperatur von 20°C belastet (Abbildung 4.2). Die Ausgangswanddicken der verwendeten Polyethylen-Schutzhüllrohre sind in Abbildung 4.29 aufgezeichnet.

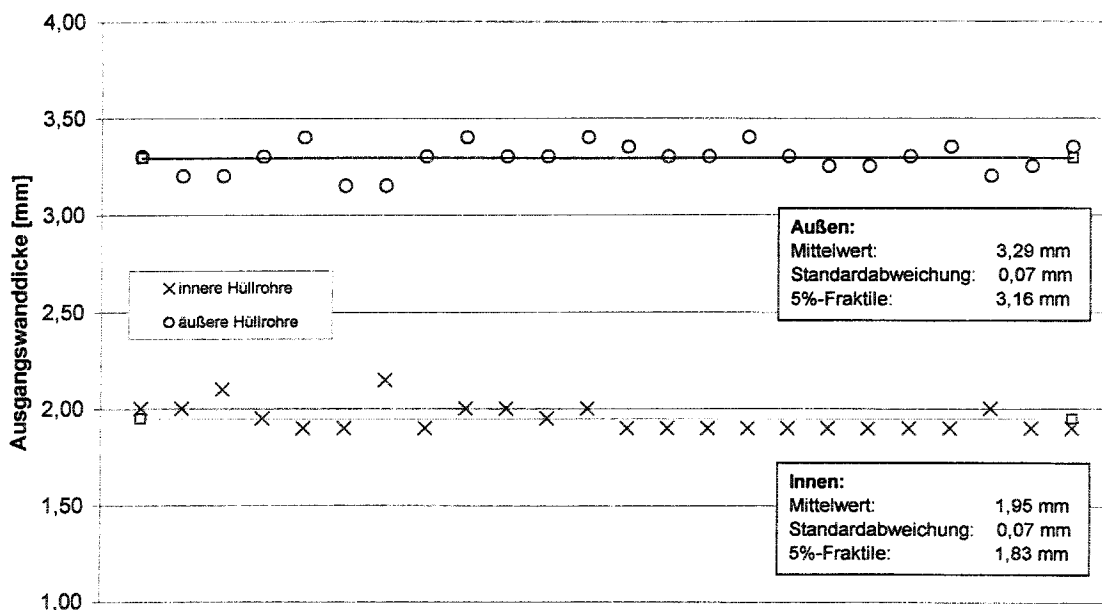


Abbildung 4.29: Ausgangswanddicken der Versuchsreihe F

In den folgenden Diagrammen sind die relativen Restwanddicken in Abhängigkeit von der Belastungsdauer vor der Temperaturumstellung, also bei der Umgebungstemperatur von 40°C, dargestellt.

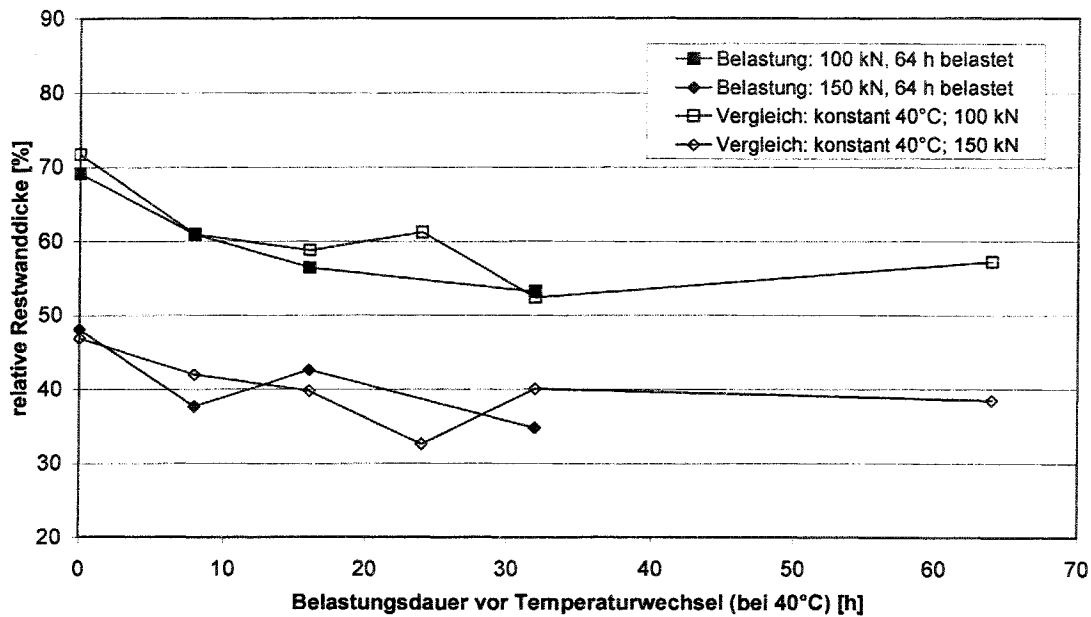


Abbildung 4.30: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei Temperaturwechsel 40°C-20°C

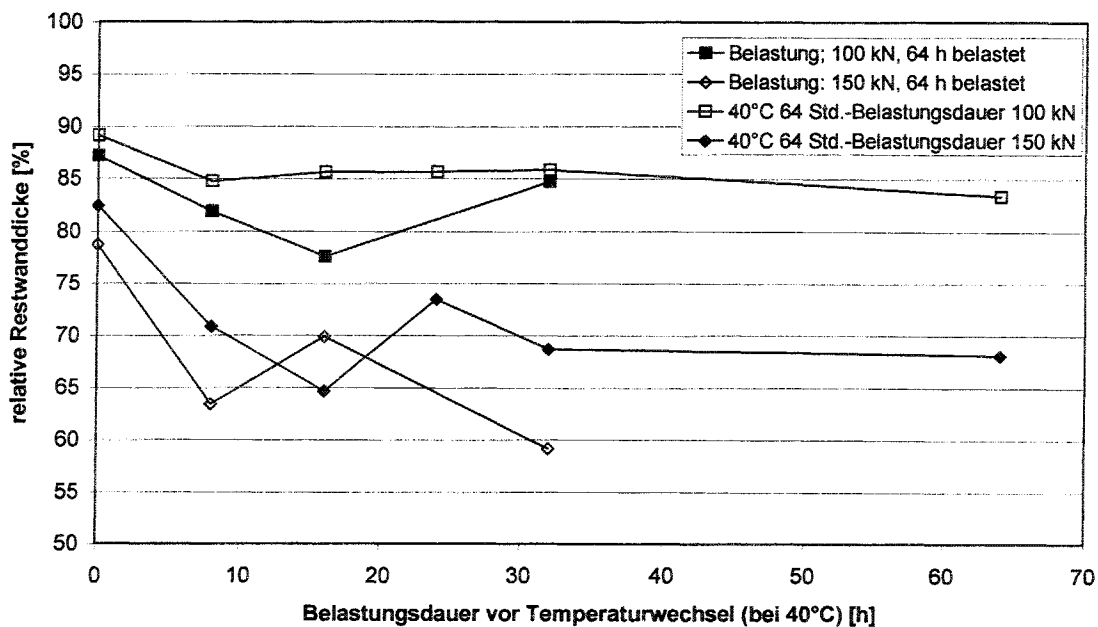


Abbildung 4.31: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhülle bei Temperaturwechsel 40°C-20°C

Zum Vergleich sind die Messwerte der Versuchsreihe C (konstante Umgebungstemperatur 40°C) eingetragen. Die Referenzwerte sind bei unterschiedlichen Belastungsdauern ermittelt worden, die Belastungsdauer in Versuchsreihe F betrug einheitlich 64 Stunden.

4.2.6.7 Versuchsreihe G

In der Versuchsreihe G wurden die Proben unter Temperaturzyklen mit einer Dauer von jeweils 12 Stunden belastet. Die Umgebungstemperatur während der Versuche lag bei 20°C bzw. 40°C. Die Ausgangswanddicken der verwendeten Polyethylen-Schutzhüllrohre sind im folgenden Diagramm aufgetragen.

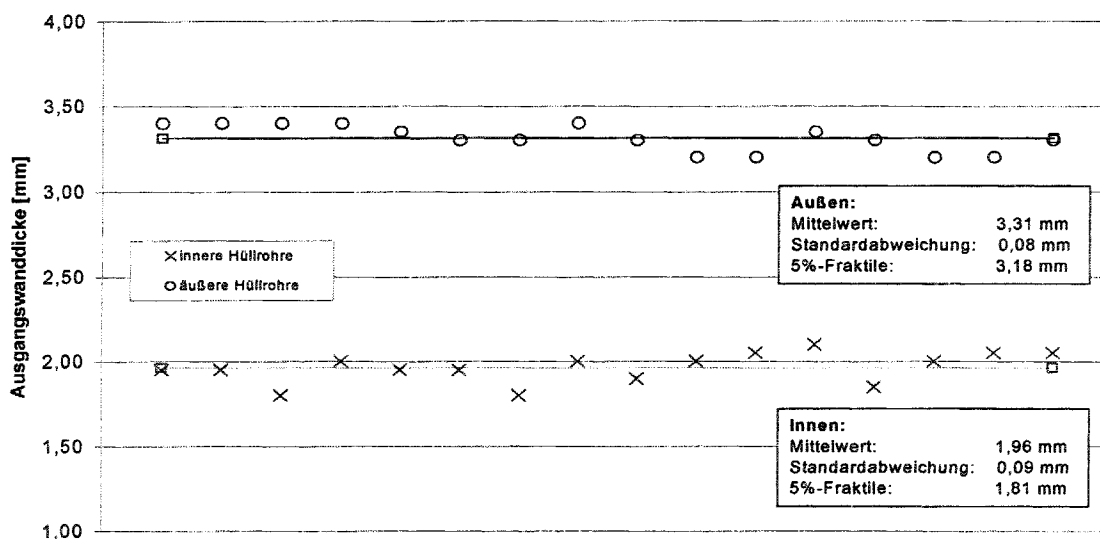


Abbildung 4.32: Ausgangswanddicken der Versuchsreihe G

In Abbildung 4.33 sind die Restwanddicken der inneren Schutzhüllen in Relation zu den Ausgangswanddicken in Abhängigkeit von der Summe der Belastungszeiten bei der höchsten Temperatur, also bei der Umgebungstemperatur von 40°C, aufgetragen.

Als Referenzwerte sind die Messwerte der Versuchsreihe C (konstante Umgebungstemperatur 40°C) eingetragen.

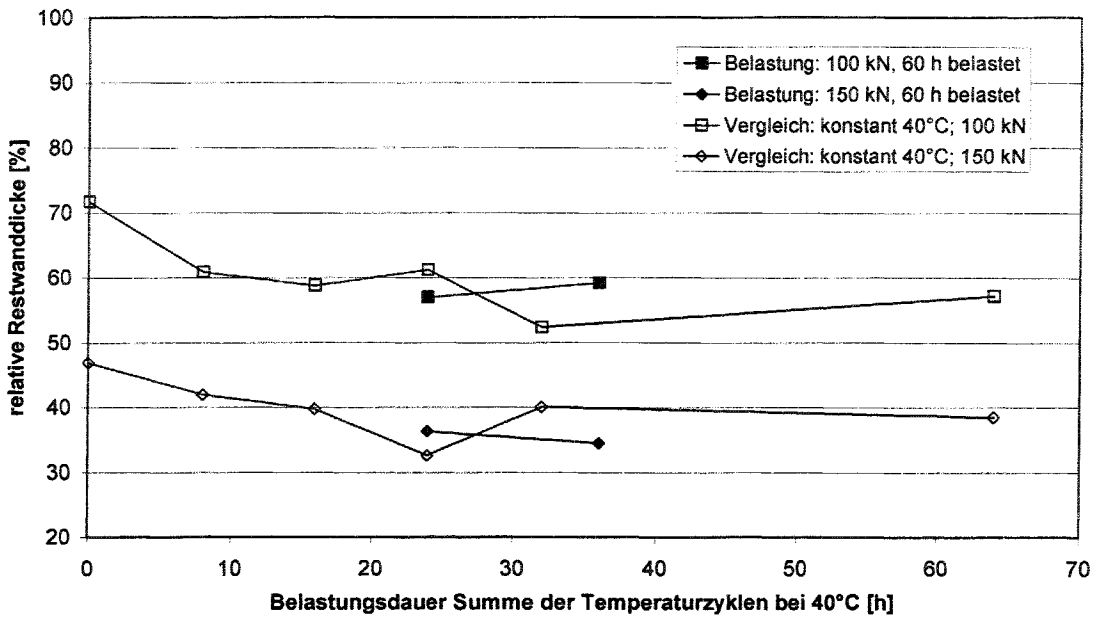


Abbildung 4.33: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen, Temperaturzyklen 40°C-20°C

4.2.6.8 Versuchsreihe H

In der Versuchsreihe H wurden die Proben bei der extremen Umgebungstemperatur von -25°C und einer Belastungsdauer von 45 Minuten getestet. Die Ausgangswanddicken der verwendeten Polyethylen-Schutzhüllrohre sind im folgenden Diagramm aufgetragen.

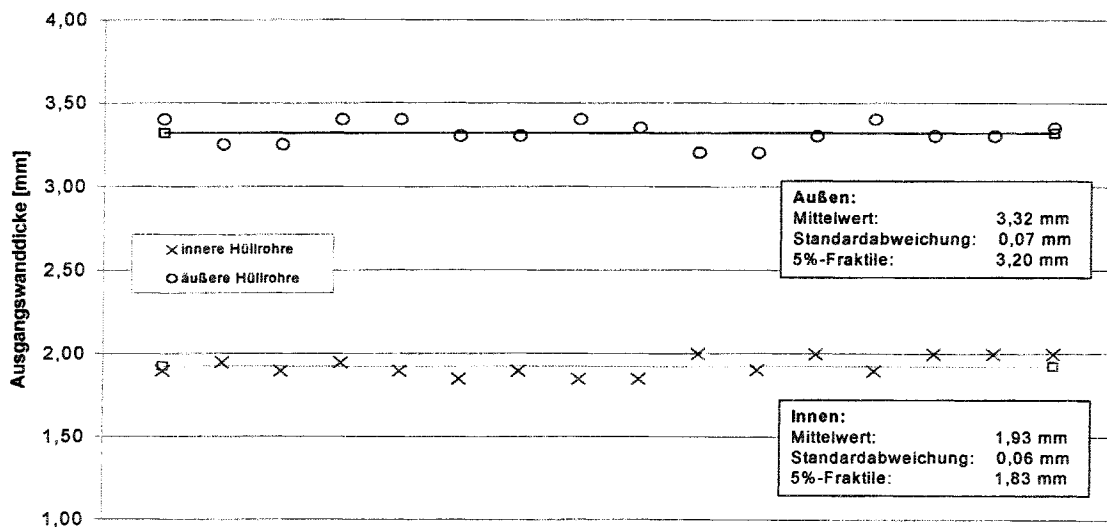


Abbildung 4.34: Ausgangswanddicken der Versuchsreihe H

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden auch Versuche bei 20°C und gleicher Belastungsdauer durchgeführt (Abbildung 4.38).

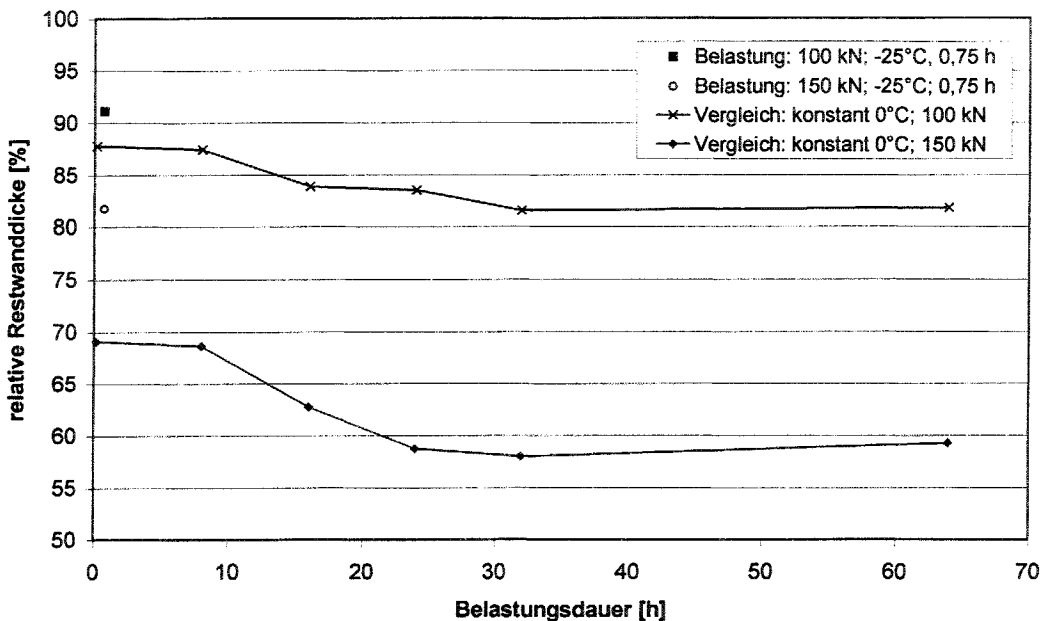


Abbildung 4.35: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen bei -25°C

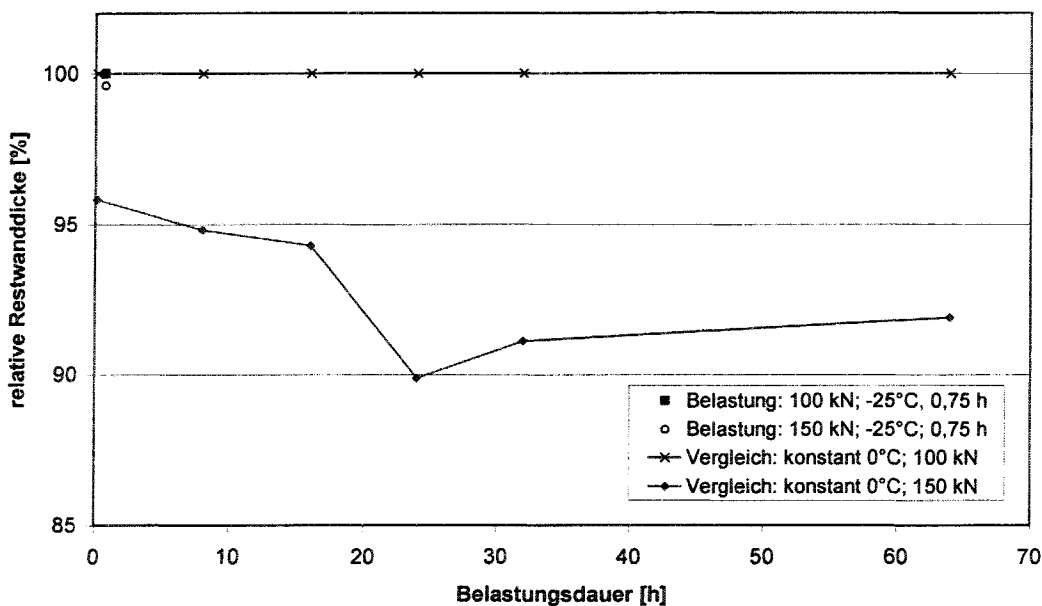


Abbildung 4.36: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen bei -25°C

4.2.7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Anhand der Versuchsauswertungen für die Serien A bis C mit konstanter Querpressung und konstanter Temperatur ist zu erkennen, dass die Restwanddicken der inneren und äußeren Mäntel mit zunehmender Belastungsdauer abnehmen. Der Betrag der Restwanddicken nähert

sich insbesondere bei den inneren Hüllrohren mit zunehmender Belastungsdauer asymptotisch einem minimalen Wert an.

Dieses Verhalten war zu erwarten, da sich aufgrund der Geometrie der Litzen mit zunehmender Eindrückung die Kontaktfläche zwischen Litzen und PE vergrößert, wie in Abbildung 4.37 zu erkennen ist. Bei gleichbleibender Kraft verringert sich mit zunehmender aktiver Kontaktfläche die Auflagerpressung so weit, bis nur noch geringe plastische Verformungen auftreten.

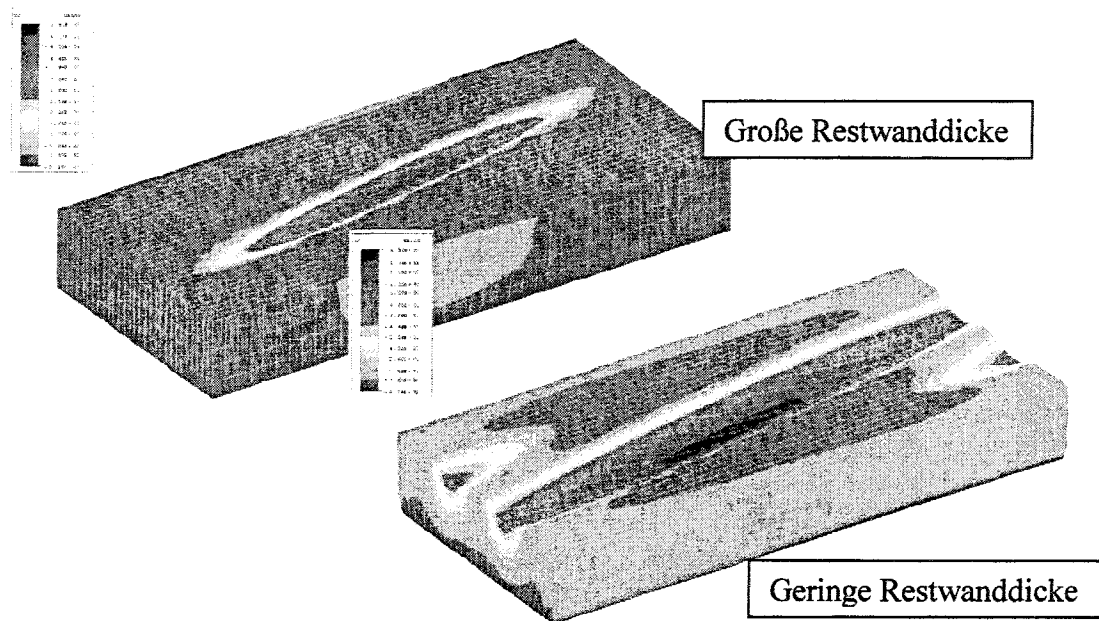


Abbildung 4.37: Eindrückfiguren für unterschiedliche Restwanddicken nach numerischer Simulation [5]

Die Restwanddicken sind bei gleichbleibender Umlenkraft und Belastungsdauer von der Umgebungstemperatur der Spannbänder abhängig. In den Versuchen A bis C konnte gezeigt werden, dass insbesondere bei den inneren Schutzhüllen im Bereich von 0°C bis 40°C ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Restwanddicke und Temperatur besteht. In Abbildung 4.38 sind die Restwanddicken der inneren Hüllrohre für unterschiedliche Belastungsdauern und Querpressungen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur aufgetragen, in Abbildung 4.39 sind die Restwanddicken der äußeren Hüllrohre in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur aufgetragen. Bei den inneren Hüllrohren ist die lineare Abhängigkeit der Restwanddicken von der Umgebungstemperatur relativ deutlich zu erkennen, bei den äußeren Mänteln ist diese lineare Abhängigkeit schwächer ausgeprägt.

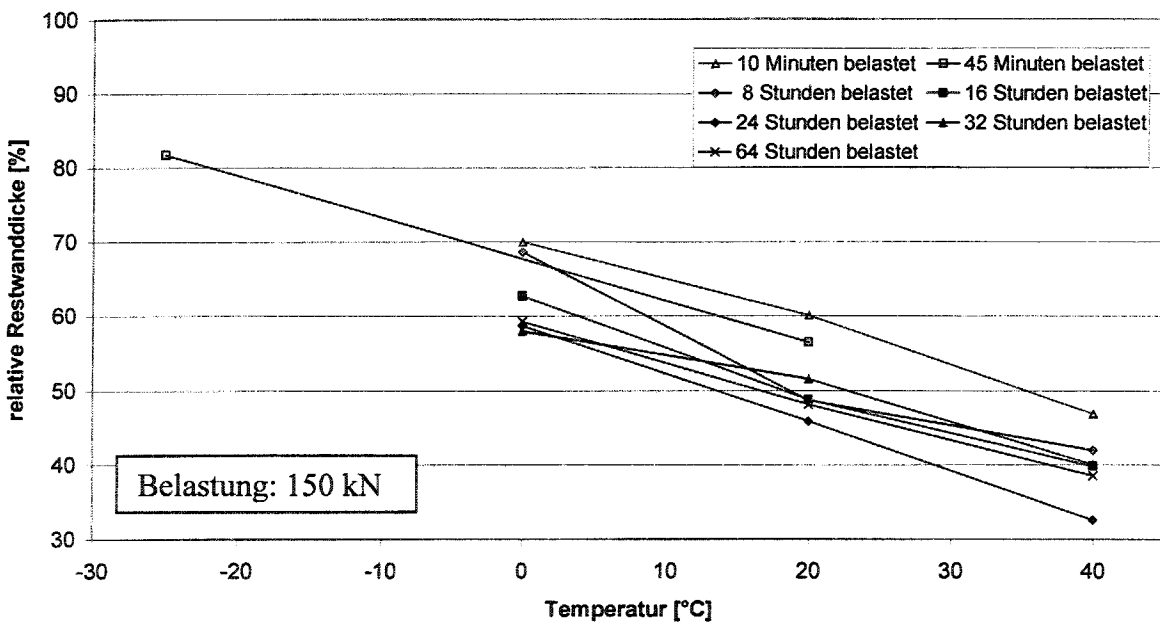
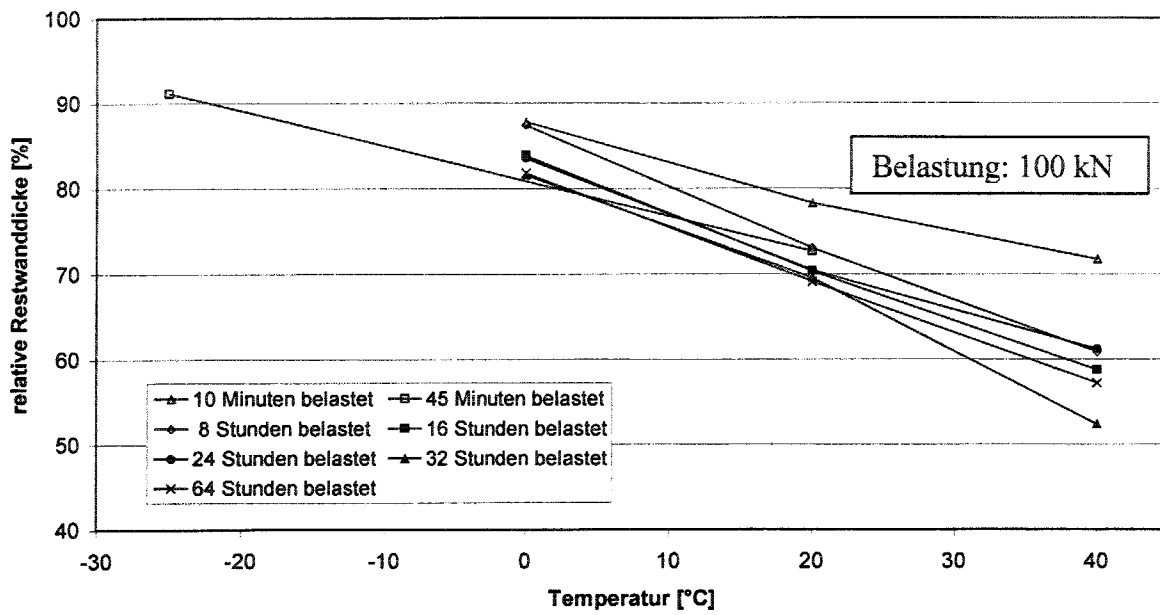


Abbildung 4.38: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen

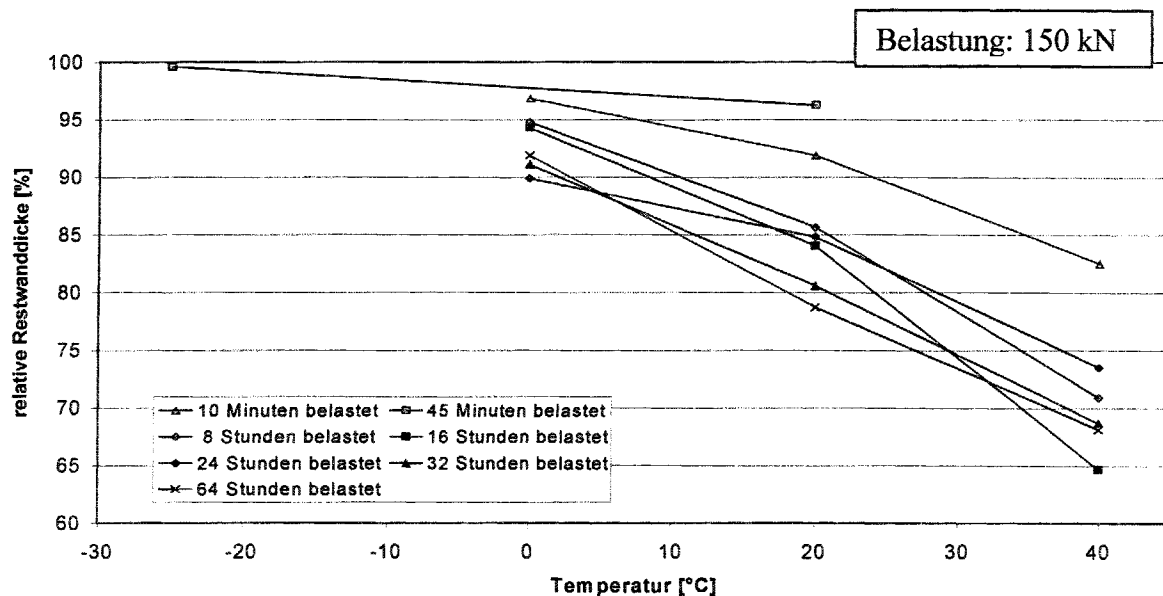
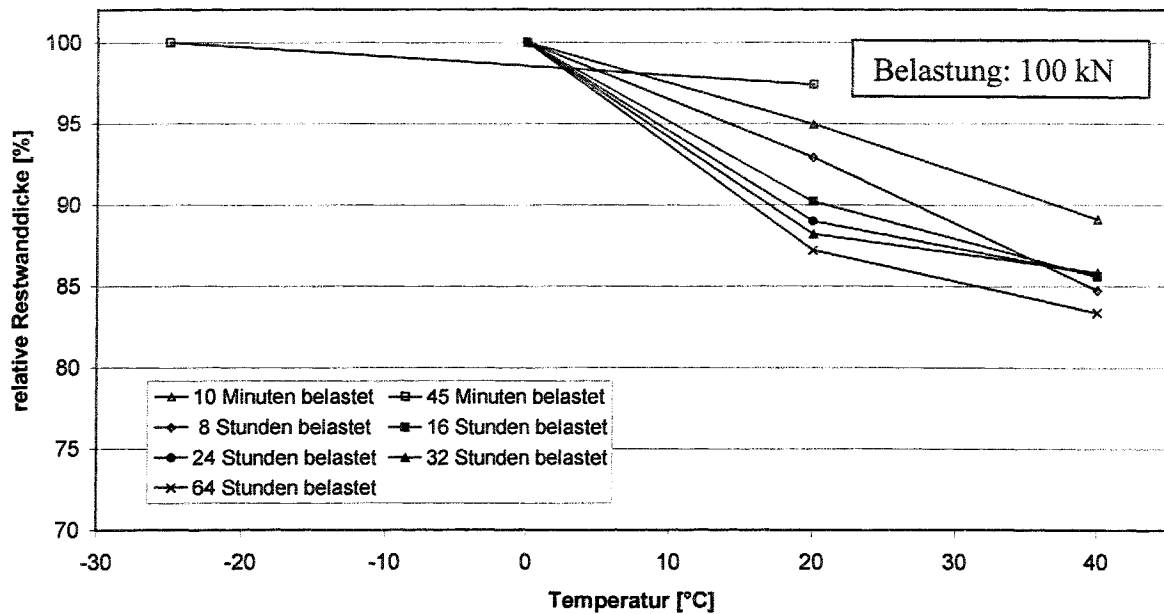


Abbildung 4.39: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen

Gerade in den Versuchsreihen B (konstante Temperatur 20°C) und C (konstante Temperatur 40°C) streuen die Werte relativ stark. Gut zu erkennen ist, dass extrem niedrige Restwanddicken der inneren Schutzhüllen durch relativ starke Restwanddicken des äußeren Mantels ausgeglichen werden.

Exemplarisch sind für die Versuchsreihe C in Abbildung 4.40 die Restwanddicken der inneren und äußeren Schutzhüllen aufsummiert und in Abhängigkeit von der Belastungsdauer aufgetragen. Zum Vergleich sind die Restwanddicken der äußeren und inneren Schutzhüllen jeweils separat eingezeichnet. Es zeigt sich, dass der geringe Wert der Restwanddicken der inneren Hüllen bei 24 Stunden Belastungsdauer stark vom asymptotischen Verlauf der Kurve

abweicht. Summiert man die Restwanddicken der inneren und äußeren Mäntel, ergibt sich ein relativ gleichmäßiger Verlauf der Messwerte.

Das entsprechende Diagramm für die Versuchsreihe B zeigt ein ähnliches Bild der Aufsummierung der Restwanddicken und ist daher an dieser Stelle nicht aufgeführt.

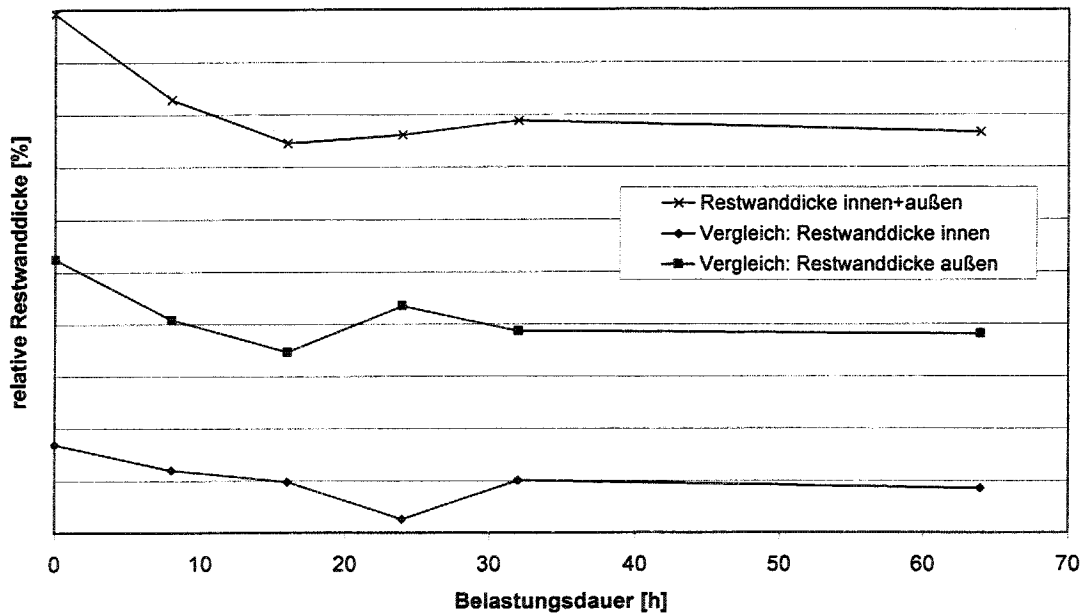


Abbildung 4.40: Summe der Restwanddicken innere und äußere Schutzhüllen

Der Einfluss der Umgebungstemperatur scheint weitestgehend unabhängig von der Größe der aufgetragenen Last und der Dauer der Belastung zu sein. Eine Steigerung der Temperatur von 0°C auf 40°C bewirkte bei den Restwanddicken der inneren Hüllrohre eine Abnahme von ca. 18-29% bzw. 0,35-0,55 mm, bei den äußeren Hüllrohren eine Verringerung von ca. 15-30% bzw. 0,50-1,00 mm. Dies entspricht für die untersuchten Materialien einer Abnahme der Restwanddicken von 0,08-0,14 mm pro 10°C bei den inneren Hüllrohren und 0,13-0,25 mm pro 10°C bei den äußeren Hüllrohren.

Trotz der relativ starken Streuung der Messwerte zeigen die Ergebnisse der Versuchsreihen D bis G, dass für die Restwanddicken der inneren und äußeren Schutzhülle die jeweils höchste, während der Belastungsphase auftretende Umgebungstemperatur maßgebend ist. Belastungsphasen bei einer niedrigeren Temperatur haben nahezu keinen Einfluss auf die Restwanddicken der Proben. Dabei ist unerheblich, ob zunächst die höhere Umgebungstemperatur eingestellt wird und bei dem Temperaturwechsel eine Abkühlung erfolgt, oder ob zu Versuchsbeginn die niedrigere Temperatur herrscht und die Probe anschließend erwärmt wird. Eine spätere Abkühlung bei gleichbleibender Querpressung bewirkte wie zu erwarten keinen

messbaren Rückgang der Eindrückungen. Die Auswertungen der computergesteuerten Verformungsmessungen bestätigen dieses Ergebnis.

In Abbildung 4.41 sind dazu beispielhaft die Zeit-Verformungskurven der Versuche MS019 (16 h bei 20°C, dann 48 h bei 40°C) und MS036 (16 h bei 40°C, dann 48 h bei 20°C) aufgetragen. Die Proben wurde mit 150 kN belastet. Gemessen wurde die gesamte Verformung der Probekörper infolge Querpressung, d.h. der inneren und äußeren Schutzhüllen. Die Eigenverformung des Versuchsstandes unter der aufgebrachten Last wurde ermittelt und von der aufgezeichneten Gesamtverformung subtrahiert, so dass in Abbildung 4.41 ausschließlich die Verformung des eingebauten Probekörpers aufgetragen ist. Erkennbar ist, dass die Endverformungen beider Proben nach dem Temperaturwechsel annähernd gleich sind. Die Reihenfolge der aufgebrachten Temperaturen hat offenbar keinen erkennbaren Einfluss auf die Endverformung.

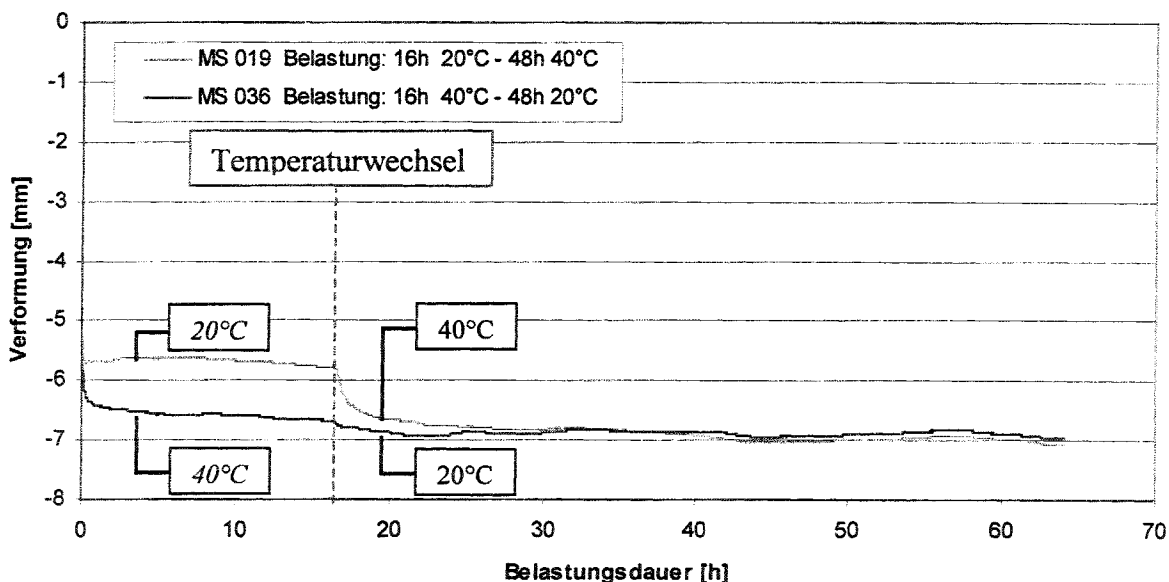


Abbildung 4.41: Zeit-Verformungsdiagramm bei Temperaturwechseln 20°C-40°C, bzw. 40°C-20°C

Die Auswirkungen unterschiedlicher Manteldicken der PE-Schutzhüllen auf die Dauerhaftigkeit externer Spannglieder wurden bereits in [5] beschrieben. Die dort aufgeführten Schlussfolgerungen können auf veränderte Umgebungstemperaturen übertragen werden.

Nach [5] wirken sich Unterlagen aus HDPE - dazu zählen in diesem Falle auch die äußeren Schutzhüllen selbst - auf die Restwanddicke der inneren Schutzhüllen dann positiv aus, wenn durch sie die Auflagerfläche zur Kraftübertragung vergrößert wird. Das ist der Fall, wenn sich die Litzen mit der inneren Schutzhülle in die Unterlage eindrücken können. Diese Eigenschaften sind unabhängig von der Umgebungstemperatur der Spannglieder, da Unterlage und inne-

re Schutzhüllen aus dem selben Material sind und somit die gleichen temperaturabhängigen Verformungseigenschaften besitzen. Ein verändertes Eindruckverhalten bei erhöhten oder besonders niedrigen Temperaturen ist damit nicht zu erwarten.

4.3 Torsionsversuche

Die Relativverschiebungen zwischen Litzen und PE-Mänteln, die in den Versuchen zum Einfluss von zyklischen Beanspruchungen simuliert werden sollen, können auf drei verschiedene Arten stattfinden. Die Litzen können sich entweder schraubenartig in den Mänteln drehen, oder die Litzen verschieben sich, ohne tordiert zu werden, relativ zu den PE-Hüllrohren entlang ihrer Längsachsen oder schräg zu dieser. In Vorversuchen konnte ein Verdrehen der Litzen beim Ein- und Austritt aus den Mänteln beobachtet werden.

Um abschätzen zu können, wie sich die Litzen bei Relativverschiebungen im Bauwerk verhalten, wurden Torsionsversuche an 0,6“ Litzen aus den untersuchten Spanngliedern zur Ermittlung der Torsionssteifigkeit durchgeführt.

Versuchsaufbau

Die Litzen wurden in einem Litzenprüfstand vorgespannt. In der Mitte des Litzenstücks wurde eine Gewindemutter (M30) aufgeklebt, um als Angriffspunkt für einen Momentenschlüssel zu dienen (Abbildung 4.42).

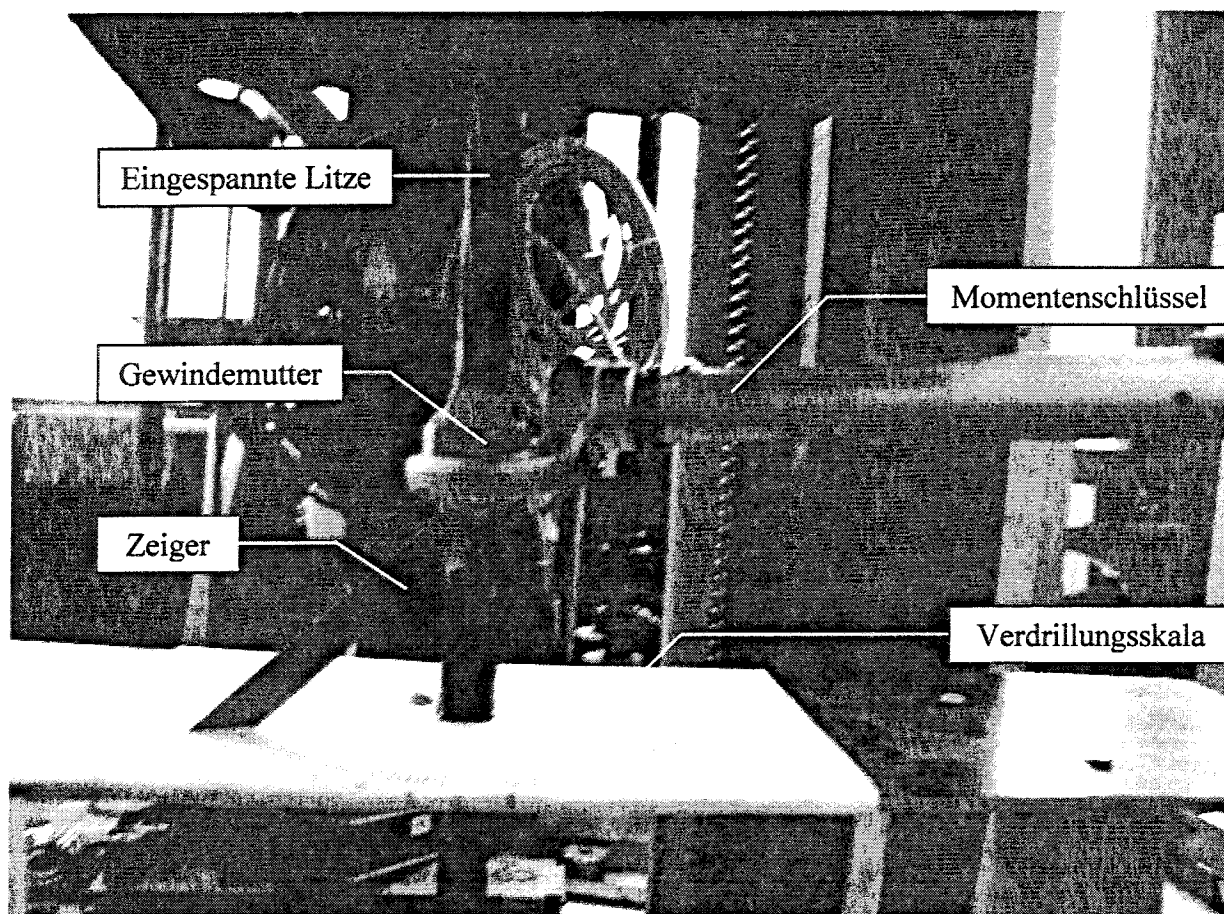


Abbildung 4.42: Versuchsaufbau Torsionsversuche

An der Mutter wurde außerdem ein Zeiger angebracht, der die Verdrehung der Litze unter einer Momentenbeanspruchung auf der zugehörigen Skala anzeigte. Um die Größe des aufgebrauchten Moments zu bestimmen, wurde ein Momentenschlüssel eingesetzt.

Versuchsdurchführung

Die Litzen wurden zunächst mit 90 kN, anschließend mit 130 kN und schließlich mit 170 kN vorgespannt. Nach dem Erreichen der Vorspannung wurde jeweils der Momentenschlüssel angesetzt und die Litze verdreht. Unter steigender Momentenbeanspruchung wurden die erzielten Verdrehungen abgelesen. Es wurden Litzen mit Längen von 1,20 m und 1,70 m untersucht, gemessen zwischen den Verankerungen.

Messtechnik und Auswertung

Die Vorspannung wurde mittels einer UPD60 Prüfmaschine der Firma Mohr & Federhoff AG aufgebracht, das einwirkende Moment mit einem Momentenschlüssel der Firma Dremotec bestimmt. Die vom Hersteller angegebene Genauigkeit beträgt $\pm 1,0$ Nm. Die sich einstellende Verdrehung der Litze konnte an einer Gradskala mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ$ abgelesen werden.

Ergebnisse

Nach den Messergebnissen ist die erreichte Verdrehung in dem Bereich von 10 Nm bis 50 Nm annähernd linear abhängig vom aufgebrauchten Moment. Die Höhe der Vorspannung hatte bei Vorspannungen von 90 kN bis 170 kN keinen erkennbaren Einfluss auf die Verdrillung. Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 4.43 dargestellt.

Um eine Verdrehung von ca. 14° zu erreichen, war bei der Litzenlänge von 1,20 m ein Drehmoment von 40 Nm erforderlich, bei einer Länge von 1,70 m ergab das Drehmoment von 40 Nm eine Verdrehung von ca. 22° . Wegen des Zusammenhangs zwischen Verdrehung und Drehmoment können folgende Gleichungen angegeben werden:

$$M = \frac{40 \text{ Nm}}{14^\circ} \cdot \varphi = 2,86 \frac{\text{Nm}}{1^\circ} \cdot \varphi \quad \text{bei 1,20 m Litzenlänge} \quad (77)$$

$$M = \frac{40 \text{ Nm}}{22^\circ} \cdot \varphi = 1,82 \frac{\text{Nm}}{1^\circ} \cdot \varphi \quad \text{bei 1,70 m Litzenlänge} \quad (78)$$

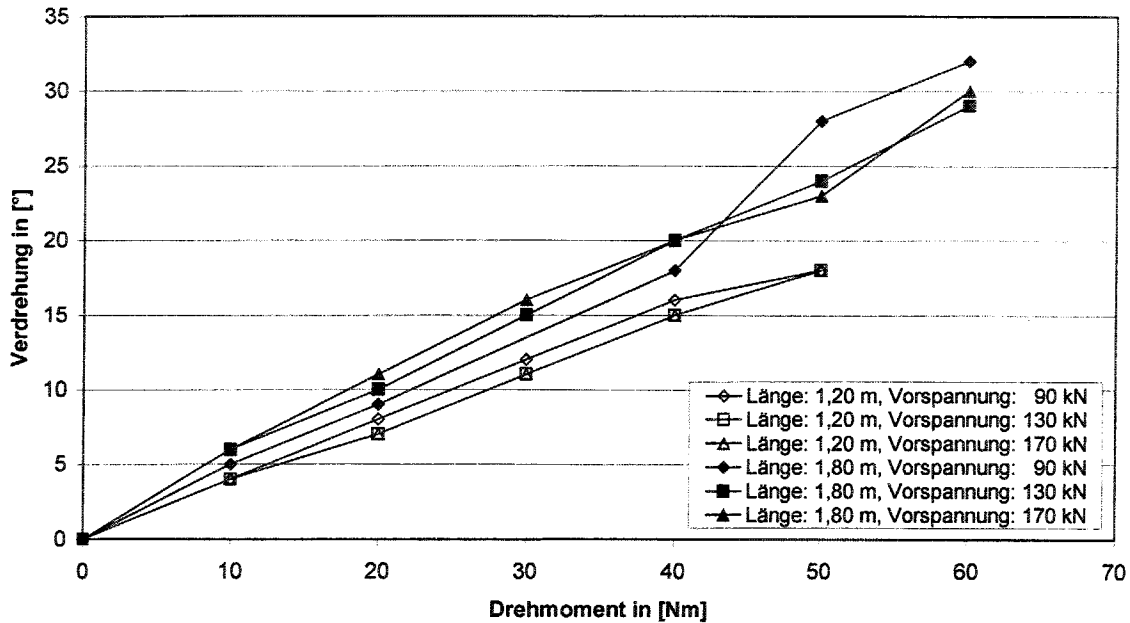


Abbildung 4.43: Auswertung Torsionsversuch 0,6“ Litzen

Nach dem Arbeitssatz ist die Verdrehung linear von der Litzenlänge abhängig, d.h. eine Verdopplung der Länge bei gleicher Momentenbeanspruchung ruft eine Verdopplung der Verdrehung hervor. Dies konnte auch bei den durchgeführten Versuchen beobachtet werden (Abbildung 4.44).

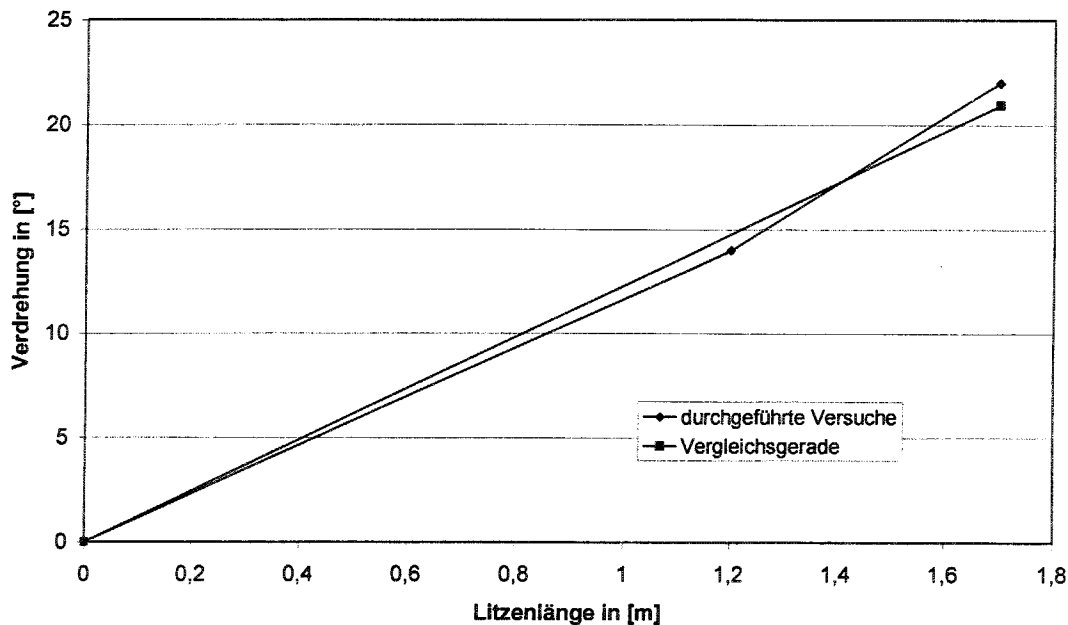


Abbildung 4.44: Auswertung Torsionsversuch 0,6“ Litzen

Somit kann das durch eine Verdrehung erzeugte Drehmoment annähernd wie folgt beschrieben werden:

$$2,86 \frac{Nm}{1^\circ} \cdot 1,20 m \approx 3,4 \frac{Nm \cdot m}{1^\circ} \quad (79)$$

$$1,82 \frac{Nm}{1^\circ} \cdot 1,70 m \approx 3,1 \frac{Nm \cdot m}{1^\circ} \quad (80)$$

$$\frac{1}{2} \cdot (3,4 + 3,1) \cdot \frac{Nm \cdot m}{1^\circ} \approx 3,3 \frac{Nm \cdot m}{1^\circ} \quad (\text{Mittelwert}) \quad (81)$$

$$M \approx 3,3 \frac{Nm \cdot m}{1^\circ} \cdot \varphi \cdot \frac{1}{l} \quad (82)$$

Hierin sind:

φ Verdrehung der Litze

l Länge der Litze

In Gleichung (59) (Kapitel 2.4.2) wurde für die Talbrücke Münchberg eine maximale Relativverschiebung von 0,543 mm (0,74 mm) in der äußeren Spanngliedlage ermittelt, auf einer Länge von:

$$L = \frac{44,25 m}{2} + \frac{52,16 m}{2} = 48,16 m \quad (83)$$

Die Litzen bestehen aus jeweils 7 Drähten, von denen ein Draht geradlinig in der Längsachse der Litze liegt, während ihn die anderen Drähte spiralförmig umlaufen. Auf einer Länge von 25 cm umlaufen die äußeren Drähte den Mitteldraht um 360°. Geht man von einer schraubenartigen Relativverschiebung aus, so ergibt sich eine von der Verschiebung linear abhängige Verdrehung:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{250 mm} \cdot \delta l = 1,44 \left[\frac{1^\circ}{mm} \right] \cdot \delta l \quad (84)$$

Hierin sind:

φ Verdrehung der Litze

δl Translatorische Verschiebung der Litze

Eine Relativverschiebung um 0,543 mm entspricht damit einer Verdrehung der Litze von:

$$\varphi = 1,44 \frac{1^\circ}{mm} \cdot 0,543 mm = 0,782^\circ \quad (85)$$

Hieraus ergibt sich somit ein Torsionsmoment von:

$$M_T = 3,26 \frac{Nm \cdot m}{1^\circ} \cdot 0,782^\circ \cdot \frac{1}{48,16 m} = 0,053 Nm \quad (86)$$

Mit den Ergebnissen aus Kapitel 2.4.2 ergibt sich das an den Umlenkstellen durch Reibung maximal aufnehmbare Moment in der zweiten Spanngliedlage pro Litze zu:

$$M = \frac{1}{4} \cdot R \cdot 2 \cdot r = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot U \cdot r = \frac{1}{4} \cdot 4 \cdot 4,73 \text{ kN} \cdot 2 \cdot 0,75 \text{ cm} = 71,9 \text{ Nm} \quad (87)$$

Hierin sind:

M Gegenmoment

R Reibungskraft

r Radius der Litze

Das maximal über Reibung aufnehmbare Moment ist somit sehr viel größer als das durch die Verdrehung erzeugte Moment. Sollte es also abweichend von den durchgeführten Berechnungen auch in den unteren Spanngliedlagen zu Relativverschiebungen kommen, so kann mit großer Wahrscheinlichkeit auch dort von einer schraubenartigen Relativbewegung der Litzen zum Mantelrohr ausgegangen werden. Auch die Verschiebungen der Litzen in der dritten und vierten Spanngliedlage sind als schraubenartige Bewegungen anzunehmen, da die Rückstellmomente bei zunehmenden Momenten durch Reibung dem Betrage nach gleich bleiben.

Eine Torsion der Litzen in der äußeren Spanngliedlage ist möglich, wenn das aus der Ausmittigkeit der angreifenden Reibungskraft an der Unterseite der Litzen entstehende Moment (Abbildung 2.22) größer ist als die Torsionssteifigkeit der Litze.

Die Reibungskraft kann nicht größer werden als die durch die seitliche Auslenkung erzeugte Kraftkomponente der Vorspannkraft, die senkrecht zum Litzenverlauf angreift zzgl. der haltenden Kräfte des äußeren Mantels. Die in Kapitel 2.6 ermittelte Rückstellkraft ohne Berücksichtigung der Stützkraft des äußeren Mantels beträgt bei maximaler Auslenkung 1,33 N, die maximale Reibungskraft beträgt 1,75 kN.

Das durch die Ausmittigkeit der angreifenden Reibungskraft erzeugte Moment ergibt sich zu:

$$M = \mu \cdot U \cdot r = R \cdot r = 1,33 \text{ N} \cdot 0,75 \text{ cm} = 0,01 \text{ Nm} \quad (88)$$

Hierin sind:

M Moment aus Vorspannkraft und horizontaler Auslenkung

R Reibungskraft

r Radius der Litze

Dieser Rechenansatz zeigt, dass ohne die Stützwirkung des äußeren Mantels eine translatorische Bewegung diagonal zur Längsachse der Litzen auftreten würde. Die durch die seitliche Stabilisierung des äußeren Mantels erzeugten Kräfte sind bislang nicht bekannt. Da das Moment, welches aufzubringen ist, um eine Verdrehung der Litzen zu ermöglichen, sehr gering ist, wird angenommen, dass auch in der äußeren Lage eine Torsion der Litzen erfolgt. Das Moment berechnet sich zu:

$$\delta M = M_T - M = 0,053 \text{ Nm} - 0,010 \text{ Nm} = 0,043 \text{ Nm} \quad (89)$$

Hierin sind:

M_T Treibendes Moment aus Verdrehung der Litze

M Haltendes Moment aus horizontaler Auslenkung und Reibungskraft

Demnach ist anzunehmen, dass sich die Litzen im Brückenbauwerk bei Relativverschiebungen infolge Verkehrslasten in die Schutzhüllen schraubenartig eindrehen. Die Litzen folgen dem Riefenverlauf und weichen nicht von diesem ab.

4.4 Versuche zum Einfluss von Betriebsbeanspruchungen

4.4.1 Allgemeines

Brückenbauwerke sind im Gebrauchszustand zahlreichen Lastwechseln ausgesetzt. Durchbiegungen von extern vorgespannten Brücken können zu Relativverschiebungen zwischen Spannlitzen und Korrosionsschutzhüllen führen. Welchen Einfluss diese Verschiebungen auf die Dauerhaftigkeit (Restwanddicken) von Polyethylen-Schutzhüllen haben, ist zur Zeit noch ungeklärt. Mit den durchgeführten Versuchen soll diese Problematik näher untersucht werden.

Um den Einfluss der Betriebsbeanspruchung auf die Dauerhaftigkeit von PE-Schutzhüllen externer Spannglieder zu untersuchen, wurden nach umfangreichen Vorversuchen die in Tabelle 4.4 aufgelisteten Versuche durchgeführt.

	Verschiebung [mm]			Lastwechsel [-]					Radius [m]		Spanngliedlage [-]				Frequenz [Hz]		
	0,1	0,5	1,0	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	2·10 ⁶	4,00	6,00	1	2	3	4	1,0	2,0	3,0
PEdyn1		x					X			x				x	x		
PEdyn2		x						X		x				x	x		
PEdyn3		x					X		x		x				x		
PEdyn4	x						X			x				x	x		
PEdyn5			x				X			x				x	x		
PEdyn6		x		x						x				x	x		
PEdyn7		x			X					x				x	x		
PEdyn8		x				x				x				x	x		
PEdyn9		x					X		x			x			x		
PEdyn10		x					X		x		x					x	
PEdyn11		x					X		x		x						x

Tabelle 4.4: Versuchsübersicht

Bei der Durchführung der Versuche wurden folgende Parameter variiert:

- Lastspielzahl
- Verschiebungsamplitude
- Umlenkradius
- Frequenz
- Querpressung

Um ein relativ großes Spektrum zum Einfluss der Lastspielzahlen auf die Restwanddicke der PE-Ummantelungen abzudecken, wurden Versuche mit 10³ bis 2·10⁶ Lastwechsel durchgeführt.

In Anlehnung an [5] und nach den eigenen Berechnungen zu Relativverschiebungen bei extern vorgespannten Brücken (Kapitel 2) wurden Amplituden von 0,1 mm bis 1,0 mm als Relativverschiebung gewählt. Größere Relativverschiebungen sind nicht zu erwarten, kleinere dürften sich nicht ungünstig auf die Dauerhaftigkeit der PE-Schutzhüllen auswirken.

Für die untersuchten Spannglieder ist ein Mindestumlenkradius von $r = 4,00$ m vorgeschrieben, bei voller Vorspannung entspricht dies einer maximalen Umlenkraft von $U = 150$ kN auf einer Länge von 20 cm. Nach eigenen Berechnungen sind bei dieser Umlenkraft die Reibungskräfte zwischen Litzen und inneren Schutzhüllen so groß, daß die Spannungsdifferenzen in den Litzen zweier benachbarter Felder aufgenommen werden können. Es kommt also zu keinen Relativverschiebungen an den Umlenkstellen. Um die Ergebnisse der Versuche zum Einfluss zyklischer Beanspruchungen mit den Ergebnissen der Temperaturversuche vergleichen zu können, wurde als Standardbelastung eine Querpressung von 100 kN auf einer Länge von 20 cm aufgebracht. Diese Belastung entspricht einem Umlenkradius von $r = 6,00$ m.

Die Standardfrequenz wurde auf Grund der Erkenntnisse der zahlreichen Vorversuche auf 1 Hertz festgelegt.

4.4.2 Versuchsaufbau

Für die Versuche unter Betriebsbeanspruchung wurde die in einem DIBt-Forschungsvorhaben entwickelte Kleinmodellversuchsanlage [5] modifiziert und eingesetzt.

Der Versuchsaufbau besteht aus einem auf Rollen gelagerten, verschieblichen Spannrahmen, in dem die Spannglieder vorgespannt und verankert werden können (Abbildung 4.45). Das Spannglied liegt innerhalb des Spannrahmens auf einem unverschieblichen Sattel auf, der den äußeren Mantel und die inneren Hüllrohre fixiert. Oberhalb des Sattels befindet sich ein Hydraulikzylinder, der den erforderlichen Querdruck auf den Polyethylenmantel aufbringt.

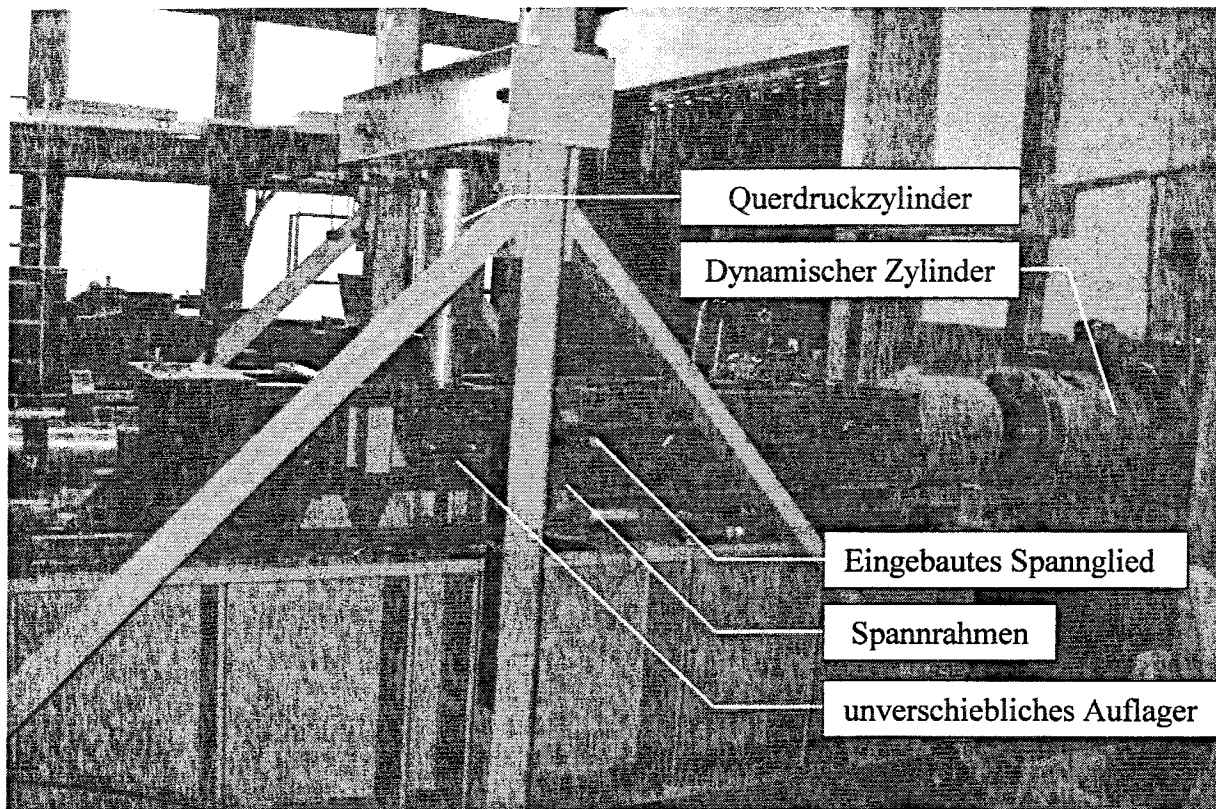


Abbildung 4.45: Versuchsstand für die Versuche unter Betriebsbeanspruchung

An der Kopfseite ist der Spannrahmen fest mit einem computergesteuerten Prüfzylinder der Firma Instron Testing Systems verbunden, der den gesamten Spannrahmen horizontal bewegen kann.

Die Litzen der Versuchskörper wurden relativ zu ihren Hüllrohren verschoben. Dabei drehten sich die Litzen schraubenartig in die PE-Hüllen ein. Die Litzen folgten dem zufolge den in das PE eingedrückten Riefen. Diese Art der Beanspruchung wurde auch mit dem analytischen Lösungsansatz in Kapitel 4.3 ermittelt.

Zahlreiche Vorversuche waren erforderlich, um das Verhalten der vorhandenen Kleinmodellversuchsanlage und der Proben unter zyklischer Belastung bestimmen zu können. Besonders intensiv wurde dabei die Veränderung der Temperatur innerhalb der Probe während des Versuchsablaufes und die Abnahme der Amplitude durch Erhöhung des inneren Reibungswiderstandes und das daraus resultierende Mitschwingen des gesamten Versuchsaufbaus untersucht.

Um die Relativverschiebungen zwischen Litzen und PE-Mantel messen zu können, wurde auf den Litzen eine Messuhr angebracht. Ein in der oberen Hälfte der Probe zwischen den inneren Schutzhüllen und dem äußeren Mantel eingebauter Temperaturfühler registrierte die Temperatur im Inneren der Probe.

In den Voruntersuchungen wurden die Einflüsse folgender Parameter auf die Temperatur und die Entwicklung der Schwingungsamplitude untersucht:

- Anzahl der Lastwechsel
- Frequenz
- Anfangsamplitude

Die ersten Versuche wurden in der bereits bestehenden Kleinmodellversuchsanlage ohne Umbaumaßnahmen durchgeführt. Die Parameter aufgebrachte Querpressung, Amplitude, Frequenz und Lastwechsel wurden entsprechend dem Versuchsplan eingestellt.

Die Veränderung der Innentemperatur und der Verschiebungsamplitude war bei allen Vorversuchen annähernd gleich. Während der Versuchsdurchführungen wurden maximale Temperaturen von über 50°C im Inneren der Probe und eine Abnahme der anfangs eingestellten Amplitude von ca. 40% des anfänglichen Weges registriert. Da der E-Modul von Polyethylen sehr temperaturabhängig ist und im Bauwerk diese extrem hohen Temperaturen nicht zu erwarten sind, musste die Kleinmodellversuchsanlage um eine Kühleinrichtung erweitert werden. Auch wegen der deutlichen Abnahme der Amplitude war eine Auswertung der Versuchsergebnisse nicht möglich.

Um die unter Betriebsbeanspruchungen auftretenden, hohen Temperaturen in den Spanngliedern senken zu können, wurde eine kombinierte Luft- und Wasserkühlung eingesetzt. Neben einem horizontal auf die PE-Ummantelung gerichteten Gebläse wurde ein Kühlwasserkreislauf eingerichtet, der die Litzen unmittelbar neben dem Bereich der Querpressung umläuft. Da der Stahl der Spannlitzen ein sehr guter Wärmeleiter ist, wurde auf eine direkte Kühlung des Polyethylens durch Wasser verzichtet.

Das Wasser wurde in einer Kühltruhe auf ca. 10°C abgekühlt und mit einer Pumpe auf ein die Litzen umgebendes Textilpolster befördert. Dieses Polster diente der gleichmäßigen Verteilung des Wassers auf die Litzen. Das aus dem Textil austretende Wasser wurde dem Kühlkreislauf wieder zugeführt (Abbildung 4.46). Mit dieser Vorrichtung konnte eine konstante Temperatur im Inneren der Probe während des Versuchsablaufs erzielt werden.

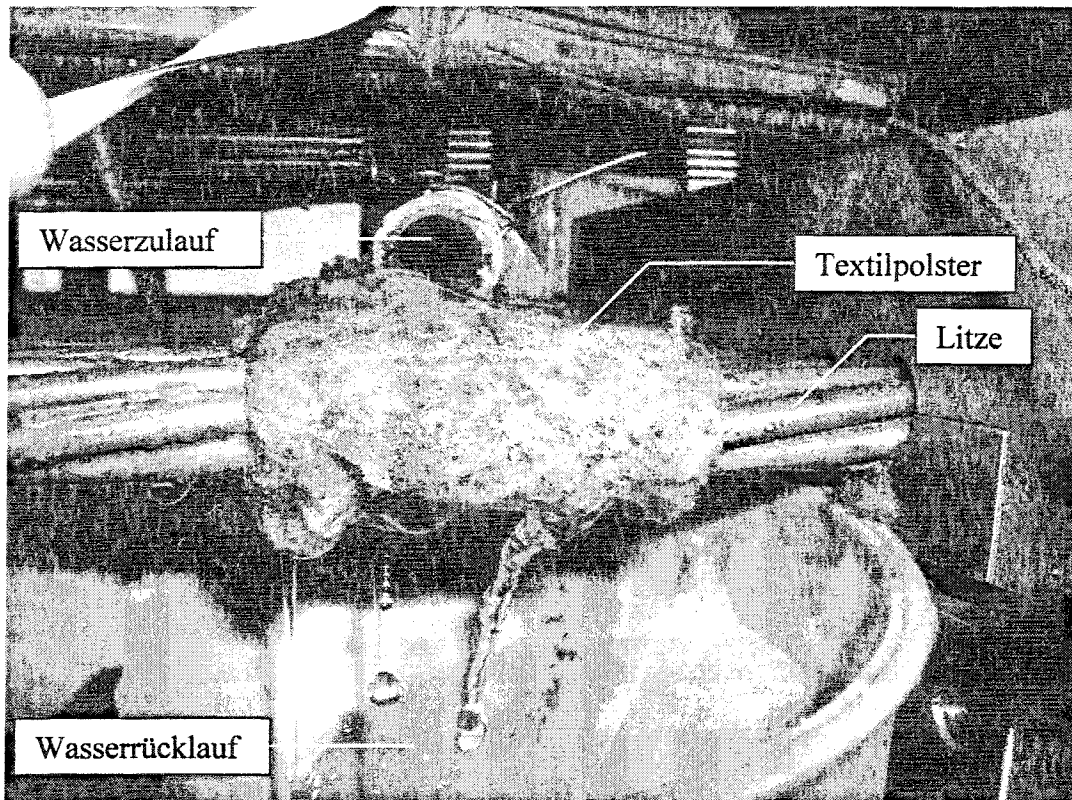


Abbildung 4.46: Kühlung der eingespannten Litzen

Um eine Verschiebung der PE-Schutzhüllen zusammen mit den Litzen auszuschließen, wurden zur seitlichen Fixierung des Mantels zwei Stahlplatten gefertigt, die mit ausreichend großen Aussparungen für die Litzen versehen waren (Abbildungen 4.47 und 4.48). Diese Platten waren am unverschieblichen Unterbau fixiert, um eine Verschiebung der Schutzhüllen in Längsrichtung der Litzen zu verhindern.

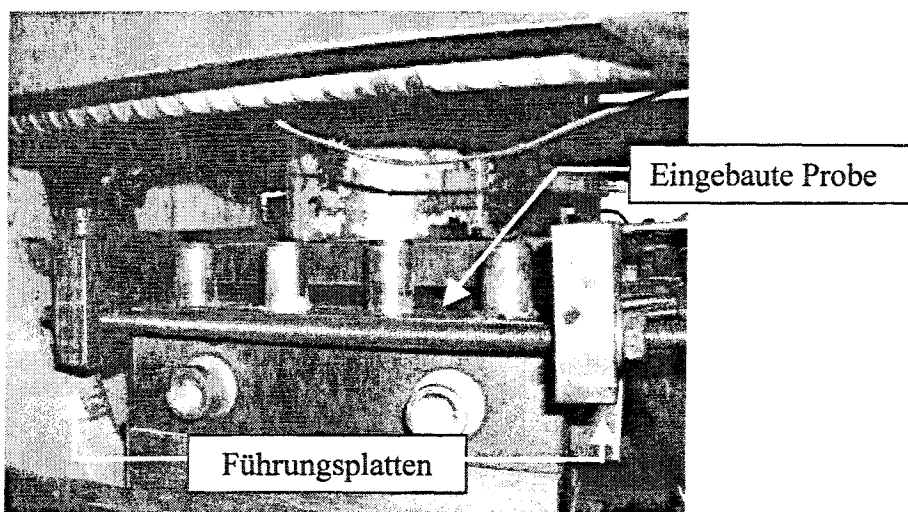


Abbildung 4.47: Seitliche Führungsplatten

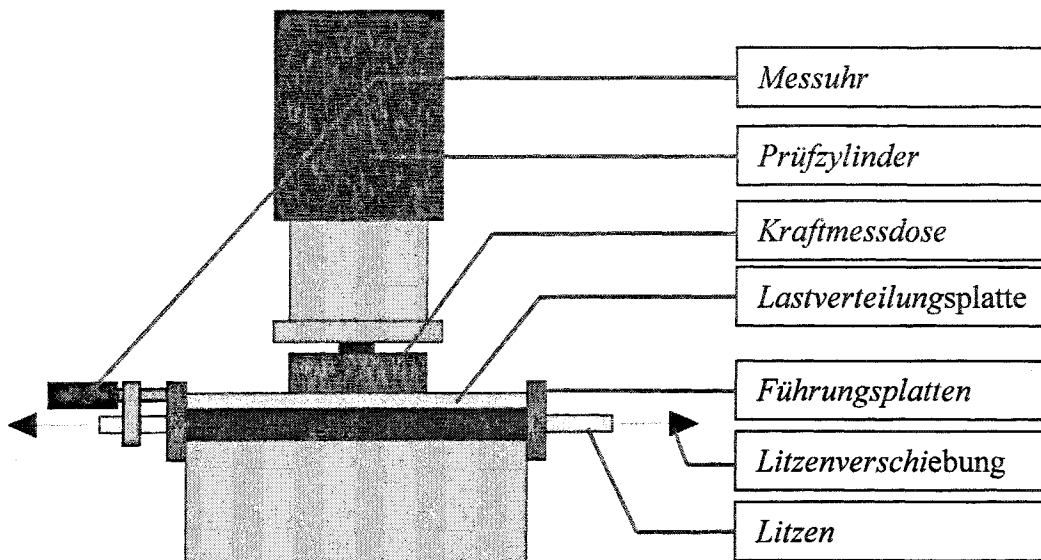


Abbildung 4.48: Wirkungsprinzip der seitlichen Führungsplatten

Eine Abnahme der Amplitude durch ein Mitschwingen des gesamten Versuchsaufbaus konnte trotz massiver Versteifungsmaßnahmen der gesamten Prüfkonstruktion nicht vollständig ausgeschlossen werden. Während des gesamten Versuchsablaufs wurde daher die Verschiebungsamplitude gemessen. Dazu wurde außerhalb der beiden Führungsplatten eine Weguhr an die vorgespannten Litzen angebracht, mit der die Relativverschiebung zwischen Litzen und Führungsplatten gemessen werden konnte. Da die Führungsplatten kraftschlüssig mit dem PE-Mantel verbunden waren, konnte so auf die Relativverschiebung zwischen Litzen und PE-Mantel geschlossen werden.

Kompensiert wurde die Abnahme der Anfangsamplitude durch manuelles Anpassen der eingestellten Wegamplitude, so dass die Amplitude der Relativverschiebungen zwischen Litze und PE-Mantel während des Versuchs annähernd konstant gehalten werden konnte.

4.4.3 Versuchsdurchführung, Messtechnik und Auswertung

Nach dem Einbau des Probekörpers wurde der PE-Mantel vor und hinter dem Sattelaufleger entfernt, so dass die Führungsplatten angebracht werden konnten. Anschließend wurde die Querpressung mit Hilfe eines Hydraulikzylinders auf den PE-Mantel aufgebracht. Der Druck wurde zunächst mit einer Handpumpe eingestellt und dann durch einen angeschlossenen Relaxationsprüfstand konstant gehalten (Kapitel 4.2.3). Die Lastwechsel starteten unmittelbar nach dem Aufbringen der Querpressung. Die Verschiebungsamplitude wurde mit einer an den Litzen angebrachten Messuhr eingestellt und gegebenenfalls manuell nachgeregelt.

Die aufgebrachte Querpressung wurde mit einer Druckmessdose und einem Mk-Gerät der Firma Hottinger-Baldwin-Messtechnik gemessen. Die Lastspielzahlen und die eingestellte

Verschiebungsamplituden des dynamischen Zylinders wurden computergesteuert erfasst. Die Temperatur im Inneren der Probe wurde während des gesamten Versuchs mit einem Temperaturmessgerät der Firma Voltcraft mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5^\circ\text{C}$ überwacht.

Unmittelbar nach Beendigung des Versuchs wurde der Querdruck abgelassen und die PE-Schutzhüllen von den vorgespannten Litzen entfernt. Die Restwanddicken der jeweils unteren Hälften der inneren Hüllrohre und des äußeren Mantels wurden unmittelbar anschließend mit einem Tiefentaster der Firma Hahn/Kolb gemessen. Maßgebend dabei waren die geringsten Wanddicken in den Riefen, die aus den Eindrückungen der Litzen in das PE resultierten.

Einige der Versuchskörper konnten mit Hilfe eines Lichtmikroskops mit einer Vergrößerung von 1:8 bis 1:25 fotografiert werden, das Korrosionsschutzfett wurde mit 630-facher Vergrößerung fotografiert (Abbildung 4.57 bis Abbildung 4.59).

4.4.4 Ergebnisse der Versuche

Wie bei den Temperaturversuchen wurden in den sichtbaren Eindrückungen die geringsten Restwanddicken der inneren Schutzhüllrohre und des äußeren Mantels gemessen. Zusätzlich wurden die Ausgangswanddicken der Hüllrohre ermittelt und über die eine Litze umgebende Fläche gemittelt. Die Restwanddicken wurden in Relation zu den Ausgangswanddicken des jeweiligen Hüllrohres gesetzt, um sie anschließend als Absolut- und Relativwerte anzugeben.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die mittleren und die geringsten Restwanddicken der Versuche im Folgenden tabellarisch aufgeführt. Daneben werden die maximalen Temperaturen angegeben, die sich im Versuchsverlauf einstellten. Der qualitative Temperaturverlauf war bei allen Versuchen ähnlich, so dass er hier für den Versuch PE_{dyn1} beispielhaft dargestellt ist (Abbildung 4.49).

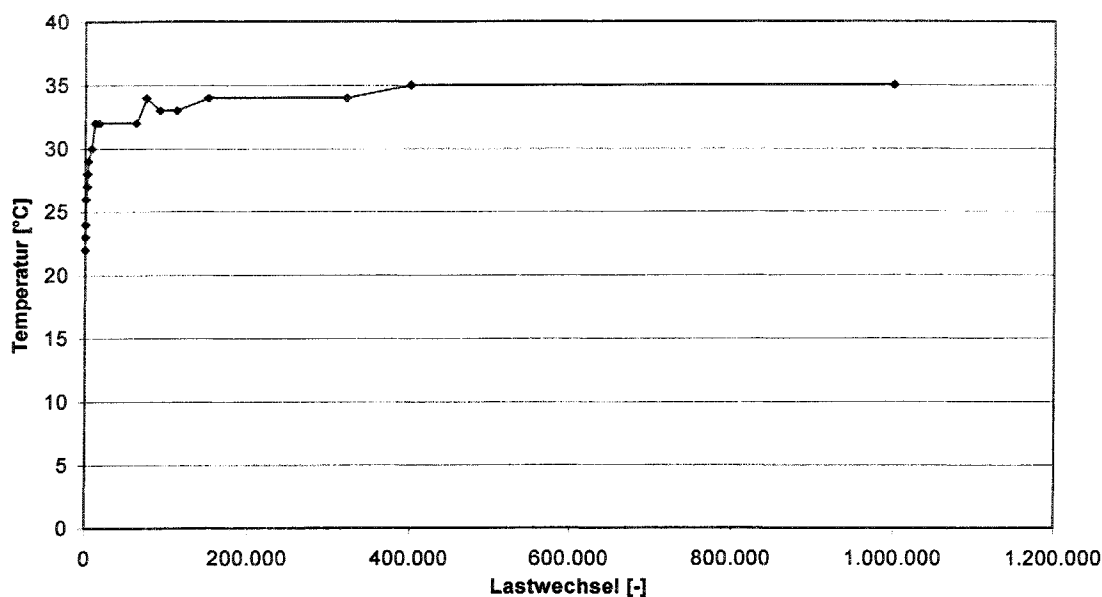


Abbildung 4.49: Temperaturverlauf der Probe bei Versuch PE_{dyn1}

Versuch PE_{dyn1}

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PE_{dyn1} sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,5 mm
Anzahl der Lastwechsel	10 ⁶
Frequenz	1 Hz
Umlenkpressung	100 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,78 mm = 39,8 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	2,81 mm = 83,1 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,31 mm = 16,8 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	2,56 mm = 76,4 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 400.000 Lastwechseln	35 °C

Tabelle 4.5: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PE_{dyn1}

Die geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre betrug 0,31 mm und lag somit deutlich unterhalb der vom DIBt in [2] geforderten Grenzen von minimal 1,00 mm (Kapitel 3). Der

nächst größere Wert der inneren Restwanddicke betrug 0,37 mm. Insgesamt wies die Probe an 18 der 20 gemessenen Stellen eine Restwanddicke von weniger als 1,00 mm auf.

Auffällige Schädigungen der Ummantelungen konnten nicht festgestellt werden. Die Oberfläche der Riefen war allerdings nicht glatt, wie bei den statischen Versuchen ohne Lastwechsel, sondern wies eine feine schuppenförmige Struktur auf. Am Korrosionsschutzfett war nach 10^6 Lastwechseln im Vergleich zu Fettproben aus unbelasteten Spannbändern eine starke Verfärbung zu erkennen (Abbildung 4.50)

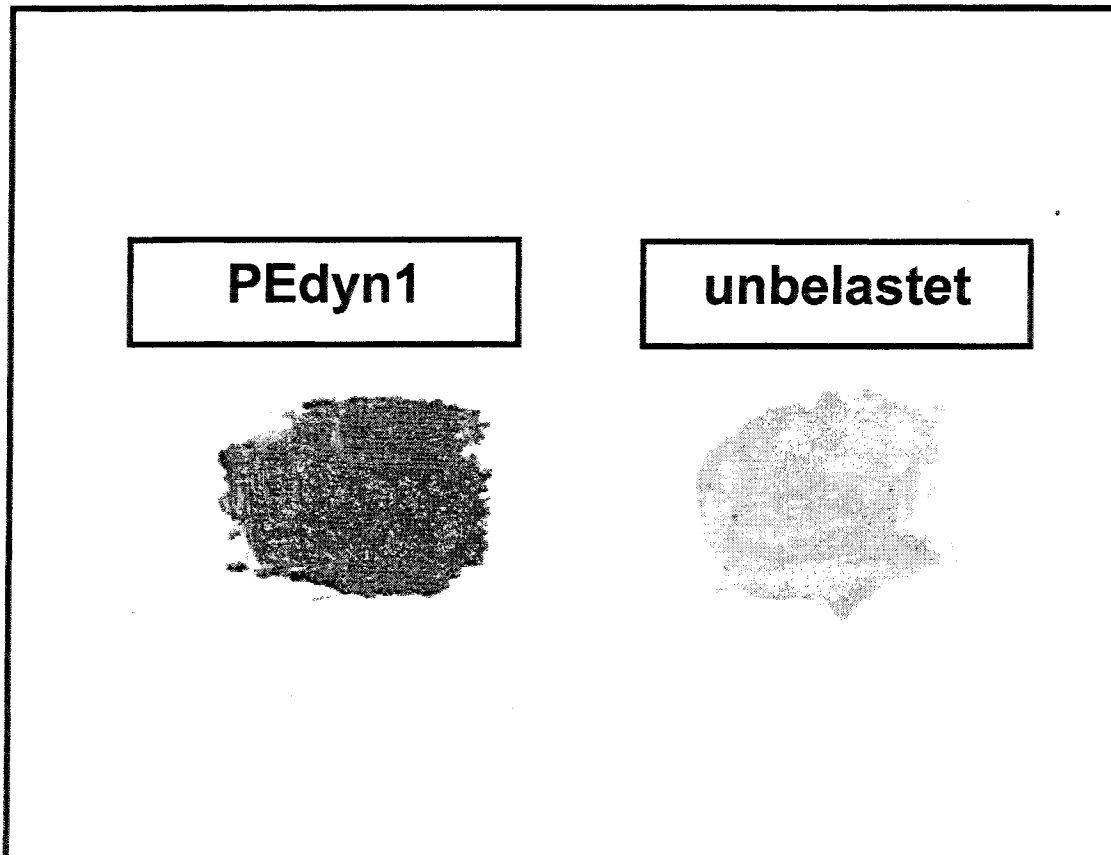


Abbildung 4.50: Korrosionsschutzfett unbelastet und nach 10^6 Lastwechseln

Abbildung 4.50 zeigt die Verunreinigung des Korrosionsschutzfettes aus dem Versuch PEdyn1 beispielhaft für alle Versuche, bei denen eine Verfärbung zu erkennen war.

Versuch PEdyn2

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn2 sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,5 mm
Anzahl der Lastwechsel	$2 \cdot 10^6$

Frequenz	1 Hz
Umlenkpressung	100 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,54 mm = 26,8 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	2,88 mm = 87,2 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,13 mm = 6,2 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	2,64 mm = 78,8 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 535.700 Lastwechseln	34 °C

Tabelle 4.6: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn2

Die mittlere Restwanddicke der inneren Schutzhüllen lag bei 0,54 mm bzw. 26,84 % der Ausgangswanddicke. Die Wanddicke unterschritt an allen gemessenen Stellen die Mindestwandstärke von 1,0 mm bzw. 50% der Ausgangswanddicke. Der äußere Schutzmantel wurde an keiner Stelle stärker als zulässig geschwächt.

Das Korrosionsschutzfett war nach Versuchsdurchführung deutlich schwarz gefärbt, besondere Schädigungen der PE-Ummantelung waren nicht erkennbar.

Versuch PEdyn3

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn3 sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,5 mm
Anzahl der Lastwechsel	10 ⁶
Frequenz	1 Hz
Umlenkpressung	37,5 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,52 mm = 79,1 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	3,19 mm = 96,6 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,27 mm = 70,6 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	3,01 mm = 92,6 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 30.000 Lastwechseln	27 °C

Tabelle 4.7: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn3

Wegen der geringen Umlenkpressung waren alle 20 gemessenen Werte der Restwanddicke der inneren Schutzhüllen größer als 1,00 mm bzw. 50 % der Ausgangswandstärke. Am äußeren Mantel konnte an allen Stellen eine Restwanddicke von mehr als 2,00 mm bzw. 75 % der Ausgangswandstärke gemessen werden.

Eine leichte Schwarzfärbung des Korrosionsschutzfettes war sichtbar, Schäden am Polyethylen traten nicht auf. Die Oberfläche der Riefen in den inneren Schutzhüllen zeigte eine leichte Schuppenbildung.

Versuch PEdyn4

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn4 sind in Tabelle 4.8 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,1 mm
Anzahl der Lastwechsel	10^6
Frequenz	1 Hz
Umlenkpressung	100 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,30 mm = 66,1 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	3,02 mm = 90,2 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,78 mm = 43,3 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	2,88 mm = 87,3 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 700.000 Lastwechseln	25 °C

Tabelle 4.8: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn4

Die inneren Schutzhüllen wiesen eine mittlere Restwanddicke von 1,30 mm bzw. 66,12% auf. Drei der 20 gemessenen Werte lagen unter 1,00 mm, zwei unter 50% der Ausgangswandstärke. Der äußere Mantel besaß an allen Stellen Restwanddicken von mehr als 2,00 mm bzw. 75 % der Ausgangswandstärke.

Auffällige Schädigungen der Ummantelung waren nicht erkennbar, das Korrosionsschutzfett zeigte eine leichte Schwarzfärbung.

Versuch PEdyn5

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn5 sind in Tabelle 4.9 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	1,0 mm
Anzahl der Lastwechsel	10 ⁶
Frequenz	1 Hz
Umlenkpressung	100 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,58 mm = 29,5 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	2,85 mm = 85,0 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,25 mm = 12,5 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	2,54 mm = 75,8 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 77.000 Lastwechseln	39 °C

Tabelle 4.9: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn5

Die Restwanddicken der inneren Schutzhüllen betragen an 19 von 20 gemessenen Stellen weniger als 1,00 mm bzw. 50 % der Ausgangswandstärke. Der äußere Mantel wies an allen Stellen eine Restwanddicke von mehr als 2,00 mm bzw. 75 % der Ausgangswandstärke auf. Im Inneren der Probe stellte sich bereits nach 77.000 Lastwechseln eine Temperatur von 39°C ein. Höhere Temperaturen wurden während des Versuches nicht registriert.

Es waren keine auffälligen Schädigungen am PE erkennbar, das Korrosionsfett war stark schwarz verfärbt. Die schuppenartige Oberflächenstruktur der Riefen in den inneren Schutzhüllen war deutlich ausgeprägt.

Versuch PEdyn6

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn6 sind in Tabelle 4.10 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,5 mm
Anzahl der Lastwechsel	10 ³
Frequenz	1 Hz
Umlenkpressung	100 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,47 mm = 72,7 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	2,94 mm = 93,2 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,36 mm = 63,3 %

Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	2,79 mm = 90,0 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 850 Lastwechseln	26 °C

Tabelle 4.10: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn6

An allen gemessenen Stellen wiesen die inneren Schutzhüllen Restwanddicken von über 1,0 mm bzw. 50 % der Ausgangswandstärke auf, die Restwanddicke des äußeren Mantel lag an allen Stellen über 2,0 mm bzw. 75 % der Ausgangswandstärke.

Die Oberflächen der Riefen zeigten eine glatte Oberfläche, eine Schuppenbildung im PE war nicht erkennbar. Eine Verfärbung des Korrosionsschutzfettes wurde nicht festgestellt, sonstige Schäden am Spannglied traten nicht auf.

Versuch PEdyn7

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn7 sind in Tabelle 4.11 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,5 mm
Anzahl der Lastwechsel	10 ⁴
Frequenz	1 Hz
Umlenkpressung	100 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,49 mm = 74,1 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	3,10 mm = 93,0 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,30 mm = 63,4 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	3,02 mm = 90,2 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 8.400 Lastwechseln	30 °C

Tabelle 4.11: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn7

Alle Messwerte der Restwanddicken der inneren Schutzhüllen und des äußeren Mantels lagen über den vom DIBt in [2] festgesetzten Grenzwerten (Kapitel 3).

Das Polyethylen zeigte keine auffälligen Schädigungen. Eine sehr geringe Verfärbung des Korrosionsschutzfettes konnte festgestellt werden.

Versuch PEdyn8

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn8 sind in Tabelle 4.12 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,5 mm
Anzahl der Lastwechsel	10 ⁵
Frequenz	1 Hz
Umlenkpressung	100 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,25 mm = 63,3 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	2,97 mm = 88,6 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,88 mm = 44,0 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	2,68 mm = 81,2 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 98.000 Lastwechseln	33 °C

Tabelle 4.12: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn8

Von den 20 gemessenen Restwanddicken der inneren Schutzhüllen lagen 19 über 1,00 mm bzw. 50 % der Ausgangswandstärke. Die Wandstärke an der dünnsten Stelle der Hüllrohre lag bei 0,88 mm. Der äußere Mantel konnte an allen Stellen Restwanddicken von über 2,00 mm bzw. über 75 % der Ausgangswandstärke einhalten.

Es konnte eine leichte Schwarzfärbung des Korrosionsschutzfettes festgestellt werden, auffällige Schädigungen der Ummantelung waren nicht erkennbar.

Versuch PEdyn9

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn9 sind in Tabelle 4.13 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,5 mm
Anzahl der Lastwechsel	10 ⁶
Frequenz	1 Hz
Umlenkpressung	75 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,97 mm = 49,2 %

Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	3,08 mm = 91,9 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	0,35 mm = 19,4 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	2,93 mm = 88,2 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 550.300 Lastwechseln	32 °C

Tabelle 4.13: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn9

Von den 20 gemessenen Riefen in den inneren Schutzhüllen wiesen elf eine Restwanddicke von weniger als 1,0 mm auf. Die geringste Restwanddicke lag bei 0,35 mm, die nächst größte betrug 0,52 mm. Am äußeren Mantel wurde an allen Stellen eine Restwanddicke von über 2,0 mm bzw. 75 % der Ausgangswandstärke gemessen.

Das Korrosionsschutzfett war deutlich schwarz verfärbt, sonstige Schädigungen der Umman-
telung wurden nicht festgestellt.

Versuch PEdyn10

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn10 sind in Tabelle 4.14
zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,5 mm
Anzahl der Lastwechsel	10 ⁶
Frequenz	2 Hz
Umlenkpressung	37,5 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,48 mm = 73,9 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	3,10 mm = 98,4 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,28 mm = 67,4 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	3,02 mm = 94,4 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 654.800 Lastwechseln	31 °C

Tabelle 4.14: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn10

Alle 20 gemessenen Werte der Restwanddicke der inneren Schutzhüllen waren größer als
1,00 mm bzw. 50 % der Ausgangswandstärke. Der äußere Mantel wies an allen Stellen eine
Restwanddicke von über 2,00 mm bzw. 75 % der Ausgangswandstärke auf.

Eine Schwarzfärbung des Korrosionsschutzfettes war sichtbar, auffällige Schäden am Polyethylen traten nicht auf. Die Oberfläche der Riefen in den inneren Schutzhüllen zeigte eine leichte Schuppenbildung.

Versuch PEdyn11

Die Hauptparameter und wesentlichen Ergebnisse des Versuchs PEdyn11 sind in Tabelle 4.15 zusammengefasst. Die einzelnen Messwerte sind dem Anhang zu entnehmen.

Amplitude	0,5 mm
Anzahl der Lastwechsel	10 ⁶
Frequenz	3 Hz
Umlenkpressung	37,5 kN
Mittlere Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,52 mm = 77,7 %
Mittlere Restwanddicke des äußeren Mantels	3,10 mm = 98,5 %
Geringste Restwanddicke der inneren Hüllrohre	1,32 mm = 73,3 %
Geringste Restwanddicke äußerer Mantel	3,07 mm = 95,9 %
Konstante Temperatur im Probeninneren nach 284.000 Lastwechseln	33 °C

Tabelle 4.15: Parameter und Ergebnisse des Versuchs PEdyn11

Alle 20 gemessenen Werte der Restwanddicke der inneren Schutzhüllen waren größer als 1,00 mm bzw. 50 % der Ausgangswandstärke. Der äußere Mantel besaß an allen Stellen eine Restwanddicke von mehr als 2,00 mm bzw. 75 % der Ausgangswandstärke einhalten.

Eine Schwarzfärbung des Korrosionsschutzfettes war sichtbar, auffällige Schäden am Polyethylen traten nicht auf. Die Oberfläche der Riefen in den inneren Schutzhüllen zeigte eine leichte Schuppenbildung.

4.4.5 Auswertung der Versuchsergebnisse

Nach den durchgeführten Versuche wird die Restwanddicke der inneren Hüllrohre durch Betriebsbeanspruchungen zusätzlich zur statischen Beanspruchung reduziert. So wurde bei dem Versuch PEdyn5 mit einer konstanten Querbelastrung von 100 kN und einer Amplitude von 1,0 mm nach 10⁶ Lastwechseln eine mittlere Restwanddicke rd. 29 % gemessen, der vergleichbare Versuch ohne zyklische Beanspruchung ergab einen Wert rd. 59 %.

In Abbildung 4.51 sind die relativen Restwanddicken von Proben, die mit 100 kN Querpressung, 0,5 mm Amplitude und einer Frequenz von 1,0 Hz geprüft wurden, in Abhängigkeit von der Belastungsdauer dargestellt. Zum Vergleich sind die Werte der Restwanddicken aus den Versuchen mit statischer Belastung eingetragen. Um den Einfluss der erhöhten Temperatur aus Reibung zu berücksichtigen, sind diese Werte zum Teil zwischen den Ergebnissen der Versuche bei 20°C und den der Versuche bei 40°C interpoliert worden. Nach [5] sind nach 24 h über 95% der Verformungen, die nach drei Wochen festgestellt werden, bereits abgeschlossen. Mit dieser Erkenntnis wurden die Ergebnisse der statischen Versuche extrapoliert, um Vergleichswerte für die Messungen nach 10^6 Lastwechseln zu erhalten.

Es ist zu erkennen, dass die Werte der zyklischen Versuche bei 10^5 Lastwechseln von denen der statischen Versuche - das entspricht einer Belastungsdauer von ca. 28 Stunden - nicht wesentlich abweichen. Nach 10^6 Lastwechseln ist bereits ein erheblicher Unterschied zwischen den Ergebnissen der statischen und der zyklischen Versuche erkennbar.

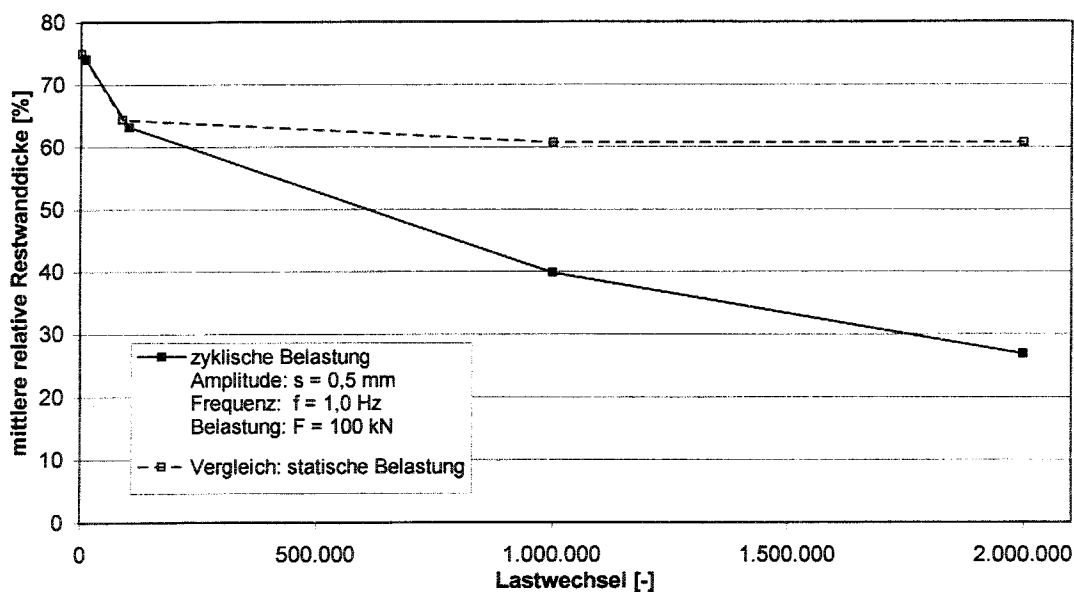


Abbildung 4.51: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen nach zyklischer Beanspruchung

Abbildung 4.52 zeigt die relativen Restwanddicken der inneren Hüllrohre nach 10^6 Lastwechseln unter 100 kN Querpressung in Abhängigkeit von der Amplitude der Relativverschiebungen zwischen Litzen und inneren Hüllrohren. Bei Verschiebungen von 0,1 mm sind die Restwanddicken aus statischen und dynamischen Versuchen annähernd gleich, bei größeren Amplituden ist eine erhebliche zusätzliche Schwächung der inneren Hüllröhre infolge der Relativverschiebungen erkennbar.

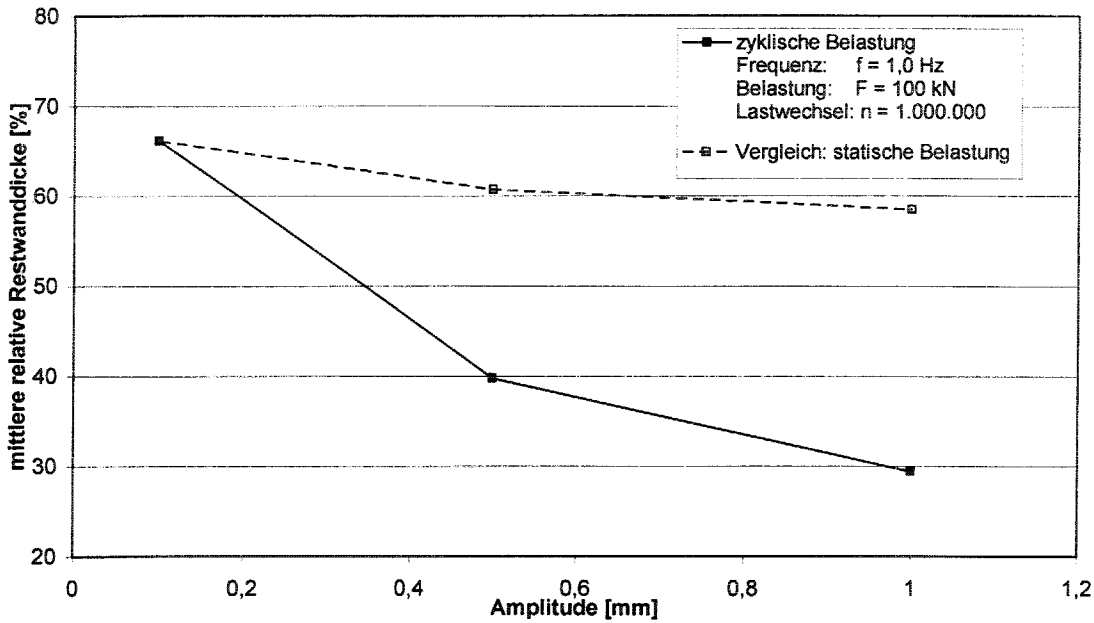


Abbildung 4.52: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen nach zyklischer Belastung in Abhängigkeit der Verschiebungsamplitude

Welchen Einfluss die Querpressung auf die Restwanddicken der inneren Hüllrohre besitzt, ist in Abbildung 4.53 erkennbar, welche die relative Restwanddicke in Abhängigkeit der Querpressung darstellt.

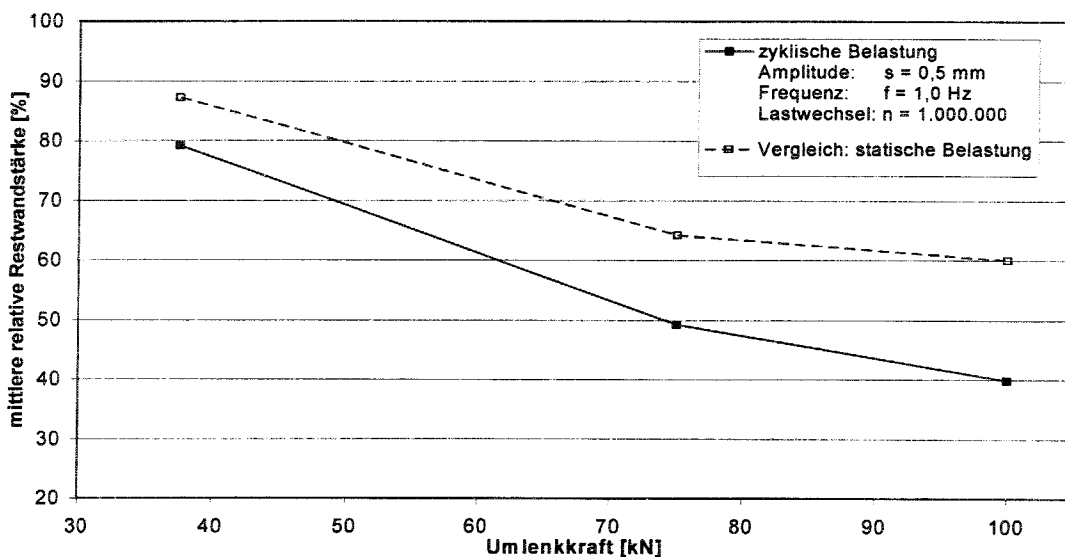


Abbildung 4.53: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen nach zyklischer Belastung

In allen Versuchen wurden die PE-Mäntel mit 1.000.000 Lastwechseln belastet und die Amplitude betrug 0,5 mm. Zum Vergleich sind, wie in den vorhergehenden Diagrammen, die Ergebnisse von statischen Versuchen mit entsprechender Querpressung, Belastungsdauer und Temperatur eingetragen.

Eine experimentelle Umlenkraft von 37,5 kN entspricht der Belastung der PE-Schutzhüllen in der ersten Spanngliedlage, eine Umlenkraft von 75 kN stellt die Situation in der zweiten Spanngliedlage dar (Kapitel 2.4.1).

Die zusätzliche Abnahme der Restwanddicken infolge zyklischer Beanspruchung beträgt bei einer Umlenkraft von 37,5 kN etwa 8% der Ausgangswanddicke, bei 100 kN nehmen die Restwanddicken der inneren Schutzhüllen durchschnittlich um etwa 20% zusätzlich ab. Die Differenz der Restwanddicken zwischen statischer und zyklischer Belastung ist annähernd linear abhängig von der Umlenkraft bzw. von der Druckspannung in der aktiven Kontaktfläche.

Erhöht sich die Umlenkraft, so erhöht sich bei gleichbleibender Auflagefläche die Spannung. Vergrößert sich bei gleichbleibender Kraft die Auflagefläche, so kann von einer geringeren Schwächung durch die Relativbewegungen ausgegangen werden. Dies ist der Fall, wenn die Fläche für die Kraftübertragung zwischen Litzen und Ummantelung, z.B. durch die Auflagerung des Spannbandes auf eine HDPE-Unterlage, vergrößert wird. Die Anforderungen an solche Unterlagen wurden bereits in [5] untersucht.

Um den Einfluss der Frequenz auf die Restwanddicken der PE-Schutzhüllen beurteilen zu können, wurden die gemessenen Restwanddicken in Abhängigkeit von der im Versuch eingestellten Frequenz in Abbildung 4.54 dargestellt. Im gleichen Diagramm sind die Vergleichswerte der entsprechenden statischen Versuche aufgetragen. Mit steigender Frequenz erhöhte sich die Innentemperatur der Proben während der Versuchsdurchführung. Um die Versuchsergebnisse mit denen der statischen Versuche vergleichen zu können, mussten die Ergebnisse der statischen Referenzversuche auf die entsprechende Temperatur umgerechnet werden. So ist zu erklären, dass die vergleichbaren Restwanddicken der inneren Hüllrohre aus den statischen Versuchen mit zunehmender Frequenz abnehmen. Insgesamt ist festzustellen, dass die Frequenz im Versuch nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Restwanddicken der inneren Schutzhüllen hat.

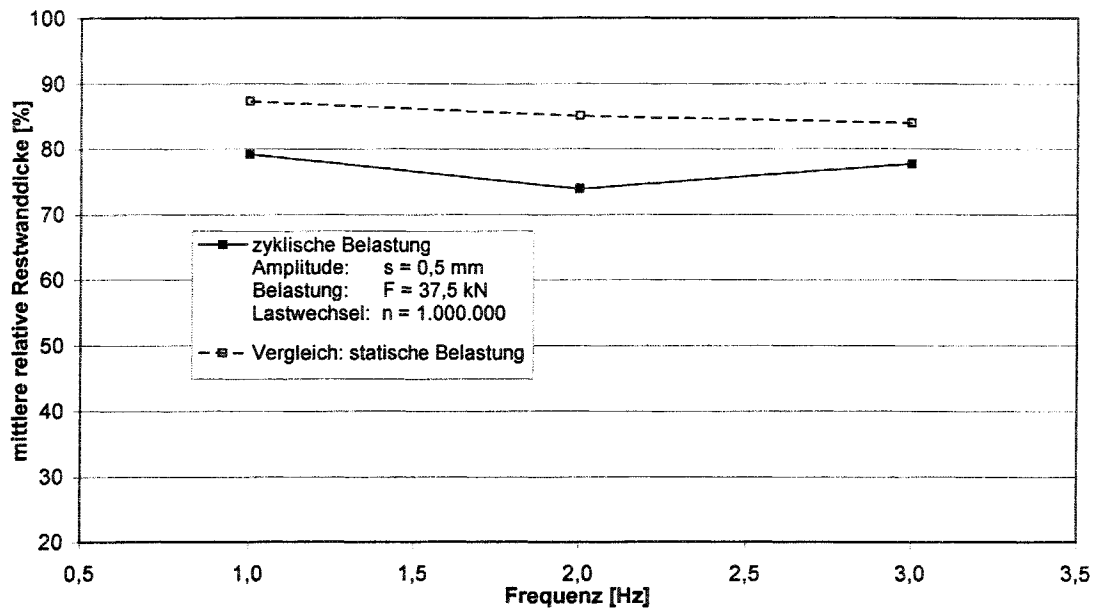


Abbildung 4.54: Relative Restwanddicken der inneren Schutzhüllen nach zyklischer Belastung

Die zusätzliche Reduzierung der Restwandstärken infolge von Relativverschiebungen zwischen Litzen und Polyethylen ist abhängig von der Querdruckspannung. Bei Spannlitzen ist diese Kontaktfläche auf Grund der Litzengeometrie sehr gering. Im Vergleich zu runden oder ovalen Spanndrähten sind deshalb die Druckspannungen bei gleicher Umlenkkraft wesentlich größer. Daher ist davon auszugehen, dass bei Spannsystemen mit Drähten die zusätzliche Reduzierung der Restwanddicken der PE-Ummantelung weit weniger ausgeprägt ist als bei Litzenspannverfahren.

Die Restwanddicken der äußeren Mäntel der Proben wiesen keinen nennenswerten Einfluss der Betriebsbeanspruchung auf. In Abbildung 4.55 sind exemplarisch die Ergebnisse der Versuche mit einer Amplitude von $s = 0,5$ mm in Abhängigkeit der Lastwechselzahl aufgetragen. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der entsprechenden statischen Versuche eingetragen. Zum Teil mussten die Ergebnisse der statischen Versuche interpoliert werden, da für die bei den dynamischen Versuchen erreichten Temperaturen keine Referenzversuche vorlagen.

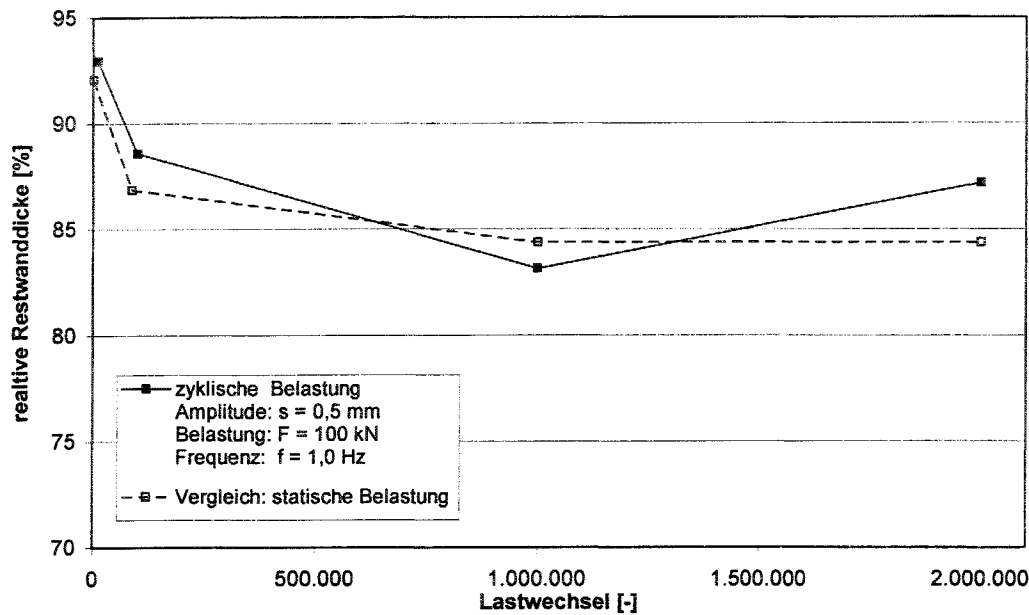


Abbildung 4.55: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen nach zyklischer Beanspruchung

Das Diagramm in Abbildung 4.56 zeigt die relative Restwanddicke von Proben nach 10^6 Lastwechseln in Abhängigkeit von der eingestellten Amplitude. Auch hier sind vergleichend die Restwanddicken der statischen Referenzversuche eingetragen.

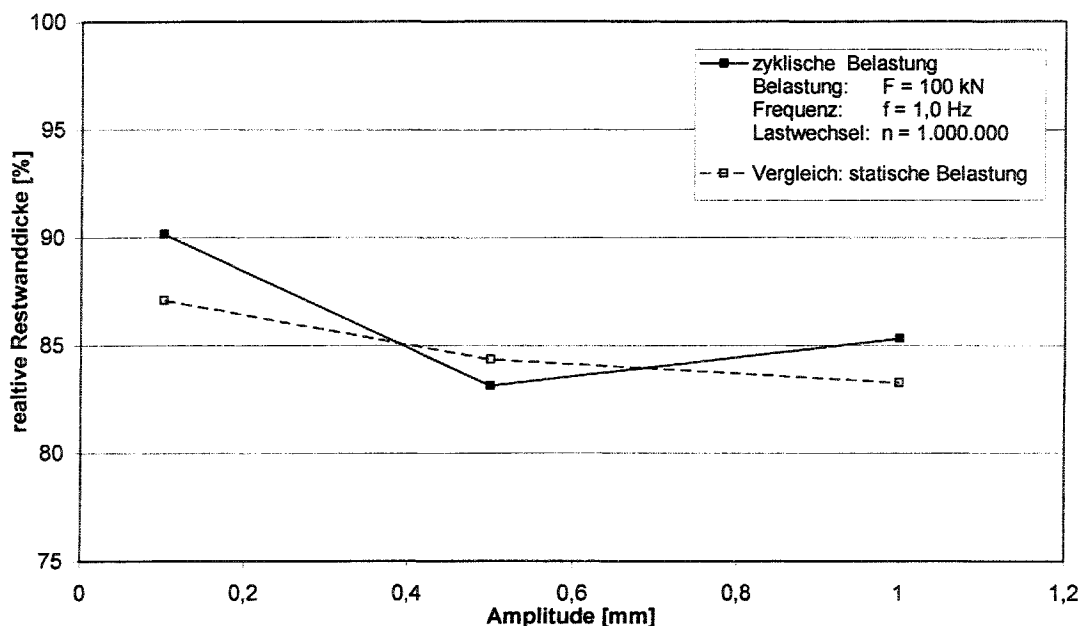


Abbildung 4.56: Relative Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen nach zyklischer Belastung

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass der äußere PE-Mantel eines Spanngliedes durch Relativverschiebungen zwischen der Litze und dem inneren PE-Mantel (innere Gleich-

tung) nicht zusätzlich geschwächt wird. Dies gilt für übliche Verhältnisse unabhängig von der Anzahl der Lastwechsel, der Amplitude der Relativverschiebung und der Größe der Umlenkkraft.

Um die Ursachen für die zusätzliche Schwächung der inneren PE-Schutzhüllen durch die Betriebsbeanspruchungen zu klären, wurden die Versuchskörper unter dem Mikroskop untersucht.

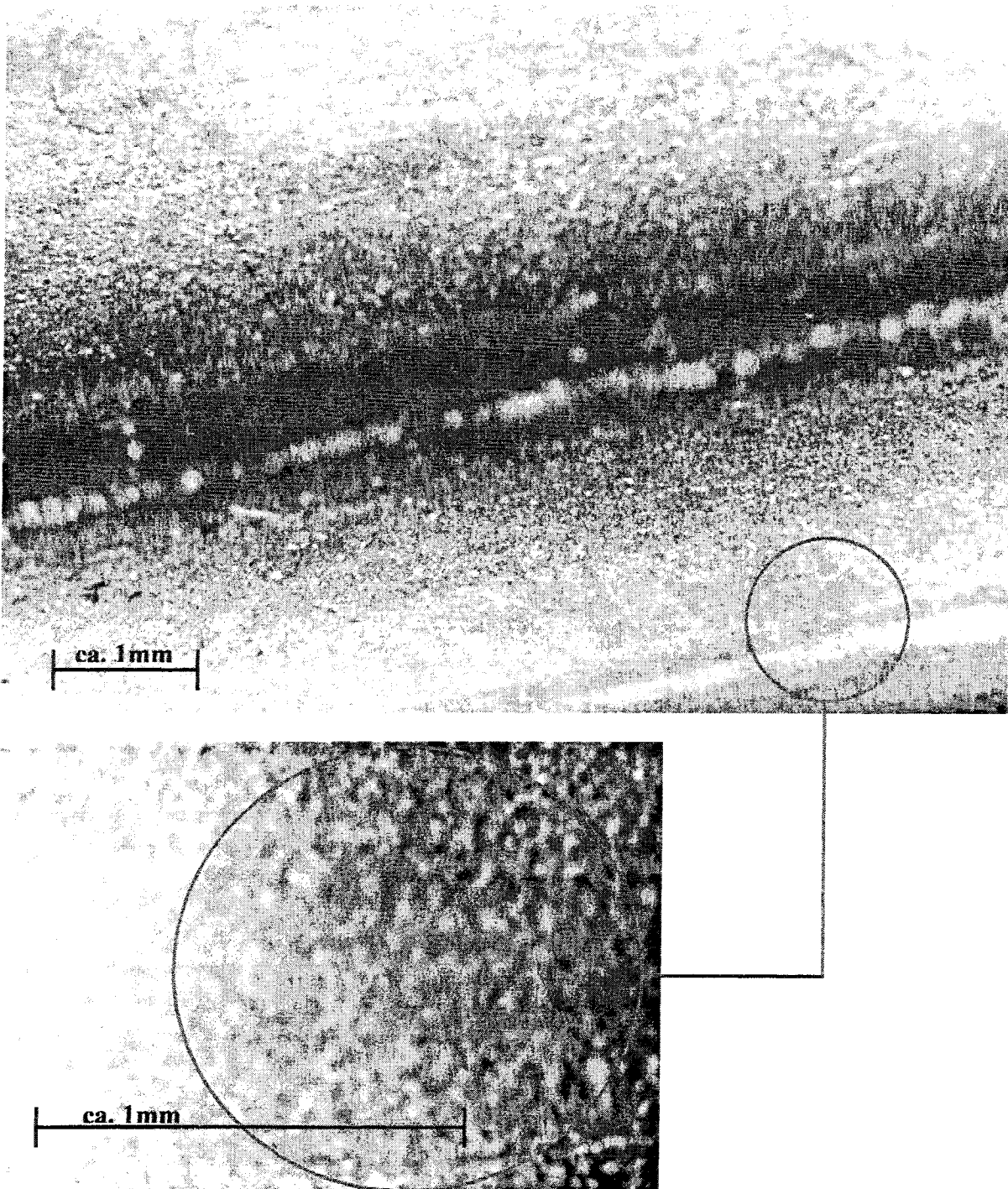


Abbildung 4.57: Oberfläche einer Spannlitze

Betrachtet man die Litzen mit bloßem Auge, so scheinen sie eine außerordentlich glatte Oberfläche zu besitzen. Doch schon bei relativ geringer Vergrößerung (1:20) ist zu erkennen, dass die Oberfläche der Litzen eine raue Struktur aufweist (Abbildung 4.57). Die innere Oberfläche der Schutzhüllen kann neben den gut sichtbaren Riefen als annähernd glatt bezeichnet werden, während in den Riefen eine schuppige Oberflächenstruktur erkennbar ist (Abbildung 4.58).

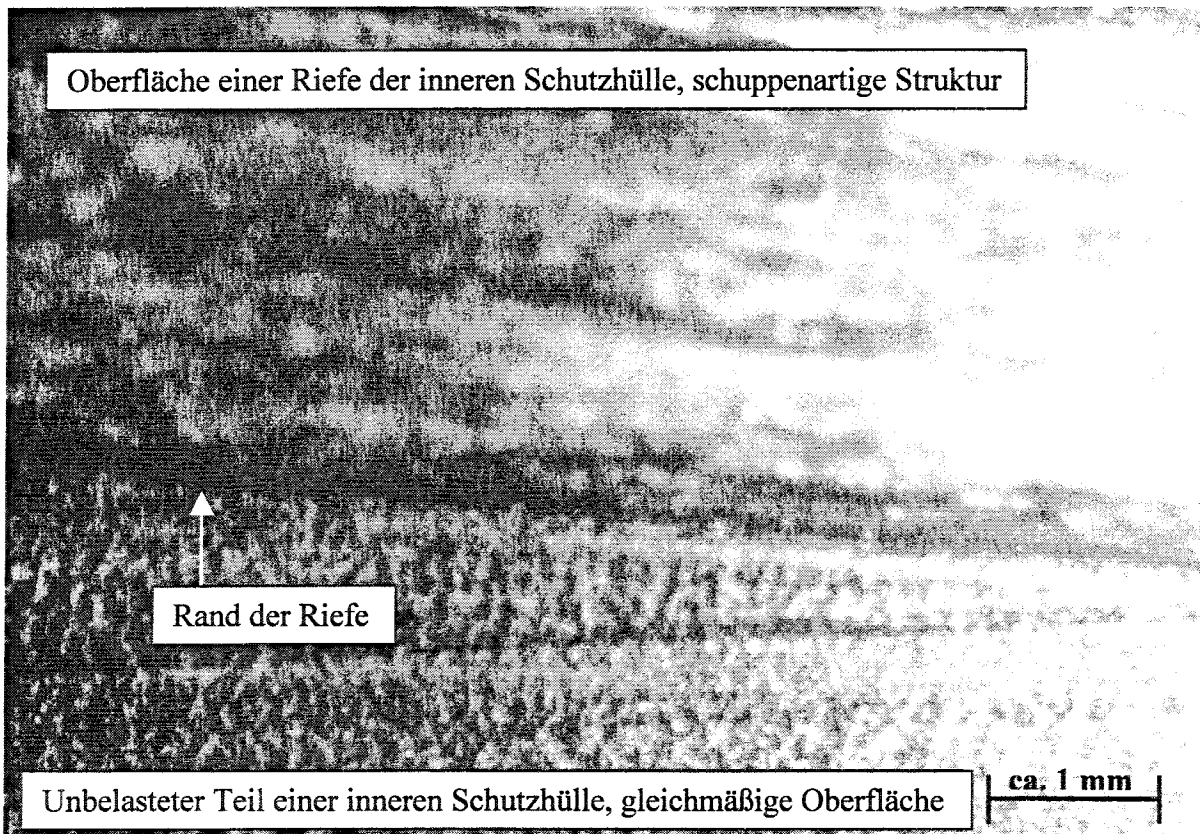


Abbildung 4.58: Oberfläche einer inneren Schutzhülle am Rand einer Riefe

Untersuchungen an inneren Schutzhüllen aus querdruckbelasteten Versuchskörpern ohne zyklische Lastwechsel zeigten in den Riefen genau die gleichen, glatten Oberflächen wie neben den Eindrückungen. Die schuppenartige Oberflächenstruktur der zyklisch beanspruchten Versuchskörper muss also durch die Relativverschiebungen zwischen Litze und Schutzhülle erzeugt worden sein.

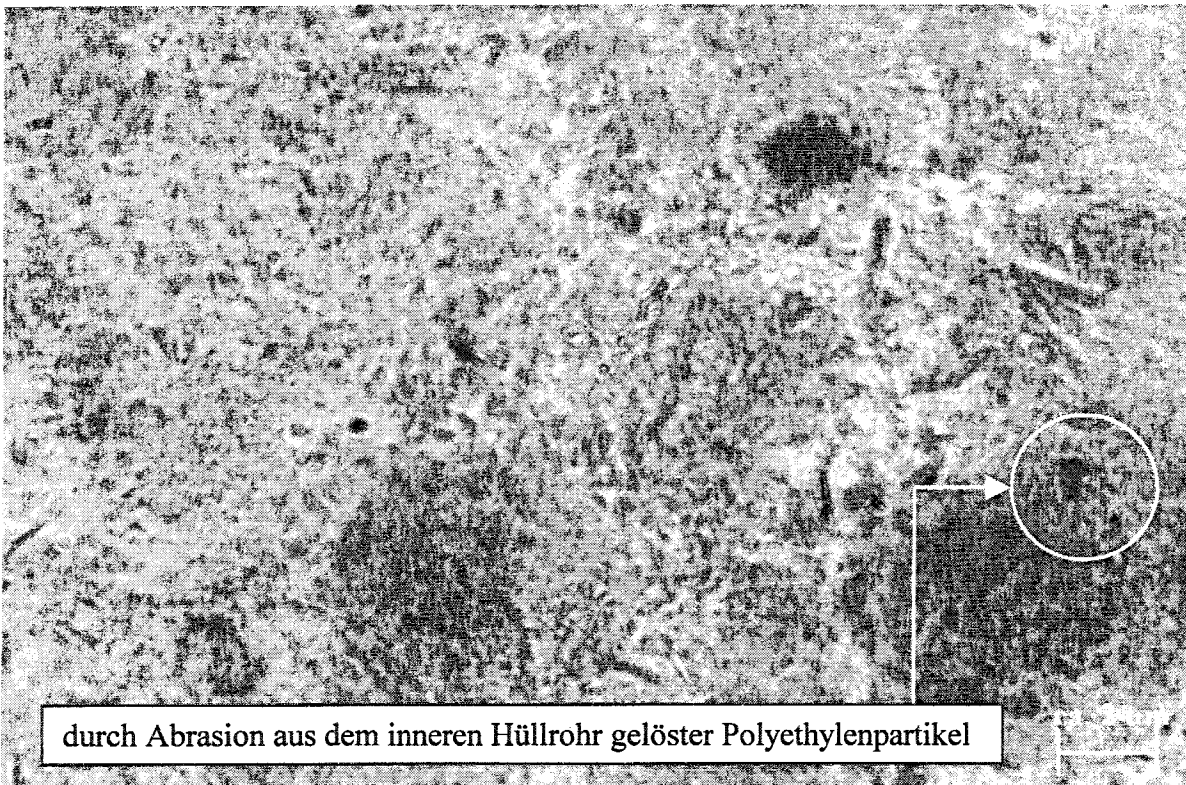


Abbildung 4.59: Korrosionsschutzfett nach dynamischer Belastung

Eine Mikroskopaufnahme des Korrosionsschutzfettes eines Versuchskörpers nach 10^6 Lastwechseln unter einer Querkraft von 100 kN und bei Relativverschiebungen von 0,5 mm ($f = 1$ Hz) zeigt deutlich feinste Bestandteile des Polyethylens, die bei unbeanspruchtem Fett nicht zu sehen sind. Diese Teilchen weisen einen Durchmesser von ca. 0,5 bis 1,0 μm auf (Abbildung 4.59). Sie werden durch die Reibung bei der Relativverschiebung aus dem inneren Hüllrohr gelöst und lagern sich im Korrosionsschutzfett ab. Erkennbar wird dies auch ohne Vergrößerung an einer deutlichen Schwarzfärbung des Fettes nach der Versuchsdurchführung. Die Aufnahmen belegen, dass durch die raue Oberflächenstruktur der Litzen eine Abrasion des Polyethylens stattfindet.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Polyethylenschutzhüllen externer Spannglieder sind an Umlenkstellen starken Beanspruchungen ausgesetzt. In dem hier beschriebenen Forschungsvorhaben wurden die Einflüsse der Umgebungstemperatur und kleiner Relativverschiebungen zwischen Spannstahl und PE-Schutzhüllen auf deren Restwanddicke untersucht. Nach den durchgeführten Versuchen weisen die Schutzhüllen infolge Temperaturbelastung und Relativverschiebungen zwischen Litzen und inneren Hüllrohren mitunter geringere Restwanddicken auf als in der Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung des DIBt [2] festgelegt.

Insbesondere hohe Temperaturen, wie sie in Hohlkastenbrücken auftreten können, tragen zu einer deutlichen Verringerung der Restwanddicken bei. Maßgebende Einflussgröße ist die maximale Temperatur, die während der Lebensdauer des Spanngliedes auftritt. Dies gilt auch für eine kurze Einwirkungsdauer.

In einem Bereich von -25°C bis 40°C waren die gemessenen Restwanddicken der inneren Schutzhüllen linear abhängig von der Umgebungstemperatur der Spannglieder. Eine Erhöhung der Temperatur um 10°C hatte eine Abnahme der Restwanddicken der inneren Schutzhüllen um 0,08-0,14 mm bzw. etwa 4-7 % der Ausgangswanddicke zur Folge. Diese Werte waren weitestgehend unabhängig von der Belastungsdauer und der Umlenkraft. Proben, die bei 40°C mit der größten zulässigen Umlenkraft belastet wurden, wiesen ab einer Belastungsdauer von zehn Minuten mittlere Restwanddicken von weniger als 1,0 mm auf.

Die Restwanddicken der äußeren Schutzhüllen waren nur annähernd linear abhängig von der Umgebungstemperatur. Ein Temperaturanstieg um 10°C bewirkte unabhängig von der Größe der Umlenkraft und der Belastungsdauer eine Verringerung der Restwanddicken der äußeren Schutzhülle um 0,13-0,25 mm bzw. 4-8 % bezogen auf den Ausgangswert. Die mittleren Restwanddicken der äußeren Mäntel lagen bei einer Temperatur von 40°C und der größten zulässigen Umlenkraft frühestens nach acht Stunden unter den vom DIBt geforderten Mindestwerten.

Wiederkehrende Relativverschiebungen von 0,5 mm zwischen Litze und PE-Hülle führten zu einer erheblichen Schwächung der inneren Schutzhüllen, die äußeren Mäntel wurden durch diese Art der Beanspruchung nicht geschädigt. Die Abnahme der Restwanddicken in den inneren Schutzhüllen war dabei annähernd linear abhängig von der Größe der Umlenkraft und dem Verschiebungsweg.

Während eine Amplitude von 0,1 mm nach 10^6 Lastwechseln keine nennenswerte Reduzierung der Restwanddicke ergab, verursachten Amplituden von 0,5 mm eine deutliche Verringerung. Nach 10^6 Lastwechseln war die Dicke der inneren Schutzhüllen so weit verringert, dass sie die Anforderungen des DIBt nicht mehr erfüllte.

Die im Bauwerk auftretenden Relativverschiebungen wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung analytisch ermittelt. Um genaue Aussagen über die Größe der Verschiebungen treffen zu können, sind Messungen an bestehenden Brücken unter Betriebsbeanspruchungen erforderlich. Weitestgehend ungeklärt ist nach wie vor auch, wie groß die Restwanddicken der inneren Hüllrohre und des äußeren Mantels tatsächlich sein müssen, um einen dauerhaften Korrosionsschutz der Spannlitzen sicherzustellen.

Zur Zeit sind in den Zulassungsversuchen für externe Spannglieder keine Untersuchungen vorgesehen, die den Einfluss von erhöhten Temperaturen und Relativverschiebungen aus Betriebsbeanspruchungen unmittelbar überprüfen. Ersatzweise werden die Litzen bzw. Spanndrähte mit voller Vorspannung über den Umlenksattel gezogen. Außerdem werden konservative Restwanddicken von 1 mm bzw. 50 % der Ausgangswerte für die innere Schutzhülle und 2 mm bzw. 75 % der Ausgangswanddicke für die äußere PE-Schutzhülle gefordert.

Um die Dauerhaftigkeit externer Spannglieder abschließend beurteilen zu können, sind folgende Fragen zu klären:

- Wie groß sind Amplitude und Lastspielzahl der Relativverschiebung zwischen Litze und innerem PE-Mantel in Brücken unter realen Verkehrslasten?
- Welche Mindestwanddicken sind für einen dauerhaften Korrosionsschutz erforderlich?
- Wird durch die aktuellen Zulassungsversuche die Betriebsbeanspruchung in Brücken realistisch abgebildet?

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Utsch, J.H.; Jahn, T.: Die Entwicklung der externen Vorspannung, Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), Heft 8, Ernst & Sohn Verlag
- [2] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung, DIBt Mitteilungen 30 (1999), Nr. 5, S. 168
- [3] Saechtling, H.: Kunststoff-Taschenbuch, 25. Ausgabe, Hanser Verlag, München 1992
- [4] Fachhochschule Frankfurt: Index-KUT, URL:
<http://www.fbv.fh-frankfurt.de/mhwww/KUT/indexkut.htm>, Stand: 15.10.2002
- [5] Hegger, J.; Cordes, H.; Neuser, J.U.: Dauerhaftigkeit von Polyethylen-Schutzhüllen an Umlenkstellen. Institutsbericht Nr.:70/2001, Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen, 2002
- [6] DIN 50900, Korrosion der Metalle; Begriffe, Ausgabe Juni 2002
- [7] Müller, K.: Lehrbuch der Metallkorrosion. Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1975
- [8] Gerthsen, C.; Vogel, H.: Physik. 18. Auflage, Springer Verlag, 1995
- [9] Martin, R.: Anwendung der Richtlinie für Betonbrücken mit externen Spanngliedern am Beispiel der Talbrücke Münchberg im Zuge der BAB A 9. im Tagungsband: Erfahrungsaustausch Betonbrücken mit externen Spanngliedern, 5.Oktober 2000
- [10] Hartz, U.: Erläuterungen zur „Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung“ und Anforderungen an externe Spannglieder, DIBt Mitteilungen 30 (1999), Nr.5, S. 165
- [11] DIN-Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken, 1. Auflage 2001
- [12] Abel, M.: Zur Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in teilweise vorgespannten Bauteilen unter Betriebsbedingungen. Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhls und Instituts für Massivbau, Heft 4, RWTH Aachen, 1996
- [13] Eibl, J.; Iványi, G.; Buschmeyer, W.; Kobler, G.: Vorspannung ohne Verbund – Technik und Anwendung, Betonkalender 1995, Teil II, Ernst & Sohn Verlag, S. 739-803
- [14] Specht M.; Fouad, N.A.: Temperatureinwirkungen auf Beton-Kastenträgerbrücken durch Klimaeinflüsse. Beton- und Stahlbetonbau 93 (1998), Heft 10, Ernst & Sohn Verlag

-
- [15] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Litzenspannverfahren VBF-CMM D Zulassungsbescheid, Zulassungsnummer: Z-13.3-90, DIBt 2001
- [16] Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach: Wetterrekorde - Lufttemperatur, URL:
<http://www.dwd.de/de/wir/Interessantes/Rekorde/Lufttemperatur/brd.html>,
Stand: 1.09.2003
- [17] Ullmann's Enzyklopädie der Technischen Chemie, 6.Auflage, Wiley-VCH, 2002

Anhang

Temperaturversuche:

	Versuch [-]	Last [kN]	Dauer [h]	Steuerung [-]	Vorspannung [-]	Temperatur [°C]
Testreihe A	MS204	100	0,2	elektronisch	ohne	0
	MS002	100	8	elektronisch	ohne	0
	MS005	100	16	elektronisch	ohne	0
	MS001	100	24	elektronisch	ohne	0
	MS003	100	32	elektronisch	ohne	0
	MS004	100	64	elektronisch	ohne	0
	MS203	150	0,2	elektronisch	ohne	0
	MS014	150	8	elektronisch	ohne	0
	MS018	150	16	elektronisch	ohne	0
	MS015	150	24	elektronisch	ohne	0
	MS017	150	32	elektronisch	ohne	0
	MS016	150	64	elektronisch	ohne	0
Testreihe B	MS205	100	0,2	manuell	ohne	20
	MS100	100	8	manuell	ohne	20
	MS101	100	16	manuell	ohne	20
	MS102	100	24	manuell	ohne	20
	MS103	100	32	manuell	ohne	20
	MS104	100	64	manuell	ohne	20
	MS200	150	0,2	manuell	ohne	20
	MS105	150	8	manuell	ohne	20
	MS106	150	16	manuell	ohne	20
	MS107	150	24	manuell	ohne	20
	MS108	150	32	manuell	ohne	20
MS109	150	64	manuell	ohne	20	
Testreihe C	MS206	100	0,2	manuell	ohne	40
	MS110	100	8	manuell	ohne	40
	MS111	100	16	manuell	ohne	40
	MS112	100	24	manuell	ohne	40
	MS113	100	32	manuell	ohne	40
	MS114	100	64	manuell	ohne	40
	MS201	150	0,2	manuell	ohne	40
	MS022	150	8	manuell	ohne	40
	MS026	150	16	manuell	ohne	40
	MS023	150	24	manuell	ohne	40
	MS025	150	32	manuell	ohne	40
	MS024	150	64	manuell	ohne	40
Testreihe D	MS006	100	32 - 64	elektronisch	ohne	0 - 20
	MS008	100	8 - 56	elektronisch	ohne	0 - 20
	MS007	100	16 - 48	elektronisch	ohne	0 - 20
	MS009	100	32 - 32	elektronisch	ohne	0 - 20
	MS012	150	8 - 56	elektronisch	ohne	0 - 20
	MS010	150	16 - 48	elektronisch	ohne	0 - 20
	MS013	150	32 - 32	elektronisch	ohne	0 - 20
	MS011	150	56 - 8	elektronisch	ohne	0 - 20

Testreihe E	MS032	100	8 - 56	manuell	ohne	20 - 40
	MS033	100	16 - 48	manuell	ohne	20 - 40
	MS034	100	32 - 32	manuell	ohne	20 - 40
	MS021	150	8 - 56	manuell	ohne	20 - 40
	MS019	150	16 - 48	manuell	ohne	20 - 40
	MS020	150	32 - 32	manuell	ohne	20 - 40
Testreihe F	MS040	100	8 - 56	manuell	ohne	40 - 20
	MS041	100	16 - 48	manuell	ohne	40 - 20
	MS027	100	32 - 32	manuell	ohne	40 - 20
	MS029	150	8 - 56	manuell	ohne	40 - 20
	MS036	150	16 - 48	manuell	ohne	40 - 20
	MS037	150	32 - 32	manuell	ohne	40 - 20
Testreihe G	MS028	100	12-12-12- 12-12	manuell	ohne	20-40-20- 40-20
	MS031	100	12-12-12- 12-12	manuell	ohne	40-20-40- 20-40
	MS050	150	12-12-12- 12-12	elektronisch	ohne	20-40-20- 40-20
	MS051	150	12-12-12- 12-12	elektronisch	ohne	40-20-40- 20-40
Testreihe H	MS300	150	0,75	elektronisch	ohne	-25
	MS301	100	0,75	elektronisch	ohne	-25
	MS302	150	0,75	elektronisch	ohne	20
	MS303	100	0,75	elektronisch	ohne	20

Dynamische Versuche:

Versuch [-]	Last [kN]	Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Lastwechsel [-]	Dauer [h]	Vorspannung [kN]
PEdyn1	100	0,5	1,0	1000000	277,78	160
PEdyn2	100	0,5	1,0	2000000	555,56	160
PEdyn3	37,5	0,5	1,0	1000000	277,78	160
PEdyn4	100	0,1	1,0	1000000	277,78	160
PEdyn5	100	1,0	1,0	1000000	277,78	160
PEdyn6	100	0,5	1,0	1000	0,28	160
PEdyn7	100	0,5	1,0	10000	2,78	160
PEdyn8	100	0,5	1,0	100000	27,78	160
PEdyn9	75	0,5	1,0	1000000	277,78	160
Pedyn10	37,5	0,5	2,0	1000000	138,89	160
Pedyn11	37,5	0,5	3,0	1000000	92,59	160

Versuch MS001
 Testreihe A
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 24 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,75	1,74	1,71	1,72	1,76	1,74
Innen 2	1,63	1,62	1,66	1,68	1,68	1,65
Innen 3	1,66	1,66	1,64	1,64	1,67	1,65
Innen 4	1,63	1,61	1,60	1,62	1,65	1,62
Mittelwert	1,67	1,66	1,65	1,67	1,69	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1			keine Rillen erkennbar			
Außen 2			keine Rillen erkennbar			
Außen 3			keine Rillen erkennbar			
Außen 4			keine Rillen erkennbar			
Mittelwert						

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,93	2,05	1,99
Innen 3	1,95	2,15	2,05
Innen 4	1,83	2,05	1,94
Mittelwert	1,92	2,08	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,10	3,20	3,15
Außen 2	3,00	3,10	3,05
Außen 3	3,00	3,10	3,05
Außen 4	3,10	3,20	3,15
Mittelwert	3,05	3,15	

Versuch MS002
 Testreihe A
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 8 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,77	1,70	1,72	1,69	1,69	1,71
Innen 2	1,75	1,73	1,73	1,70	1,79	1,74
Innen 3	1,58	1,57	1,60	1,60	1,59	1,59
Innen 4	1,78	1,78	1,79	1,78	1,76	1,78
Mittelwert	1,72	1,70	1,71	1,69	1,71	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1		keine Rillen erkennbar				
Außen 2		keine Rillen erkennbar				
Außen 3		keine Rillen erkennbar				
Außen 4		keine Rillen erkennbar				
Mittelwert						

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,10	2,03
Innen 2	1,90	2,05	1,98
Innen 3	1,75	1,95	1,85
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,88	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,55	3,45
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,55	3,45
Mittelwert	3,30	3,45	

Versuch MS003
 Testreihe A
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 32 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,62	1,64	1,61	1,63	1,65	1,63
Innen 2	1,41	1,41	1,39	1,42	1,50	1,43
Innen 3	1,62	1,64	1,65	1,65	1,70	1,65
Innen 4	1,70	1,70	1,65	1,63	1,65	1,67
Mittelwert	1,59	1,60	1,58	1,58	1,63	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1			keine Rillen erkennbar			
Außen 2			keine Rillen erkennbar			
Außen 3			keine Rillen erkennbar			
Außen 4			keine Rillen erkennbar			
Mittelwert						

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1		1,92	2,05
Innen 2		1,80	1,92
Innen 3		1,90	2,02
Innen 4		1,95	2,05
Mittelwert		1,89	2,01

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1		3,35	3,55
Außen 2		3,15	3,25
Außen 3		3,15	3,15
Außen 4		3,45	3,55
Mittelwert		3,28	3,38

Versuch MS004
 Testreihe A
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 64 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,59	1,63	1,64	1,63	1,66	1,63
Innen 2	1,65	1,60	1,60	1,60	1,63	1,62
Innen 3	1,62	1,60	1,59	1,59	1,59	1,60
Innen 4	1,63	1,61	1,61	1,60	1,63	1,62
Mittelwert	1,62	1,61	1,61	1,61	1,63	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1			keine Rillen erkennbar			
Außen 2			keine Rillen erkennbar			
Außen 3			keine Rillen erkennbar			
Außen 4			keine Rillen erkennbar			
Mittelwert						

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,92	2,05	1,99
Innen 2	1,80	1,92	1,86
Innen 3	1,90	2,02	1,96
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,89	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,50	3,43
Außen 2	2,85	2,95	2,90
Außen 3	2,90	3,00	2,95
Außen 4	3,40	3,50	3,45
Mittelwert	3,13	3,24	

Versuch MS005
 Testreihe A
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 16 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,61	1,61	1,61	1,58	1,65	1,61
Innen 2	1,72	1,68	1,70	1,72	1,69	1,70
Innen 3	1,51	1,49	1,48	1,46	1,67	1,52
Innen 4	1,74	1,76	1,74	1,74	1,78	1,75
Mittelwert	1,65	1,64	1,63	1,63	1,70	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1			keine Rillen erkennbar			
Außen 2			keine Rillen erkennbar			
Außen 3			keine Rillen erkennbar			
Außen 4			keine Rillen erkennbar			
Mittelwert						

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,91	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,25	3,35	

Versuch MS006
 Testreihe D
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 32 - 64 h
 Temperatur: 0°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: Test

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,40	1,46	1,45	1,50	1,37	1,44
Innen 2	1,40	1,42	1,38	1,48	1,38	1,41
Innen 3	1,44	1,44	1,42	1,47	1,47	1,45
Innen 4	1,38	1,40	1,39	1,38	1,30	1,37
Mittelwert	1,41	1,43	1,41	1,46	1,38	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,00	2,88	2,95	2,97	2,97	2,95
Außen 2	2,82	2,79	2,88	2,80	2,82	2,82
Außen 3	2,90	2,88	2,90	2,90	2,92	2,90
Außen 4	3,00	2,98	3,00	3,02	3,00	3,00
Mittelwert	2,93	2,88	2,93	2,92	2,93	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	2,05	2,15	2,10
Innen 3	2,05	2,15	2,10
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	2,00	2,10	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,05	3,20	3,13
Außen 2	3,05	3,20	3,13
Außen 3	3,05	3,20	3,13
Außen 4	3,05	3,20	3,13
Mittelwert	3,05	3,20	

Versuch MS007
 Testreihe D
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 16 - 48 h
 Temperatur: 0°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,41	1,34	1,36	1,35	1,29	1,35
Innen 2	1,50	1,39	1,33	1,33	1,37	1,38
Innen 3	1,49	1,51	1,48	1,47	1,52	1,49
Innen 4	1,51	1,42	1,40	1,36	1,31	1,40
Mittelwert	1,48	1,42	1,39	1,38	1,37	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,82	2,83	2,84	2,88	2,95	2,86
Außen 2	2,81	2,73	2,74	2,84	2,85	2,79
Außen 3	2,84	2,87	2,88	2,88	2,89	2,87
Außen 4	2,98	2,96	2,96	3,00	3,02	2,98
Mittelwert	2,86	2,85	2,86	2,90	2,93	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	2,05	2,20	2,13
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,96	2,08	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,10	3,30	3,20
Außen 2	2,95	3,15	3,05
Außen 3	3,00	3,15	3,08
Außen 4	3,10	3,25	3,18
Mittelwert	3,04	3,21	

Versuch MS008
 Testreihe D
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 8 - 56 h
 Temperatur: 0°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,20	1,25	1,28	1,25	1,33	1,26
Innen 2	1,20	1,16	1,30	1,26	1,35	1,25
Innen 3	1,17	1,17	1,17	1,12	1,19	1,16
Innen 4	1,50	1,53	1,52	1,48	1,46	1,50
Mittelwert	1,27	1,28	1,32	1,28	1,33	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,00	3,00	3,02	3,02	2,98	3,00
Außen 2	3,00	3,01	3,03	3,08	3,07	3,04
Außen 3	3,04	3,01	3,00	3,03	3,04	3,02
Außen 4	3,05	3,06	3,05	3,12	3,15	3,09
Mittelwert	3,02	3,02	3,03	3,06	3,06	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,93	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,23	3,33	

Versuch MS009
 Testreihe D
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 32 - 32 h
 Temperatur: 0°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,19	1,26	1,29	1,27	1,28	1,26
Innen 2	1,36	1,50	1,50	1,51	1,43	1,46
Innen 3	1,53	1,54	1,58	1,59	1,54	1,56
Innen 4	1,33	1,34	1,35	1,32	1,38	1,34
Mittelwert	1,35	1,41	1,43	1,42	1,41	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,97	2,98	2,97	3,00	2,99	2,98
Außen 2	2,92	2,91	2,90	2,92	2,91	2,91
Außen 3	2,97	2,99	2,98	2,98	3,02	2,99
Außen 4	3,13	3,12	3,14	3,19	3,18	3,15
Mittelwert	3,00	3,00	3,00	3,02	3,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,80	1,90	1,85
Innen 2	2,05	2,15	2,10
Innen 3	1,95	2,15	2,05
Innen 4	1,80	2,10	1,95
Mittelwert	1,90	2,08	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,20	3,30	3,25
Außen 2	3,10	3,20	3,15
Außen 3	3,10	3,20	3,15
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,18	3,28	

Versuch MS010
 Testreihe D
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 16 - 48 h
 Temperatur: 0°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,78	0,86	0,88	0,92	0,95	0,88
Innen 2	0,78	0,79	0,77	0,82	0,79	0,79
Innen 3	1,14	1,03	1,03	1,13	1,15	1,10
Innen 4	1,15	1,11	1,12	1,19	1,20	1,15
Mittelwert	0,96	0,95	0,95	1,02	1,02	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,62	2,67	2,82	2,74	2,69	2,71
Außen 2	2,74	2,75	2,79	2,83	2,82	2,79
Außen 3	2,76	2,82	2,83	2,83	2,85	2,82
Außen 4	2,85	2,80	2,90	2,90	2,92	2,87
Mittelwert	2,74	2,76	2,84	2,83	2,82	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	1,85	1,95	1,90
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,95	2,05	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,28	3,38	

Versuch MS011
 Testreihe D
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 56 - 8 h
 Temperatur: 0°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,76	1,01	1,05	1,06	1,02	0,98
Innen 2	0,72	0,78	0,79	0,81	0,81	0,78
Innen 3	1,01	1,03	1,13	1,10	1,04	1,06
Innen 4	1,29	1,38	1,41	1,37	1,37	1,36
Mittelwert	0,95	1,05	1,10	1,09	1,06	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,21	3,06	3,07	3,11	3,20	3,13
Außen 2	3,13	3,11	3,07	3,12	3,18	3,12
Außen 3	3,17	3,12	3,13	3,16	3,21	3,16
Außen 4	3,15	3,16	3,23	3,28	3,33	3,23
Mittelwert	3,17	3,11	3,13	3,17	3,23	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,75	1,85	1,80
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	2,05	2,15	2,10
Mittelwert	1,93	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch MS012
 Testreihe D
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 8 - 56 h
 Temperatur: 0°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,06	1,11	1,10	1,12	1,10	1,10
Innen 2	1,00	0,89	0,99	1,05	0,94	0,97
Innen 3	0,77	0,88	0,85	0,75	0,88	0,83
Innen 4	1,33	1,17	1,20	1,21	1,16	1,21
Mittelwert	1,04	1,01	1,04	1,03	1,02	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,87	2,78	2,72	2,74	2,76	2,77
Außen 2	2,88	2,83	2,85	2,93	2,94	2,89
Außen 3	2,94	2,83	2,84	2,92	3,00	2,91
Außen 4	3,02	2,84	2,82	2,94	3,08	2,94
Mittelwert	2,93	2,82	2,81	2,88	2,95	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	2,00	2,10	2,05
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,94	2,04	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,20	3,40	3,30
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,23	3,35	

Versuch MS013
 Testreihe D
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 32 - 32 h
 Temperatur: 0°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,94	1,04	1,08	1,08	1,07	1,04
Innen 2	0,71	0,93	1,05	1,02	1,00	0,94
Innen 3	0,96	0,99	1,05	1,10	0,92	1,00
Innen 4	0,69	0,84	0,88	0,92	0,92	0,85
Mittelwert	0,83	0,95	1,02	1,03	0,98	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,74	2,54	2,62	2,66	2,70	2,65
Außen 2	2,55	2,53	2,54	2,60	2,68	2,58
Außen 3	2,61	2,65	2,67	2,66	2,76	2,67
Außen 4	2,74	2,83	2,82	2,83	2,84	2,81
Mittelwert	2,66	2,64	2,66	2,69	2,75	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,85	1,95	1,90
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,91	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,29	3,39	

Versuch MS014
 Testreihe A
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 8 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,33	1,38	1,40	1,28	1,44	1,37
Innen 2	1,12	1,18	1,19	1,15	1,05	1,14
Innen 3	1,40	1,43	1,42	1,32	1,24	1,36
Innen 4	1,49	1,48	1,46	1,45	1,43	1,46
Mittelwert	1,34	1,37	1,37	1,30	1,29	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,12	3,13	3,14	3,23	3,22	3,17
Außen 2	3,09	3,08	3,06	3,11	3,12	3,09
Außen 3	3,09	3,09	3,15	3,21	3,20	3,15
Außen 4	3,17	3,18	3,20	3,23	3,23	3,20
Mittelwert	3,12	3,12	3,14	3,20	3,19	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,75	1,85	1,80
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,89	1,99	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,28	3,38	

Versuch MS015
 Testreihe A
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 24 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,21	1,29	1,28	1,29	1,27	1,27
Innen 2	0,97	1,12	1,13	1,16	1,02	1,08
Innen 3	0,73	0,98	1,06	0,95	0,91	0,93
Innen 4	1,30	1,34	1,43	1,42	1,36	1,37
Mittelwert	1,05	1,18	1,23	1,21	1,14	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,16	3,16	3,12	3,16	3,26	3,17
Außen 2	3,16	3,07	3,07	3,08	3,16	3,11
Außen 3	3,08	3,04	3,05	3,15	3,15	3,09
Außen 4	3,15	3,14	3,12	3,16	3,25	3,16
Mittelwert	3,14	3,10	3,09	3,14	3,21	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,80	1,90	1,85
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,91	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,25	3,35	

Versuch MS016
 Testreihe A
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 64 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,21	1,29	1,28	1,29	1,27	1,27
Innen 2	0,97	1,12	1,13	1,16	1,02	1,08
Innen 3	0,73	0,98	1,06	0,95	0,91	0,93
Innen 4	1,30	1,34	1,43	1,42	1,36	1,37
Mittelwert	1,05	1,18	1,23	1,21	1,14	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,98	2,93	2,98	2,98	3,03	2,98
Außen 2	2,95	2,95	3,02	3,00	3,03	2,99
Außen 3	3,03	3,02	3,04	3,03	3,05	3,03
Außen 4	3,16	3,08	3,18	3,15	3,10	3,13
Mittelwert	3,03	3,00	3,06	3,04	3,05	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,25	3,35	

Versuch MS017-1
 Testreihe A
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 32 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: Kraft wurde nicht konstant gehalten, Versuch wurde wiederholt

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,08	1,26	1,30	1,28	1,18	1,22
Innen 2	1,13	1,16	1,12	1,11	1,06	1,12
Innen 3	1,32	1,31	1,30	1,30	1,23	1,29
Innen 4	1,33	1,42	1,43	1,41	1,31	1,38
Mittelwert	1,22	1,29	1,29	1,28	1,20	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,04	3,08	3,11	3,08	3,14	3,09
Außen 2	3,08	3,02	3,06	3,05	3,05	3,05
Außen 3	3,03	3,04	3,02	3,08	3,09	3,05
Außen 4	3,08	3,12	3,09	3,11	3,13	3,11
Mittelwert	3,06	3,07	3,07	3,08	3,10	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,75	1,85	1,80
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,91	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,20	3,30	3,25
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,19	3,29	

Versuch MS017-2
 Testreihe A
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 32 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,10	1,15	1,21	1,16	1,11	1,15
Innen 2	1,12	1,25	1,26	1,21	1,10	1,19
Innen 3	1,08	0,89	1,03	1,02	0,96	1,00
Innen 4	1,15	1,20	1,19	1,15	1,14	1,17
Mittelwert	1,11	1,12	1,17	1,14	1,08	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,08	3,08	3,06	3,07	3,05	3,07
Außen 2	3,08	3,06	2,99	2,98	3,05	3,03
Außen 3	2,97	2,98	2,98	2,98	3,02	2,99
Außen 4	3,04	3,08	3,11	3,08	3,07	3,08
Mittelwert	3,04	3,05	3,04	3,03	3,05	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,80	1,90	1,85
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,89	1,99	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,29	3,39	

Versuch MS018
 Testreihe A
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 16 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,19	1,19	1,31	1,27	1,00	1,19
Innen 2	1,24	1,13	1,21	1,17	0,78	1,11
Innen 3	1,25	1,29	1,24	1,11	1,40	1,26
Innen 4	1,38	1,40	1,38	1,31	1,40	1,37
Mittelwert	1,27	1,25	1,29	1,22	1,15	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,16	3,12	3,18	3,27	3,34	3,21
Außen 2	3,09	3,11	3,03	3,10	3,16	3,10
Außen 3	3,10	3,08	3,17	3,20	3,18	3,15
Außen 4	3,22	3,23	3,23	3,28	3,40	3,27
Mittelwert	3,14	3,14	3,15	3,21	3,27	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,75	1,85	1,80
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,91	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,30	3,40	3,35
Außen 3	3,30	3,40	3,35
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,33	3,43	

Versuch MS019
 Testreihe E
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 16 - 48 h
 Temperatur: 20°C - 40°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,73	0,83	0,83	0,80	0,82	0,80
Innen 2	0,58	0,72	0,75	0,82	0,80	0,73
Innen 3	0,53	0,55	0,54	0,65	0,63	0,58
Innen 4	0,70	0,73	0,73	0,79	0,80	0,75
Mittelwert	0,63	0,71	0,71	0,77	0,76	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,22	2,39	2,39	2,47	2,40	2,37
Außen 2	2,33	2,40	2,37	2,30	2,45	2,37
Außen 3	2,34	2,30	2,34	2,35	2,38	2,34
Außen 4	2,16	2,24	2,20	2,22	2,32	2,23
Mittelwert	2,26	2,33	2,33	2,34	2,39	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,80	1,90	1,85
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,88	1,98	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,25	3,30	3,28
Mittelwert	3,20	3,29	

Versuch MS020
 Testreihe E
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 32 - 32 h
 Temperatur: 20°C - 40°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,76	0,84	0,88	0,90	0,84	0,84
Innen 2	0,65	0,79	0,79	0,72	0,72	0,73
Innen 3	0,83	0,73	0,78	0,76	0,69	0,76
Innen 4	0,66	0,67	0,72	0,74	0,66	0,69
Mittelwert	0,73	0,76	0,79	0,78	0,73	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,10	2,09	2,19	2,18	2,12	2,14
Außen 2	2,36	2,34	2,41	2,52	2,42	2,41
Außen 3	2,15	1,95	1,96	2,04	2,18	2,06
Außen 4	2,03	2,15	2,12	2,19	2,16	2,13
Mittelwert	2,16	2,13	2,17	2,23	2,22	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,80	1,98	1,89
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,85	2,00	1,93
Innen 4	1,80	2,00	1,90
Mittelwert	1,84	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,20	3,30	3,25
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,20	3,30	

Versuch MS021
 Testreihe E
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 8 - 56 h
 Temperatur: 20°C - 40°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,63	0,77	0,80	0,83	0,75	0,76
Innen 2	0,70	0,80	0,82	0,82	0,80	0,79
Innen 3	0,44	0,55	0,78	0,60	0,59	0,59
Innen 4	0,50	0,58	0,58	0,59	0,57	0,56
Mittelwert	0,57	0,68	0,75	0,71	0,68	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,22	2,26	2,40	2,34	2,28	2,30
Außen 2	2,03	2,01	2,03	2,10	2,22	2,08
Außen 3	2,38	2,25	2,18	2,05	2,28	2,23
Außen 4	2,10	2,22	2,20	2,28	2,32	2,22
Mittelwert	2,18	2,19	2,20	2,19	2,28	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,80	1,90	1,85
Innen 2	1,85	1,95	1,90
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,84	1,94	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,30	3,40	3,35
Außen 3	3,30	3,40	3,35
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,33	3,43	

Versuch MS022
 Testreihe C
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 8 h
 Temperatur: 40°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,86	0,91	0,91	0,90	0,86	0,89
Innen 2	0,83	0,94	0,94	0,99	0,92	0,92
Innen 3	0,73	0,73	0,81	0,79	0,79	0,77
Innen 4	0,70	0,71	0,71	0,72	0,69	0,71
Mittelwert	0,78	0,82	0,84	0,85	0,82	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,25	2,30	2,32	2,35	2,37	2,32
Außen 2	2,30	2,22	2,32	2,33	2,34	2,30
Außen 3	2,36	2,31	2,29	2,25	2,34	2,31
Außen 4	2,35	2,35	2,36	2,36	2,35	2,35
Mittelwert	2,32	2,30	2,32	2,32	2,35	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,90	2,10	2,00
Innen 4	1,90	2,10	2,00
Mittelwert	1,89	2,04	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,23	3,33	

Versuch MS023
 Testreihe C
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 24 h
 Temperatur: 40°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,60	0,63	0,68	0,64	0,61	0,63
Innen 2	0,53	0,60	0,64	0,63	0,62	0,60
Innen 3	0,53	0,66	0,65	0,61	0,54	0,60
Innen 4	0,64	0,76	0,74	0,73	0,67	0,71
Mittelwert	0,58	0,66	0,68	0,65	0,61	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,24	2,43	2,45	2,43	2,32	2,37
Außen 2	2,65	2,40	2,37	2,45	2,48	2,47
Außen 3	2,58	2,47	2,43	2,43	2,66	2,51
Außen 4	2,47	2,45	2,44	2,44	2,46	2,45
Mittelwert	2,49	2,44	2,42	2,44	2,48	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,29	3,39	

Versuch MS024
 Testreihe C
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 64 h
 Temperatur: 40°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,82	0,82	0,83	0,80	0,76	0,81
Innen 2	0,77	0,73	0,83	0,75	0,68	0,75
Innen 3	0,84	0,72	0,73	0,78	0,76	0,77
Innen 4	0,74	0,74	0,78	0,80	0,81	0,77
Mittelwert	0,79	0,75	0,79	0,78	0,75	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,22	2,29	2,36	2,38	2,32	2,31
Außen 2	2,20	2,30	2,30	2,33	2,48	2,32
Außen 3	2,31	2,26	2,19	2,20	2,30	2,25
Außen 4	2,13	2,23	2,20	2,28	2,35	2,24
Mittelwert	2,22	2,27	2,26	2,30	2,36	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	2,00	2,10	2,05
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,96	2,06	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch MS025
 Testreihe C
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 32 h
 Temperatur: 40°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,83	0,84	0,93	0,92	0,86	0,88
Innen 2	0,69	0,85	0,82	0,78	0,79	0,79
Innen 3	0,75	0,80	0,75	0,64	0,66	0,72
Innen 4	0,68	0,77	0,78	0,85	0,83	0,78
Mittelwert	0,74	0,82	0,82	0,80	0,79	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,43	2,30	2,35	2,34	2,33	2,35
Außen 2	2,37	2,34	2,36	2,24	2,40	2,34
Außen 3	2,27	2,20	2,20	2,32	2,37	2,27
Außen 4	2,03	2,15	2,15	2,13	2,19	2,13
Mittelwert	2,28	2,25	2,27	2,26	2,32	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	2,00	2,10	2,05
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,93	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,26	3,36	

Versuch MS026
 Testreihe C
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 16 h
 Temperatur: 40°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,89	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92
Innen 2	0,80	0,80	0,86	0,80	0,88	0,83
Innen 3	0,66	0,75	0,74	0,72	0,75	0,72
Innen 4	0,61	0,61	0,62	0,66	0,66	0,63
Mittelwert	0,74	0,77	0,79	0,78	0,80	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,45	2,14	2,28	2,28	2,28	2,29
Außen 2	2,15	2,08	2,13	2,18	2,20	2,15
Außen 3	2,27	2,24	2,27	2,35	2,36	2,30
Außen 4	2,00	2,16	2,11	2,17	2,20	2,13
Mittelwert	2,22	2,16	2,20	2,25	2,26	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch MS027
 Testreihe F
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 32 - 32 h
 Temperatur: 40°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,03	1,05	1,10	1,06	1,18	1,08
Innen 2	1,10	1,26	1,27	1,17	1,10	1,18
Innen 3	0,81	0,94	0,94	0,98	1,04	0,94
Innen 4	1,04	1,00	1,04	1,03	1,02	1,03
Mittelwert	1,00	1,06	1,09	1,06	1,09	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,95	2,85	2,87	2,88	3,10	2,93
Außen 2	2,84	2,69	2,80	2,85	2,96	2,83
Außen 3	2,91	2,77	2,75	2,80	3,01	2,85
Außen 4	2,83	2,74	2,71	2,75	2,71	2,75
Mittelwert	2,88	2,76	2,78	2,82	2,95	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,94	2,04	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch MS028
 Testreihe G
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 12-12-12-12-12 h
 Temperatur: 20-40-20-40-20 °C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,31	1,22	1,15	1,08	0,94	1,14
Innen 2	1,25	1,10	1,00	0,94	0,75	1,01
Innen 3	1,33	1,30	1,18	0,95	1,07	1,17
Innen 4	1,18	1,10	1,09	1,03	0,89	1,06
Mittelwert	1,27	1,18	1,11	1,00	0,91	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,07	1,90	1,90	1,89	1,84	1,92
Außen 2	2,09	2,06	2,06	2,02	1,92	2,03
Außen 3	1,95	1,94	1,91	1,89	1,93	1,92
Außen 4	2,11	2,07	2,05	1,95	1,89	2,01
Mittelwert	2,06	1,99	1,98	1,94	1,90	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,88	1,98	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,29	3,39	

Versuch	MS029
Testreihe	F
Belastung:	150 kN
Dauer:	8 - 56 h
Temperatur:	40°C - 20°C
Temperaturverlauf:	variabel
Steuerung:	manuell
Prüfmaschine:	Instron
Prüfort:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,78	0,91	0,80	0,80	0,76	0,81
Innen 2	0,76	0,75	0,77	0,78	0,73	0,76
Innen 3	0,70	0,67	0,70	0,74	0,63	0,69
Innen 4	0,59	0,63	0,62	0,61	0,59	0,61
Mittelwert	0,71	0,74	0,72	0,73	0,68	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,15	2,14	2,23	2,26	2,26	2,21
Außen 2	1,90	1,91	1,95	2,05	2,15	1,99
Außen 3	2,05	2,00	2,02	2,08	2,25	2,08
Außen 4	2,00	2,05	2,01	2,06	2,03	2,03
Mittelwert	2,03	2,03	2,05	2,11	2,17	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,85	1,95	1,90
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,85	1,95	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,23	3,33	

Versuch MS031
 Testreihe G
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 12-12-12-12-12 h
 Temperatur: 40-20-40-20-40 °C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,34	1,08	1,11	1,11	1,13	1,15
Innen 2	1,46	0,85	1,13	1,18	1,14	1,15
Innen 3	1,23	0,96	0,99	0,97	0,96	1,02
Innen 4	1,44	1,23	1,21	1,13	1,16	1,23
Mittelwert	1,37	1,03	1,11	1,10	1,10	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,06	2,05	1,97	1,94	2,20	2,04
Außen 2	2,13	2,08	2,06	1,98	2,13	2,08
Außen 3	2,14	2,07	2,07	2,06	2,13	2,09
Außen 4	2,05	2,04	1,98	1,90	1,98	1,99
Mittelwert	2,10	2,06	2,02	1,97	2,11	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,88	1,98	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,35	3,45	3,40
Außen 3	3,35	3,45	3,40
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,35	3,45	

Versuch MS032
 Testreihe E
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 8 - 56 h
 Temperatur: 20°C - 40°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,11	1,14	1,17	1,21	1,23	1,17
Innen 2	1,08	1,18	1,24	1,31	1,35	1,23
Innen 3	1,05	1,40	1,08	1,10	1,16	1,16
Innen 4	1,13	1,13	1,14	1,24	1,30	1,19
Mittelwert	1,09	1,21	1,16	1,22	1,26	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,85	2,80	2,87	2,92	2,93	2,87
Außen 2	2,82	2,81	2,88	2,87	2,95	2,87
Außen 3	2,89	2,81	2,82	2,88	2,85	2,85
Außen 4	2,85	2,83	2,93	2,89	2,98	2,90
Mittelwert	2,85	2,81	2,88	2,89	2,93	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,86	1,96	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,30	3,40	3,35
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,31	3,41	

Versuch MS033
 Testreihe E
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 16 - 48 h
 Temperatur: 20°C - 40°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,27	1,24	1,21	1,20	1,10	1,20
Innen 2	1,27	1,29	1,22	1,16	1,19	1,23
Innen 3	1,14	1,21	1,17	1,03	0,93	1,10
Innen 4	1,30	1,32	1,25	1,16	1,06	1,22
Mittelwert	1,25	1,27	1,21	1,14	1,07	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,02	2,91	2,86	2,76	2,69	2,85
Außen 2	2,99	2,89	2,81	2,84	2,82	2,87
Außen 3	3,12	2,93	2,84	2,86	2,86	2,92
Außen 4	3,04	2,94	2,92	2,93	2,89	2,94
Mittelwert	3,04	2,92	2,86	2,85	2,82	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,30	3,40	3,35
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,31	3,41	

Versuch MS034
 Testreihe E
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 32 - 32 h
 Temperatur: 20°C - 40°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,49	1,43	1,41	1,36	1,39	1,42
Innen 2	1,71	1,59	1,55	1,43	1,39	1,53
Innen 3	1,30	1,20	1,16	1,02	1,00	1,14
Innen 4	1,51	1,35	1,27	1,14	1,16	1,29
Mittelwert	1,50	1,39	1,35	1,24	1,24	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,00	2,95	2,90	2,85	2,89	2,92
Außen 2	2,80	2,80	2,76	2,79	2,70	2,77
Außen 3	2,75	2,75	2,74	2,70	2,57	2,70
Außen 4	2,85	2,73	2,64	2,62	2,58	2,68
Mittelwert	2,85	2,81	2,76	2,74	2,69	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	2,00	2,10	2,05
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,94	2,04	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,15	3,25	3,20
Außen 2	3,10	3,20	3,15
Außen 3	3,05	3,15	3,10
Außen 4	3,20	3,30	3,25
Mittelwert	3,13	3,23	

Versuch MS036
 Testreihe F
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 16 - 48 h
 Temperatur: 40°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,82	0,87	0,90	0,90	0,82	0,86
Innen 2	0,75	0,84	0,88	0,84	0,88	0,84
Innen 3	0,77	0,83	0,79	0,71	0,99	0,82
Innen 4	0,73	0,71	0,71	0,75	0,70	0,72
Mittelwert	0,77	0,81	0,82	0,80	0,85	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,27	2,28	2,33	2,38	2,30	2,31
Außen 2	2,48	2,28	2,20	2,24	2,37	2,31
Außen 3	2,50	2,35	2,37	2,45	2,54	2,44
Außen 4	2,33	2,20	2,24	2,28	2,25	2,26
Mittelwert	2,40	2,28	2,29	2,34	2,37	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,85	1,95	1,90
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,85	1,95	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,29	3,39	

Versuch MS037
 Testreihe F
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 32 - 32 h
 Temperatur: 40°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,59	0,60	0,59	0,58	0,54	0,58
Innen 2	0,72	0,71	0,70	0,65	0,63	0,68
Innen 3	0,82	0,75	0,76	0,63	0,61	0,71
Innen 4	0,74	0,69	0,73	0,72	0,63	0,70
Mittelwert	0,72	0,69	0,70	0,65	0,60	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,15	1,85	1,95	2,00	2,03	2,00
Außen 2	1,93	2,02	2,03	2,05	2,08	2,02
Außen 3	1,80	1,78	1,84	1,90	2,08	1,88
Außen 4	1,70	1,82	1,88	1,94	2,04	1,88
Mittelwert	1,90	1,87	1,93	1,97	2,06	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,88	1,98	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,24	3,34	

Versuch MS040
 Testreihe F
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 8 - 56 h
 Temperatur: 40°C - 20°C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,18	1,24	1,18	1,20	1,20	1,20
Innen 2	1,26	1,17	1,18	1,14	1,17	1,18
Innen 3	1,28	1,22	1,23	1,19	1,19	1,22
Innen 4	1,09	1,60	1,04	1,08	1,01	1,16
Mittelwert	1,20	1,31	1,16	1,15	1,14	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,74	2,79	2,85	2,71	2,68	2,75
Außen 2	2,68	2,65	2,62	2,62	2,56	2,63
Außen 3	2,65	2,80	2,81	2,63	2,71	2,72
Außen 4	2,53	2,58	2,54	2,52	2,53	2,54
Mittelwert	2,65	2,71	2,71	2,62	2,62	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,85	1,95	1,90
Innen 3	2,10	2,20	2,15
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,91	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,10	3,20	3,15
Außen 3	3,10	3,20	3,15
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,20	3,30	

Versuch	MS041
Testreihe	F
Belastung:	100 kN
Dauer:	16 - 48 h
Temperatur:	40°C - 20°C
Temperaturverlauf:	variabel
Steuerung:	manuell
Prüfmaschine:	Relax
Prüfort:	Halle KG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,23	1,04	1,07	1,09	1,04	1,09
Innen 2	1,14	1,15	1,21	1,19	1,17	1,17
Innen 3	1,21	1,17	1,22	1,19	1,15	1,19
Innen 4	1,08	1,09	1,11	1,08	1,08	1,09
Mittelwert	1,17	1,11	1,15	1,14	1,11	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,79	2,65	2,56	2,51	2,51	2,60
Außen 2	2,56	2,49	2,39	2,40	2,41	2,45
Außen 3	2,62	2,61	2,53	2,54	2,57	2,57
Außen 4	2,55	2,51	2,42	2,39	2,41	2,46
Mittelwert	2,63	2,57	2,48	2,46	2,48	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	2,05	2,15	2,10
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,96	2,06	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,20	3,30	

Versuch MS050
 Testreihe G
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 12-12-12-12-12 h
 Temperatur: 20-40-20-40-20 °C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,75	0,81	0,80	0,85	0,74	0,79
Innen 2	0,74	0,76	0,78	0,76	0,62	0,73
Innen 3	0,63	0,73	0,82	0,76	0,68	0,72
Innen 4	0,66	0,61	0,62	0,64	0,62	0,63
Mittelwert	0,70	0,73	0,76	0,75	0,67	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,00	1,97	2,04	2,08	2,00	2,02
Außen 2	2,00	1,89	1,92	2,00	2,08	1,98
Außen 3	1,90	1,82	1,82	1,80	1,97	1,86
Außen 4	1,95	2,03	2,00	1,99	2,25	2,04
Mittelwert	1,96	1,93	1,95	1,97	2,08	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,80	1,90	1,85
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,95	2,15	2,05
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,93	2,05	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,20	3,30	

Versuch MS051
 Testreihe G
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 12-12-12-12-12 h
 Temperatur: 40-20-40-20-40 °C
 Temperaturverlauf: variabel
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,75	0,77	0,78	0,77	0,87	0,79
Innen 2	0,63	0,70	0,71	0,66	0,55	0,65
Innen 3	0,76	0,74	0,70	0,61	0,57	0,68
Innen 4	0,62	0,63	0,68	0,68	0,65	0,65
Mittelwert	0,69	0,71	0,72	0,68	0,66	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,40	2,30	2,14	2,19	2,21	2,25
Außen 2	2,70	2,55	2,58	2,60	2,60	2,61
Außen 3	2,40	2,42	2,45	2,48	2,42	2,43
Außen 4	2,35	2,34	2,34	2,33	2,65	2,40
Mittelwert	2,46	2,40	2,38	2,40	2,47	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	2,00	2,10	2,05
Innen 4	2,05	2,15	2,10
Mittelwert	1,96	2,06	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,21	3,31	

Versuch MS100
 Testreihe B
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 8 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,49	1,44	1,45	1,43	1,38	1,44
Innen 2	1,44	1,43	1,38	1,38	1,46	1,42
Innen 3	1,64	1,54	1,53	1,44	1,45	1,52
Innen 4	1,53	1,52	1,48	1,47	1,44	1,49
Mittelwert	1,53	1,48	1,46	1,43	1,43	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,93	2,86	2,87	2,83	2,95	2,89
Außen 2	2,95	2,93	2,90	2,87	2,85	2,90
Außen 3	2,87	2,86	2,81	2,81	2,77	2,82
Außen 4	3,10	3,10	3,20	3,03	3,06	3,10
Mittelwert	2,96	2,94	2,95	2,89	2,91	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	2,10	2,20	2,15
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,96	2,06	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,15	3,25	3,20
Außen 2	3,05	3,15	3,10
Außen 3	3,05	3,15	3,10
Außen 4	3,15	3,25	3,20
Mittelwert	3,10	3,20	

Versuch MS101
 Testreihe B
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 16 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,37	1,35	1,34	1,28	1,30	1,33
Innen 2	1,43	1,40	1,47	1,37	1,30	1,39
Innen 3	1,52	1,42	1,47	1,37	1,29	1,41
Innen 4	1,45	1,49	1,43	1,38	1,49	1,45
Mittelwert	1,44	1,42	1,43	1,35	1,35	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,87	2,86	2,82	2,80	2,81	2,83
Außen 2	2,89	2,91	2,82	2,83	2,81	2,85
Außen 3	2,80	2,84	2,81	2,75	2,75	2,79
Außen 4	3,02	2,98	3,02	2,97	2,94	2,99
Mittelwert	2,90	2,90	2,87	2,84	2,83	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	2,05	2,15	2,10
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,94	2,04	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,15	3,25	3,20
Außen 2	3,10	3,20	3,15
Außen 3	3,05	3,15	3,10
Außen 4	3,20	3,30	3,25
Mittelwert	3,13	3,23	

Versuch MS102
 Testreihe B
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 24 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,53	1,50	1,53	1,51	1,57	1,53
Innen 2	1,43	1,42	1,38	1,39	1,40	1,40
Innen 3	1,53	1,46	1,48	1,47	1,42	1,47
Innen 4	1,37	1,34	1,32	1,23	1,22	1,30
Mittelwert	1,47	1,43	1,43	1,40	1,40	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,94	2,95	2,94	2,92	2,97	2,94
Außen 2	2,72	2,75	2,79	2,79	2,82	2,77
Außen 3	2,87	2,83	2,84	2,78	2,83	2,83
Außen 4	2,82	2,78	2,79	2,76	2,87	2,80
Mittelwert	2,84	2,83	2,84	2,81	2,87	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	2,00	2,10	2,05
Innen 3	2,05	2,15	2,10
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,98	2,08	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,20	3,30	3,25
Außen 2	3,10	3,20	3,15
Außen 3	3,10	3,20	3,15
Außen 4	3,15	3,25	3,20
Mittelwert	3,14	3,24	

Versuch MS103
 Testreihe B
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 32 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,36	1,39	1,42	1,41	1,35	1,39
Innen 2	1,48	1,43	1,42	1,48	1,44	1,45
Innen 3	1,37	1,37	1,39	1,40	1,37	1,38
Innen 4	1,32	1,32	1,31	1,30	1,28	1,31
Mittelwert	1,38	1,38	1,39	1,40	1,36	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,92	2,94	2,91	2,90	2,89	2,91
Außen 2	2,88	2,74	2,71	2,66	2,65	2,73
Außen 3	2,82	2,81	2,72	2,76	2,76	2,77
Außen 4	2,91	2,79	2,76	2,77	2,72	2,79
Mittelwert	2,88	2,82	2,78	2,77	2,76	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	2,00	2,10	2,05
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,94	2,04	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,05	3,15	3,10
Außen 3	3,05	3,15	3,10
Außen 4	3,15	3,25	3,20
Mittelwert	3,13	3,23	

Versuch MS104
 Testreihe B
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 64 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,29	1,33	1,29	1,30	1,35	1,31
Innen 2	1,42	1,41	1,34	1,38	1,38	1,39
Innen 3	1,44	1,41	1,39	1,38	1,38	1,40
Innen 4	1,35	1,34	1,32	1,31	1,27	1,32
Mittelwert	1,38	1,37	1,34	1,34	1,35	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,87	2,84	2,85	2,86	2,84	2,85
Außen 2	2,72	2,70	2,71	2,66	2,65	2,69
Außen 3	2,82	2,81	2,87	2,80	2,79	2,82
Außen 4	2,85	2,82	2,86	2,85	2,83	2,84
Mittelwert	2,82	2,79	2,82	2,79	2,78	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,85	1,95	1,90
Innen 3	2,05	2,15	2,10
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,91	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,05	3,15	3,10
Außen 3	3,05	3,15	3,10
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,16	3,26	

Versuch MS105
 Testreihe B
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 8 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,98	1,07	1,06	0,92	0,76	0,96
Innen 2	1,01	0,89	1,12	1,01	0,79	0,96
Innen 3	0,85	0,85	0,95	0,97	0,83	0,89
Innen 4	1,18	1,08	1,02	1,04	0,84	1,03
Mittelwert	1,01	0,97	1,04	0,99	0,81	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,93	2,81	2,77	2,80	2,80	2,82
Außen 2	2,92	2,85	2,72	2,73	2,82	2,81
Außen 3	2,88	2,82	2,75	2,77	2,82	2,81
Außen 4	2,86	2,80	2,76	2,66	2,58	2,73
Mittelwert	2,90	2,82	2,75	2,74	2,76	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,93	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,21	3,31	

Versuch MS106
 Testreihe B
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 16 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,21	1,12	0,99	0,88	0,71	0,98
Innen 2	1,24	1,16	1,10	0,92	0,80	1,04
Innen 3	1,26	1,13	1,00	0,75	0,58	0,94
Innen 4	1,08	1,09	0,91	0,77	0,81	0,93
Mittelwert	1,20	1,13	1,00	0,83	0,73	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,00	2,91	2,84	2,74	2,90	2,88
Außen 2	2,92	2,78	2,74	2,68	2,73	2,77
Außen 3	2,84	2,75	2,69	2,72	2,78	2,76
Außen 4	2,75	2,58	2,50	2,40	2,80	2,61
Mittelwert	2,88	2,76	2,69	2,64	2,80	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	2,00	2,10	2,05
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,95	2,05	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,20	3,30	3,25
Mittelwert	3,23	3,33	

Versuch	MS107
Testreihe	B
Belastung:	150 kN
Dauer:	24 h
Temperatur:	20°C
Temperaturverlauf:	konstant
Steuerung:	manuell
Prüfmaschine:	Relax
Prüfort:	Halle KG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,60	0,68	0,73	0,67	0,68	0,67
Innen 2	0,67	0,77	0,79	0,77	0,90	0,78
Innen 3	0,88	0,87	0,94	0,88	0,77	0,87
Innen 4	1,08	1,03	0,88	0,85	0,79	0,93
Mittelwert	0,81	0,84	0,84	0,79	0,79	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,84	2,76	2,73	2,77	2,81	2,78
Außen 2	2,77	2,67	2,66	2,73	2,74	2,71
Außen 3	2,85	2,73	2,72	2,68	2,74	2,74
Außen 4	2,88	2,74	2,77	2,79	2,77	2,79
Mittelwert	2,84	2,73	2,72	2,74	2,77	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,93	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,10	3,20	3,15
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,20	3,30	

Versuch MS108
 Testreihe B
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 32 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,95	0,93	1,08	1,13	1,10	1,04
Innen 2	0,90	0,75	0,94	1,20	1,18	0,99
Innen 3	0,86	0,85	0,97	1,08	0,95	0,94
Innen 4	1,00	1,03	1,05	1,04	1,05	1,03
Mittelwert	0,93	0,89	1,01	1,11	1,07	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,47	2,65	2,60	2,52	2,55	2,56
Außen 2	2,64	2,84	2,74	2,56	2,61	2,68
Außen 3	2,53	2,74	2,63	2,53	2,65	2,62
Außen 4	2,64	2,64	2,59	2,58	2,63	2,62
Mittelwert	2,57	2,72	2,64	2,55	2,61	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,75	1,85	1,80
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,90	2,10	2,00
Mittelwert	1,89	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,20	3,30	

Versuch MS109
 Testreihe B
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 64 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,01	0,92	0,93	0,90	0,88	0,93
Innen 2	0,87	0,94	0,85	0,83	1,12	0,92
Innen 3	1,28	0,94	1,10	0,93	0,92	1,03
Innen 4	1,19	1,00	1,03	0,90	0,80	0,98
Mittelwert	1,09	0,95	0,98	0,89	0,93	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,50	2,40	2,42	2,37	2,42	2,42
Außen 2	2,50	2,50	2,40	2,45	2,48	2,47
Außen 3	2,70	2,60	2,50	2,55	2,54	2,58
Außen 4	2,65	2,45	2,35	2,45	2,35	2,45
Mittelwert	2,59	2,49	2,42	2,46	2,45	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	2,05	2,15	2,10
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,96	2,06	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,15	3,25	3,20
Außen 2	3,05	3,15	3,10
Außen 3	3,05	3,15	3,10
Außen 4	3,15	3,25	3,20
Mittelwert	3,10	3,20	

Versuch MS110
 Testreihe C
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 8 h
 Temperatur: 40°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,18	1,30	1,37	1,43	1,43	1,34
Innen 2	1,02	1,09	1,16	1,21	1,30	1,16
Innen 3	0,88	1,10	1,21	1,22	1,31	1,14
Innen 4	0,94	1,06	1,12	1,16	1,24	1,10
Mittelwert	1,01	1,14	1,22	1,26	1,32	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,68	2,83	2,93	2,98	3,10	2,90
Außen 2	2,72	2,82	2,83	2,94	2,93	2,85
Außen 3	2,75	2,83	2,84	2,92	2,97	2,86
Außen 4	2,64	2,81	2,85	2,88	2,96	2,83
Mittelwert	2,70	2,82	2,86	2,93	2,99	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,80	1,90	1,85
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,30	3,40	3,35
Außen 3	3,30	3,40	3,35
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,33	3,43	

Versuch	MS111
Testreihe	C
Belastung:	100 kN
Dauer:	16 h
Temperatur:	40°C
Temperaturverlauf:	konstant
Steuerung:	manuell
Prüfmaschine:	Relax
Prüfort:	Halle KG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,04	1,09	1,13	1,17	1,22	1,13
Innen 2	1,06	1,17	1,17	1,23	1,34	1,19
Innen 3	0,89	0,96	0,96	1,02	1,19	1,00
Innen 4	1,15	1,25	1,20	1,25	1,30	1,23
Mittelwert	1,04	1,12	1,12	1,17	1,26	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,75	2,76	2,90	2,86	2,91	2,84
Außen 2	2,82	2,78	2,82	2,84	2,87	2,83
Außen 3	2,90	2,92	2,91	2,91	2,91	2,91
Außen 4	2,80	2,83	2,87	2,90	2,88	2,86
Mittelwert	2,82	2,82	2,88	2,88	2,89	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,70	1,80	1,75
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,89	1,99	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,29	3,39	

Versuch MS112
 Testreihe C
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 24 h
 Temperatur: 40°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,10	1,24	1,26	1,29	1,32	1,24
Innen 2	1,19	1,14	1,18	1,16	1,20	1,17
Innen 3	1,16	1,04	1,14	1,19	1,18	1,14
Innen 4	1,03	0,98	1,08	1,06	1,16	1,06
Mittelwert	1,12	1,10	1,17	1,18	1,22	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,94	2,96	3,02	3,00	3,04	2,99
Außen 2	2,76	2,78	2,83	2,80	2,73	2,78
Außen 3	2,76	2,87	2,80	2,81	2,88	2,82
Außen 4	2,84	2,88	2,86	2,92	2,93	2,89
Mittelwert	2,83	2,87	2,88	2,88	2,90	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,80	1,90	1,85
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,85	1,95	1,90
Mittelwert	1,84	1,94	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch	MS113
Testreihe	C
Belastung:	100 kN
Dauer:	32 h
Temperatur:	40°C
Temperaturverlauf:	konstant
Steuerung:	manuell
Prüfmaschine:	Relax
Prüfort:	Halle KG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,11	1,04	1,07	1,06	1,09	1,07
Innen 2	0,95	0,92	0,94	0,87	1,22	0,98
Innen 3	0,95	0,85	0,82	0,83	0,84	0,86
Innen 4	1,20	1,20	1,27	1,18	1,08	1,19
Mittelwert	1,05	1,00	1,03	0,99	1,06	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,83	2,74	2,71	2,75	2,76	2,76
Außen 2	2,97	2,94	2,88	2,87	2,90	2,91
Außen 3	2,97	2,93	2,93	2,89	2,84	2,91
Außen 4	3,02	2,94	2,89	2,88	2,86	2,92
Mittelwert	2,95	2,89	2,85	2,85	2,84	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	2,00	2,10	2,05
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch MS114
 Testreihe C
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 64 h
 Temperatur: 40°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,17	1,24	1,26	1,26	1,29	1,24
Innen 2	1,01	1,03	1,07	1,07	1,01	1,04
Innen 3	1,26	1,08	1,12	1,13	1,08	1,13
Innen 4	1,05	0,96	0,97	0,99	0,98	0,99
Mittelwert	1,12	1,08	1,11	1,11	1,09	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,90	2,88	2,87	2,91	2,91	2,89
Außen 2	2,77	2,78	2,81	2,82	2,85	2,81
Außen 3	2,72	2,73	2,70	2,81	2,94	2,78
Außen 4	2,73	2,58	2,62	2,61	2,61	2,63
Mittelwert	2,78	2,74	2,75	2,79	2,83	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,75	1,85	1,80
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,88	1,98	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch MS200
 Testreihe B
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 0,2 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,20	1,21	1,23	1,31	1,46	1,28
Innen 2	1,37	1,15	1,07	1,08	1,33	1,20
Innen 3	1,37	1,03	0,98	0,80	1,05	1,05
Innen 4	1,36	1,26	1,25	1,22	1,29	1,28
Mittelwert	1,33	1,16	1,13	1,10	1,28	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,76	2,74	2,88	2,90	2,97	2,85
Außen 2	2,82	2,86	2,98	2,95	2,92	2,91
Außen 3	2,81	2,79	3,02	3,04	2,97	2,93
Außen 4	2,86	2,80	2,85	2,90	3,00	2,88
Mittelwert	2,81	2,80	2,93	2,95	2,97	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	2,05	2,15	2,10
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,95	2,05	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,20	3,30	3,25
Außen 2	3,00	3,10	3,05
Außen 3	3,00	3,10	3,05
Außen 4	3,20	3,30	3,25
Mittelwert	3,10	3,20	

Versuch	MS201
Testreihe	C
Belastung:	150 kN
Dauer:	0,2 h
Temperatur:	40°C
Temperaturverlauf:	konstant
Steuerung:	manuell
Prüfmaschine:	Relax
Prüfort:	Halle KG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,36	1,04	0,98	0,95	0,98	1,06
Innen 2	1,02	0,96	0,86	0,87	1,10	0,96
Innen 3	0,67	0,65	0,64	0,70	0,90	0,71
Innen 4	0,98	0,97	0,94	0,94	1,06	0,98
Mittelwert	1,01	0,91	0,86	0,87	1,01	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,83	2,82	2,74	2,74	2,94	2,81
Außen 2	2,84	2,73	2,68	2,71	2,77	2,75
Außen 3	2,72	2,62	2,58	2,62	2,80	2,67
Außen 4	2,75	2,70	2,63	2,59	2,65	2,66
Mittelwert	2,79	2,72	2,66	2,67	2,79	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,93	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,25	3,35	

Versuch MS203
 Testreihe A
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 0,2 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,35	1,44	1,47	1,48	1,50	1,45
Innen 2	1,26	1,41	1,18	1,34	1,39	1,32
Innen 3	1,08	1,09	1,10	1,11	1,13	1,10
Innen 4	1,45	1,49	1,45	1,51	1,58	1,50
Mittelwert	1,29	1,36	1,30	1,36	1,40	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,30	3,28	3,32	3,25	3,29
Außen 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
Außen 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
Außen 4	3,26	3,32	3,47	3,37	3,20	3,32
Mittelwert	3,29	3,31	3,34	3,32	3,26	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,89	1,99	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,45	3,55	3,50
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,40	3,50	3,45
Mittelwert	3,34	3,44	

Versuch MS204
 Testreihe A
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 0,2 h
 Temperatur: 0°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,61	1,68	1,71	1,70	1,68	1,68
Innen 2	1,73	1,71	1,72	1,68	1,66	1,70
Innen 3	1,48	1,54	1,57	1,58	1,55	1,54
Innen 4	1,78	1,80	1,82	1,81	1,78	1,80
Mittelwert	1,65	1,68	1,71	1,69	1,67	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
Außen 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
Außen 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
Außen 4	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
Mittelwert	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch MS205
 Testreihe B
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 0,2 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,46	1,47	1,46	1,44	1,41	1,45
Innen 2	1,49	1,51	1,50	1,49	1,57	1,51
Innen 3	1,67	1,67	1,66	1,63	1,74	1,67
Innen 4	1,41	1,41	1,40	1,42	1,44	1,42
Mittelwert	1,51	1,52	1,51	1,50	1,54	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,18	3,21	3,14	3,15	3,26	3,19
Außen 2	3,10	3,01	3,04	3,04	3,10	3,06
Außen 3	3,20	3,10	3,08	3,04	3,09	3,10
Außen 4	3,20	3,19	3,17	3,16	3,22	3,19
Mittelwert	3,17	3,13	3,11	3,10	3,17	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,75	1,85	1,80
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,89	1,99	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,25	3,35	

Versuch MS206
 Testreihe C
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 0,2 h
 Temperatur: 40°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: manuell
 Prüfmaschine: Relax
 Prüfort: Halle KG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,35	1,35	1,32	1,25	1,35	1,32
Innen 2	1,43	1,54	1,49	1,31	1,60	1,47
Innen 3	1,55	1,52	1,55	1,45	1,40	1,49
Innen 4	1,61	1,45	1,54	1,48	1,33	1,48
Mittelwert	1,49	1,47	1,48	1,37	1,42	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,10	3,04	2,94	2,92	2,98	3,00
Außen 2	2,97	2,78	2,76	2,81	2,83	2,83
Außen 3	2,94	2,91	2,81	2,84	2,86	2,87
Außen 4	3,07	2,87	2,80	2,80	2,91	2,89
Mittelwert	3,02	2,90	2,83	2,84	2,90	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	2,00	2,10	2,05
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,96	2,06	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,25	3,35	3,30
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,20	3,30	

Versuch MS300
 Testreihe H
 Belastung: 150 kN
 Dauer: 0,75 h
 Temperatur: -25°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,52	1,59	1,59	1,59	1,60	1,58
Innen 2	1,47	1,52	1,50	1,50	1,40	1,48
Innen 3	1,54	1,54	1,57	1,45	1,72	1,56
Innen 4	1,45	1,52	1,51	1,52	1,56	1,51
Mittelwert	1,50	1,54	1,54	1,52	1,57	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,34	3,35	3,34	3,35	3,35
Außen 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
Außen 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
Außen 4	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
Mittelwert	3,34	3,34	3,34	3,34	3,34	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,80	1,90	1,85
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,80	1,90	1,85
Mittelwert	1,83	1,93	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch MS301
 Testreihe H
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 0,75 h
 Temperatur: -25°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,75	1,75	1,74	1,72	1,68	1,73
Innen 2	1,78	1,76	1,74	1,72	1,70	1,74
Innen 3	1,77	1,79	1,73	1,76	1,77	1,76
Innen 4	1,80	1,81	1,80	1,80	1,72	1,79
Mittelwert	1,78	1,78	1,75	1,75	1,72	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
Außen 2	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
Außen 3	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
Außen 4	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
Mittelwert	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,90	2,00	1,95
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,88	1,98	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,28	3,38	

Versuch	MS302
Testreihe	H
Belastung:	150 kN
Dauer:	0,75 h
Temperatur:	20°C
Temperaturverlauf:	konstant
Steuerung:	elektronisch
Prüfmaschine:	Instron
Prüfort:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,14	1,21	1,33	1,34	1,36	1,28
Innen 2	1,33	0,91	1,20	1,15	1,14	1,15
Innen 3	0,82	1,00	1,00	1,02	1,15	1,00
Innen 4	0,85	1,00	0,97	0,94	0,94	0,94
Mittelwert	1,04	1,03	1,13	1,11	1,15	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,08	3,02	3,02	3,03	3,07	3,04
Außen 2	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
Außen 3	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
Außen 4	3,06	3,08	3,08	3,14	3,18	3,11
Mittelwert	3,14	3,13	3,13	3,14	3,16	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,80	1,90	1,85
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,85	1,96	1,91
Innen 4	1,90	2,10	2,00
Mittelwert	1,88	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,15	3,25	3,20
Außen 3	3,15	3,25	3,20
Außen 4	3,25	3,35	3,30
Mittelwert	3,21	3,31	

Versuch MS303
 Testreihe H
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 0,75 h
 Temperatur: 20°C
 Temperaturverlauf: konstant
 Steuerung: elektronisch
 Prüfmaschine: Instron
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,38	1,52	1,54	1,54	1,50	1,50
Innen 2	1,32	1,42	1,43	1,37	1,37	1,38
Innen 3	1,53	1,33	1,41	1,34	1,31	1,38
Innen 4	1,43	1,47	1,54	1,43	1,47	1,47
Mittelwert	1,42	1,44	1,48	1,42	1,41	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,20	3,27	3,25	3,23	3,23	3,24
Außen 2	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
Außen 3	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
Außen 4	3,23	3,24	3,06	3,10	3,18	3,16
Mittelwert	3,26	3,28	3,23	3,23	3,25	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,93	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,29	3,39	

Versuch	PEdyn1
Testreihe	dynamisch
Belastung:	100 kN
Dauer:	277,8 h
Lastwechsel:	1000000
Amplitude:	0,5 mm
Frequenz:	1 Hz
Kühlung:	Wasser + Luft
Prüfart:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,92	0,81	0,91	0,78	0,79	0,84
Innen 2	1,25	0,95	0,91	0,81	0,47	0,88
Innen 3	0,37	0,70	0,83	0,54	0,31	0,55
Innen 4	1,02	0,82	0,80	0,76	0,84	0,85
Mittelwert	0,89	0,82	0,86	0,72	0,60	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,00	2,80	2,73	2,78	3,08	2,88
Außen 2	2,80	2,80	2,82	2,82	2,90	2,83
Außen 3	2,90	2,58	2,56	2,70	2,88	2,72
Außen 4	3,14	2,80	2,69	2,69	2,65	2,79
Mittelwert	2,96	2,75	2,70	2,75	2,88	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,90	2,00	1,95
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,80	1,90	1,85
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,30	3,40	3,35
Außen 3	3,30	3,40	3,35
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,33	3,43	

Versuch PEdyn1

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	22,00	0,50	0,50
100	23,00	0,50	0,50
300	24,00	0,50	0,50
1000	26,00	0,45	0,45
1001	26,00	0,50	0,45
2400	27,00	0,45	0,40
2401	27,00	0,50	0,40
2500	28,00	0,50	0,40
3220	28,00	0,50	0,40
3770	29,00	0,50	0,40
7600	30,00	0,45	0,35
7601	30,00	0,50	0,35
11900	32,00	0,50	0,35
17050	32,00	0,46	0,31
17051	32,00	0,50	0,31
62400	32,00	0,46	0,27
62401	32,00	0,50	0,27
74600	34,00	0,50	0,27
91000	33,00	0,48	0,25
91001	33,00	0,50	0,25
111400	33,00	0,46	0,21
111401	33,00	0,50	0,21
150100	34,00	0,48	0,19
150101	34,00	0,50	0,19
320000	34,00	0,48	0,17
320001	34,00	0,50	0,17
400000	35,00	0,50	0,17
1000000	35,00	0,50	0,17

Versuch	PEdyn2
Testreihe	dynamisch
Belastung:	100 kN
Dauer:	555,6 h
Lastwechsel:	2000000
Amplitude:	0,5 mm
Frequenz:	1 Hz
Kühlung:	Wasser + Luft
Prüfort:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,71	0,22	0,62	0,76	0,39	0,54
Innen 2	0,26	0,25	0,19	0,13	0,65	0,30
Innen 3	0,63	0,41	0,82	0,83	0,60	0,66
Innen 4	0,69	0,50	0,67	0,72	0,67	0,65
Mittelwert	0,57	0,35	0,58	0,61	0,58	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,93	2,90	2,83	2,88	3,08	2,92
Außen 2	2,90	2,94	2,76	2,86	3,10	2,91
Außen 3	2,76	2,72	2,76	2,82	2,94	2,80
Außen 4	3,08	2,64	2,76	2,99	2,88	2,87
Mittelwert	2,92	2,80	2,78	2,89	3,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	2,05	2,15	2,10
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,95	2,05	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,25	3,35	

Versuch PEdyn2

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	22	0,52	0,52
500	23	0,48	0,48
501	23	0,50	0,48
1460	25	0,46	0,44
1461	25	0,51	0,44
5610	26	0,41	0,34
5611	26	0,52	0,34
84320	25	0,25	0,07
84321	25	0,50	0,07
109780	34	0,52	0,09
109781	34	0,50	0,09
252380	33	0,35	-0,06
252381	33	0,50	-0,06
535700	34	0,46	-0,10
535701	34	0,50	-0,10
683600	34	0,51	-0,09
772370	34	0,54	-0,06
772371	34	0,50	-0,06
860500	34	0,45	-0,11
860501	34	0,50	-0,11
1211050	33	0,50	-0,11
1289080	33	0,50	-0,11
1623070	34	0,50	-0,11
1823040	34	0,50	-0,11
2000000	33	0,50	-0,11

Versuch	PEdyn3
Testreihe	dynamisch
Belastung:	37,5 kN
Dauer:	277,8 h
Lastwechsel:	1000000
Amplitude:	0,5 mm
Frequenz:	1 Hz
Kühlung:	Wasser + Luft
Prüfort:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,61	1,62	1,63	1,57	1,57	1,60
Innen 2	1,41	1,48	1,40	1,27	1,29	1,37
Innen 3	1,54	1,49	1,62	1,57	1,57	1,56
Innen 4	1,62	1,57	1,55	1,51	1,60	1,57
Mittelwert	1,55	1,54	1,55	1,48	1,51	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,33	3,18	3,19	3,14	3,25	3,22
Außen 2	3,19	3,13	3,07	3,07	3,21	3,13
Außen 3	3,14	3,10	3,01	3,11	3,19	3,11
Außen 4	3,36	3,28	3,21	3,25	3,36	3,29
Mittelwert	3,26	3,17	3,12	3,14	3,25	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,75	1,85	1,80
Innen 3	1,90	2,00	1,95
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,88	1,98	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,20	3,30	3,25
Außen 3	3,20	3,30	3,25
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,25	3,35	

Versuch PEdyn3

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	24	0,50	0,50
1580	25	0,45	0,45
1581	25	0,50	0,45
2020	25	0,50	0,45
7700	26	0,45	0,40
7701	26	0,50	0,40
12440	26	0,49	0,39
31140	27	0,45	0,35
31141	27	0,50	0,35
80330	27	0,50	0,35
92500	27	0,50	0,35
99300	27	0,50	0,35
177800	27	0,48	0,33
177801	27	0,51	0,33
260000	27	0,50	0,32
321800	27	0,50	0,32
480000	27	0,50	0,32
612000	27	0,50	0,32
788700	27	0,50	0,32
1000000	27	0,50	0,32

Versuch	PEdyn4
Testreihe	dynamisch
Belastung:	100 kN
Dauer:	277,8 h
Lastwechsel:	1000000
Amplitude:	0,1 mm
Frequenz:	1 Hz
Kühlung:	Wasser + Luft
Prüfort:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,50	1,45	1,40	1,30	1,30	1,39
Innen 2	1,23	1,12	0,94	0,78	0,78	0,97
Innen 3	1,55	1,45	1,37	1,33	1,43	1,43
Innen 4	1,46	1,42	1,41	1,36	1,32	1,39
Mittelwert	1,44	1,36	1,28	1,19	1,21	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,16	3,08	2,97	2,99	3,02	3,04
Außen 2	3,05	3,02	2,99	3,02	3,04	3,02
Außen 3	2,99	2,97	2,88	2,91	2,93	2,94
Außen 4	3,23	3,09	3,11	2,92	3,03	3,08
Mittelwert	3,11	3,04	2,99	2,96	3,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	1,75	1,85	1,80
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch PEdyn4

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	21,00	0,10	0,10
430	21,00	0,08	0,08
431	21,00	0,10	0,08
4000	21,00	0,06	0,04
4001	21,00	0,10	0,04
26000	22,00	0,06	0,00
26001	22,00	0,11	0,00
81000	21,00	0,08	-0,03
81001	21,00	0,10	-0,03
96000	23,00	0,10	-0,03
154000	23,00	0,10	-0,03
211000	23,00	0,08	-0,05
211001	23,00	0,10	-0,05
280000	22,00	0,10	-0,05
560000	24,00	0,11	-0,04
560001	24,00	0,10	-0,04
660000	24,00	0,11	-0,03
660001	24,00	0,10	-0,03
700000	25,00	0,10	-0,03
710000	24,00	0,10	-0,03
780000	25,00	0,10	-0,03
960000	25,00	0,10	-0,03
1000000	25,00	0,10	-0,03

Versuch PEdyn5
 Testreihe dynamisch
 Belastung: 100 kN
 Dauer: 277,8 h
 Lastwechsel: 1000000
 Amplitude: 1,0 mm
 Frequenz: 1 Hz
 Kühlung: Wasser
 + Luft
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,56	0,64	0,63	0,74	0,25	0,56
Innen 2	0,63	0,48	0,52	0,37	0,30	0,46
Innen 3	0,50	0,58	0,54	0,40	0,36	0,48
Innen 4	0,59	0,84	0,83	0,90	1,00	0,83
Mittelwert	0,57	0,64	0,63	0,60	0,48	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,90	2,72	2,54	2,74	2,95	2,77
Außen 2	2,94	2,81	2,78	2,72	2,82	2,81
Außen 3	2,96	2,98	2,94	2,91	2,92	2,94
Außen 4	2,87	2,91	2,82	2,82	2,90	2,86
Mittelwert	2,92	2,86	2,77	2,80	2,90	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,80	1,90	1,85
Innen 3	2,00	2,10	2,05
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,93	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,30	3,40	3,35
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,30	3,40	3,35
Mittelwert	3,29	3,39	

Versuch PEdyn5

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	24	1,00	1,00
200	25	1,00	1,00
400	26	1,00	1,00
600	27	1,00	1,00
1800	29	0,90	0,90
1801	29	1,00	0,90
2770	30	0,95	0,85
2771	30	1,00	0,85
3660	25	0,96	0,81
3661	25	1,00	0,81
3900	28	1,00	0,81
4300	30	1,01	0,82
5000	31	1,01	0,82
8400	33	0,95	0,76
8401	33	1,00	0,76
11500	34	0,97	0,73
11501	34	1,00	0,73
16100	36	1,00	0,73
28700	37	0,96	0,69
28701	37	0,98	0,71
38600	38	0,95	0,68
74800	37	0,90	0,63
74801	37	1,00	0,63
76000	38	1,00	0,63
77000	39	1,00	0,63
82000	39	1,00	0,63
98500	39	1,02	0,65
98501	39	0,90	0,53
120000	37	0,90	0,53
120000	37	1,00	0,53
121000	38	1,00	0,53
122000	39	1,00	0,53
163000	39	0,98	0,51
170000	39	0,99	0,52
208000	39	0,97	0,50
252000	39	0,97	0,50
290000	39	0,97	0,50
404500	39	0,97	0,50
602000	39	0,98	0,51
703300	39	0,97	0,50
711000	39	0,99	0,52
800000	39	0,98	0,51
1000000	39	0,98	0,51

Versuch	PEdyn6
Testreihe	dynamisch
Belastung:	100 kN
Dauer:	0,28 h
Lastwechsel:	1000
Amplitude:	0,5 mm
Frequenz:	1 Hz
Kühlung:	Luft
Prüfort:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,47	1,40	1,48	1,49	1,42	1,45
Innen 2	1,45	1,46	1,38	1,36	1,44	1,42
Innen 3	1,66	1,56	1,52	1,45	1,46	1,53
Innen 4	1,52	1,50	1,47	1,46	1,45	1,48
Mittelwert	1,53	1,48	1,46	1,44	1,44	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,94	2,90	2,91	2,85	2,91	2,90
Außen 2	2,96	2,94	2,89	2,88	2,87	2,91
Außen 3	2,87	2,86	2,79	2,83	2,79	2,83
Außen 4	3,12	3,09	3,18	3,05	3,07	3,10
Mittelwert	2,97	2,95	2,94	2,90	2,91	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	2,10	2,20	2,15
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,90	2,00	1,95
Mittelwert	1,98	2,08	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,15	3,25	3,20
Außen 2	3,05	3,15	3,10
Außen 3	3,05	3,15	3,10
Außen 4	3,15	3,25	3,20
Mittelwert	3,10	3,20	

Versuch PEdyn6

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	Amplitude
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	22	0,50	0,50
50	22	0,50	0,50
100	23	0,50	0,50
200	24	0,50	0,50
300	24	0,50	0,50
500	24	0,48	0,48
700	25	0,46	0,46
701	25	0,50	0,46
850	26	0,50	0,46
1000	26	0,49	0,45

Versuch	PEdyn7
Testreihe	dynamisch
Belastung:	100 kN
Dauer:	2,78 h
Lastwechsel:	10000
Amplitude:	0,5 mm
Frequenz:	1 Hz
Kühlung:	Wasser
Prüfort:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,45	1,39	1,32	1,34	1,60	1,42
Innen 2	1,72	1,65	1,57	1,36	1,30	1,52
Innen 3	1,48	1,40	1,37	1,37	1,38	1,40
Innen 4	1,66	1,63	1,60	1,57	1,65	1,62
Mittelwert	1,58	1,52	1,47	1,41	1,48	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,12	3,09	3,02	3,05	3,18	3,09
Außen 2	3,13	3,05	3,05	3,05	3,07	3,07
Außen 3	3,11	3,07	3,02	3,08	3,02	3,06
Außen 4	3,25	3,15	3,14	3,16	3,24	3,19
Mittelwert	3,15	3,09	3,06	3,09	3,13	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	2,00	2,10	2,05
Innen 3	1,80	1,90	1,85
Innen 4	2,05	2,15	2,10
Mittelwert	1,96	2,06	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,30	3,40	3,35
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,29	3,39	

Versuch PEdyn7

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	22,00	0,52	0,52
300	22,00	0,50	0,50
890	23,00	0,48	0,48
891	23,00	0,50	0,48
1000	24,00	0,49	0,47
1700	24,00	0,49	0,47
2000	24,00	0,49	0,47
2440	25,00	0,48	0,46
2441	25,00	0,50	0,46
3140	26,00	0,50	0,46
4100	27,00	0,48	0,44
4101	27,00	0,50	0,44
4600	27,00	0,50	0,44
5100	28,00	0,49	0,43
5740	28,00	0,48	0,42
5741	28,00	0,50	0,42
6440	29,00	0,50	0,42
7000	29,00	0,50	0,42
7640	29,00	0,50	0,42
8400	30,00	0,49	0,41
9100	30,00	0,49	0,41
10000	30,00	0,49	0,41

Versuch	PEdyn8
Testreihe	dynamisch
Belastung:	100 kN
Dauer:	27,78 h
Lastwechsel:	100000
Amplitude:	0,5 mm
Frequenz:	1 Hz
Kühlung:	Wasser
Prüfort:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,42	1,40	1,35	1,43	1,47	1,41
Innen 2	1,41	1,52	1,13	1,03	0,88	1,19
Innen 3	1,20	1,24	1,12	1,15	1,04	1,15
Innen 4	1,23	1,33	1,27	1,14	1,21	1,24
Mittelwert	1,32	1,37	1,22	1,19	1,15	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,13	2,85	2,85	3,02	3,02	2,97
Außen 2	2,76	2,68	2,90	2,93	3,10	2,87
Außen 3	2,83	2,81	2,93	3,00	3,15	2,94
Außen 4	2,95	2,96	3,11	3,06	3,30	3,08
Mittelwert	2,92	2,83	2,95	3,00	3,14	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,85	1,95	1,90
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,93	2,03	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch PEdyn8

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	22,00	0,50	0,50
360	23,00	0,46	0,46
361	23,00	0,50	0,46
530	24,00	0,50	0,46
970	24,00	0,46	0,42
971	24,00	0,50	0,42
1520	25,00	0,50	0,42
2350	26,00	0,49	0,41
2610	26,00	0,48	0,40
2611	26,00	0,50	0,40
4300	26,00	0,48	0,38
4301	26,00	0,50	0,38
4850	27,00	0,50	0,38
11900	27,00	0,47	0,35
11901	27,00	0,50	0,35
12300	28,00	0,50	0,35
17400	29,00	0,46	0,31
17401	29,00	0,50	0,31
18030	30,00	0,50	0,31
20500	30,00	0,50	0,31
38700	30,00	0,45	0,26
38701	30,00	0,50	0,26
40500	31,00	0,50	0,26
94000	31,00	0,40	0,16
94001	31,00	0,50	0,16
98000	33,00	0,50	0,16
100000	33,00	0,50	0,16

Versuch PEdyn9
 Testreihe dynamisch
 Belastung: 75 kN
 Dauer: 277,78 h
 Lastwechsel: 1000000
 Amplitude: 0,5 mm
 Frequenz: 1 Hz
 Kühlung: Wasser
 Prüfort: Halle EG
 Bemerkungen: keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	0,93	1,12	1,36	1,30	1,43	1,23
Innen 2	1,27	0,52	0,35	0,62	0,57	0,67
Innen 3	1,25	0,95	0,95	1,02	0,82	1,00
Innen 4	1,26	1,03	0,95	0,96	0,80	1,00
Mittelwert	1,18	0,91	0,90	0,98	0,91	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	2,93	3,04	3,11	3,14	3,28	3,10
Außen 2	2,98	3,00	3,04	3,08	3,33	3,09
Außen 3	3,12	3,13	2,93	3,07	3,05	3,06
Außen 4	3,21	3,03	3,05	3,00	3,02	3,06
Mittelwert	3,06	3,05	3,03	3,07	3,17	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	2,00	2,10	2,05
Innen 2	1,75	1,85	1,80
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,91	2,01	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,35	3,45	3,40
Außen 2	3,25	3,35	3,30
Außen 3	3,25	3,35	3,30
Außen 4	3,35	3,45	3,40
Mittelwert	3,30	3,40	

Versuch PEdyn9

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
100	22	0,50	0,50
350	23	0,48	0,48
351	23	0,50	0,48
1160	24	0,43	0,41
1161	24	0,50	0,41
3060	26	0,43	0,34
3061	26	0,50	0,34
7980	28	0,45	0,29
7981	28	0,50	0,29
12050	28	0,50	0,29
14300	28	0,50	0,29
100250	28	0,41	0,20
100251	28	0,50	0,20
162822	31	0,49	0,19
249747	31	0,46	0,16
249748	31	0,50	0,16
258219	31	0,50	0,16
550300	32	0,50	0,16
595020	32	0,51	0,17
614680	31	0,51	0,17
777280	31	0,51	0,17
890553	32	0,51	0,17
950270	32	0,52	0,18
950271	32	0,50	0,18
1000000	32	0,50	0,18

Versuch	PEdyn10
Testreihe	dynamisch
Belastung:	37,5 kN
Dauer:	138,89 h
Lastwechsel:	1000000
Amplitude:	0,5 mm
Frequenz:	2 Hz
Kühlung:	Wasser
Prüfört:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,49	1,35	1,36	1,36	1,28	1,37
Innen 2	1,71	1,43	1,64	1,42	1,70	1,58
Innen 3	1,69	1,43	1,49	1,50	1,38	1,50
Innen 4	1,51	1,43	1,55	1,52	1,29	1,46
Mittelwert	1,60	1,41	1,51	1,45	1,41	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,10	3,06	3,12	3,10	3,12	3,10
Außen 2	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
Außen 3	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
Außen 4	3,12	3,02	3,10	3,13	3,10	3,09
Mittelwert	3,11	3,07	3,11	3,11	3,11	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,85	1,95	1,90
Innen 2	2,05	2,15	2,10
Innen 3	1,95	2,05	2,00
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,95	2,05	2,00

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,15	3,25	3,20
Außen 2	3,05	3,15	3,10
Außen 3	3,05	3,15	3,10
Außen 4	3,15	3,25	3,20
Mittelwert	3,10	3,20	3,15

Versuch PEdyn10

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	24	0,50	0,50
11600	26	0,45	0,45
11601	26	0,50	0,45
16000	27	0,48	0,43
21500	27	0,45	0,40
21501	27	0,50	0,40
27620	29	0,50	0,40
197480	29	0,45	0,35
197481	29	0,50	0,35
337880	30	0,50	0,35
506000	30	0,50	0,35
560000	30	0,50	0,35
654800	31	0,50	0,35
714100	31	0,50	0,35
854000	31	0,49	0,34
1000000	31	0,49	0,34

Versuch	PEdyn11
Testreihe	dynamisch
Belastung:	37,5 kN
Dauer:	92,59 h
Lastwechsel:	1000000
Amplitude:	0,5 mm
Frequenz:	3 Hz
Kühlung:	Wasser
Prüfort:	Halle EG
Bemerkungen:	keine

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Innen 1	1,60	1,51	1,64	1,50	1,57	1,56
Innen 2	1,72	1,42	1,62	1,53	1,74	1,61
Innen 3	1,35	1,38	1,32	1,36	1,46	1,37
Innen 4	1,61	1,46	1,48	1,58	1,46	1,52
Mittelwert	1,57	1,44	1,52	1,49	1,56	

Restwanddicke absolut	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5	Mittelwert
Außen 1	3,12	3,08	3,09	3,13	3,10	3,10
Außen 2	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
Außen 3	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
Außen 4	3,16	3,12	3,08	3,07	3,10	3,11
Mittelwert	3,12	3,10	3,09	3,10	3,10	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Innen 1	1,95	2,05	2,00
Innen 2	1,95	2,05	2,00
Innen 3	1,75	1,85	1,80
Innen 4	1,95	2,05	2,00
Mittelwert	1,90	2,00	

Ausgangswanddicke absolut	geringster Wert	maximaler Wert	Mittelwert
Außen 1	3,15	3,25	3,20
Außen 2	3,05	3,15	3,10
Außen 3	3,05	3,15	3,10
Außen 4	3,15	3,25	3,20
Mittelwert	3,10	3,20	

Versuch PEdyn11

Versuchsverlauf:

Lastwechsel	Temperatur	Amplitude	
		nachgeregelt	nicht nachgeregelt
0	21	0,50	0,50
15850	28	0,45	0,45
15851	28	0,50	0,45
42700	30	0,46	0,41
42701	30	0,50	0,41
66300	31	0,50	0,41
226110	32	0,46	0,37
226111	32	0,50	0,37
264900	32	0,50	0,37
284020	33	0,50	0,37
305840	33	0,47	0,34
580570	33	0,50	0,34
580571	33	0,49	0,33
960000	33	0,49	0,33
1000000	33	0,49	0,33