

## **Alterung von Kunststoffmantelrohr**

### **Praxisergebnisse**

Das diesem Vortrag zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit unter dem Förderkennzeichen 0327272 A bis H gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Am Forschungsvorhaben waren beteiligt:

Stadtwerke Leipzig GmbH (Projektleitung)

GEF Chemnitz mbH (Projektkoordination)

Bewag AG & Co.KG Berlin

FWV Niederrhein Dinslaken

HEW Hamburg AG

Stadtwerke Lemgo GmbH

Elastogran Lemförde GmbH

IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH Dresden

Fachhochschule Lausitz Cottbus/Senftenberg

Der Abschlussbericht (100 Seiten einschl. 102 Abbildungen und Diagrammen sowie 3 Anlagen mit umfangreichem Datenmaterial) kann bei GEF Chemnitz bestellt werden. Vervielfältigungs- und Versandgebühr: 20,00 €.

Dr.-Ing. Winfried Schuricht

## **Der Alterungsprozess von KMR**

Mit der Alterung von KMR werden alle über längere Zeit infolge verschiedener Einflüsse ablaufenden Vorgänge bezeichnet, die von außen oder innen wirkend zu einer irreversiblen Veränderung von Gebrauchswerteigenschaften, ja bis zur Unbrauchbarkeit des KMR führen können. Bei KMR sind vor allem mechanische, physikalische und chemische Einflüsse bedeutsam.

Der physikalische Prozess der Zellgasdiffusion verändert die Zellgaszusammensetzung. Unmittelbar nach der Ausschäumung des KMR besteht das Zellgas in den PUR-Schaumstoffzellen hauptsächlich aus den Treibgasen, wie sie durch die Schaumstoffrezeptur vorgegeben werden. Der Anteil von Luft, verursacht durch Vermischungsprozesse bei der Ausschäumung, ist vernachlässigbar gering. Das Partialdruck- bzw. Konzentrationsgefälle zwischen der Umgebungsluft und dem Zellgasgemisch im PUR-Hartschaumstoff des KMR bewirkt nun die einsetzenden irreversiblen Permeationsprozesse. Die Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle der Luft diffundieren durch den PE-Mantel und die überwiegend geschlossenzellige Struktur des PUR-Hartschaumstoffs in die Schaumstoffzellen, während auf umgekehrtem Wege die Treibgasmoleküle aus den Schaumstoffzellen in die Umgebungsluft gelangen. Die Konzentration der Luftbestandteile in den Schaumstoffzellen steigt nach und nach an und entspricht schließlich der Umgebungsluft. In der Regel haben die Treibgase R 11 und c-Pentan deutlich niedrigere Permeationsraten als das physikalische Treibmittel CO<sub>2</sub> und verbleiben damit länger in den Schaumstoffzellen.

Den wesentlichen Widerstand für die Permeation von Luft leistet das PE-Mantelrohr. Ein dünnerer PE-Mantel erleichtert insbesondere das Eindringen von O<sub>2</sub>. Hingegen leistet bei der Permeation der Zellgase R 11 und c-Pentan die PUR-Schaumstoffschicht den wesentlichen Widerstand, während der Widerstand des PE-Mantelrohres vernachlässigt werden kann. Erhöhte Temperaturen vergrößern die Diffusionsrate beim KMR und verringern die Löslichkeit der Treibmittel in der PUR-Matrix.

Das Ausdiffundieren der Treibgase und das Eindiffundieren von Luft vollzieht sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. In den Schaumstoffzellen ruft der Alterungsprozess Überdruck bzw. Unterdruck hervor. Bei Schaumstoffdichten  $\geq 60 \text{ kg/m}^3$  gibt es jedoch erfahrungsgemäß keine Probleme hinsichtlich der Dimensionsstabilität, so dass die schwankenden Zellgasdrücke einen wesentlichen Einfluss auf die Zeitstandsfestigkeit nicht erwarten lassen.

## **Der Einfluss der Alterung auf die Wärmedämmung des KMR**

Der Wärmetransport durch den Schaumstoff, der die Wärmeverluste des Mediumrohres bewirkt, erfolgt mit einem Anteil von rd. 2/3 über die Wärmeleitung des Zellgases. Die Treibgase haben eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Luft. Die mit der Alterung einhergehenden Permeations- und Diffusionsprozesse erhöhen kontinuierlich den Luftanteil im Zellgas, wodurch nach und nach die Gesamtwärmeleitfähigkeit des Schaumstoffs um rd. 20 % ansteigt. Die Alterung des KMR verschlechtert also dessen Wärmedämmvermögen, ohne jedoch dramatische Ausmaße anzunehmen. Das restliche Drittel des Wärmetransports geschieht durch die Wärmeleitung über das

Zellgerüst, also Festkörperwärmeleitung durch Stege und Wände, und durch Wärmestrahlung. Der Alterungsprozess beeinflusst diesen Anteil nicht nennenswert.

### **Der Einfluss der Alterung auf den Haftverbund des KMR**

Die Zellgase Stickstoff, CO<sub>2</sub> und c-Pentan reagieren nicht mit Bestandteilen des PUR-Zellgerüsts, nehmen also keinen Einfluss auf das mechanische Verhalten des PUR-Schaumstoffs. Bei c-Pentan ist allerdings zu beachten, dass infolge des relativ hohen Siedepunktes von 49° C unter Einsatzbedingungen das c-Pentan in den „kalten“ mantelrohrnahen PUR-Schaumstoffzellen in flüssiger Form vorliegt, so dass gegebenenfalls c-Pentan als Weichmacher im PUR-Zellgerüst wirkt und Kriechprozesse bei mechanischer Dauerbelastung intensiviert werden können.

Bei Schaumstoffsystemen mit dem FCKW-Treibgas Freon R11 ist eine Beeinflussung des mechanischen Alterungsverhaltens durch R11 nicht auszuschließen, da R11 sich als Folge der thermischen Beanspruchung z. T. zersetzen kann, so dass Reaktionen von z. B. Chlor- oder Fluorradikalen mit Bestandteilen des PUR-Polymers möglich sind. Die stärker oxidative Wirkung von R 11 ist bekannt. Da die Löslichkeit von R11 in der PUR-Matrix ca. 2 bis 5 mal größer ist als die von c-Pentan, ist bei Schaumstoffsystemen mit R11 ein größerer Weichmachereffekt zu erwarten als bei den neuen PUR-Systemen mit Treibgasen auf Kohlenwasserstoffbasis.

Anders ist es bei dem Zellgas Sauerstoff. Wie oben erläutert, vergrößert sich durch den Permeationsprozess im Verlauf der Nutzungsdauer der Anteil von Sauerstoff im Zellgas des PUR-Schaumstoffes, auch im Bereich der am Mediumrohr angrenzenden Schaumstoffschicht. Diese ist jedoch gleichzeitig hohen Temperaturen ausgesetzt. Die Folge sind Oxidationsprozesse im PUR-Polymer, welche die Verbundfestigkeit mit dem Mediumrohr, d. h. die Zeitstandfestigkeit des KMR beeinträchtigen können. Makroskopisch äußern sich die durch die Oxidation und die thermische Beanspruchung ausgelösten Alterungsprozesse durch eine zunehmende Sprödigkeit, ein Anwachsen der Offenzelligkeit und eine bräunliche Verfärbung des Schaumstoffes. Eine direkte Korrelation der Färbung mit dem Alter bzw. dem Festigkeitszustand der Rohre ist allerdings nicht zulässig, da auch viele andere Einflussfaktoren wie z. B. unterschiedliche Ausgangsstoffe und Rezepturen an der Färbung beteiligt sind. Beispiele enthält der Abschlussbericht.

Wie die Ergebnisse von künstlichen Alterungsprüfungen an KMR hinsichtlich der Verbundfestigkeit bei erhöhter Temperaturbelastung zeigen, kann zunächst die Festigkeit des Schaumstoffes vor allem durch Nachhärtungseffekte zunehmen. Mit zunehmender Beanspruchungsdauer reduziert sich die Verbundfestigkeit, verbleibt über längere Zeit auf einem ziemlich hohen Niveau, um dann relativ schnell auf Null abzusinken - siehe Bild 1.

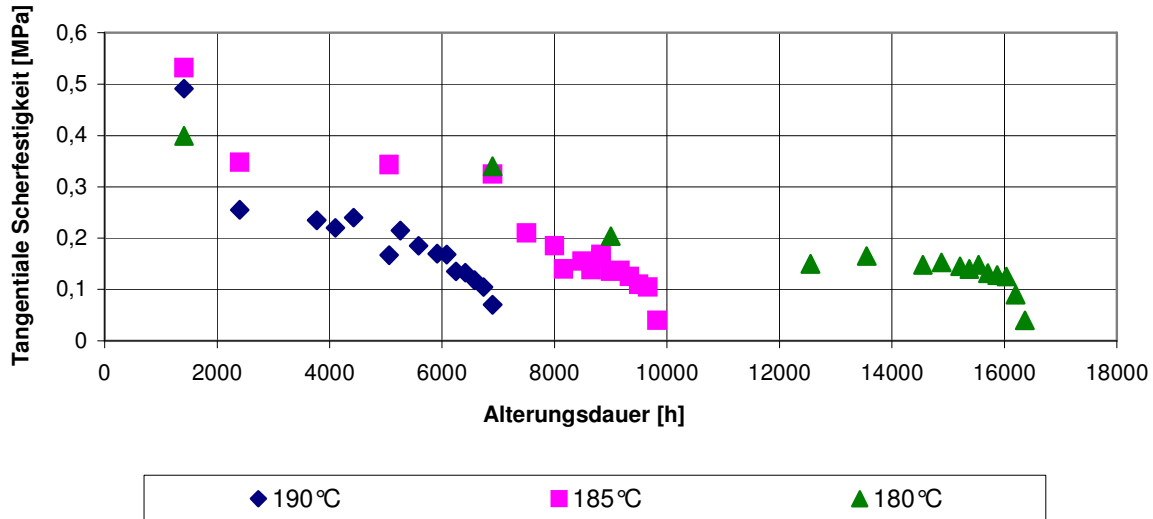


Bild 1: Tangentiale Scherfestigkeit bei 140 °C von KMR in Abhängigkeit von der Dauer der Beanspruchung durch hohe Temperaturen am Medienrohr - Variante Diskonti neu

### Die Herangehensweise im Forschungsvorhaben

Nach rund 30 Jahren Kunststoffmantelrohranwendung in der deutschen Fernwärmeversorgung war der rechte Zeitpunkt für eine umfassende Praxisuntersuchung gegeben. Die Sollwerte des Zeitstandverhaltens hinsichtlich der mechanisch-technologischen Festigkeitskennwerte und der Wärmeleitfähigkeit sowie die Prüfmethode der künstlichen Alterung bei sehr hohen Temperaturen mit der Lebensdauerberechnung enthält die EN 253. Prüfergebnisse von praxisgealterten KMR-Proben aus Umverlegungen, Schadensfällen und einer Pilotstrecke in Leipzig sollten die Aussagen der EN 253 verifizieren.

Ausgewertet wurden 110 Rohrproben von 10 verschiedenen Energieversorgungsunternehmen: Bewag Berlin, FN Dinslaken, HEW Hamburg, SW Leipzig, SW Lemgo, Drewag Dresden, Steag Essen, EV Oberhausen, SW Flensburg, SFW Saarbrücken. Das Rohralter lag bei 3 bis 25 Jahren. Das maximale äquivalente Rohralter für 120° C Dauertemperatur, umgerechnet mit der Arrhenius-Beziehung, betrug 11 Jahre. Unmittelbar nach der Entnahme der KMR-Probe wurden die Schnittflächen des PUR-Schaumstoffs mit Alu-Folie abgedichtet. Sämtliche Rohrproben wurden bei IMA Dresden normgerecht geprüft. Elastogran Lemförde und die Fachhochschule Lausitz führten darüber hinaus Materialuntersuchungen durch, z. B. zur Zellgaszusammensetzung, zur Zellstruktur, u. a.

Die Lebensdauerabschätzung der EN 253 berücksichtigt nur die thermische Belastung. Im Forschungsvorhaben sollte geprüft werden, ob daneben auch andere Faktoren wie z. B. die mechanische Wechselbeanspruchung Einfluss auf die Zeitstandfestigkeit von KMR nehmen.

## Praxisergebnisse zur axialen Scherfestigkeit

Im Verlaufe des Forschungsprojekts entwickelten sich die Prüfergebnisse zur axialen Scherfestigkeit des KMR zu einem Schwerpunkt. Um das Bild 2 interpretieren zu können, bedarf es neben einem Grundverständnis zum Alterungsprozess, deshalb die obigen Ausführungen, auch noch der Kenntnis technologischer Fertigungstoleranzen. Zunächst muss man die Streuung der Anfangsfestigkeit bedenken. Die EN 253 fordert einen Mindestwert von 0,12 MPa, ein mittlerer Wert der Handelsware mag bei 0,3 MPa liegen, und sorgfältig gefertigte Versuchsrohre der üblichen DN 50 besitzen Werte um die 0,7 MPa. Hinzu kommt, dass die überwiegend im Diskontinierverfahren hergestellten Rohre längs einer Rohrstange Festigkeitsunterschiede im Verhältnis 1 zu 2 aufweisen können. Deshalb ist eine hohe Streubreite der Prüfwerte im Bild 2 nachvollziehbar. Die realen Betriebstemperaturen der Fernwärmenetze sind auf TBä = 120° C Dauertemperatur bezogen. Die Umrechnung erfolgte nach Bild 3 (Aktivierungsenergie 150 kJ/mol\*K). Es wird angenommen, dass beispielsweise eine Betriebsdauer von 11,7 Stunden bei 100° C zu einer vergleichbaren Alterung führt wie 1 Stunde bei 120° C.

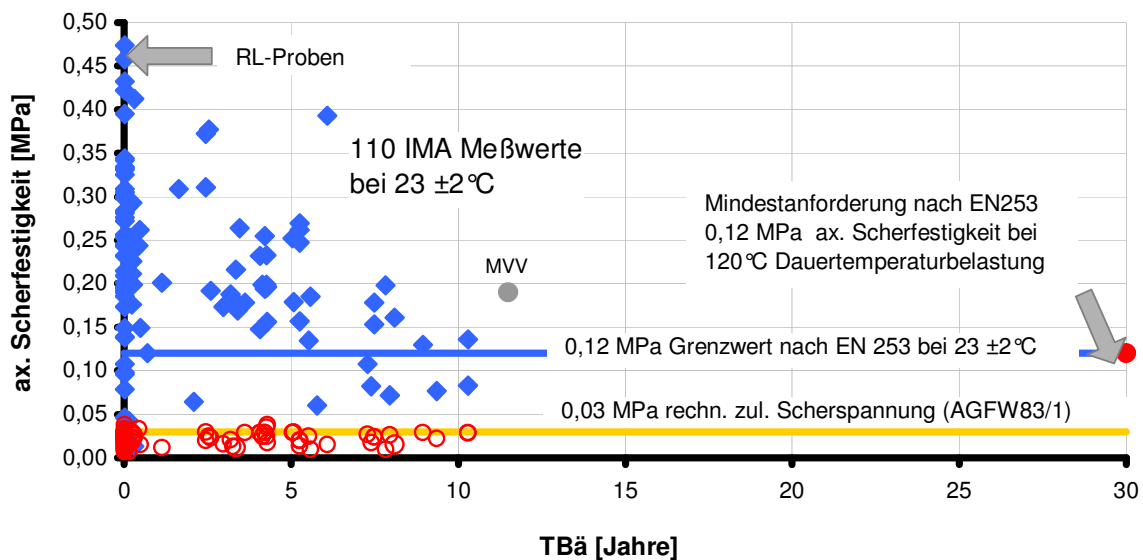


Bild 2: Restscherfestigkeit aller 110 Rohrproben unter Beachtung der thermischen Belastung

Nach Bild 2 liegt die Restscherfestigkeit bei 15 % der Proben unter dem nach EN 253 geforderten Grenzwert von 0,12 MPa. Dabei war bei 13 von diesen 16 Rohrproben ein Versagen des Haftverbundes zwischen Stahlrohr/PUR bzw. PE-Rohr/PUR festzustellen (Adhäsionsbruch). Ausgehend von der nominellen Belastung 120° C Dauertemperatur für 30 Betriebsjahre können die Proben alle in das „erste Lebensdrittel“ eingeordnet werden. Somit scheint die dem PUR-Schaumstoff zugeführte Wärmemenge, die zur Alterung und damit Reduzierung der Festigkeitswerte beiträgt, nicht als einzige Einflussgröße bestimmend zu sein.

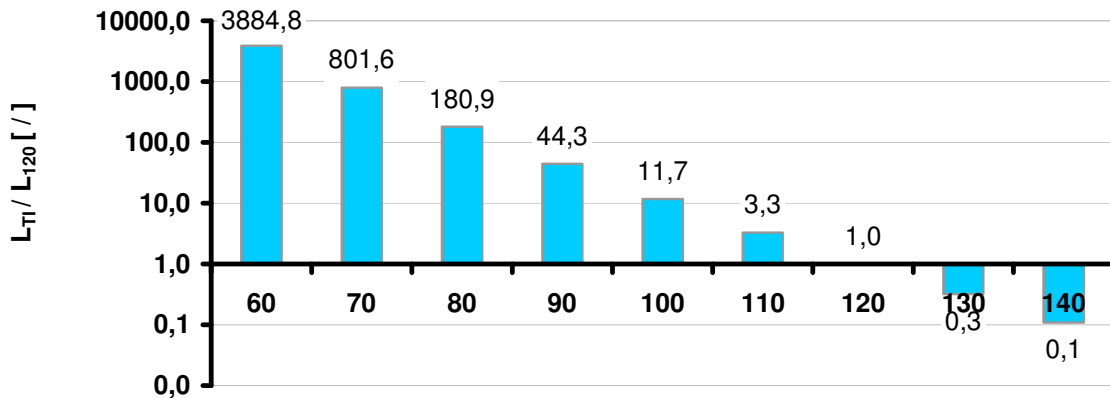


Bild 3: Wertigkeit der Temperaturbeanspruchung von KMR hinsichtlich Alterung (Arrhenius-Beziehung)

Dies wird auch durch den Vergleich der Vor- und Rücklauf-Scherfestigkeitswerte in Bild 4 bestätigt. Geht man davon aus, dass die eingebauten Kunststoff-Mantelrohre bezüglich ihrer Qualität in Vor- und Rücklauf gleichverteilt sind, bleibt als bestimmende Größe die unterschiedliche Temperaturbelastung. Somit muss  $\tau_{VL,i} - \tau_{RL,i} < 1$  ergeben. Durch Addition aller ausgewerteten 34 Probenpaare erhält man mit dem Verhältnis  $+0,387/-1,896$  einen deutlichen Indikator für die thermische Belastung. Allerdings wäre aufgrund der nach  $TB_{\bar{a},120}$  geordneten Werte ein mit steigendem  $TB_{\bar{a},120}$  zunehmender Differenzbetrag zu erwarten.

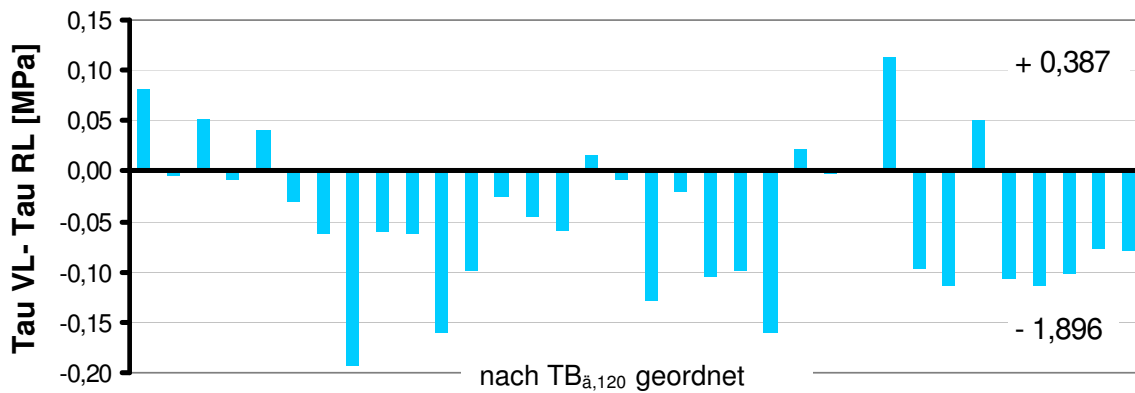
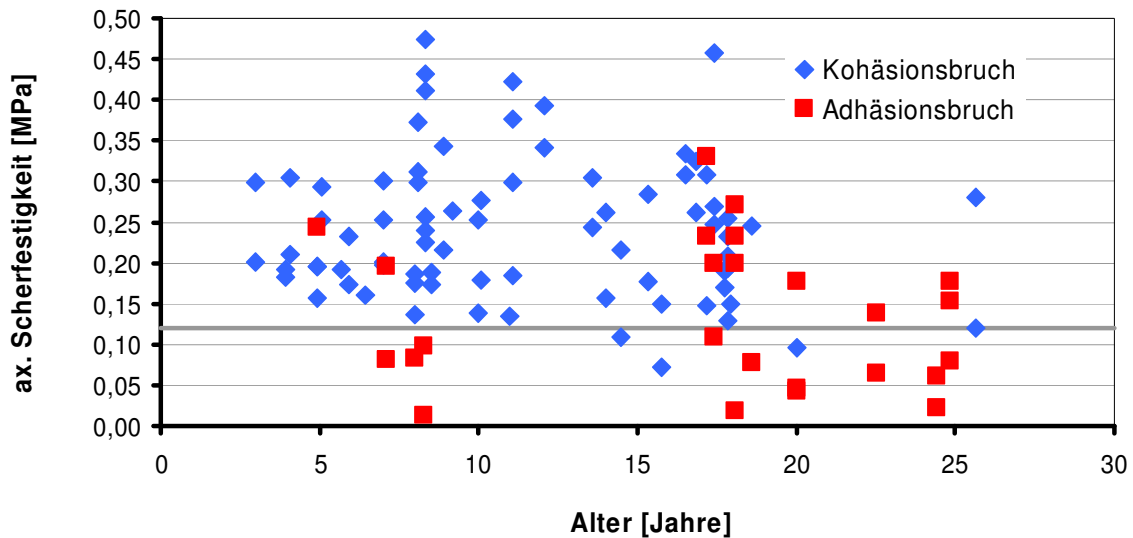


Bild 4: Vergleich der Vorlauf- und Rücklaufscherfestigkeitswerte

Das Bild 2 zeigt neben den Messwerten auch den für die Auslegung von KMR-Trassen üblichen Grenzwert der Scherspannung von 0,03 MPa. Die in der statischen Nachrechnung der Trassen ermittelten Scherspannungen ergaben mit nur geringfügigen Überschreitungen weniger Trassen die generelle Einhaltung dieses Grenzwertes. Das Verhältnis zwischen axialer Scherfestigkeit und Scherspannung stellt die Bruchsicherheit dar. Diese größtenteils hohen Sicherheiten werden durch die Scha-

denstatistik bestätigt. Es sind kaum Schadensfälle infolge eines Versagens des PUR-Schaumstoffes bekannt. Andererseits sollte man nicht darüber hinwegsehen, dass neben den bereits genannten 15 Prozent weitere Anteile der Kunststoff-Mantelrohre nach der nominellen Alterung von 30 Jahren 120°C Dauerbelastung den EN-Wert nicht mehr erreichen werden. Das Potential des Kunststoff-Mantelrohres hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit wird aber auch durch die sehr hohen gemessenen Restfestigkeitswerte deutlich.

Die Darstellung der Festigkeit in Abhängigkeit des Alters und die Zuordnung der Bruchtypen in Bild 5 unterstreicht nochmals die Bedeutung des Haftverbundes. Dass dieses Thema noch aktuell ist, wird durch 6 Proben bestätigt, die ein Alter unter 10 Jahren aufweisen.



## **Gibt es neben der thermischen Belastung weitere Größen, die die Alterung von KMR beeinflussen**

Durch weitere statistische Auswertungen der Rohrproben wird geprüft, ob eine Abhängigkeit der axialen Restscherfestigkeit zu bislang unberücksichtigten Merkmalen besteht. Dazu wurden folgende Größen herangezogen, die zum einen den Startwert beeinflussen, andererseits den Alterungsprozess dominieren.

- Nennweite des Mediumrohrs
- Rohdichte des PUR-Schaumstoffs
- Rohralter
- Mechanische Wechselbeanspruchung

Die statistischen Analysen legen den Schluss nahe, dass alle 4 Merkmale den Startwert bzw. die Alterung beeinflussen. Die Daten zu der durchgeführten Regression enthält der Abschlussbericht des Forschungsberichts. Um die Höhe der Einflussnahme der einzelnen Merkmale zuverlässig bestimmen zu können, wäre ein umfangreicheres normalverteiltes Datenmaterial erforderlich gewesen. Bild 6 gibt aber immerhin eine Orientierung. Die Mittelwerte der betrachteten Rohrproben lagen bei 133 mm für die Nennweite,  $76 \text{ kg/m}^3$  für die Rohdichte und 12,5 Jahre für das Rohralter. Beim Rohralter wurde die Temperaturbelastung in Form des Quotienten Alter zu TBä  $120^\circ \text{C}$  als Parameter eingeführt. Man kann nun in der statistisch ermittelten Regressionsgleichung das gewünschte Merkmal variieren und die übrigen Merkmale beim Mittelwert stehen lassen. So erhält man die drei Einzeldiagramme im Bild 6. Hinsichtlich der mechanischen Wechselbeanspruchung ergab sich die beste Korrelation für das Produkt aus statischer Beanspruchung und Lastwechselzahl.

Diskussionswürdig ist in besonderem Maße die Abhängigkeit von der Rohdichte. Mit der Begründung, die Wärmeleitfähigkeit weiter zu senken, obwohl dies über die Dichte nur marginal möglich ist, wird z. Z. über eine Senkung der Mindestrohddichte von  $60 \text{ kg/m}^3$  nachgedacht. Den relativ kleinen Gewinn an Wärmedämmung jedoch durch einen Festigkeitsverlust des KMR zu erkaufen, was identisch ist mit einer Verringerung der Standzeit der Fernwärmenetze, kann nicht als zielführend im gesamtwirtschaftlichen Sinne wie auch der Versorgungsunternehmen gelten.

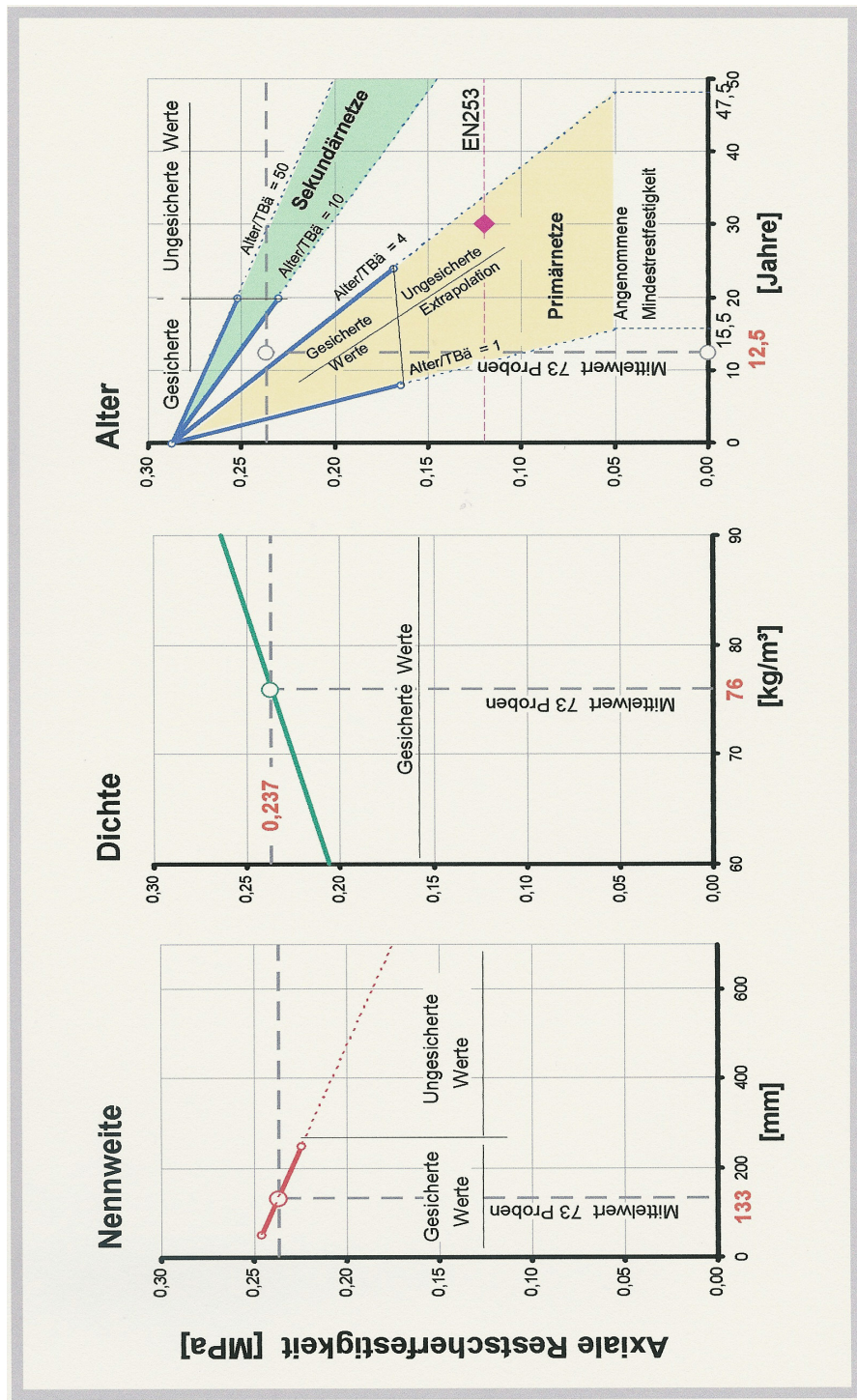


Bild 6: Orientierender Einfluss der Einzelmerkmale Nennweite, Dichte und Rohralter auf die axiale Restscherfestigkeit

Alter / TB <sub>a 120</sub>	1	4	10	50
Dauertemperatur °C	120	109	102	89

Umrechnung nach der Arrhenius-Beziehung

## Bedarf die Lebensdauerabschätzung in der EN 253 gemäß CCOT einer Korrektur

Die Lebensdauer  $L_T$  einer konstanten Dauerbeanspruchung  $T$  ist erreicht, wenn der gleitende Mittelwert der tangentialen Scherfestigkeit den Grenzwert  $\tau_{t,140^\circ\text{C}} = 0,13$  MPa unterschreitet. Gemäß EN 235 ist nach Ermittlung der  $L_T$ -Werte für unterschiedliche Alterungstemperaturen die CCOT (Calculated Continuous Operating Temperature) durch Regression bestimmbar, wenn der Korrelationskoeffizient  $r$  größer 0,98 ist.

$$\text{CCOT} = T_{30a} = \frac{C}{\ln L_{30a} - D}$$

Für drei c-Pentan-getriebene PUR-Schaumstoffsysteme wurden gemäß dieser Vorschrift die Lebensdauern bestimmt. Für einen dieser drei Schaumstoffe ergaben sich nach CCOT folgende Werte:

30 Jahre Dauerbetrieb mit  $151,1^\circ\text{C}$

bzw. 1141 Jahre Dauerbetrieb mit  $120^\circ\text{C}$ .

Nach dem Ablauf ist noch eine tangentiale Scherfestigkeit von mindestens 0,13 MPa bei einer Messtemperatur von  $140^\circ\text{C}$  vorhanden.

Obwohl die künstliche Alterung ein geeignetes Instrumentarium zur Überprüfung neuer Schaumstoffsysteme bezüglich Alterungsbeständigkeit darstellt, muss jedoch kritisch hinterfragt werden, ob die Arrhenius-Beziehung über eine so große Temperaturspanne anwendbar ist, oder ob nicht bei der Auslegung von Fernwärmenetzen ein größerer Sicherheitsfaktor unverzichtbar ist, ganz abgesehen von Berücksichtigung anderer Einflussmerkmale auf den Alterungsprozess.

Das Bearbeitungsteam des Forschungsvorhabens hat sich zu dieser Frage wie folgt verständigt:

Die Diskrepanzen zwischen den Aussagen für die Dauergebrauchseigenschaften aus der künstlichen Alterung bei  $180$ ,  $185$  und  $190^\circ\text{C}$  nach der EN 253 und den im Forschungsvorhaben gewonnenen Praxisergebnissen sind viel zu groß, als dass sie einfach hingenommen werden können. Sie bedeuten für alle Partner ein zu hohes Risiko. Es ist zwingend notwendig, die Diskrepanzen durch weitere Forschungsarbeiten aufzuklären. Es wird eine zukünftige Aufgabe der Branche sein, eine bessere Übereinstimmung zwischen der künstlichen Alterung (EN 253) und den Praxisergebnissen zu erreichen.

Das nachweisliche Aufzeigen dieser Unstimmigkeiten gilt als ein wesentliches Arbeitsergebnis dieses Forschungsvorhabens.

### Praxisergebnisse zur Wärmeleitfähigkeit, zur Geschlossenenzelligkeit und zur Wasseraufnahme der PUR-Hartschaumstoffsysteme

Die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ergab, dass bis auf wenige Ausnahmen alle gemessenen Werte bei einer Einsatzdauer > 10 Jahre unter dem Sollwert von 33 mW/mK nach EN 253 lagen, also besser sind, als die Norm fordert. Bedenken, dass die Wärmedämmung sich mit dem Rohralter über die erwarteten Werte hinaus verschlechtert, erwiesen sich als unbegründet. Hinsichtlich der Energieökonomie ist das ein wertvollen Ergebnis. Siehe Bild 7.

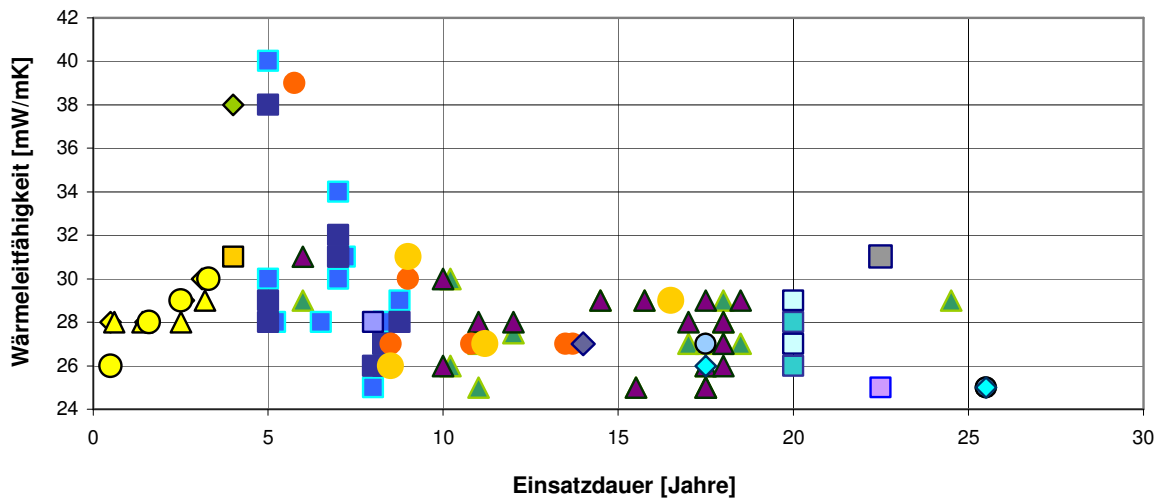


Bild 7: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{23}$  in Abhängigkeit vom KMR-Probenalter (Messung mit  $\lambda$ -Nadelsonde)

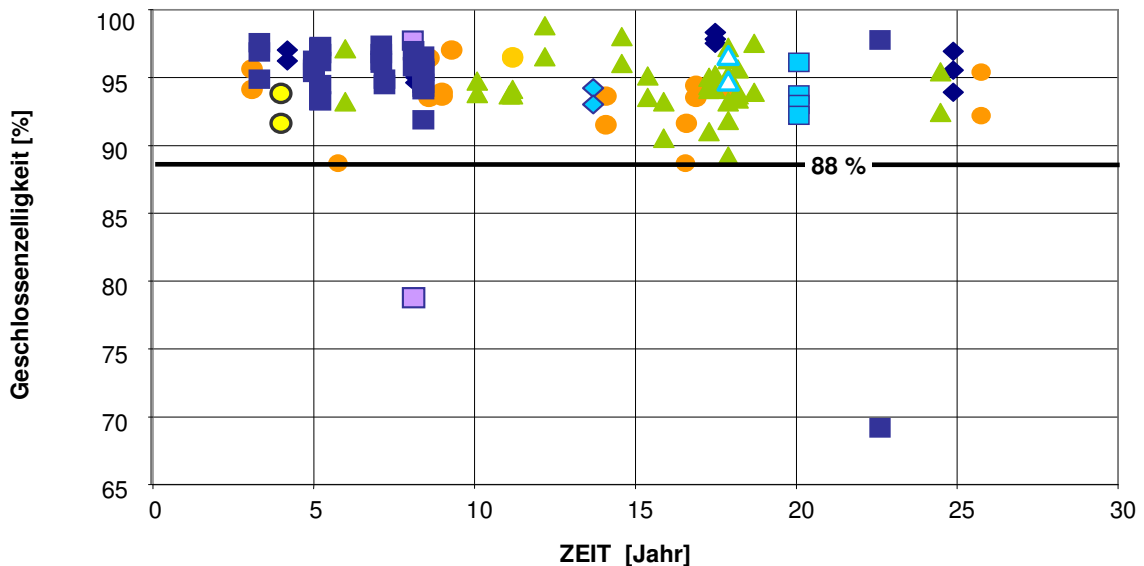


Bild 8: Geschlossenenzelligkeit in Abhängigkeit vom KMR-Probenalter

Die Geschlossenenzelligkeit ist ein einfacher Indikator für die Verarbeitungsqualität des PUR-Schaumstoffs. Unabhängig vom Alter der untersuchten KMR-Rohrproben wurden die Geschlossenenzelligkeitsanforderungen an die Schaumstoffe sicher erfüllt. Siehe Bild 8.

Die Wasseraufnahme des PUR-Hartschaumstoffes wurde mittels Tauchtest (90 min im kochenden Wasser) nach DIN 53433 an jeweils 3 Probekörpern je Rohrprobe geprüft. Die Wasseraufnahme in flüssiger Form oder als Wasserdampf in den Schaumstoff erfolgt bei diesem Test nur im Oberflächenbereich der angeschnittenen Zellen und in den mit der Oberfläche direkt verbundenen offenen Zellen und soll nach EN 253: 2003  $\leq 10\%$  betragen. Bild 9 zeigt die Prüfergebnisse der Wasseraufnahme aller untersuchten Rohrproben.

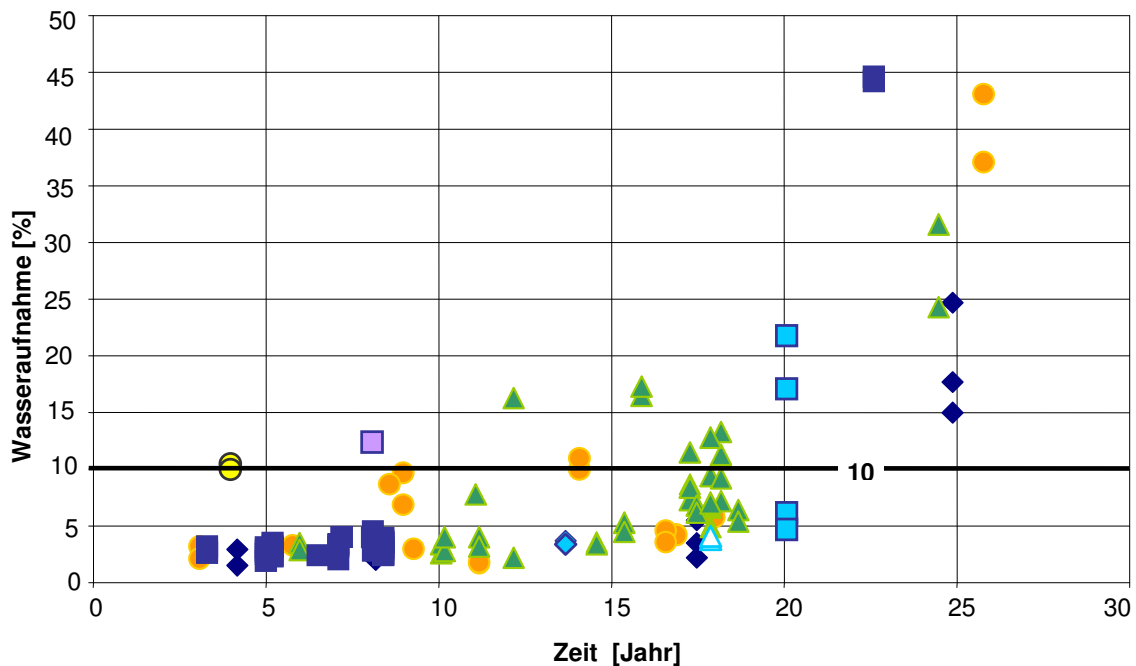


Bild 9: Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom KMR-Probenalter

Obwohl der Tauchtest zur Prüfung der Wasseraufnahme wenig praxisnah ist, kann die erhöhte Wasseraufnahme auf altersbedingte Veränderungen der Zellstruktur hindeuten.

## **Resümee**

Das Kunststoffmantelrohr wird auch weiterhin das führende Verlegeverfahren für Fernwärmerohrleitungen bleiben. Es dürfen jedoch trotz der anerkannten Güte des Rohres nicht jene Anwendungsgrenzen überschritten werden, die objektiv durch die Materialeigenschaften und die Herstellungstechnologien gezogen werden müssen. Bei Beachtung dieser z. Z. noch strittigen Grenzen besteht für die Versorgungsunternehmen die erforderliche längerfristige Planungssicherheit.

Die Aussagekraft der künstlichen Alterungsprüfung bei hohen Temperaturen von 180 bis 190° C im Labor auf die zu erwartenden Dauergebrauchseigenschaften sollte nochmals überdacht werden.