

## HVG-Mitteilung Nr. 2045

### Polarisationsoptische Bestimmung des Spannungszustandes in rotationssymmetrischen Glaskörpern

A. Witzmann, Schott-Rohr Glas GmbH, Mitterteich

Vortrag auf der DGG Jahrestagung am 28. Mai 2003 in Leipzig

Die Festigkeit von Glasprodukten wird entscheidend durch den mechanischen Spannungszustand des Glases bestimmt. Durch die definierte Erzeugung von geeigneten Spannungsverhältnissen kann die Festigkeit nach den jeweiligen Erfordernissen gezielt eingestellt werden (üblicherweise: Erhöhung der Festigkeit aber auch lokale Schwächung zur Erzeugung von Sollbruchstellen). Für die Analyse der Spannungszustände und die Überwachung der Produktqualität nehmen polarisationsoptische Verfahren unter Ausnutzung der photoelastischen Eigenschaften des Glases eine zentrale Rolle ein. Die Rekonstruktion des Spannungszustandes erfordert jedoch im allgemeinen Fall die Anwendung von Methoden der optischen Tensorfeld-Tomografie. Da für die Berechnung der 6 Komponenten des Spannungstensors in konventionellen Polarimetern nur zwei Messparameter (optische Verzögerung und Azimutwinkel) gemessen werden, ist eine Lösung des Problems nur für Spezialfälle möglich. Die Einschränkung der tomografischen Methode auf rotationssymmetrische Modelle ermöglicht jedoch Vereinfachungen, welche unter der Einbeziehung der elastischen Eigenschaften des Gegenstandes für eine Vielzahl von Problemen die Berechnung des Spannungsfeldes von Glaskörpern mit Restspannungen (Vorspannung) bzw. unter externer Last ermöglichen. Die Anwendung dieser Verfahren ermöglicht bereits mit geringem Aufwand eine gegenüber der verbreiteten axialen Durchstrahlung deutlich erhöhte Aussagekraft bezüglich der im Glaskörper vorliegenden Spannungsverhältnisse.

Für die verwendeten polarisationsoptischen Messungen nach der Methode der „integralen Photoelastizität“ wird der Gegenstand in Ebenen senkrecht zur Rotationsachse (z-Achse) durchstrahlt, um die optische Phasenverzögerung  $\Delta$  und den Azimutwinkel der Hauptachsen  $\varphi$  zu messen. Die Ein- und Auskopplung der Messstrahlen erfolgt über einen Tank mit angepasster Immersionslösung, um den Einfluss der Brechung (und auch die Änderung des Polarisationszustandes) an den optischen Grenzflächen auszuschließen. Für den Zusammenhang zwischen den polarisationsoptischen Messgrößen und dem Spannungstensorfeld ergeben sich die folgenden integralen Gleichungen:

$$\Delta \cos (2 \varphi) = C \int (\sigma_x - \sigma_z) \, dy \quad (1)$$

$$\Delta \sin (2 \varphi) = 2 C \int \tau_{xz} \, dy \quad (2)$$

mit  $C$  – spannungsoptische Konstante,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  und  $\tau_{xz}$  – Komponenten des Spannungstensors.

Unter Zuhilfenahme der Gleichgewichtsbedingungen für Ebenen senkrecht zur Zylinderachse ohne Oberflächenkräfte ergibt sich für axialsymmetrische Spannungsfelder ohne Spannungsgradient in axialer Richtung folgender Zusammenhang zwischen dem radialen Profil der axialen Spannung  $\sigma_z$  und der optischen Verzögerung  $\Delta(x)$  für Stahlgänge parallel zur y-Achse im Abstand  $x$  [1]:

$$\Delta(x) = 2C \int_x^R \frac{\sigma_z r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr \quad (3)$$

Die drei wesentlichen radialen Spannungsprofile (konstante Spannung, linearer und parabolischer Spannungsverlauf) sind damit durch typische Verläufe der optischen Verzögerung  $\Delta(x)$ , die in Bild 2 dargestellt sind, charakterisiert.

Die konstante Spannung (Membranspannung) ist, auf Grund der wachsenden, durchstrahlten Glasdicke, durch eine kontinuierliche Zunahme der optischen Verzögerung gekennzeichnet. Der lineare Spannungsverlauf (z. B. einseitige Vorspannung) führt zu einer Umkehr des Vorzeichens der Verzögerung bei ca. 75% der relativen Wanddicke und der parabolische Spannungsverlauf (z.B. beidseitige Vorspannung) weist zwei Vorzeichenwechsel auf. Damit kann der prinzipielle Spannungszustand bei Dominanz eines Spannungszustandes bereits mit visueller Beobachtung klassifiziert werden. Vorteilhaft ist dabei die Verwendung polychromatischen Lichts, die eine eindeutige Zuordnung der Nulldurchgänge der Phasenverzögerung zulässt. Die Phasen der Berechnung des Spannungsprofils nach Aufnahme der Intensitätsverteilung mit einem Bildverarbeitungssystem sind in Bild 3 dargestellt. Untersucht wurde ein Duran<sup>®</sup>-Rohr mit einem Außendurchmesser von 120 mm und einer Wanddicke von 9 mm, das durch Erhitzung und anschließendes Abschrecken im Ölbad thermisch vorgespannt wurde. Im Intensitätsprofil sind deutlich die zwei Zonen der Richtungsumkehr der Verzögerung  $\Delta$  zu identifizieren. Durch eine Messung bei anderer Wellenlänge (kontinuierlich: Weißlicht oder diskret: z.B. LED-Beleuchtung verschiedener Wellenlängen) werden zusätzlich die Nulldurchgänge der Verzögerung identifiziert. Mit diesen Informationen erfolgt eine Zuordnung der Ordnung der Isoklinen und die Berechnung der absoluten Verzögerungen (Messpunkte in Abb. 3b). Als durchgezogene Linie ist der Fit der experimentellen Werte durch eine Superposition der Verzögerungen der oben angegebenen Grundspannungsprofile eingezeichnet. Das zugehörige Spannungsprofil ist, wie zu erwarten, parabolisch weist jedoch eine geringe Asymmetrie auf (siehe Bild 4).

Für eine Serie vorgespannter Rohre mit Wanddicken von 3, 5, 7, und 9 mm wurden die in Bild 4 dargestellten Profile der axialen Zugspannung gemessen. Für alle Wanddicken wurde eine axiale Druckspannung  $> 80$  MPa im Oberflächenbereich realisiert. Die leichte Asymmetrie im Profil ist durch Unterschiede im Kühlprozess zwischen Außen- und Innenwand des Rohres verursacht.

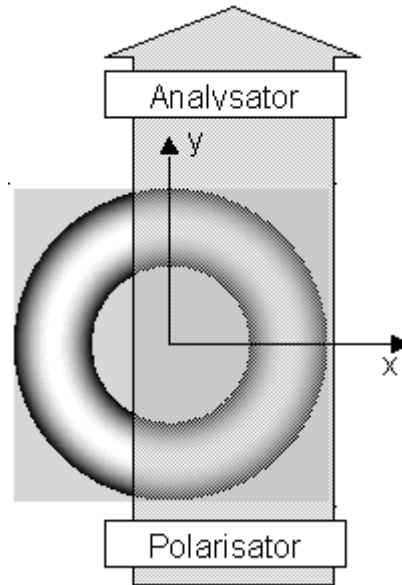


Bild 1: Schematische Darstellung der Messung eines Hohlzylinders im Immersionsbad (Draufsicht).

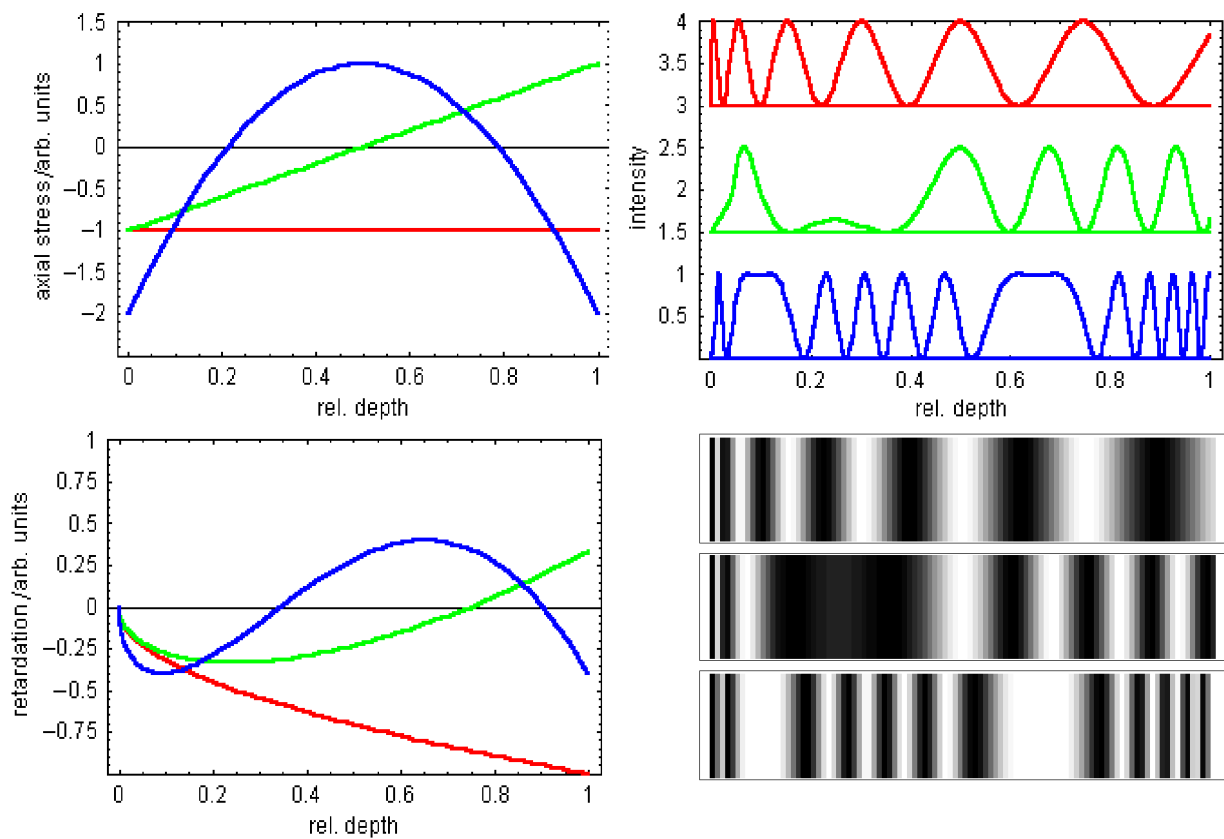


Bild 2: Typische Spannungsprofile in Hohlzylindern und die dazugehörigen Profile der optischen Verzögerung (links) dargestellt über der relativen Wanddickenposition (0 – Rohroberfläche, 1 – Rohrinne). Auf den rechten beiden Bildern sind die prinzipiellen Profile der Intensität dargestellt, die sich bei der Messung in einem linearen Dunkelfeldpolarimeter ergeben.

Die Anwendung der Methode zur Untersuchung des Einspannbereiches eines axial vorgespannten Rohres (Außendurchmesser = 70 mm, Wanddicke = 4.9 mm), das z.B. als Tragsäule im Architekturbereich verwendet wird, ist in Bild 5 dargestellt. Die für die Untersuchung präparierten, ca. 500 mm langen Rohrstücke wurden mechanisch in axialer Richtung definiert auf einen Druck von 5.5, 10 und 15 MPa vorgespannt. Im oberen Darstellungsbereich hat sich nahezu das Spannungsfeld eines langen Zylinders mit einer Hauptachsenlage parallel zur Zylinderachse ausgebildet. Das Spannungsprofil in diesem Bereich kann durch die Überlagerung der axialen Druckspannung und einer parabolischen Spannungskomponente beschrieben werden (siehe Bild 6). Im Einspannbereich treten zusätzliche Scherkräfte durch die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften von Glasrohr und Unterlage auf, die für die Tragfähigkeit des Glasrohrs von entscheidender Bedeutung sind [2]. Diese bewirken in einer ca. 5 mm breiten Randzone zur Unterlage eine starke Variation der Hauptachsenrichtung des Spannungstensors. Die Berechnung der Spannungsverteilung in diesem Bereich ist zwar theoretisch möglich [3], erscheint jedoch messtechnisch nicht praktikabel. Durch den Vergleich der polarisationsoptischen Messwerte mit synthetischen Kurven aus Finite-Element-Rechnungen können jedoch auch in diesem Fall charakteristische Spannungszustände identifiziert und Schlussfolgerungen für die Optimierung der Krafterleitung gezogen werden.

Die Spannungsanalyse im mittleren Rohrbereich (Bild 6) ergibt eine gute Korrelation zwischen den mechanischen Vorspannwerten und den gemessenen, mittleren Spannungen. Das Ausgangsrohr weist ein lineares Spannungsprofil mit einer leichten Druckspannung an der Rohraußenseite auf, die durch die Abkühlbedingungen im Herstellungsprozess verursacht wurde. Bei den mechanisch vorgespannten Rohren ist ein überlagerter, parabolischer Spannungsverlauf zu beobachten. Ursachen dafür sind sowohl der Einfluss des Spannungsfeldes an der Auflagefläche (auf Grund der Geometrie des Immersionsbades konnte der Messort nicht weiter von der Auflagefläche verlegt werden) als auch Inhomogenitäten der Spannungen an der Auflagefläche.

Am Beispiel thermisch und mechanisch vorgespannter Rohre wurde die Aussagekraft der Messung des axialen Spannungsprofils rotationssymmetrischer Körper ohne axialen Spannungsgradienten dargestellt. Das Verfahren ermöglicht über die Messung der axialen Spannung wesentliche Aussagen zur Spannungsverteilung im Körper. Unter Zuhilfenahme weiterer Annahmen wie z.B. Gleichgewichts- und Kompatibilitätsbedingungen können auch Schlussfolgerungen auf die weiteren Hauptspannungskomponenten gezogen werden. In den vorgestellten Beispielen (Wanddicke  $\ll$  Außendurchmesser) ist z.B. die radiale Spannungskomponente wesentlich geringer als die axiale. Ein wesentlicher Vorteil der Methode ist die zerstörungsfreie in situ Prüfung, die lediglich durch die Einschränkungen bezüglich der Anwendung der Immersion limitiert ist. Insbesondere ist mit diesem Verfahren die Überprüfung montierter Tragsäulen, bei Zugänglichkeit sogar im eingebauten Zustand, möglich.

- [1] Aben, H., Guillemet, C. Photoelasticity of Glass, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.
- [2] Doenitz, F.-D., Jung, H., Verbundglasrohr als konstruktives Element im Bauwesen, Tagung der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft, Leipzig (2003).
- [3] Andrienko, Yu. A., et al., J. Opt. Soc. Am. A 9 (1992)1765-1768.

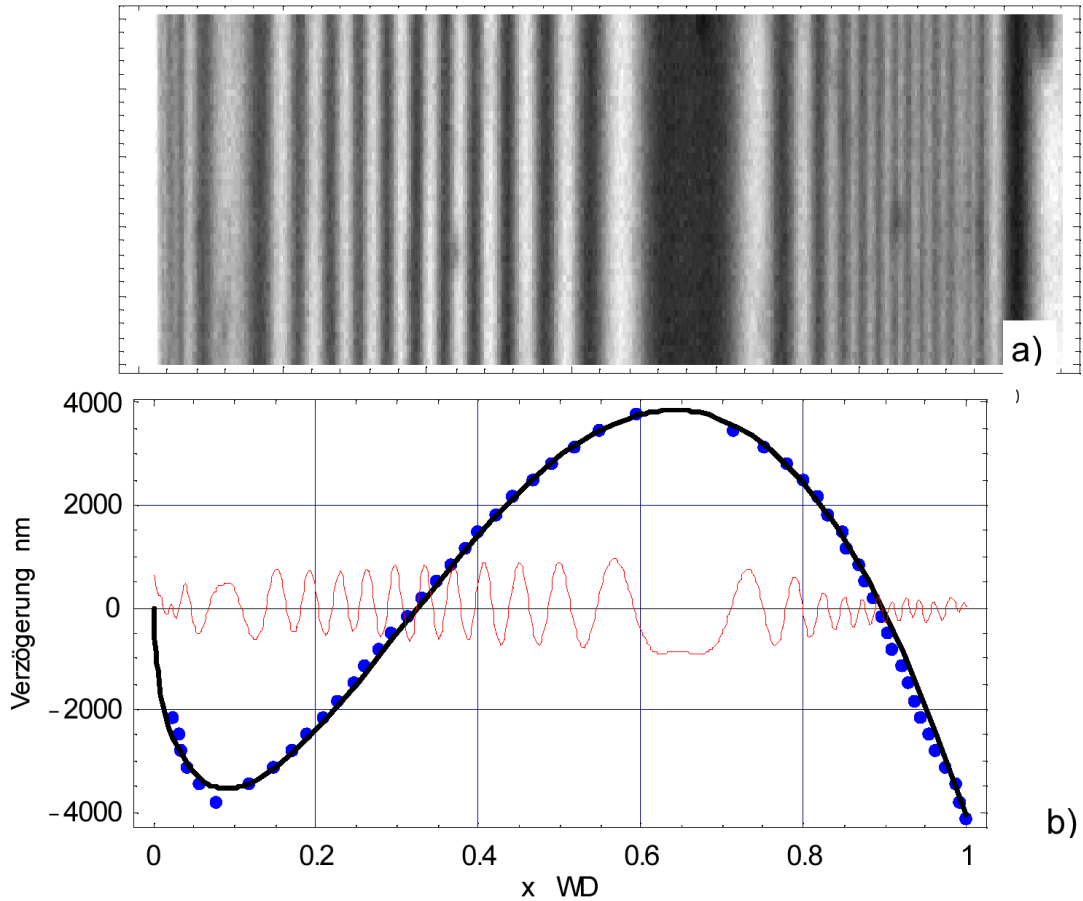


Bild 3: Dunkelfeldpolarimetrische Aufnahme eines vorgespannten Rohres (Außendurchmesser 120 mm, Wanddicke 9 mm), a) Intensitätsverteilung des Wandbereiches (50 x 640 Pixel), b) digitalisiertes Intensitätsprofil mit dem rekonstruierten Profil der optischen Verzögerungen (Punkte) und dem Profil der optischen Verzögerung, das durch den Fit der experimentellen Daten an die oben angegebenen Spannungsprofile berechnet wurde.

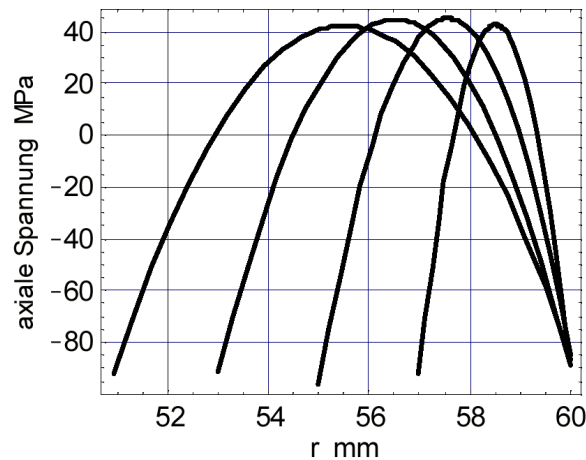


Bild 4: Berechnete radiale Profile der axialen Spannung aus Messungen an vorgespannten Rohren (Außendurchmesser = 120 mm) mit Wanddicken von 9, 7, 5 und 3 mm (von links nach rechts).

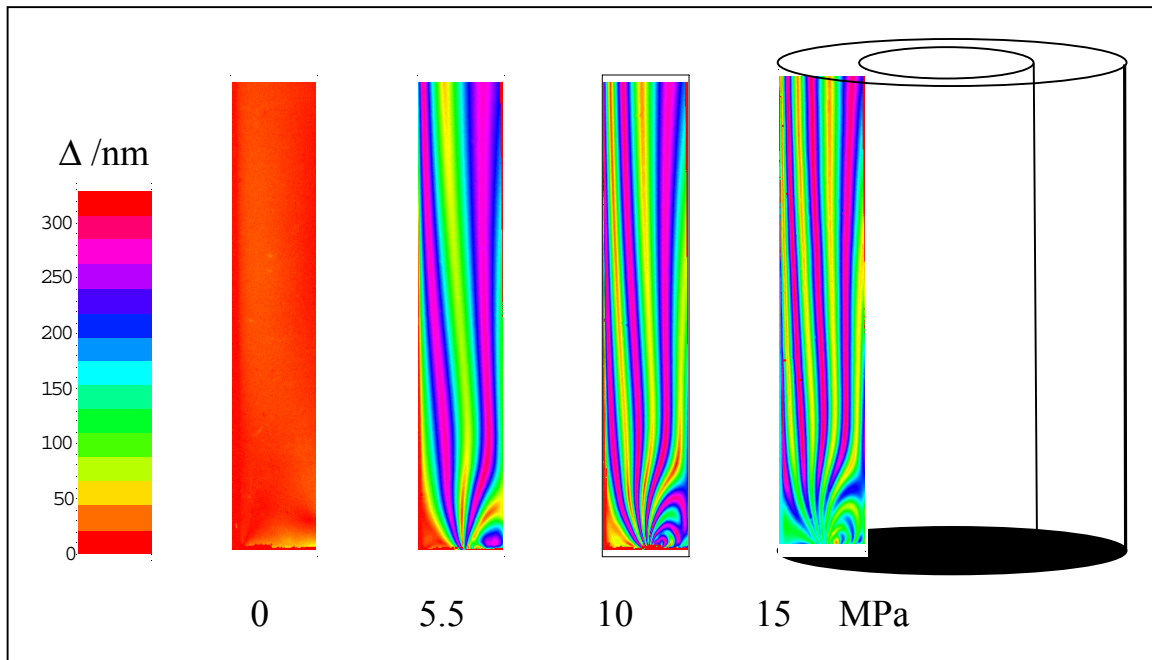


Bild 5: Messung der optischen Verzögerung  $\Delta$  im Einspannbereich eines axial mit 0, 5.5, 10 und 15 MPa vorgespannten Duran<sup>®</sup>-Glasrohrs (Außendurchmesser = 70 mm, Wanddicke = 4,9 mm). Im Bereich der Auflagefläche (im Bild unten) treten erhebliche Spannungsgradienten in axialer Richtung auf.

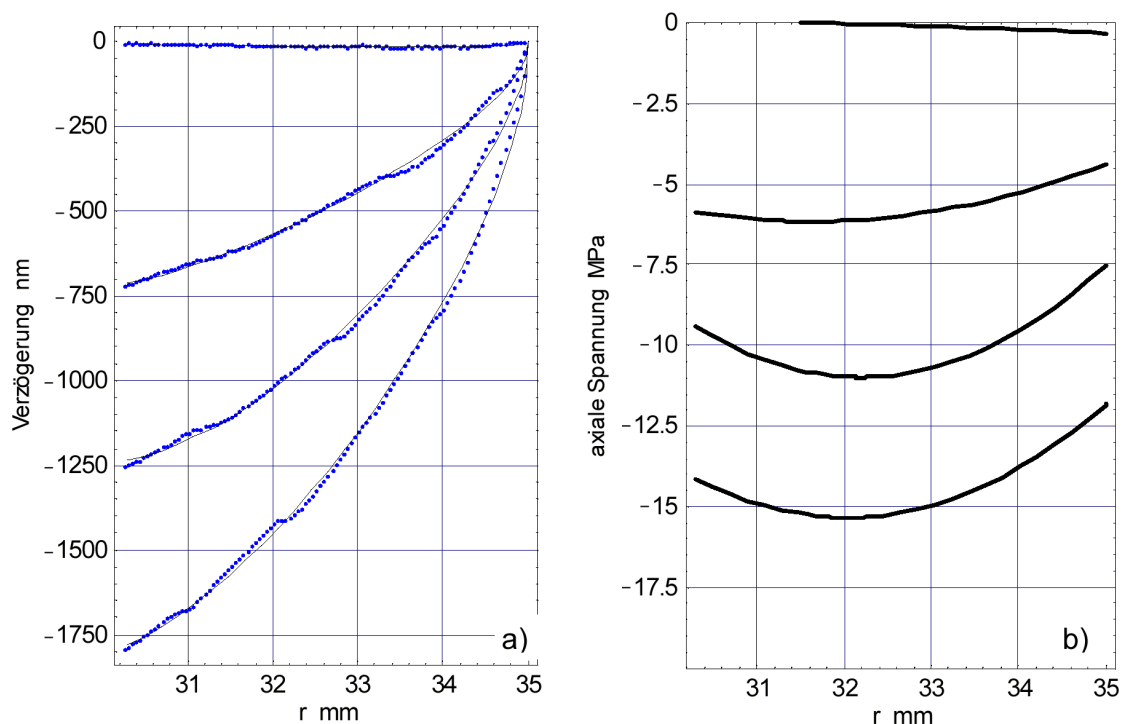


Bild 6: Berechnung der Spannung des Ausgangsrohrs und von mechanisch mit 5.5, 10 und 15 MPa axial vorgespannten Rohren (b) durch einen Fit der optischen Verzögerungen  $\Delta$  als Superposition der Grundspannungen (a).