

Rohrleitungen, Festigkeitsberechnung, FEM

Untersuchung des Spannungs- und Verformungsverhaltens von senkrechten Rohrverzweigungen

K. Graeff-Weinberg, Magdeburg

Inhalt. Die Auswertung vorhandener Vorschriften und Berechnungsverfahren ergibt, daß eine allgemeine analytische Beschreibung des Beanspruchungszustands von Rohrabzweigen nicht möglich ist. Die Autorin berichtet über Untersuchungen rechtwinkliger Rohrverzweigungen mit Hilfe der FEM und gibt Empfehlungen für die Durchführung von Spannungs- und Verformungsanalysen. Den Ergebnissen werden aus der Literatur bekannte Vergleichswerte gegenübergestellt.

Anwendungen aus der Sicht des Herausgebers. Rohrverzweigungen kommen im Apparate- und Anlagenbau häufig vor, so daß die Literaturrecherche über bisherige Berechnungsansätze und Untersuchungsergebnisse den Festigkeitsspezialisten der Praxis interessieren wird. Die von der Autorin selbst durchgeführten FEM-Untersuchungen bestätigen die Anwendungsmöglichkeit dieser Strukturanalysemithe mit Ergebnissen für einige Rohrverzweigungsabmessungen und -belastungen.

1 Einleitung

Rohrabzweige sind als Bestandteile von Rohrleitungssystemen weit verbreitete Bauelemente; allgemeine Bemessungskriterien für ihre Auslegung sind daher in Standards bzw. Richtlinien niedergelegt [1–3]. Grundlage der Gleichungen für den Traglastnachweis ist allgemein das Flächenvergleichsverfahren. Diese von Kellogg 1957 vorgestellte und in [4] zur Dimensionierung von Rohrabzweigen erweiterte Methode basiert auf dem Vergleich von beanspruchtem und tragendem Rohrquerschnitt. Kriterium der Festigkeitsberechnung ist hier nicht die maximale, sondern die mittlere Beanspruchung des Abzweigs. Die Ausschnitte in Zylindern werden durch Verschwächungsbeiwerte erfaßt [1].

Bei der Dimensionierung nach dem angegebenen Verfahren können an höchstbeanspruchten Stellen plastische Verformungen auftreten. Dafür wird eine Stützwirkung im elastoplastischen Bereich vorausgesetzt, die bei dünnwandigen Rohrverzweigungen unter Umständen erheblich unterschritten wird. Ähnliche Bemessungsregeln wie im deutschen gelten auch im amerikanischen Regelwerk [2, 3, 5].

Allgemein wird das relativ einfache Flächenvergleichsverfahren zwar als ausreichend betrachtet, Untersuchungen der Bauteile innerhalb der letzten Jahre bestätigten jedoch, daß dieses Konzept veraltet ist. Durch die überschlägige Berechnung wird der Ausschnitt oft mehr als unbedingt notwendig verstärkt. Die Ermittlung des in den Rohrverzweigungen wirklich vorliegenden Spannungszustandes ist mit diesem Verfahren ebensowenig möglich wie eine Berücksichtigung plastischer Verfor-

mungen. Daher sind andere Methoden zu suchen, um den im Abzweig auftretenden Spannungszustand zu bestimmen.

2 Bisheriger Kenntnisstand

2.1 Analytische und experimentelle Methoden

Eine erste umfassende analytische Betrachtung von senkrechten Rohrverzweigungen wurde 1961 von Reidelbach [6] vorgestellt. Abzweig und Grundrohr werden als in der Schalenmittelfläche gekoppeltes Tragwerk betrachtet und die im Durchdringungsbereich auftretenden Schnittgrößen hergeleitet. Die dazu getroffene Annahme eines kreisförmigen Rohrausschnitts begrenzt die Theorie auf Durchmesser verhältnisse $D_{ST}/D_G \leq 0,5$ (D_{ST} Durchmesser des Stutzens, D_G Durchmesser des Grundrohres).

Diese Arbeit diente Strohmeier in [7] als Grundlage für ein Rechenprogramm. Die Ergebnisse wurden experimentellen Werten gegenübergestellt und mit zusätzlichen Korrekturfaktoren versehen.

Bijlaard [8] untersuchte erstmals den Einfluß der Belastung des Stutzens durch äußere Kräfte und Momente. Auch diese Berechnungsmethode ist nur für kleine, dünnwandige Rohrabzweige ($D_{ST}/D_G \leq 0,5$; $D_G/S_1 \geq 20$) gültig (S_1 Wanddicke des Grundrohres).

In [9] wird dieser Lösungsweg aufgegriffen und weiterentwickelt. Hier werden die am Stutzen angreifenden Kräfte und Momente so betrachtet, als ob sie den Zylinder des Grundrohres wie eine örtlich begrenzte Flächenlast belasten. Es werden zahlreiche Diagramme zur Bestimmung des Spannungszustands im Grundrohr vorgelegt. Wegen der weiten Verbreitung des Bulletin [9] wurde 1984 eine Ergänzung herausgegeben [10]. Eingearbeitet sind weitere analytisch ermittelte Resultate sowie experimentelle Ergebnisse.

Kupfer [12, 13] betrachtete den Zylinder mit Stutzen als zusammengesetztes Flächentragwerk; die Kopplung erfolgt mit Übergangsbedingungen für die Schalenmittelfläche. Die analytische Lösung für den Zylinder ermittelt er mit der Theorie der flach gekrümmten Zylinderschale; das Randstörproblem des Stutzens wird mit der Flügelschen Biegetheorie beschrieben. Dabei werden der Ausschnitt im Zylinder als kreisförmig und der Stutzenrand als geradlinig begrenzt angenommen. Diese Voraussetzungen bedingen die Beschränkung auf dünnwandige Zylinder-Stutzen-Verbindungen mit D_{ST}/D_G

$\leq 0,3$. Aus numerischen Ergebnissen wurden Bemessungsdiagramme abgeleitet.

Eine allgemeine analytische Betrachtung von Zylindern mit Abzweigen ist nur für bestimmte Abmessungsverhältnisse möglich. Da bei großen Durchmesser-Verhältnissen nicht ein kreisförmiger Rohrausschnitt idealisiert werden kann, sind solche Geometrien mit Hilfe der Theorie gekrümmter Kreisschalen nicht mehr zu erfassen. Auch bei der Betrachtung dickwandiger Rohrabzweige und zur Berücksichtigung verschiedener Formen des Übergangs Rohr-Stutzen muß auf andere Methoden zurückgegriffen werden.

Inzwischen liegen zahlreiche experimentelle Untersuchungen dieser Bauteile vor. Bei Innendruckbelastung berichten alle Arbeiten übereinstimmend über maximale Beanspruchung der Zylinder-Stutzen-Verbindungen an der Innenseite der Durchdringung im Längsschnitt. Insgesamt muß aber festgestellt werden, daß es keine allgemeinen quantitativen Aussagen zur Spannungskonzentration in Rohrdurchdringungen gibt. Die angegebenen Diagramme und Gleichungen sind nur bereichsweise gültig. Unterschiedliche Meßmethoden (holographische Untersuchungen, DMS usw.) schränken außerdem die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ein.

2.2 Numerische Untersuchungen

Da sowohl den analytischen als auch den experimentellen Verfahren zur Beanspruchungsanalyse von Rohrverzweigungen Grenzen gesetzt sind, rücken numerische Berechnungen (z. B. mit Hilfe der FEM) zunehmend in den Vordergrund. Der sehr hohe Aufwand für Pre- und Postprocessing erschwert jedoch eine ausführliche Untersuchung dieser Bauteile.

Als numerisch günstige und für die Vernetzung relativ einfache Variante erwies sich die Modellierung der Rohrverzweigungen mit Schalenelementen. Monschau [16] zieht ein Schalenmodell zur Berechnung eines experimentell untersuchten Abzweigs heran, die dafür verwendeten Elementtypen sind jedoch geradlinig begrenzt und ungünstig angeordnet. Der Übergangsradius des Versuchskörpers bleibt beim FE-Modell unberücksichtigt.

Mit dem von Weese in [17] vorgestellten Modell aus Semi-Loof-Schalen nach [18] sind dagegen durch Nachbildung des Übergangsradius und Verfeinerungen des Elementnetzes im Durchdringungsbereich relativ genaue Aussagen über die Spannungsverteilung möglich.

Hartig [19] untersuchte ein T-Stück, dessen FE-Modell ebenfalls aus Semi-Loof-Schalenelementen aufgebaut ist. Von Bartel [20] wurden mit einem ähnlichen Berechnungsmodell innendruckbelastete Rohrverbindungen untersucht. Der notwendige numerische Aufwand ist für Schalenstrukturen wesentlich geringer als bei FE-Modellen aus 3D-Elementen. Allerdings muß man insbesondere im Gebiet der Rohrdurchdringung mit relativ großen Ungenauigkeiten rechnen.

Ergebnisse mit einem Vollkörperelementmodell wurden 1984 von Theilig [21] vorgestellt. Rost untersuchte in [14] 29 Rohrverzweigungen mit speziellen Abmessungsverhältnissen. Zur Ermittlung der Spannungserhöhungsfaktoren wurden überschlägige Gleichungen abgeleitet. Weber [22] berechnete fünf Verzweigungen. Dabei werden neben Innendruck und statischer Belastung auch Temperatureinflüsse untersucht. Berechnungen innendruckbelasteter Abzweige mit kleinem Stutzen mit Hilfe eines

3D-Modells und mit einer rotationssymmetrischen Ausführung werden von Franzius in [23] vorgestellt.

2.3 Schlussfolgerungen

Die Auswertung der im internationalen Schrifttum bekanntgewordenen Untersuchungen ergibt, daß selbst für einfache Bauformen der Rohrverzweigung mit Hilfe analytischer und experimenteller Methoden keine allgemeine Beschreibung des Beanspruchungszustands möglich ist. Aus diesem Grund wird für diese Bauteile verstärkt die Methode der Finiten Elemente angewandt. Dabei ist grundsätzlich eine dreidimensionale Analyse notwendig. In den Bereichen mit hohen Spannungsgradienten sollte mehrschichtig vernetzt werden. Der fertigungsbedingte Übergangsradius vom Rohr zum Stutzen ist bei der Modellierung zu berücksichtigen.

In den meisten vorliegenden Untersuchungen wird allein die Beanspruchung durch Innendruck betrachtet. Mit Hilfe der FEM ist darüber hinaus die Erfassung zusätzlicher, aus dem Rohrleitungssystem herrührender Kraftwirkungen möglich. Diesen bisher oft vernachlässigten Belastungsanteilen sollte künftig verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet werden.

3 Modellierung rechtwinkliger Rohrverzweigungen

3.1 Aufbau des FE-Modells

Für Rohrverzweigungen gibt es vielfältige praktische Ausführungsformen. Häufigster Fall ist dabei der Zylinder mit senkrechtem, mittigem Stutzen ohne inneren Überstand, der hier betrachtet werden soll.

Zur numerischen Untersuchung wurde das FEM-System COSAR genutzt [24]. Wegen der geometrischen Symmetrie des Rohrabzweigs braucht nur ein Viertel modelliert zu werden. Trotzdem ist der für die dreidimensionale Vernetzung notwendige Aufwand sehr hoch. Daher wurde ein Preprozessor entwickelt, der ausgehend von wenigen Angaben zu Geometrie, Netzgestaltung und Belastung des Abzweigs ein vollständiges FE-Modell aufbaut. Dabei ist eine unmittelbare grafische Netzkontrolle möglich. Mit dem Ziel günstiger Ele-

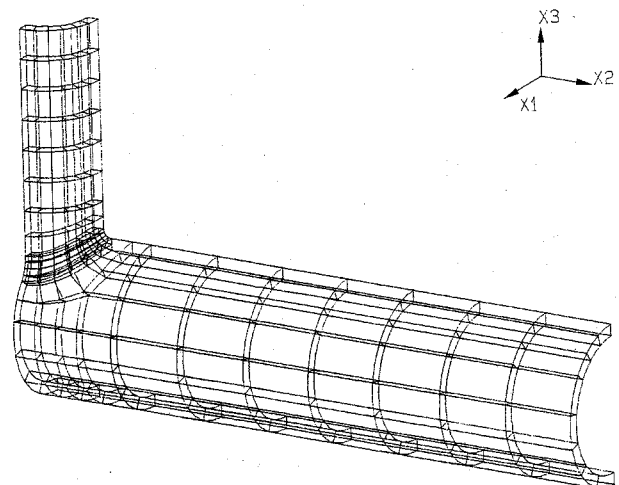


Bild 1. FE-Modell der Rohrverzweigung

mentabmessungen können die Eckdaten des Modells variiert werden.

Am Übergang vom Rohr zum Stutzen wird ein Radius modelliert. Wegen der zu erwartenden Spannungskonzentrationen werden hier in Wanddickenrichtung mehrere Elemente angeordnet. Für Rohr und Stutzen folgen wahlweise Strukturen aus Schalen- oder Vollkörperelementen. Die Anzahl der Elemente in axialer und in Umfangsrichtung ist variabel. Die FE-Modelle der hier vorgestellten Abzweige (Bild 1) sind aus isoparametrischen 20-Knoten-Hexaederelementen nach [18] aufgebaut.

3.2 Belastung

Die wichtigste Belastung von Rohrverzweigungen ist Innendruck. Zusätzlich werden hier die Einflüsse von Längskraft und Biegemomenten am Grundrohr untersucht. Da für das FE-Modell nur ein Viertel des Rohrabzweigs vernetzt wird, werden diese Belastungen durch symmetrische und antisymmetrische Anteile ausgedrückt. Berechnet werden die einzelnen Lastfälle mit Einheitslasten. Man erhält daher normierte Spannungen.

Unter Voraussetzung linear-elastischen Materialverhaltens ermittelt man anschließend die Spannungsverteilung für reale Belastungen durch Superposition der Ergebnisse. Die Randbedingungen ergeben sich aus den Symmetrie- bzw. Antisymmetrieforderungen bezüglich der Schnittebenen.

Um Aussagen über die Spannungsverteilung unabhängig von der spezifischen Geometrie der Abzweige treffen zu können, werden Spannungserhöhungsfaktoren α ermittelt.

$$\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nenn}} \quad (1)$$

3.3 Geometrie der berechneten Abzweige

FEM-Analysen wurden an sechs Rohrverzweigungen unterschiedlicher Geometrie durchgeführt (Tabelle 1). Die Abzweige wurden ausgewählt, da hierzu in der Literatur Vergleichswerte zur Verfügung stehen und so eine Bewertung unterschiedlicher Modelle möglich ist. Dabei entspricht Rohr 1 der in [17] für den Lastfall Innendruck untersuchten Verzweigung. Rohr 2 wurde in [16] berechnet; neben den symmetrischen Randbedingungen wurden hier für die Rohrenden radiale Verschiebungen verhindert. Rohr 3 ist in [19] untersucht worden. Rohr 4 und Rohr 6 wurden in [14] ohne Übergangsradien an der Innenseite modelliert. Die radiale Aufweitung infolge Membranspannungszustand wurde dort zusätzlich als Verschiebung vorgegeben. Rohr 5 stellt mit einem

Tabelle 1. Untersuchte Rohrverzweigungen

Abzweig	D_{ST}/D_G	S_1/S_2	D_G/S_1	r_m/D_G
(1)	0,4	1,0	100,0	0,05
(2)	0,75	1,0	80,0	0,1
(3)	0,8	1,0	100,0	0,943
(4)	0,65	1,0	12,5	0,096
(5)	0,5	1,0	5,0	0,24
(6)	0,325	1,0	19,0	0,093

Tabelle 2. Formfaktoren bei variierten Stutzenlängen

Länge des Stutzens	Spannungserhöhungsfaktor
$l = 1,5 D_{ST}$	$\alpha = 8,01$
$l = 1,25 \sqrt{D_{ST} S_1}$	$\alpha = 7,19$
$l = 2 D_{ST}$	$\alpha = 5,76$
$l = 2,5 D_{ST}$	$\alpha = 5,27$
$l = 3 D_{ST}$	$\alpha = 5,19$
$l = 3,5 D_{ST}$	$\alpha = 5,09$
$l = 4 D_{ST}$	$\alpha = 5,05$
$l = 4,5 D_{ST}$	$\alpha = 5,03$
$l = 5 D_{ST}$	$\alpha = 5,02$

Verhältnis von $S_1/D_G = 0,2$ eine untere Grenze für dickwandige Rohre dar.

Die Geometrie einer senkrechten Rohrverzweigung wird allgemein durch die Verhältnisse D_{ST}/D_G , D_G/S_1 und S_1/S_2 sowie durch Größe und Form des Übergangsradius beschrieben (S_2 Wanddicke des Stutzens, r_m mittlerer Radius des Übergangs Grundrohr-Stutzen). Einfluß auf die Ausbildung von Spannungskonzentrationen haben aber auch die Längen von Rohr und Abzweig. Für die Beanspruchungsanalyse wurden daher Voruntersuchungen zur Wahl geeigneter Vernetzungslängen durchgeführt. Dabei wurde davon ausgegangen, daß sich am Rohrende annähernd der Membranspannungszustand des druckbelasteten Zylinders einstellt. In den Vorschriften [1] werden für den Traglastnachweis mittragende Längen in Abhängigkeit von Durchmesser d und Wanddicke s angegeben.

$$l \approx 1,25 \sqrt{ds} \quad (2)$$

Testrechnungen zeigten, daß diese Längen für das FE-Modell der Rohrverzweigung zu klein sind. Man berechnet damit sehr hohe Spannungswerte am Stutzenrand sowie starke Verformungen. Die im Durchdringungsbereich ermittelten Spannungen werden dadurch deutlich beeinflußt. Für den Aufbau von FE-Modellen werden daher folgende Längen vorgeschlagen:

$$\begin{aligned} \text{Stutzen} \quad l &\approx 3,5 \dots 4,5 \cdot D_{ST}, \\ \text{Grundrohr} \quad l &\approx 1,5 \dots 2 \cdot D_G. \end{aligned} \quad (3)$$

Unter Voraussetzung dieser Vernetzungslängen klingen die Störungen des Membranspannungszustands ab. Am Beispiel von Rohr 3 soll der Einfluß der Stutzenlänge auf die Spannungsspitzen im Durchdringungsbereich demonstriert werden. Bei jeweils gleichen Grundrohr-längen $l = 2D_G$ werden für Innendruckbelastung die in Tabelle 2 angegebenen Spannungserhöhungen ermittelt.

4 Ergebnisse der FEM-Analysen

4.1 Verformungsverhalten bei Innendruckbelastung

Ein Minimum an vorgegebenen Randbedingungen führt dazu, daß sich die untersuchten Rohrabzweige relativ frei verformen können (Bild 2). Im Querschnitt wird eine radiale Aufweitung des Durchdringungsbereichs festgestellt. Der Ausschnitt ovalisiert sich. Da die Umfangsspannung im ungestörten Rohr (Membranspannungszustand) doppelt so groß wie die entsprechende Längsspannung ist, kann diese Deformation durch den Festig-

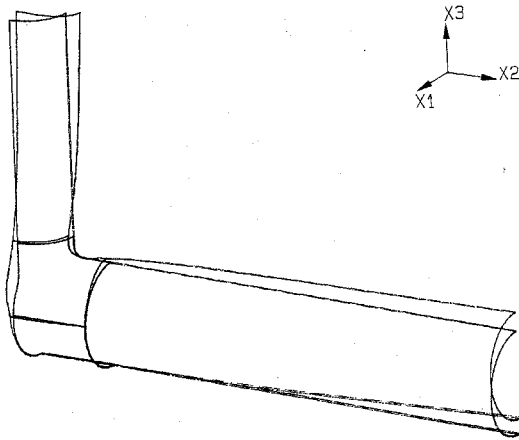


Bild 2. Verformungsverhalten bei Innendruckbelastung

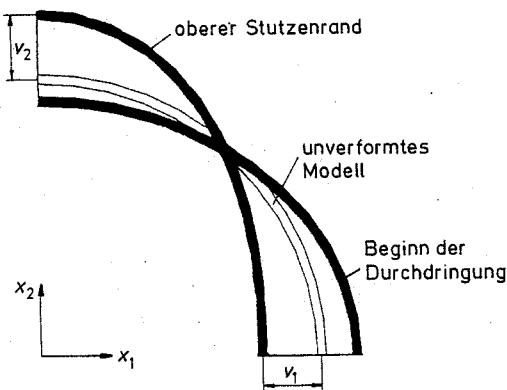


Bild 3. Ovalisierung des Stutzens; v_1, v_2 Verschiebungen

keitsverlust des Zylinders erklärt werden.

Infolge dieser Verformung ist ein Anheben des Grundrohrendes zu beobachten. Untersuchungen mit unterschiedlichen Modellen zeigten keinen wesentlichen Einfluß der Rohrlänge auf dieses Verhalten. Die Verformung des Durchdringungsbereichs wird im Stutzen kompensiert. Bei flexiblen Strukturen verdrehen sich die Enden gegeneinander (Bild 3); dickwandige Rohre reagieren entsprechend steifer. Die Ovalisierung des Stutzens ist stark abhängig von seiner Länge; bei sehr langem Stutzen verschwindet sie.

Die berechneten Beispiele zeigen bei freier Lagerung deutliche Deformationen. Da eine solche idealisierte Lagerung praktisch nicht möglich ist, sind entsprechende Zwangskräfte zu erwarten.

4.2 Spannungszustand bei Innendruckbelastung

Zur Bewertung des Spannungszustands im Rohrabzweig wird die allgemein zur Dimensionierung übliche, nach der Gestaltänderungshypothese berechnete Vergleichsspannung σ_v herangezogen. Ihr Maximum liegt bei Innendruckbelastung erwartungsgemäß an der inneren Oberfläche im Längsschnitt der Verzweigung. Die Spannungen steigen in diesem Bereich stark an und klingen dann rasch über der Rohrlänge ab (Bild 4).

Die erste Hauptspannung σ_1 hat ihr Extremum ebenfalls im Längsschnitt, sie weist in tangentielle Richtung. Ihr Maximalwert ist allgemein etwas höher als derjenige der Vergleichsspannung; bei dünnwandigen Rohren liegt er auf der Außenseite. Zur Berechnung der Erhöhungsfaktoren wird als Bezugsspannung die Tangentialspannung im ungestörten Rohr gewählt (Druck auf Schalenmittelfläche).

$$\sigma_{\text{nenn}} = p_i(D_G - S_1)^2 / (2D_G S_1) \quad (4)$$

(p_i Innendruck).

Den berechneten Spannungserhöhungsfaktoren werden in Tabelle 3 Vergleichswerte aus der Literatur gegenübergestellt. Insgesamt liegen sie in der erwarteten Größenordnung; ihr Betrag ist allgemein etwas höher als

Tabelle 3. Vergleich einiger Spannungserhöhungsfaktoren für den Lastfall Innendruck (α_{vgl} bezieht sich auf die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Quellen)

	α_{FEM}	α_{vgl}	α nach [14]	α nach [25]	α nach [15]	α nach [11]
(1)	3,66	3,45	3,20	4,26	2,75	4,6 ... 6,4
(2)	4,49	4,26	4,10	5,55	3,37	6,3 ... 8,7
(3)	5,27	10,8	4,23	6,07	—	7,1 ... 9,9
(4)	4,99	3,89	3,81	3,20	3,20	3,3 ... 4,6
(5)	5,89	—	3,17	2,22	2,92	2,4 ... 3,4
(6)	3,36	3,01	3,01	2,50	—	2,6 ... 3,7

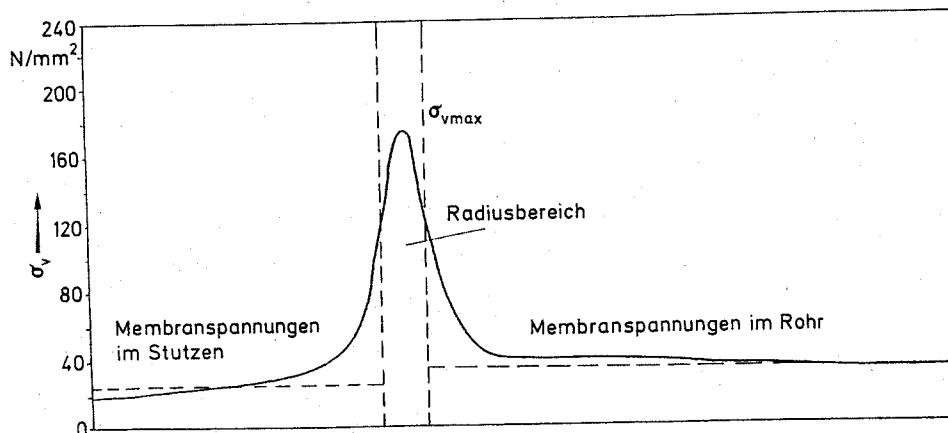


Bild 4. Typischer Spannungsverlauf im Längsschnitt der Rohrverzweigung bei Innendruckbelastung

derjenige der Vergleichswerte. Das für Rohr 2 berechnete Ergebnis wird zusätzlich durch eine in [20] untersuchte ähnliche Abzweigung bestätigt; hier wurde $\alpha = 4,56$ ermittelt. Besonders bei dickwandigen Rohren ist der Wert des Erhöhungsfaktors davon abhängig, für welchen Durchmesser die Bezugsspannung berechnet wurde. Wird der Membranspannungszustand auf die Schalinnenfläche bezogen, sind die Formfaktoren natürlich geringer.

4.3 Belastung durch Längskraft am Grundrohr

Bei Belastung des Grundrohres durch eine Längskraft kommt es infolge des Abzweigs zu einer deutlichen Störung des Membranspannungszustandes. Das Rohr wird gezogen, der Ausschnitt ovalisiert sich in Längsrichtung. Ähnlich wie beim Lastfall Innendruck hat das eine entgegengesetzte Ovalisierung des Stutzenrandes zur Folge, während sich das Grundrohr infolge des Festigkeitsverlustes verbiegt.

Die höchsten Spannungswerte treten für diesen Lastfall im Querschnitt der Verzweigung an der Innenseite auf. Die Maxima liegen im unteren Bereich der Durchdringung und verschieben sich bei dickwandigen Rohrverzweigungen in Stutzenrichtung. Die ermittelten Formfaktoren beziehen sich auf die Nennspannung nach Gl. (5).

$$\sigma_{\text{nenn}} = 4F/\pi[(D_G + S_1)^2 - (D_G - S_1)^2] \quad (5)$$

(F Kraft).

Die angreifenden Zugspannungen sowie die infolge der Stutzenovalisierung bewirkte Stauchung führen zu relativ großen Spannungserhöhungen. Bedingt durch die unterschiedlichen Abmessungsverhältnisse der Abzweige ist bei den Ergebnissen eine relativ breite Streuung festzustellen; sie liegen aber insgesamt im erwarteten Bereich.

Die Formfaktoren steigen allgemein mit dem Durchmesser Verhältnis an, was mit der Ausschnittovalisierung erklärt werden kann. Eine Ausnahme bildet die dickwandige Rohrverzweigung Rohr 5; hier ist offensichtlich die versteifende Wirkung des Stutzens so groß, daß die Spannungserhöhung gering ausfällt (Tabelle 4).

Tabelle 4. Spannungsmaxima bei statischer Belastung

Längskraft		Quermoment		Längsmoment	
$\sigma_{v\text{max}}$ N/mm ²	α_{FEM}	$\sigma_{v\text{max}}$ N/mm ²	α_{FEM}	$\sigma_{v\text{max}}$ N/mm ²	α_{FEM}
(1) 10,3	3,24	13,2	1,03	37,7	2,93
(2) 1859,9	4,68	$2,98 \cdot 10^4$	1,48	$7,1 \cdot 10^4$	3,53
(3) 20,9	6,57	21,8	1,70	65,7	5,11
(4) 1,2	3,02	1,8	1,04	3,6	2,10
(5) 0,3	1,88	0,8	1,06	1,1	1,55
(6) 39,9	2,38	382,8	1,03	688,8	1,86

4.4 Belastung durch Biegemomente

Beim Angriff eines Biegemoments am Grundrohr parallel zur Stutzenachse wird die Rohrverzweigung relativ gering verformt. Die Verbiegung des Rohres in der x_1, x_2 -

Ebene hat nur eine leichte Ovalisierung des Stutzenrandes zur Folge. Die Spannungserhöhungen sind für diesen Lastfall ebenfalls gering. Die maximalen Spannungen treten im Rohrquerschnitt auf, die Extremwerte sind dabei weit in Richtung Grundrohr verschoben. Hohe Spannungswerte sind am Ende des Übergangsradius auf der Innenseite sowie im Grundrohr bei etwa $x_3 = 0$ auf der Außenseite der Verzweigung feststellbar.

Bei Angriff eines Biegemoments am Grundrohr senkrecht zur Stutzenachse kommt es zu einer deutlichen Biegung des Rohres um seine Längsachse, während sich der Abzweig allgemein kaum verformt. Die maximalen Spannungen treten bei den dünnwandigen Abzweigen an der Innenseite im Querschnitt auf. Die Spannungsspitzen sind hier vor allem mit der Verformung des Ausschnitts zu erklären. Bei dickwandigen Rohren überwiegt offensichtlich der Einfluß der Grundrohrbiegung; hier liegen die Spannungsmaxima in der Längsschnittebene der Durchdringung außen.

Die durch Angriff eines Quermoments bewirkten Spannungserhöhungen sind deutlich größer als bei Belastung durch ein Biegemoment längs der Stutzenachse. Dabei ist offensichtlich die Steifigkeit der Rohrverzweigung von wesentlichem Einfluß. Bei kleinen Durchmesser Verhältnissen bzw. großen Wanddicken sind die ermittelten Spannungen geringer.

Die Bezugsspannungen zur Berechnung der Spannungserhöhungen bei Momentenbelastung (Tabelle 4) wurden mit Gl. (6) bestimmt.

$$\sigma_{\text{nenn}} = 32M(D_G + S_1)/\pi[(D_G + S_1)^4 - (D_G - S_1)^4] \quad (6)$$

(M Moment).

Die berechneten Werte weisen eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung mit den in [22] beschriebenen Ergebnissen auf.

5 Zusammenfassung

Trotz des hohen numerischen Aufwands zeigt sich, daß die Beanspruchungsanalyse von Rohrverzweigungen mit der FEM eine Alternative zu den bisher angewandten Berechnungsmethoden ist. Als besonderer Vorteil gilt, daß prinzipiell beliebige Geometrien, Abmessungsverhältnisse und Belastungsgrößen berechenbar sind. Um möglichst genaue Aussagen über Spannungs- und Verformungsverhalten der Abzweige treffen zu können, sind zur Modellierung Vollkörper Elemente zu verwenden. Da die Spannungsspitzen relativ schnell abklingen, läßt sich die mehrschichtige Modellierung auf den unmittelbaren Bereich der Rohrdurchdringung begrenzen. Die Längen von Rohr und Stutzen beeinflussen die berechneten Spannungserhöhungen wesentlich; für den Aufbau des FE-Modells wurden daher Richtwerte abgeleitet.

Bei der Belastung durch Innendruck stimmen die Berechnungsergebnisse gut mit den aus der Literatur bekannten Resultaten überein. Für die Beanspruchung des Grundrohres durch äußere Kräfte liegen bisher nur wenige Vergleichsgrößen vor, daher kann hier vor allem eine qualitative Übereinstimmung festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch, daß die Rohrleitungsreaktionen in ihrer Wirkung auf die Spannungskonzentrationen nicht vernachlässigbar sind.

Wegen der geringen Anzahl von nur sechs berechneten Rohrverzweigungen läßt sich noch keine allgemeingültige

Abhängigkeit des Belastungszustands von den Geometrieparametern ableiten. Um solche Aussagen treffen zu können, sind gezielte Berechnungen mit variierten Abmessungsverhältnissen D_{ST}/D_G , D_G/S_1 , S_1/S_2 und r_m/D_G notwendig. Zu berücksichtigen sind außerdem unterschiedliche Lagerungsbedingungen sowie verschiedene Formen des Durchdringungsbereiches.

Der vorgestellte Lösungsweg bietet sich für eine solche systematische Untersuchung an. Mit dem entwickelten Datengenerator lassen sich die Berechnungsmodelle einfach aufbauen. Durch Superposition der Grundlastfälle können reale Belastungsgrößen berechnet werden.

Wünschenswert wäre eine experimentelle Verifikation der berechneten Ergebnisse. Voraussetzung für praktische Konsequenzen zu Dimensionierung und Lebensdauerabschätzung sind weiterhin möglichst genaue Angaben über die aus den Rohrleitungssystemen herrührenden Kraftwirkungen.

Literatur

- AD-Merkblatt B9: Ausschnitte in Zylindern, Kegeln und Kugeln unter innerem Überdruck. Verein. Techn. Überwach.ver., Essen 1986
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sect. VIII, Div. 1 und 2. ASME, New York 1986
- ANSI-Code for Pressure Piping B31.1. Amer. Nat. Stand. Inst., New York 1977
- Winn, L.: Berechnung von Behältern unter statischem Innendruck. Konstruktion 15 (1963) H. 7, S. 263–270
- Rodabaugh, E. C.: A Review of Area Replacement Rules for Pipe Connections in Pressure Vessels and Piping. Weld. Res. Council., Bull. 335. New York 1988
- Reidelbach, W.: Der Spannungszustand im Übergangsbereich einer rechtwinkligen Rohrabzweigung. Ing.-Arch. 30 (1961) H. 5, S. 293–316
- Strohmeier, K.: Spannungen im Bereich von radialen zylindrischen Stützen in Zylinderschalen. Konstruktion 25 (1973) H. 3, S. 84–93
- Bijlaard, P. P.: Additional Data on Stresses in Cylindrical Shells under Local Loading. Weld. Res. Council., Bull. 50. New York 1959
- Wichmann, K. R.; Hopper, A. G.; Mershon, J. L.: Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells Due to External Loadings. Weld. Res. Council., Bull. 107. New York 1965
- Mershon, J. L. u. a.: Local Stresses in Cylindrical Shells Due to External Loadings on Nozzles – Suppl. to WRC Bull. No. 107. Weld. Res. Council., Bull. 297. New York 1984
- TGL 22160/01 bis /06: Rohrleitungen aus Stahl, Festigkeitsberechnungen, Allgemeine Berechnungsgrundlagen (1984)
- Kupfer, W.: Ein Beitrag zur Ermittlung der elastischen Spannungskonzentration in der Umgebung von radialen Rohrstützen an zylindrischen stählernen Behältern. Diss. TH Leipzig 1977
- Kupfer, W.: Elastizitätstheoretische Analyse von Zylinderschalen mit radialem Stützen. Diss. B TH Leipzig 1989
- Rost, M.: Zur Beanspruchung von senkrechten Abzweigungen durch Innendruck und äußere Kräfte und Momente. Diss. Univ. Stuttgart 1976
- BS 5500: Unfired Fusion Welded Pressure Vessels. Brit. Stand. Inst., London 1982
- Monschau, H. G.: Untersuchung des räumlichen Verformungsverhaltens einer Rohrdurchdringung. Dipl.-arb. Berg. Univ. GH Wuppertal 1989
- Weese, W.: Spannungsberechnung von Rohrverzweigungen. Masch.bautech. 39 (1990) H. 11, S. 497–499
- Universelles FEM-System COSAR. Nutzerhandbuch FEMCOS GmbH, Magdeburg 1990
- Hartig, J. O.: Teilaufgaben zur Berechnung von Rohrverzweigungen auf der Grundlage von Schalenmodellen. Dipl.-arb. TU Magdeburg 1990
- Bartel, P.: Beitrag zur Spannungsanalyse von Abzweigungsteilen für Verteilleitungen in Wasserkraftanlagen infolge Innendruckbelastung. Diss. TH Zwickau 1990
- Theilig, H.: Dreidimensionale Analyse rechtwinkliger Rohrverzweigungen mit finiten Elementen. Masch.bautech. 33 (1984) H. 2, S. 69–73
- Weber, J.: Beanspruchung von Rohrverzweigungen. Diss. TU Magdeburg 1989
- Franzius, D.: Spannungserhöhungen an stützenverstärkten Ausschnitten von Kugel- und Zylinderschalen. TÜ 28 (1987) H. 5, S. 191–194
- Altenbach, J.; Gabbert, U.: COSAR – Ein bewährtes System für Forschung und Praxis. Techn. Mech. 11 (1990) H. 3, S. 125–137
- Fessler, H.; Lewin, B. H.: Stresses in Branched Pipes under Internal Pressure. Instn. mech. Eng. Proc. 176 (1962) H. 29, S. 771–788

Buchbesprechungen

Klingenberg, H.: Automobil-Meßtechnik. Teil 1: Akustik. 2. Aufl. Berlin: Springer 1991. 264 S., 232 Abb. Geb. DM 98,–.

Umweltschutz, Energiesparen und Sicherheit im Straßenverkehr stellen an die Eigenschaften eines Automobils ständig wachsende Anforderungen. Beim Lösen der daraus resultierenden Aufgaben in Forschung und Entwicklung treten meßtechnische Probleme auf, die sich mit herkömmlichen Verfahren und handelsüblichen Geräten oft nicht lösen lassen. Die Meßtechnik in der Kraftfahrzeugentwicklung ist daher zu einem eigenständigen Fachgebiet geworden, in dem Verfahren und Geräte weiterentwickelt oder neu konzipiert werden.

Die Meßtechnik der höherfrequenten Schwingungen und Geräusche ist ein besonders wichtiges Teilgebiet. Sie erfordert hochentwickelte Verfahren der Meßwerterfassung und -verarbei-

tung, neuartige Ansätze in der rechnerischen Modellbildung sowie eine leistungsfähige numerische Rechentechnik in Hard- und Software. Außerdem ist gesetzlichen Regelungen und genormten Abnahmeverfahren Rechnung zu tragen.

Dem Verfasser ist vorzüglich gelungen, dieses neuartige, anwendungsnahe und methodisch vielseitige Gebiet verständlich und dennoch auf sauberer wissenschaftlicher Basis darzustellen. Wünschenswert wäre allerdings ein stärkeres Eingehen auf die meßtechnischen Voraussetzungen numerischen Modellrechnungen, die heute zunehmend Versuche ersetzen oder reduzieren. In dieser Richtung bleiben wichtige Fragen offen. Doch die nach recht kurzer Zeit erschienene zweite, überarbeitete Auflage belegt, daß das Buch von der Fachwelt geschätzt wird.

D. Radaj