

Bild 1: Aufbau aramidbewehrter Kunststoffrohre

Fig. 1: Structure of reinforced thermoplastic pipes

Aramidbewehrte Kunststoffrohre

Stand der Entwicklungen bei der Einführung des Systems für den Einsatz im Gashochdruckbereich in Deutschland

Reinforced thermoplastic pipes

Development status in introduction of the system for use in the high-pressure gas field in Germany

Aramidbewehrte Kunststoffrohre werden bereits seit einigen Jahren mit großem Erfolg als Hochdruckleitungen für Wasser, Rohöl, Sauer gas und aggressive Medien eingesetzt. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass auch der Einsatz im Gashochdruckbereich möglich ist, wobei ein Qualitäts- und Sicherheitsniveau erreicht wird, das dem von Rohren aus Stahl entspricht. Es werden Ergebnisse von durchgeführten Untersuchungen aufgezeigt, die das Qualitäts- und Sicherheitsniveau von aramidbewehrten Kunststoffrohren für den Gashochdruckbereich nachweisen. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse läuft zurzeit das Verfahren einer allgemeinen Zulassung für den Gashochdruckbereich in Deutschland.

Aramide-reinforced plastic pipes have now been in highly successful use as high-pressure lines for water, crude oil, sour gas and aggressive fluids for a number of years. Tests performed up to now have indicated that they are also suitable for use in the high-pressure gas sector, with the achievement of quality and safety levels equal to those of steel. The results of completed tests which confirm the quality and safety standards of aramide-reinforced pipes for the high-pressure gas sector are discussed in this article. The general approval procedure for use with high-pressure gas is now in progress in Germany on the basis of these results.



Dipl.-Ing. Helmut Lührsens

Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Leipzig
Tel. (0341) 21737-6

Entwicklung und Aufbau aramidbewehrter Kunststoffrohre

Kunststoffrohre werden bereits seit Jahrzehnten erfolgreich im Rohrleitungsbau eingesetzt. Aufgrund der im Vergleich zu Stahlrohren geringeren Festigkeit des Werkstoffes blieben jedoch die Anwendungsmöglichkeiten bezüglich aufnehmbarer Innendruckbeanspruchungen bisher begrenzt. Durch die ständige Weiterentwicklung der Werkstoffeigenschaften können beispielsweise PE-Rohre in der Gasversorgung nunmehr bis zu Drücken von 10 bar eingesetzt werden. Um Kunststoffrohre auch in höheren Druckstufen einsetzen zu können, wurden faserverstärkte Kunststoffrohre entwickelt. Neben den glasfaserverstärkten Kunststoffrohren, die insbesondere im Bereich von Chemieanlagen, in denen aggressive Medien zu transportieren sind, eingesetzt werden, sind seit einigen Jahren auch aramidfaserbewehrte Kunststoffrohre für den Gas- und Rohöltransport im Einsatz. Der Einsatz von aramidfaserbewehrten Kunststoffrohren beispielsweise für den Rohöltransport resultiert aus der hervorragenden chemischen Beständigkeit der verwendeten Werkstoffe gegenüber den zu transportierenden Medien.

Die aramidbewehrten Kunststoffrohre werden auch als RTP (Reinforced Thermoplastic Pipes) bezeichnet. Diese Kunststoffrohre bestehen im Prinzip aus drei unterschiedlichen Schichten. Als innere Schicht wird ein herkömmliches PE-Rohr verwendet, auf das kreuzweise Aramidfaserlagen gewickelt werden. Die Aramidfaserlagen werden anschließend mit einer äußeren Schutzschicht aus PE bedeckt (Bild 1).

Jede der einzelnen Schichten des aramidbewehrten Kunststoffrohres hat eine Funktion. Das innere PE-Rohr ist für den Medientransport, als Tragschicht für die Aramidfasern und zur Aussteifung des Rohres gegen äußere Beanspruchungen wie z. B. Erd- oder Verkehrslasten vorgesehen. Die Aramidfasern sind bezüglich der Innendruckbeanspruchung das tragende Element der bewehrten Kunststoffrohre. Die Aramidfasern werden in mehreren Lagen wechselweise auf das innere PE-Rohr gewickelt. Der Wickelwinkel der einzelnen Aramidfaserlagen beträgt in Richtung der Rohrachse bei Innendruckbeanspruchten Rohren $\pm 55^\circ$. Die Anzahl der Aramidfasern bestimmt den aufnehmbaren Innendruck. Auf den Aramidfasern befindet sich eine äußere Schutzschicht aus PE. Für weitere Details wird auf die vorhergehenden Veröffentlichungen [1, 2, 3] verwiesen.

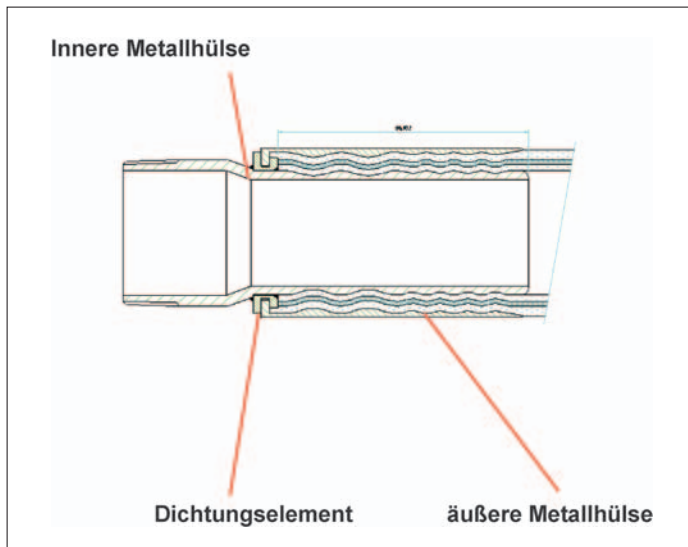


Bild 2: Quetschverbindung

Fig. 2: Pressure joint

Eigenschaften aramidbewehrter Kunststoffrohre

Die Aramidfasern zeichnen sich wie die Glas- und Kohlefasern durch besondere Festigkeitseigenschaften aus. So beträgt die Zugfestigkeit von Aramidfasern z. B. rund 2700 N/mm^2 . Zudem haben Aramidfasern, wie andere Kunststoffe auch, eine besonders hohe Beständigkeit gegen organische Substanzen, wie z. B. Benzin und verschiedene Öle. Gase wie CO_2 oder CH_4 beeinflussen die Festigkeit der Aramidfasern nicht.

Aramidbewehrte Kunststoffrohre werden in Nennweiten bis 150 mm als Rollbunde mit Längen von bis zu 700 m produziert. Für größere Nennweiten werden Einzelrohre in Längen von 12 bis 24 m produziert, da der Durchmesser der Transportrollen für den Transport im Straßenverkehr auf 4 m begrenzt ist. Derzeit werden aramidbewehrte Kunststoffrohre vorwiegend in Nennweiten bis DN 150 eingesetzt. Bei diesen Nennweiten sind Innendrucke bis zu 140 bar möglich.

Die Verbindung der einzelnen Rohrschnitte zum Rohrstrang erfolgt je nach Rohrersteller als Schweiß- oder Quetschverbindung. Bei der Quetschverbindung werden eine innere und eine äußere Metallhülse auf das Rohrende des aramidbewehrten Kunststoffrohres geschoben und dann plastisch so verformt, dass das Kunststoffrohr kraftschlüssig mit den Hülsen verbunden wird (**Bild 2**). Eine entsprechende Formgebung der Rohrhülse unterstützt den Kraftfluss. Das andere Ende der Rohrhülse wird so ausgebildet, dass ein herkömmlicher Flansch angeschweißt werden kann.

Bild 3 zeigt eine Schweißverbindung für aramidbewehrte Kunststoffrohre. Bei dieser Verbindungsart wird zunächst das innen liegende PE-Rohr mittels einer herkömmlichen

Spiegelschweißung verbunden. Anschließend wird eine zuvor aufgeschobene bewehrte Schweißmuffe im Bereich der Spiegelschweißung aufgebracht und mit der äußeren PE-Schicht des aramidbewehrten Kunststoffrohres verschweißt. Da im Bereich der Rohrverbindung die Aramidfasern unterbrochen sind, ist die bewehrte Aufschweißmuffe für die Aufnahme der Beanspruchungen zuständig.

Besondere Anforderungen beim Einsatz als Gashochdruckleitung

Permeation

Beim Transport von Erdgas im aramidbewehrten Kunststoffrohr kommt es, wie bei herkömmlichen PE-Rohren auch, zu einer Permeation des Gases durch die Rohrwand. Die Permeation des Gases führt beim Transport von trockenem Erdgas jedoch nicht zu einer Änderung der Festigkeitseigenschaften der Kunststoffrohre und ist somit aus statischer Sicht nicht relevant. Bei den aramidbe-

weherten Kunststoffrohren kommt es jedoch aufgrund des mehrschichtigen Aufbaus zunächst im Bereich der Aramidfasern zu einer Ansammlung des permeierten Gases und somit zu einem Druckaufbau. Bei einem ausreichend hohen Innendruck würde es zu einer Ablösung der äußeren Schutzschicht des aramidbewehrten Kunststoffrohres, dem sogenannten Cover-blow-off, kommen. Durch das Ablösen der äußeren Schicht des PE-Rohres beim Cover-blow-off kommt es jedoch nicht zu einem Versagen des Tragwerkes, sondern die äußere Schutzschicht des aramidbewehrten Kunststoffrohres wird lediglich örtlich beschädigt. Um diesen Effekt zu vermeiden, werden von den verschiedenen Rohrherstellern unterschiedliche Varianten wie z. B. das Perforieren der äußeren Schutzschicht oder das Anordnen einer Zwangsentlüftung für die Faserschicht im Bereich der Rohrverbindungen vorgenommen. Ist eine Perforation der Außenschicht oder eine Zwangsentlüftung für die Aramidfaserlagen nicht vorhanden, so ist zur Vermeidung von Cover-Blow-Off der Innendruck zu reduzieren. Dies führt beispielsweise bei einem aramidbewehrten Kunststoffrohr DN 100 zu einem Innendruck in der Größenordnung von 40 bar. Mit einer Perforation der Außenschicht oder einer Zwangsentlüftung der Aramidfaserlagen wäre in diesem Fall ein Innendruck in der Größenordnung von 70 bar möglich. Durch das Einbringen von dünnen Metallfolien in die innere Schicht kann eine Permeation des Gases durch die Rohrwand vollständig unterbunden werden. Zurzeit werden die ersten Versuche an RTP mit Metallfolien durchgeführt.

Verlegetechniken

Für die Verlegung aramidbewehrter Kunststoffrohre lässt sich feststellen, dass diese aufgrund ihres geringen Gewichtes im Vergleich zu Stahlrohren und der wesentlich geringeren Biegesteifigkeit ohne den Einsatz aufwändiger Verlegetechnologien (z. B. Seitenbäume) verlegt werden können. Die Ver-

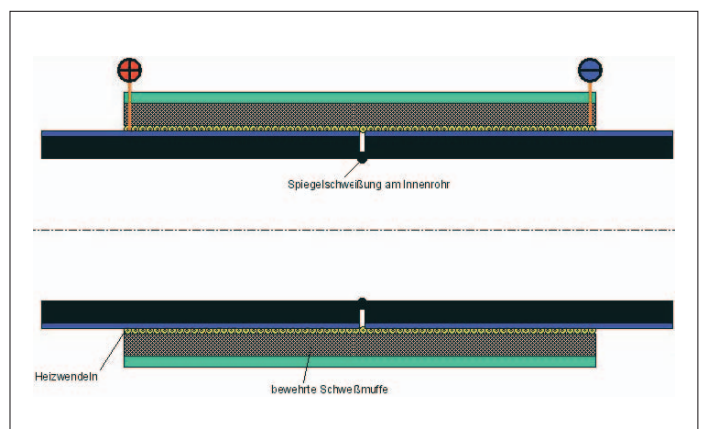


Bild 3: Schweißverbindung

Fig. 3: Welded joint

legung im Rohrgraben kann in den üblichen Arbeitsschritten Aushub des Grabens, Auslegen des Rohres, Verbinden der Rohrschüsse und Absenken der Leitung ohne Großgeräte mit anschließender Grabenverfüllung erfolgen. Neben der klassischen Rohrverlegung im offenen Graben können diese Rohre jedoch auch unter Einsatz moderner Verlegetechnologien wie z. B. durch Fräsen oder Pflügen (**Bild 4**) eingebaut werden. Die Kreuzung von Verkehrswegen kann mit Einsatz des HDD-Verfahrens realisiert werden. Der Anschluss an weiterführende Anlagenteile erfolgt über die vorhandenen Verbindungselemente, die an den Enden mit herkömmlichen Flanschen oder Anschweißenden versehen werden. Aufgrund der temperaturabhängigen Festigkeitseigenschaften des Werkstoffes sind jedoch bei elastischer Verlegung die einsetztemperaturabhängigen Mindestbiegeradien zu berücksichtigen. Hieraus resultiert, wie bei den herkömmlichen PE-Rohren, dass eine Verlegung bei Temperaturen oberhalb von 0 °C stattfinden sollte. Die Verlegevorschriften für herkömmliche PE-Rohre können für aramidbewehrte Kunststoffrohre singgemäß angewandt werden.

Druckprüfung nach der Verlegung

Für die Durchführung der Druckprüfung nach der Verlegung von aramidbewehrten Kunststoffrohren sind durch die Hersteller Verfahrensanweisungen vorgegeben. Bei der Druckprüfung wird das aramidbewehrte Kunststoffrohr zunächst in kurzer Zeit auf den Prüfdruck (ca. $1,4 \cdot PN$) gebracht. Anschließend erfolgt eine Haltephase. Nach der Haltephase erfolgt eine Druckabsenkung auf den Nenndruck und anschließend wiederum eine erneute Haltephase. Aufgrund der Festigkeitseigenschaften der Aramidfasern kommt es dann zu einer Kontraktion des Rohres, die zu einem geringfügigen Ansteigen des Innendruckes führt. Über diese Druckprüfung lässt sich die Integrität des eingebauten aramidbewehrten Kunststoffrohres nachweisen. Aufgrund der zeit-, temperatur- und belastungsabhängigen Festigkeitseigenschaften von Kunststoffen ist eine dem Stresstest bei Stahlrohren vergleichbare Prüfung nicht möglich. Der Prüfdruck bei RTP liegt ca. 40 % über dem Nenndruck der Leitung und entspricht dem für den Zeitstandinnendruckversuch erforderlichen Prüfdruck für eine Standzeit von 50 Jahren.

Weitere Anforderungen

Da der Einsatz aramidbewehrter Kunststoffrohre im Gashochdruckbereich geplant ist, wurden durch die Rohrhersteller weitere Versuche, die die spezifischen Beanspruchungen beim Einsatz im Gashochdruckbereich widerspiegeln, durchgeführt. Durchgeführt wurden beispielsweise Versuche zum

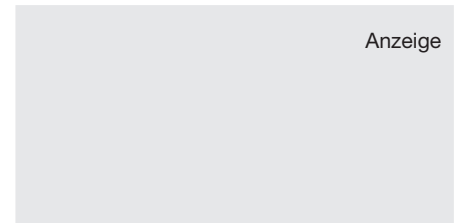
schnellen Risswachstum, zur Kondensatbeständigkeit und zu Längsbeanspruchungen. Die Versuche zur Untersuchung des schnellen Risswachstums zeigten, dass ein schnelles Risswachstum bei RTP durch die tragenden Aramidfasern praktisch nicht möglich ist. Bei herkömmlichen PE-Rohren ist das schnelle Risswachstum hingegen bei der Bemessung mit einem entsprechenden Sicherheitsbeiwert zu berücksichtigen [4].

Probabilistische Untersuchungen zum Vergleich von Stahl und RTP

Über die Grundlagen einer probabilistischen Berechnung und das Aufstellen von Fehlerbäumen wurde bereits in [2] berichtet. In dieser Veröffentlichung wurde auch das Thema "Sicherheit bei Kunststoffrohren" umfassend diskutiert. Im Folgenden sollen wesentliche Ergebnisse aus dem Vergleich von RTP- und Stahlrohren über probabilistische Berechnungen dargestellt werden.

Ein wichtiger Punkt ist hierbei die Rohrherstellung. Bei der Rohrherstellung sind eine Vielzahl von Produktionsparametern einzuhalten, die während des Produktionsprozesses ständig überwacht werden. Trotzdem kann es auch bei einer automatisierten und überwachten Fertigung zu Fehlern kommen. Für die Analyse der Eintretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers bei der Produktion können die in [2] beschriebenen Fehlerbäume verwendet werden. Exemplarisch ist in **Bild 5** ein Fehlerbaum für das Auftreten eines Fehlers bei der Rohrherstellung dargestellt. Der Vergleich zwischen Stahl und RTP zeigt, dass die Eintretenswahrscheinlichkeiten für einen Fehler bei der Rohrherstellung in der gleichen Größenordnung liegen. Die bei den einzelnen Ereignissen angesetzten Eintretenswahrscheinlichkeiten beruhen auf der Basis von Herstellererfahrungen.

Ein weiteres Beispiel für den probabilistischen Vergleich von RTP und Stahl ist eine Undichte bei einer Schädigung durch Dritte. Bei einem Kontakt mit der Leitung im Falle von Tätigkeiten Dritter wird die Leitung zunächst beschädigt, wobei es nicht unbedingt zur Undichte kommen muss. Die Entstehung einer Undichte erfordert eine Schädigungsenergie, die größer ist als der vom Rohr entgegenwirkende Widerstand. Der Widerstand des Rohres ist abhängig von der Rohrgeometrie, insbesondere der Wanddicke und von der Materialgüte. Die Schädigungsenergie ist abhängig von dem eingesetzten Gerät (Bagger, Pflug usw.). In dem Bericht [5] wird ein Berechnungsansatz dargestellt, der von einer Schädigung der Leitung durch den Zahn eines Baggers ausgeht. Mit diesem Ansatz wird auf der Grundlage von Versuchen an Stahlrohren die Grenzzustandsgleichung ermittelt. Für den Vergleich von Stahl und RTP erfolgten Finite-Element-Berechnungen un-



ter Aufbringen der Last des Baggerzahnens an statisch gleichwertigen Rohren (z. B. DN 100, PN 70) aus Stahl und RTP. Die Berechnungsergebnisse zeigen für kleine Nennweiten bis DN 150 gleiche Versagenswahrscheinlichkeiten für Stahl und RTP. Bei größeren Nennweiten lässt sich jedoch feststellen, dass Stahlrohre eine geringere Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der probabilistische Vergleich bezüglich des Qualitäts- und Sicherheitsniveaus von aramidbewehrten Kunststoffrohren mit Rohren aus Stahl Ergebnisse in der gleichen Größenordnung zeigt.

Aktueller Stand bei der Zulassung und Ausblick

Eine allgemeine Zulassung für den Gasbereich in Deutschland wird zurzeit beantragt, da die bereits zitierten Untersuchungen und



Bild 4: Verlegung eines aramidbewehrten Kunststoffrohrs
Fig. 4: Installation of RTP pipe

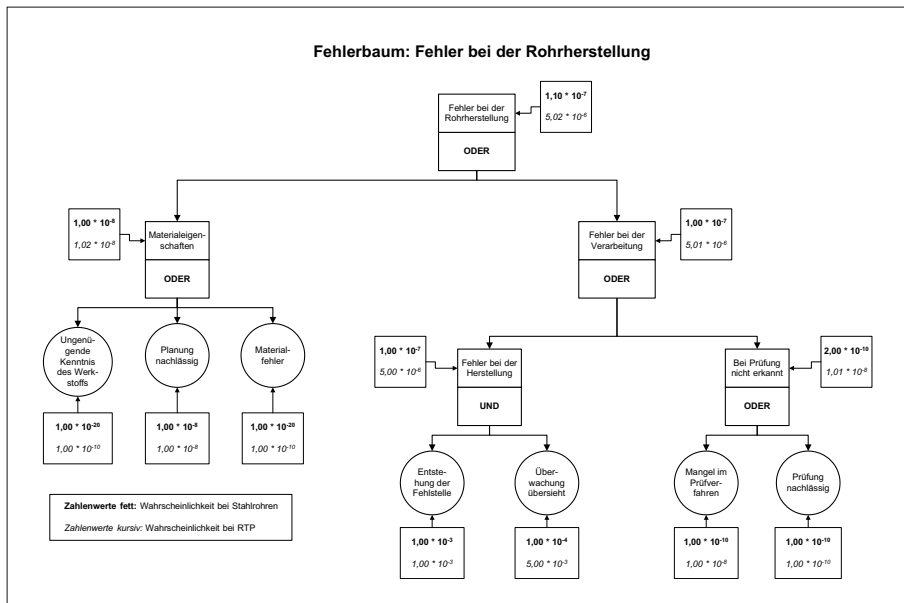


Bild 5: Fehlerbaum für die Rohrherstellung

Fig. 5: Error tree for pipe production

Pilotprojekte die Entscheidung nahe legen, aramidbewehrte Kunststoffrohre problemorientiert einzusetzen. Für die Zulassung soll seitens einer Gruppe von Gasversorgern in zwei Schritten vorgegangen werden. Einerseits wird die allgemeine Zulassung beim DVGW durch einen Rohrproduzenten beantragt. Parallel dazu wird im Rahmen eines Pilotprojektes eine Einzelzulassung bei einer Aufsichtsbehörde beantragt. Mit der Durchführung des Pilotversuches sollen weitere Er-

kenntnisse über den Einsatz aramidbewehrter Kunststoffrohre im Gashochdruckbereich gewonnen werden.

Alle bisher durchgeführten praktischen und theoretischen Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass der Einsatz aramidbewehrter Kunststoffrohre für den Gashochdruckbereich eine sichere und wirtschaftliche Alternative zum Einsatz des Werkstoffes Stahl darstellt.

Weitere Entwicklungen bei den Produzenten aramidbewehrter Kunststoffrohre gehen in die Richtung alternativer Verstärkungsfasern zu den bisher verwendeten Aramidfasern. Eine preiswerte Alternative stellt der Einsatz von Polyesterfasern dar. Mit einer Bewehrung aus Polyesterfasern können jedoch nicht Druckstufen in der Größenordnung von bis zu 140 bar erreicht werden, wie dies bei Aramidfasern möglich ist. Jedoch bieten Polyesterfasern als Verstärkung in bewehrten Kunststoffrohren Möglichkeiten für Druckstufen in der Größenordnung von etwa 40 bar, die auch für kleine bis mittlere Transportnetze eine sinnvolle Alternative darstellen.

Literatur:

- [1] Veenker, M. und Lühsen, H.: Der Einsatz von armierten Kunststoffrohren großen Durchmessers im Hochdruckbereich von 100 bar, 3R internat. 39 (2000) Nr. 3
- [2] Veenker, M.: Kunststoffleitungen im Hochdruckbereich, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Stahlleitungen, 3R internat. 40 (2001) Nr. 4
- [3] Lühsen, H.: Reinforced Thermoplastic Pipes (RTP), State of Development, Situation on the World Market and System Introduction in Germany, 3R internat. 40 (2001) Special Plastic Pipes
- [4] Wernicke, K.; Weßing, W.: Innovation durch Einsatz von Gas-Druckrohren aus PE 100 in der Gasversorgung, 3R internat. 38 (1999), Nr. 10/11
- [5] Zimmermann, T.: Pipeline Reliability-Based Design Developments for Outside Force Damage, in: Proceedings of an International Conference on Risk-Based & Limit State Design & Operation of Pipelines, Aberdeen, 1998