

Kostensenkung bei der Kunststoff-Mantelrohrverlegung durch zeitgerechte Auslegung der Netze

Von Georg Eigner, Berlin, Lothar Gerke-Reineke und Andreas Schleyer, Leimen*)

1 Zielsetzung

Der Stand der Technik bezüglich der Kunststoffmantelrohrverlegung (KMR) ist in Bewegung geraten. Viele Anwender stehen vor der Frage, ob sie ihre Netze weiterhin nach den »alten« Verlegetechniken auslegen sollen oder ob sie bereits heute ohne Risiko eine höhere Materialausnutzung zulassen können.

In diesem Beitrag wird aus der Sicht eines im Fernwärmeleitungsbau tätigen Ingenieurbüros beschrieben, wie die zukünftige Auslegung von Kunststoff-Mantelrohrnetzen aussehen wird, welche Nachweise zu führen sind und welche Einsparungen davon zu erwarten sind.

Durch zeitgerechte Nachweismethoden und neue, hochbelastbare KMR-Bauteile lassen sich folgende Vereinfachungen bei der Auslegung von KMR-Netzen erreichen:

- wesentlich kürzere Dehnschenkel (Dehnpolster-)Längen,
- beliebige Richtungsänderungen zwischen 0 und 90° und darüber hinaus in direkter Erdverlegung ohne Dehnpolster (querbelastbare Bögen),
- Verzicht auf Kompensationselemente und auf thermische Vorspannung (Kaltverlegung),
- längere direkte Hausabgänge.

Die Ziele a) und c) können bereits heute unter Einhaltung der in Deutschland gültigen Regelwerke erreicht werden. Zur Erreichung von Zielsetzung b) müssen spezielle KMR-Bauteile, die in Technikumsversuchen bereits erfolgversprechend getestet wurden, bis zur Serienproduktion entwickelt werden, was vermutlich noch ein Jahr dauern wird. In der Entwicklung ist auch die Realisierung längerer direkter Hausabgangslängen (Ziel d.). Hier ist zu erwarten, daß in naher Zukunft mehrere Effekte ausgenutzt werden können, die eine Vervielfachung der heute zulässigen Abgangslängen ermöglichen werden.

Die heutige Auslegung von Richtungsänderungen und Dehnschenkelängen wird in aller Regel mit Arbeitsdiagrammen oder Rechenprogrammen vorgenommen, die auf der AGFW-Arbeitsmappe »Kunststoff-Verbundmantelrohre« basieren. Die auf dieser Grundlage für das Stahlrohr berechneten Spannungen werden dabei mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 (bzw. 1,4) gegen die Warmstreckgrenze $R_{p0,2T}$ abgesichert. Dieser Nachweis ist nur möglich, wenn

- die Rückstellkraft (Bettungsreaktion) des Dehnpolsters gleich Null gesetzt wird (Annahme: Dehnpolster = Hohlraum),
- und wenn lange Dehnschenkelängen vorgesehen werden.

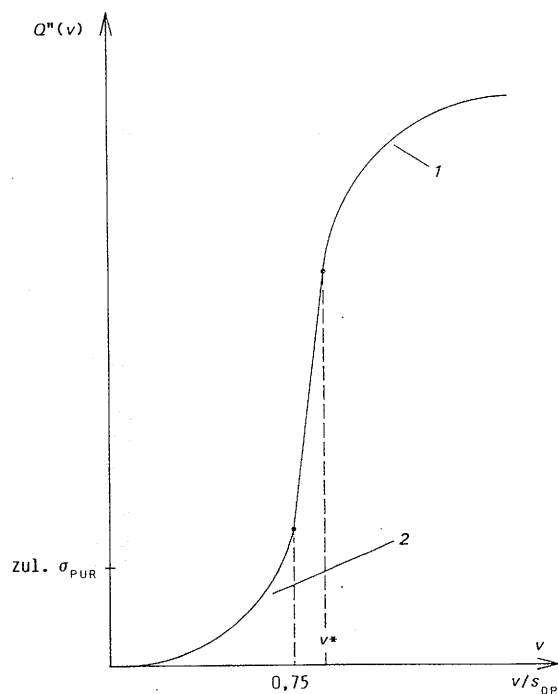
Seit Jahren ist bekannt, daß dieser Nachweis die tatsächlich auftretende Belastung nur ungenügend wiedergibt, denn

Bild 1. Resultierende Bettungsreaktion aus Dehnpolster und Erdreich (qualitative Darstellung)

- passiver Erddruck
- Dehnpolsterkompression

Figure 1. Resulting bedding reaction of expansion pad and earth (qualitative presentation)

- passive pressure of earth
- compression of expansion pad



4263-1

Tafel 1. Prinzipieller Aufbau eines BCH-Blattes

Table 1. General construction of a BCH-sheet

Bettungsfunktion $Q''(v)$ und $F_R''(v)$
Bedding function $Q''(v)$ and $F_R''(v)$
Blatt: (Name) Sheet: (name)

v mm	$Q''(v)$ N/mm ²	$F_R''(v)$ N/mm ²
v_1	$Q''(v_1)$	$F_R''(v_1)$
v_2	$Q''(v_2)$	$F_R''(v_2)$
v_3	$Q''(v_3)$	$F_R''(v_3)$
v_4	$Q''(v_4)$	$F_R''(v_4)$
v_5	$Q''(v_5)$	$F_R''(v_5)$
v_6	$Q''(v_6)$	$F_R''(v_6)$
...

die Rückstellkräfte des Dehnpolsters bewirken Querpressungen, die ein schnelleres Abklingen der Biegelinie und eine erheblich höhere, statische Belastung des KMR zur Folge haben.

Der vorliegende Beitrag zeigt einen neuen Lösungsweg auf, der auf der Theorie des elastisch gebetteten Balkens beruht und die tatsächlich auftretende Beanspruchung des KMR im Dehnpolster mit hoher Genauigkeit ermittelt.

Bei gleicher Dehnschenkelänge sind die Spannungen im Stahlrohr dabei um ein Vielfaches höher als beim bisherigen Nachweis. Diese hohen Spannungs-

*) Dipl.-Ing. G. Eigner, Berlin, Dipl.-Ing. L. Gerke-Reineke und Dr.-Ing. A. Schleyer, Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme mbH (GEF), Leimen.

schwingbreiten werden nun nicht gegen die Warmstreckgrenze abgesichert, sondern für das jeweilige Betriebslastkollektiv einer Ermüdungsanalyse unterzogen. Diese Ermüdungsanalyse kann schon heute nach dem in Deutschland gültigen AD-Merkblatt S2 [1] durchgeführt werden.

Bezeichnungen

In diesem Beitrag werden die in der Rohrstatik üblichen Kurzzeichen in Anlehnung an [2] verwendet. Zusätzlich werden eingeführt:

'	Zeichen für Streckenlast
"	Zeichen für Flächenlast
$Q''(v)$	Bettungsdruck infolge Querverschiebung
$F_R''(v)$	nichtlineare Reibkraftzunahme infolge Querverschiebung
s_{DP}	Dehnpolsterdicke
D_M	Durchmesser des Mantelrohres
d_m	mittlerer Durchmesser des Mediumrohres
M_0	Ringbiegemoment ohne Berücksichtigung der Stützwirkung des Innendruckes
M_1	Ringbiegemoment mit Berücksichtigung der Stützwirkung des Innendruckes
k_p	Abminderungsfaktor für Innendruckstabilisierung

2 Ermittlung der Schnittgrößen unter Berücksichtigung der Bettungsreaktionen der Dehnpolster und des Erdreiches

Die bisher üblichen Berechnungsmethoden gingen bei der Berechnung der Rohrsysteme davon aus, daß im Gleitbereich mit Erdbettung ausschließlich axiale Verschiebungen infolge Temperaturdehnung und innerem Überdruck auftreten, die durch die axiale Reibkraft F_R gemindert werden. Im Bereich der Dehnpolster hingegen wurde eine ungehinderte Beweglichkeit in axialer und lateraler Richtung vorausgesetzt.

Durch diese Betrachtungsweise wird die statische Berechnung so vereinfacht, daß sie mit einfachen Mitteln durchführbar ist. Allerdings verharmlost diese Berechnungsweise die tatsächlich auftretende Beanspruchung in unvertretbarem Umfang. Aus diesem Grund hat auch die

AGFW in [4] bereits 1985 die Einbeziehung der Dehnpolsterrückstellkräfte empfohlen. Außerdem ergaben sich bei der Auslegung dadurch in der Vergangenheit unnötig lange Dehnpolster und teilweise überflüssige Restriktionen bei der Trassierung, wodurch die eigentlich möglichen Kostenuntergrenzen bei der KMR-Verlegung nicht erreicht wurden.

Bereits die Berücksichtigung linearer Bettungsreaktionen erfordert die Zugrundelegung eines wesentlich detaillierteren statischen Modells. Beim KMR treten allerdings durch die Kompression von Dehnpolster und Erdreich grundsätzlich nichtlineare Bettungsfunktionen auf, wodurch die Anwendung geeigneter Iterationsverfahren notwendig wird. Dieser höhere Berechnungsaufwand war der Grund dafür, daß die bisherige vereinfachte Berechnung bis heute unverändert beibehalten wurde.

Die inzwischen erheblich gestiegene Leistungsfähigkeit moderner PC ermöglicht heute den Einsatz von EDV-Programmen, die diesen hohen Berechnungsaufwand problemlos leisten. Nachfolgend werden die Berechnungsgrundlagen eines marktgängigen KMR-Programms [3] beschrieben, mit dessen Hilfe die wirtschaftlichen Vorteile der neuen Auslegung genutzt werden können.

2.1 Berücksichtigung beliebiger Bettungsfunktionen

Aus zahlreichen Kompressionsversuchen an 100-mm-Würfeln [15] kann auf das Bettungsverhalten der gängigen Dehnpolstermaterialien geschlossen werden. Die Bettungsreaktion $Q''(v)$ des Dehnpolsters ist abhängig vom eingesetzten Material, von der Dicke des Dehnpolsters und der auftretenden Kompression. Charakteristisch für das Bettungsverhalten aller Dehnpolster ist die quasi exponentielle Zunahme der Rückstellkräfte bei hohen Kompressionen. Im unteren Teil von *Bild 1* ist die Bettungscharakteristik eines Dehnpolsters von 0 bis 75 % Eindrückung qualitativ dargestellt.

Bei einer bestimmten Maximalpressung v^* des Dehnpolsters wird der umgebende Sand komprimiert. Der weitere Verlauf des Druck-Weg-Diagrammes orientiert sich nun an der Kurve des passiven Erddruckes im Boden (oberer Teil von *Bild 1*). Die Verbindung zwischen Dehnpolster- und Erddruckkurve findet zwischen $v = 0,75 \cdot s_{DP}$ und v^* linear statt, bis hierüber nähere Erkenntnisse vorliegen (mittlerer Teil von *Bild 1*).

Aus den z. Z. vorliegenden Versuchsergebnissen wurden in [3] je drei Gruppen für Dehnpolstermaterialien (weich, normal und hart) und für die Sandeinbettung (schwach, mittel und stark verdichtet) gebildet. Abhängig vom gewählten Dehnpolstermaterial, der Dehnpolsterdicke und der gewählten Bo-

dengruppe wird die Berechnung mit der zugehörigen, nichtlinearen Bettungsfunktion durchgeführt.

In Bereichen mit erhöhter Querpressung wird auch die Reibkraft höhere Werte annehmen, weil die Reibkraftzunahme auf der belasteten Rohrseite wesentlich größer ist, als die Reibkraftabnahme auf der entlasteten Rohrseite. Auch dieser Effekt ist für die wirklichkeitsnahe statische Berechnung von KMR wichtig und geht in [3] durch die Berücksichtigung einer nicht-linearen Reibkraft-Zunahme $F_R''(v)$ infolge Querverschiebung ein.

Die Bettungsfunktionen $Q''(v)$ und $F_R''(v)$ werden extern als Wertepaare eines Polygonzuges in BCH-Blättern (Bettungs-Charakteristik) definiert (*Bild 2* und *Tafel 1*).

Sowohl für die Querpressung $Q''(v)$ als auch für die zusätzliche Reibkraft $F_R''(v)$ wurden in [3] ingenieurmäßig plausible Ansätze gewählt, die die vorliegenden Praxiserfahrungen abdecken. In [14] werden z. Z. die angesprochenen Effekte eingehend untersucht. Die Ergebnisse können vom Anwender durch neue oder geänderte BCH-Blätter berücksichtigt werden. Für das Anlegen und Editieren der BCH-Blätter steht eine spezielle Benutzeroberfläche zur Verfügung, so daß neue Erkenntnisse zu dieser Problematik ohne Programmänderung unmittelbar genutzt werden können.

2.2 Grundlagen der Systemberechnung

Das jeweilige System wird zunächst so in Abschnitte unterteilt, daß innerhalb eines Abschnittes die grundlegenden Berechnungswerte wie Rohrabmessungen, Betriebswerte, Bettungswerte, BCH-Blatt und Strangrichtung konstant bleiben. Je nach Genauigkeitsanspruch ist für den jeweiligen Abschnitt eine Teilung (Genauigkeitsstufe) n vorzugeben. Mit n steigt die Genauigkeit, allerdings auch der Berechnungsaufwand. Durch diese Teilung entstehen Stabelemente, für deren Berechnung das Reduktionsverfahren [5] als Grundlage dient.

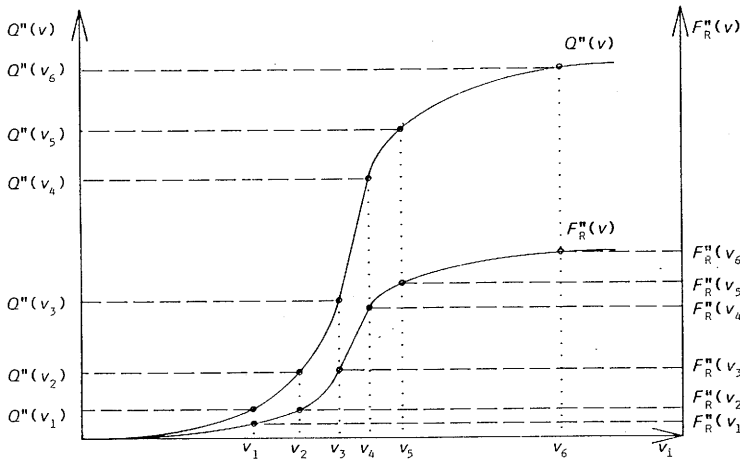


Bild 2. Bettungsfunktionen $Q''(v)$ und $F_R''(v)$

Figure 2. Bedding function $Q''(v)$ und $F_R''(v)$

Zur Vermeidung numerischer Schwierigkeiten, die sich beim Reduktionsverfahren bei großen Federkonstanten ergeben können, wird an den Schnittufern mit Ablösung der statischen Unbekannten gearbeitet.

Die für die gedachten Ersatzfedern im i -ten Iterationsschritt einzurechnenden Federkonstanten ergeben sich aus der im $(i-1)$ -ten Iterationsschritt ermittelten Verschiebung und dem gemäß Bettungsfunktion und F_R' entsprechenden zugehörigen Belastungs-Sollwert. Die Iteration kann manuell abgebrochen werden. Erfolgt dies nicht, so bricht GEFKMR die Iteration ab, wenn die größte Verschiebungsänderung von einem zum anderen Iterationsschritt kleiner ist als 0,05 mm. Für den weiteren praktischen Gebrauch des Programms kann diese Grenze sicherlich ohne wesentlichen Genauigkeitsverlust auf 0,5 bis 1,0 mm heraufgesetzt werden. Bei sehr kleinen Verschiebungswerten konvergieren die Federkonstanten der Ersatzfedern gegen ∞ , deshalb findet im Programm eine Begrenzung auf 10^{10} (N/mm) statt.

Der Bogen wird näherungsweise durch 10 gerade Stabelemente ersetzt, wobei anstelle der Biegesteifigkeit EI die dem Bogen entsprechende Biegefestigkeit EI/k_b Berücksichtigung findet. Für einen Bogen mit dem Ablenkwinkel α ergibt sich am Bogenanfang und -ende jeweils eine Ablenkung von $\alpha/20$. An den dazwischenliegenden neun Schnittstellen hingegen findet diese Transformation je zweimal statt. Dadurch besteht die Möglichkeit, Bettungsfunktionen verschiebungsgerecht (radial und tangential) zu erfassen.

Bei Berechnungen ohne Bettungsreaktionen und Reibung ist es üblich, die Wirkungen der Axialkraft infolge Innendruck (Längsspannung und Dehnungsanteil) auszuweisen, die Axialkraft aus Innendruck selbst jedoch nicht anzugeben und mit der Axialkraft infolge Wärmedehnung und Reibung nicht zu überlagern.

Für Berechnungen mit Bettungsreaktionen ist es sinnvoller, die Kräfte aus Innendruck dort anzusetzen, wo sie am

4263.2

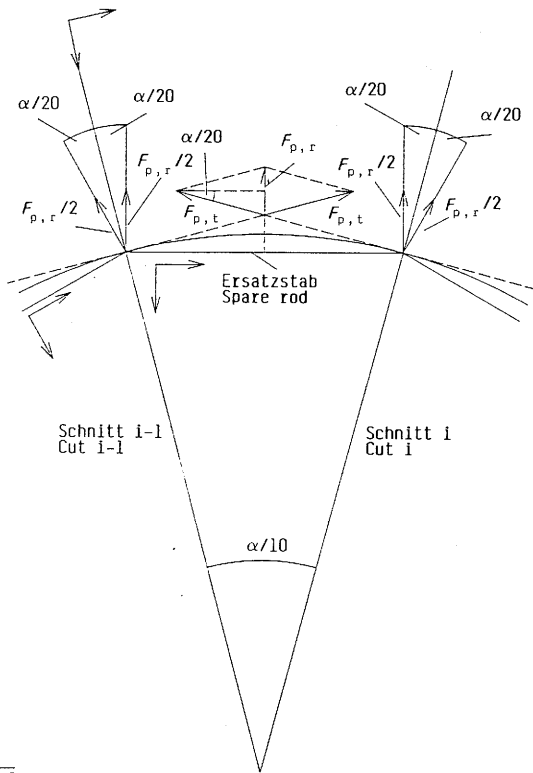


Bild 3. Resultierende Radialkraft infolge Innendruck

Figure 3. Resulting radial force as a consequence of internal pressure

4263.3

Für die praktischen Belange genügt es, die auf ein solches Stabelement wirkenden axialen und lateralen Streckenlasten als Punktlasten am Stabanfang und -ende jeweils für die halbe Stablänge einzurechnen. Die von der lateralen Verschiebung v abhängigen Belastungen werden dabei in der sich aus v und BCH-Blatt ergeben-

den Größe an dem jeweiligen Schnittufer berücksichtigt. Die axial wirkende Reibkraft

$$(F_R' + F_R''(v) \cdot D_M) \cdot L/2$$

wird jedoch nur in voller Größe wirksam, wenn an der betreffenden Schnittstelle axiale Verschiebung eintritt. Im Haftbereich wird sie Null und im Übergangsbereich sind Zwischenwerte zu erwarten. Das Federkonstantenverfahren gemäß [6] kommt dabei in bewährter Form zur iterativen Erfassung dieser Unstetigkeit und in abgewandelter Form zur Erfassung komplizierter Bettungsfunktionen zur Anwendung.

Rohr angreifen, also am Bogen. Durch die Winkeländerung von einem Schnitt zum anderen ($2 \times \alpha/20$) stehen die auf das Bogensegment wirkenden Innendruckkräfte beider Seiten unter einem Winkel von ($\pi - 2 \times \alpha/20$). Die resultierende Kraftwirkung ist eine Radialkraft (Bild 3):

$$F_{p,r} = d_i^2 \cdot \pi/4 \cdot p \cdot 2 \cdot \sin \frac{\alpha}{20}$$

Diese Kraft wird jeweils zur Hälfte am Schnitt $i-1$ nach der 2. Koordinaten-Transformation und am Schnitt i vor der 1. Transformation eingerechnet (am Bogenanfang gibt es nur die 2. und am Bogenende nur die 1. Transformation). Die auf diese Weise eingeleiteten Radialkräfte rufen axial im Bogen und im jeweils anschließenden geraden Rohr die axiale Innendruckkraft

$$F_{p,a} = d_i^2 \cdot \pi/4 \cdot p$$

hervor, die sich durch diese Verfahrensweise mit den übrigen Axialkräften gleich direkt überlagert (betragsmäßige Abminderung der Druckkräfte). Bei der Spannungsberechnung entfällt damit jedoch die Berechnung der axialen Innendruckspannung.

2.3 Ringbiegebeanspruchung infolge Querpressung

Eine umfangsbezogene Spannungsanalyse erfordert, daß die infolge Querpressung $Q''(v)$ zu erwartende Ringbiegebeanspruchung abhängig vom Umfangswinkel φ bekannt ist. Analog zur Verfahrensweise bei der experimentellen Ermittlung der zulässigen PUR-Druckspannungen wird die Querpressung $Q''(v)$ über der vertikalen Durchmesserkoordinate z als konstant angenommen. Bezogen auf den mittleren Durchmesser des Mediumrohres ergibt sich die Querpressung $Q''(v) \cdot D_M/d_m$ (Bild 4). Wegen

$$dz = r_m \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi$$

wirkt auf ein finites Element der Länge $r_m \cdot d\varphi$

die Querlast

$$Q_v''(\varphi) = r_m \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi \cdot Q''(v) \cdot D_M/d_m$$

entgegen der lateralen Verschiebung v .

Diese äußere Belastung hat im Bereich

$$-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$$

die Komponenten:

$$\text{radial} \quad Q_r''(\varphi) = Q_v''(\varphi) \cdot \cos \varphi$$

$$\text{tangential} \quad Q_t''(\varphi) = Q_v''(\varphi) \cdot \sin \varphi$$

Setzt man näherungsweise Symmetrie zwischen oberer und unterer Ringhälfte voraus, so können die weiteren Betrachtungen allein für die obere Hälfte geführt werden (Bild 5).

Die im Bereich $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ wirksame äußere Querlast entspricht der inneren Querkraftänderung im Bereich $0 \leq \varphi \leq \pi$, beides auf dieselbe Längeneinheit bezogen.

Wird gemäß [7] tangentiale Querkraftübertragung vorausgesetzt (radial $\tau_Q = 0$), so ergibt sich in v -Richtung folgendes Gleichgewicht:

$$0,5 \cdot Q''(v) \cdot D_M = r_m \cdot P_t''(\pi/2) \cdot \int_0^{\pi} \sin^2 \varphi \cdot d\varphi$$

Daraus folgt für die im Scheitel wirkende Querkraftänderung:

$$P_t''(\pi/2) = 2/\pi \cdot Q''(v) \cdot D_M/d_m$$

mit $d_m = 2 \cdot r_m$

Setzt man $Q''(v) \cdot D_M/d_m = K$, so lautet die Stützfunktion im Bereich $0 \leq \varphi \leq \pi$.

$$\begin{aligned} \text{tangential} \quad P_t''(\varphi) &= 2/\pi \cdot K \cdot r_m \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \\ \text{radial} \quad P_r''(\varphi) &= 0 \end{aligned}$$

Aus der Überlagerung der Stütz- und Belastungsfunktionen läßt sich unter Beachtung ihrer Wirkungsrichtungen und der bei $\varphi = 0$ und $\varphi = \pi$ vorliegenden Symmetrie-Randbedingungen der Verlauf der Kraft- und Verformungsgrößen ermitteln.

Bei Anwendung der vorgenannten Berechnungsmethode wird in [3] berücksichtigt, daß bei Kunststoff-Mantelrohren der Verbund Stahl/PUR/PE die Ringbiegefestigkeit ($E \cdot I$)_{ges} gegenüber dem ungedämmten Stahlrohr erheblich erhöht. Dies läßt sich durch die Bildung einer gleichwertigen Ersatzwanddicke berücksichtigen. Für ein KMR DN 500 mit $D_M = 670$ mm und $p = 25$ bar erhöht sich z. B. die Ringbiegesteifigkeit um den Faktor 5,25, und es kann mit einer gleichwertigen Ersatzwanddicke von 10,7 mm anstelle der tatsächlichen Wanddicke von 6,3 mm gerechnet werden. Dabei ist allerdings zu beachten, daß die Berücksichtigung einer erhöhten Ringbiegesteifigkeit infolge der Verbundwirkung nur zulässig ist, wenn die dadurch im PUR-Schaum hervorgerufene Scherspannung in Umfangsrichtung den zulässigen Wert von 0,03 N/mm² (Kapitel 4) nicht überschreitet.

Desweiteren läßt sich bei gleichzeitig wirkendem Innendruck dessen ringstabilisierende Wirkung in Anlehnung an Rumpel [8] wie folgt berücksichtigen:

$$M_1 = \frac{M_0}{1 + \frac{p \cdot r_m^3}{(E \cdot I)_{\text{ges}}} \cdot k_p}$$

Beim genannten Beispiel verringert dieser Effekt das Ringbiegemoment auf $M_1 = M_0/2,8$.

3 Spannungsermittlung und -bewertung

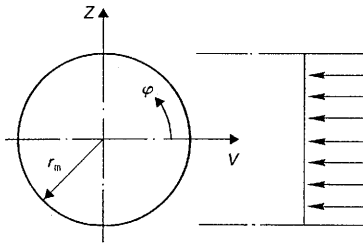
Auf der Basis der exakten Schnittgrößen wird eine detaillierte Spannungsanalyse in jedem Schnitt durchgeführt. Sowohl im Geradrohr als auch im Bogen wird der Rohrumfang in 10°-Schritten abgetastet, und es werden für die Innen- und Außenfaser die Spannungen in axia-

ler, tangentialer und radialer Richtung bestimmt, wobei die Ringbiegebeanspruchung nach Kapitel 2.3 mit einbezogen wird. Im Bogenbereich werden umfangsbezogene Spannungserhöhungsfaktoren angesetzt.

Die Spannungsermittlung und -bewertung kann nach [7] Kapitel 4.2 durchgeführt werden. Bei Anwendung der heute gültigen AGFW-Richtlinien ergibt sich aber folgendes Problem: Die exakte Berücksichtigung der Bettungsreaktionen führt zu deutlich höheren Spannungen als die bisherigen vereinfachenden Berechnungsmethoden. Somit könnte die heute zulässige KMR-Auslegung mit diesen Regelwerken nicht mehr nachgewiesen werden.

Es kann deshalb auf das Durchführen einer Ermüdungsanalyse nicht mehr verzichtet werden. In [3] wurde aus diesem Grunde die Möglichkeit geschaffen, die Spannungen nach ASME [9] zu ermitteln und nach AD S2 [1] zu bewerten. Hierbei ergibt sich zusätzlich der Vorteil, daß die Spannungserhöhungsfaktoren nach ASME den tatsächlichen Spannungszustand im Bogen genauer wiedergeben als die nach AGFW [7].

Die mit ASME und AD S2 mögliche sehr hohe Werkstoffausnutzung sollte im Fernwärmeleitungsbau vor Abschluß der zur Zeit laufenden Untersuchungen noch nicht uneingeschränkt genutzt werden. Dies erscheint ratsam, weil der Geltungsbereich von ASME nicht alle im Fernwärmeleitungsbau vorkommenden Bogenkennzahlen abdeckt und weil AD S2



4263.4

Bild 4. Lastansatz zur Bestimmung der Ringbiegebeanspruchung

Figure 4. Load specification for the determination of the ring bending stress

an die Herstellung und Prüfung der Leitungen Anforderungen stellt, deren Einhaltung bei den heute üblichen Baustellenbedingungen nicht immer sichergestellt ist.

In [3] wird aus diesen Gründen bei Anwendung von AD S2 die maximale Kerbwirkung angesetzt. Außerdem werden 2000 Vollastwechsel zur sicheren Abdeckung fernwärmetyppischer Netzganglinien unterstellt.

4 Beanspruchung des PUR-Schaumes und des Mantelrohres

Auf den PUR-Schaum können Scherspannungen in Achsrichtung (τ_{PUR}) und radikale Druckspannungen (σ_{PUR}) wirken. Beide Spannungsponenten erreichen im Rohrquerschnitt wegen der unterschiedlich großen Flächen von Medium- und Mantelrohr ihr Maximum unmittelbar am Mediumrohr, wo auch die höchste Temperatur herrscht.

Da die Nutzungsdauer des KMR-Systems auch wesentlich von der Zeitstandfestigkeit des PUR-Schaumes bestimmt wird, müssen die zeit-, temperatur- und lastabhängigen Festigkeitskennwerte für zul. (σ_{PUR}) und zul. (τ_{PUR}) angesetzt werden. Letzterer beträgt $0,03 \text{ N/mm}^3$ und wurde in [10] experimentell bestätigt.

Für zul. (σ_{PUR}) bei radialer Zeitstandsbeanspruchung lagen in der Vergangenheit keine Anhaltswerte vor. Sofern bei der Auslegung der Dehnpolster die in der Bundesrepublik Deutschland

üblichen Dimensionierungsrichtlinien, besonders [2 und 4] eingehalten wurden, konnte der PUR-Schaum von unzulässiger radialer Druckspannung geschützt werden.

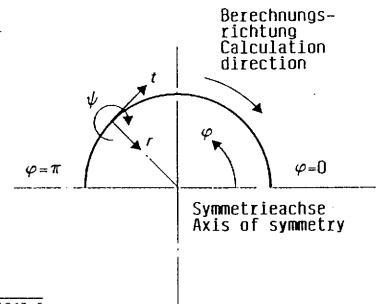
Lediglich bei direkt erdverlegten Richtungsänderungen ohne Dehnpolster (also bei kleinen Knickwinkeln und beim Trassenbogen) mußte der Planer bisher die radiale Druckspannung im PUR-Schaum überprüfen. In Ermangelung von Versuchsergebnissen haben die Autoren in der Vergangenheit hierbei Druckspannungen von $0,1$ bis $0,15 \text{ N/mm}^2$ als zulässig angesehen. Die im Rahmen eines Forschungsvorhabens der Fernwärmeversorgung Niederrhein in Dinslaken zur Zeit laufenden Schaumversuche zur Ermittlung der radialen Zeitstand-Druckfestigkeit scheinen den genannten Schätzwert zumindestens tendenziell zu bestätigen.

Durch die exakte rechnerische Berücksichtigung aller Bettungsfunktionen (Querpressung und Reibkrafteerhöhung durch v -Verschiebung) werden in [3] nun an allen Stellen die tatsächlich auftretenden Druck- und Scherspannungen im Schaum ermittelt. Wird durch ein vorgegebenes Dehnpolster die Beanspruchung des PUR-Schaumes unzulässig hoch, so wird eine Erhöhung der Dehnpolsterdicke notwendig.

Da die Dehnpolster im Erdreich wie eine zusätzliche Wärmedämmung wirken, läuft man damit allerdings Gefahr, eine unzulässig hohe Temperatur am PE-HD Mantelrohr zu erhalten. Beim Einsatz von Schrumpftverbindungen z. B. dürfen nach [4] Manteltemperaturen von $50 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht überschritten werden. Ein KMR-Programm sollte daher in der Lage sein, abhängig von der Auslegungstemperatur, der Überdeckungshöhe und der Dehnpolsterdicke die maximale Manteltemperatur zu berechnen und bei Überschreitung der zulässigen Manteltemperatur die maximal zulässige Dehnpolsterdicke anzugeben.

5 Optimierung beliebiger KMR-Trassen

Ein für den Anwender besonders interessantes Funktionsmerkmal eines KMR-Programmes besteht in der Möglichkeit, für beliebige Trassensituationen vom Programm alle statikrelevanten Auslegungsgrößen automatisch optimal auslegen zu lassen. Da ein EDV-Programm die Trassierungsalternativen nicht kennen kann, besteht seine vordringlichste Aufgabe bei der Optimierung darin, unter dem Gesichtspunkt der Massenreduzierung und unter Einhaltung aller zulässigen Werte im Stahlrohr, im PUR-Schaum und im PE-HD Mantelrohr die wirtschaftlichste Ausstattung mit Dehnpolstern zu ermitteln. Bei statisch unzu-



4263.5

Bild 5. Bezeichnungen am symmetrischen Rohrquerschnitt

Figure 5. Denominations at the symmetric pipe cross section

lässigen Trassenführungen werden dem Benutzer Hinweise für die Veränderung der Eingabedaten gegeben.

Durch die Berücksichtigung von Bettungsreaktion $Q''(v)$ und Reibkrafteerhöhung $F_R''(v)$ haben einzelne Trassenelemente wie z. B. L-System und Knick vielfach Rückwirkungen aufeinander, die bei der Optimierung zu berücksichtigen sind. Nachfolgend wird beschrieben, wie in [3] die Trassenoptimierung durchgeführt wird.

Die Berechnung zahlreicher Trassensysteme unter Berücksichtigung der Bettungsreaktion hat gezeigt, daß es zulässig ist, in einem ersten Optimierungsprozeß die erforderliche Dehnpolsterdicke und in einem zweiten Optimierungsprozeß die minimal erforderliche Dehnpolsterlänge durch Iteration zu ermitteln. Die Auswahl der erforderlichen Dehnpolsterdicke kann wahlweise in Schritten von 10 , 20 oder 40 mm durchgeführt werden. Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich auf eine Abstufung in 40-mm -Schritten.

Nach einer Plausibilitätsprüfung aller Eingabedaten und einer nachfolgenden Systemanalyse stattet das Programm in einer Erstbelegung die Trasse mit Dehnpolstern aus. An allen Richtungsänderungen $> 30^\circ$ werden Dehnpolster mit einer Dicke von 80 mm angesetzt. Die bisher noch nicht optimierte Dehnpolsterlänge wird dabei ausreichend lang gewählt. Bei ungleich langen Schenkeln werden die ungleich langen Dehnpolsterlängen nach einem geeigneten Algorithmus so gewählt, daß das maximale Biegemoment in der Nähe der Bogenmitte auftritt. Mit dieser Erstbelegung werden nun

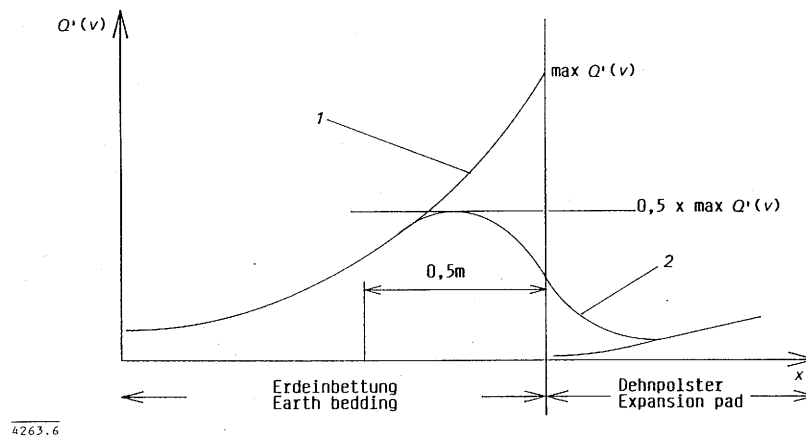
die Schnittgrößen und Verschiebungen des elastisch gebetteten Trassensystems berechnet.

An allen Stellen, an denen die Beanspruchung des PUR-Schaumes oder die Ringbiegespannung des Stahlrohres infolge Querpressung die jeweils zulässigen Werte überschreitet, werden die Dehnpolsterdicken auf 120 mm erhöht. In Bereichen, in denen die PUR-Beanspruchung und die Ringbiegespannung weniger als 60% der zulässigen Werte aufweisen, wird die Dehnpolsterdicke auf 40 mm verringert. In den übrigen Bereichen wird die vorhandene Dehnpolsterdicke von 80 mm beibehalten. Mit dieser Zweitbelegung werden erneut die Schnittgrößen und Verschiebungen des Systems berechnet.

Spätestens nach dem dritten Berechnungslauf sind die erforderlichen Dehnpolsterdicken für die gesamte Trasse bestimmt, und damit ist der erste Optimierungsprozeß abgeschlossen. Wird dabei an mindestens einer Stelle die zulässige Manteltemperatur überschritten, so erhält der Anwender eine Warnmeldung und Vorschläge für veränderte Eingabedaten. Bei Trassensystemen, für die überhaupt keine zulässige Auslegung gefunden werden kann, wird die Überschreitung der zulässigen Werte genannt, und es werden ebenfalls Vorschläge für veränderte Eingabedaten (z. B. andere Trassenführung, anderes Dehnpolstermaterial) gemacht.

Im zweiten Optimierungsprozeß werden nachfolgend die Dehnpolsterlängen minimiert. Auch hierbei sind die Schaum- und Ringbiegespannungen zu überprüfen, als wesentliches Kriterium kommt allerdings noch die Einhaltung der zulässigen Spannungsschwingbreite im Stahlrohr hinzu. Der Übergang zwischen Sandeinbettung und Dehnpolster bildet wegen der unterschiedlichen Bettungsfunktionen quasi eine elastische Einspannstelle, an der rechnerisch außergewöhnlich hohe Querpressungen auftreten (Bild 6). In der Praxis ist die Sandeinbettung unmittelbar vor dem Dehnpolster aber nicht mehr in der Lage, mit einem so hohen Spitzendruck auf Querverformungen zu reagieren. Vielmehr wird der Sand bei Querverformung auch in Richtung Dehnpolster ausweichen, bis sich ein kontinuierlicher Übergang der Bettungsfunktionen einstellt (geschwungene Linie in Bild 6).

Um zu vermeiden, daß die nur in der Theorie auftretenden, hohen Spitzenwerte der Querpressung generell die Dehnschenkellänge bestimmen, erscheint es sinnvoll, im Bereich bis 0,5 m vom Dehnpolster entfernt, nur die Hälfte des rechnerischen Spitzenwertes als Beanspruchung anzusetzen und damit die Einhaltung der zulässigen Schaum- und Ringbiegespannungen zu überprüfen.



4263.6

Bild 6. Theoretischer und tatsächlicher Verlauf der Querpressung im Übergangsbereich zwischen Sand und Dehnpolster (qualitative Darstellung)

- 1 theoretischer Verlauf
- 2 tatsächlicher Verlauf

6 Kürzere und dünnere Dehnpolster

Ein wesentlicher Vorteil der exakteren Berechnungsmethode und der weitergehenden statistischen Ausnutzung liegt in der möglichen Verringerung des Dehnpolstermaterials. Vergleichsrechnungen zeigen, daß mit der in [3] zur Anwendung kommenden Berechnungsmethode lediglich noch Dehnschenkel erforderlich werden, die – je nach Trassensituation – die Hälfte bis ein Drittel der bisherigen Länge aufweisen. In vielen Fällen kann auch die Dehnpolsterdicke verringert werden.

Der mögliche Auslegungsvorteil wird am nachfolgenden Beispiel eines L-Systems DN 100 (Ablenkwinkel 90°, Überdeckungshöhe 1 m) mit 200 m Schenkellänge aufgezeigt. Zur Begrenzung der Endverschiebungen am Bogen bietet sich hier die Vorwärmung an. Im Beispiel wurden verfügbare Dehnpolsterdicken von 40, 80 und 120 mm unterstellt. Der Vergleich von alter und neuer Berech-

Figure 6. Theoretical and actual course of the lateral compression at the transition between sand and expansion pad (qualitative presentation)

- 1 theoretic course
- 2 actual course

nungsmethode ermöglicht folgenden Auslegungsunterschied:

	bisherige Auslegung nach [2]	neue Auslegung nach [3]
Dehnpolsterlänge	m 3,20	1,10
Dehnpolsterdicke	mm 80	40
Querverschiebung in Bogenmitte	mm 33	23

In diesem Beispiel wird neben der Verkürzung der Dehnschenkellänge auch eine Verringerung der Dehnpolsterdicke möglich, wodurch nicht nur die Verlegekosten, sondern auch die Funktionsrisiken der Leitung gesenkt werden. Bei der bisherigen Auslegung waren in jedem Fall die mit einfachen Mitteln abgeschätzten und an einem relativ niedrigen zulässigen Wert gemessenen Spannungen im Stahlrohr systembestimmend. Die Spannungen im PUR-Schaum galten ohne Überprüfung als eingehalten, was im Hinblick auf die notwendig werdende, komfortable Dehnpolsterausstattung als eine in den meisten Fällen auf der sicheren Seite liegende Annahme angesehen werden kann.

Bei der neuen Auslegung werden die Spannungen im Stahlrohr unter Berücksichtigung aller auftretenden Bettungsreaktionen aus der tatsächlichen Biegelinie exakt berechnet und können dann



Bild 7. Querbelastbares KMR

Figure 7. Laterally loadable plastic jacket pipe

mit höheren zulässigen Werten verglichen werden. Durch die Berücksichtigung der tatsächlichen Rückstellkräfte des Dehnpolsters braucht die Kompression des Dehnpolsters nicht mehr pauschal auf 50 % seiner Dicke begrenzt zu werden, sondern kann je nach Dehnpolstermaterial auch Werte zwischen 50 und 85 % annehmen. Mit den durch beide Effekte möglich werdenden kürzeren und dünneren Dehnpolstern nimmt allerdings die radiale Druckspannung im PUR-Schaum zu und wird angesichts der relativ niedrigen Zeitstandfestigkeit des Schaumes systembestimmend.

Die durch die neue Berechnungsmethode mögliche Kostensenkung im Leitungsbau liegt auch bei nicht vorgewärmter Verlegung in ähnlicher Größenordnung. Die in [11] beschriebenen Techniken zur Verringerung des Dehnpolstermaterials können weiterhin eingesetzt werden, der durch sie erzielbare Auslegungs- und damit auch Kostenvorteil wird durch die hier vorgestellte Berechnungsmethode noch vergrößert.

7 Beliebige Richtungsänderungen zwischen 0 und 90° und darüber hinaus in direkter Erdverlegung ohne Dehnpolster

Nach der hier vorgestellten Berechnungsmethode werden nicht nur die Dehnschenkellängen und Dicken, sondern auch die zulässigen Knickwinkel in den meisten Fällen vom PUR-Schaum bestimmt. Wegen der geringen Zeitstandfestigkeit des PUR-Schaumes werden deshalb je nach Trassensituation nur Knickwinkel zwischen 3 und 6° möglich. Um diese Beschränkungen in der Auslegung und die anderen bekannten Nachteile von Dehnpolstern zu beseitigen, wurde innerhalb des Forschungsvorhabens »Neue Prüftechniken und System-

komponenten beim Kunststoff-Mantelrohr« der Gas-, Elektrizitäts- und Wasserwerke Köln AG (GEW) ein querbelastbarer KMR-Bogen entwickelt. Entwicklung, Prüfung und Einsatzmöglichkeiten dieses Bauteils sind in [12] beschrieben.

Die Wirkung der neu entwickelten KMR-Bögen beruht darauf, daß erstmals in Fernwärmerohren ein mit Blähgas oder -ton verstärkter PUR-Schaum eingesetzt wird, der auch im gealterten Zustand bei hohen Temperaturen eine vielfach höhere, radiale Druckfestigkeit aufweist (Bild 7). Die mit möglichst großer Lagerungsdichte eingefüllten Blähgas- oder Blähtonkugeln bilden ein tragendes Gerüst zwischen Medium- und Mantelrohr, durch das die Querbelastbarkeit dieser Rohre unabhängig von der Belastungszeit und der Mediumtemperatur wird. Die Aufgabe des Schaumes, der unter Temperatur und Zeit einen Großteil seiner Festigkeitseigenschaften verliert, ist bei den neuen, querbelastbaren Rohren auf die Einbettung des Granulats reduziert.

Querbelastbare KMR brauchen in Fernwärmenetzen nur in Bereichen eingesetzt werden, in denen eine nennenswerte Querbelastung wirkt, vor allem also in Bögen und Knicken. Wegen der erhöhten Bettungsreaktionen des Erdreichs kommen für die Verbindung der Mantelrohre nur Schweißmuffen infrage. Trotzdem werden die Bauteile, besonders die Bogen, im Vergleich zu konventionellen Bauteilen längere Bogenschkel benötigen, damit die Muffenverbindungen in Bereiche mit geringerer Querbelastung gelegt werden können. In querbelastbaren KMR-Bauteilen wird auch das Stahlrohr stärker belastet. Eventuell können in Einzelfällen Wanddickenerhöhungen oder Stahlsorten mit höherer Streckgrenze erforderlich werden.

Beim Deutschen Patentamt wurde zwischenzeitlich der Schutz der Erfindung querbelastbarer KMR-Bogen von GEW, Köln, beantragt.

Querbelastbare KMR werden zur Zeit in Langzeitversuchen bei 160 °C Mediumtemperatur seit über zwei Monaten mit 2 N/mm² belastet, ohne daß bisher nennenswerte Verformungen aufgetreten sind. Diese Prüflast liegt in den meisten Fällen mit Sicherheit oberhalb der zu erwartenden Bettungsreaktion des Bodens.

Sollten die noch ausstehenden Versuche die bisherigen positiven Ergebnisse bestätigen, so könnte durch den Einsatz der neuen, querbelastbaren KMR-Bauteile die Trassierung wesentlich vereinfacht werden, weil dann in Verbindung mit der Berechnungsmethode nach [3]

auf einfache Weise beliebige Leitungsknicke zwischen 0 und 90° ohne Kompensationselemente möglich würden. Durch die größere Flexibilität bei der Trassierung könnten im Einzelfall erhebliche Kostensenkungen erreicht werden.

Ein weiterer Vorteil bestünde darin, daß zukünftig die zulässigen Verlegelängen kaltverlegter Leitungen nicht mehr durch die in Dehnpolstern aufnehmbaren maximalen Dehnungen begrenzt wären. Dies wäre auch für andere Entwicklungsansätze (vor allem für die Anwendung der betrieblichen Selbstvorspannung) von Bedeutung und könnte deren Einsparpotential erhöhen.

Ein nicht zu unterschätzender Wert der Neuentwicklung liegt auch darin, daß mit den Dehnpolstern eine wesentliche Schwachstelle im KMR-System beseitigt wird, die immer eine unerwünschte Erhöhung der Manteltemperatur zur Folge hat und deren Langzeiteignung bis heute bezweifelt wurde.

8 Verzicht auf Kompensationselemente und Vorwärmung

Die Entwicklung der querbelastbaren KMR-Bauteile wird in naher Zukunft abgeschlossen sein und wird voraussichtlich einen völligen Verzicht auf Kompensationselemente möglich machen. Außerdem gestatten die von Fernwärme Niederrhein bereits durchgeführten Versuche bei gerader Leitungsführung schon heute einen Verzicht auf eine thermische Vorspannung. Beide Entwicklungen ergänzen sich, so daß künftig eine kompensationslose Kaltverlegung auch für maximale Betriebstemperaturen von 130 oder 140 °C möglich sein wird. Das Programm [3] ist bereits ausgestattet, den hierfür erforderlichen Spannungsnachweis zu führen.

Die Kaltverlegung weist die Vorteile der thermischen Vorspannung auf, vermeidet jedoch deren zeitlichen und kostenmäßigen Aufwand. Es ergeben sich bei der Kaltverlegung allerdings noch folgende Besonderheiten, die beachtet werden müssen:

- Große Dehnwege (ungefähr viermal größer als bei vorgewärmt verlegten Leitungen).
- Abgänge stellen wegen der hohen Axialkräfte Schwachstellen in der Leitung dar und müssen gegebenenfalls verstärkt werden. Anbohrungen beachten!
- An allen Richtungsänderungen treten höhere Druckspannungen im PUR-Schaum auf, z. B. an Knicken, Trassenbögen, 90°-Bögen.
- Längere Gleitbereiche sind eventuell erschwerend für Hausabgangsleitungen.
- Auf erdverlegte Armaturen wirken wesentlich höhere Kräfte.
- Größere Ausknickgefahr bei Freigrabung oder niedriger Überdeckungshöhe.

Alle diese Probleme sind lösbar, zumal das bisher größte Hindernis (die großen

