

# Störfallrelevante Leckagen abschätzen

Neues Verfahren simuliert Flanschverhalten unter Betriebsbedingungen

Sonderdruck aus der Zeitschrift  
Verfahrenstechnik · Sonderausgabe 2002

GOTTFRIED HILSCHER

**Flanschverbindungen im Rohrleitungs- und Anlagenbau kommt für die Betriebssicherheit eine herausragende Bedeutung zu. Sie unterliegen der Störfallverordnung nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz, lassen sich aber noch immer nicht befriedigend berechnen. Mit einem neuen Simulationsverfahren auf der Basis von Finite-Elemente-Berechnungen gelingt es, für den konkreten Einsatz störfallrelevante Leckagen abzuschätzen. Die angestrebte, den realen Verhältnissen gerecht werdende Flanschberechnung ist damit einen bedeutenden Schritt näher gerückt. Vor diesem Hintergrund wird eine alternative Flanschverbindung mit einem O-Ring als Dichtelement vorgestellt und diskutiert.**

Flanschverbindungen sind unverzichtbare Komponenten in den Rohrleitungssystemen von Chemie- und Kraftwerksanlagen. Als lösbare Verbindungen von medienführenden Anlagenteilen sind sie derart ideal und gängig, dass sie nur noch in Spezialistenkreisen ein Gesprächsthema sind. Was sollte man auch diskutieren, wenn alles nach DIN festgelegt ist? Die Flanschgrößen zum Beispiel nach den Nennweiten der Lei-

tungen und den Drücken, die in ihnen herrschen. Das Material der einzusetzenden Flachdichtungen wird nach zahlreichen Betriebsparametern ausgewählt, zu denen neben der Temperatur des Mediums auch dessen spezifische Eigenschaften gehören. Sind die Schrauben vorschriftsmäßig angezogen, und ist die Rohrleitung vor unzulässigen äußeren Einflüssen gesichert, ist alles getan, um den Betrieb zu starten.

Regelmäßige Inspektionen der Leitungen und der Flansche sollen die laufende Betriebssicherheit gewährleisten, dienen der frühzeitigen Entdeckung bedrohlicher Leckagen. Vielfach werden die Dichtungen nach einer gewissen Betriebsstundenzahl vorsorglich erneuert und die Flansche auf ihre weitere Tauglichkeit hin überprüft. Gesetzliche Auflagen, betriebsinterne Vorschriften und viel Erfahrungswissen haben dazu geführt, dass Flanschverbindungen meist nur noch nach ungewöhnlichen Leckagen oder Störfällen beraten werden. Dichtungshersteller melden sich vornehmlich dann zu Wort, wenn sie mit Neuentwicklungen alte Problemfälle beherrschen können.

### Störungsursache undichte Flansche

Bei aller Sorgfalt im Umgang mit Flanschverbindungen ist ein bemerkenswert hoher Anteil der Störungen in Chemie- und Kraftwerksanlagen etwa auf undichte Flansche zurückzuführen. In einem Beitrag über die „Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit als Aufgabe des Chemieanlagenbaus“ [1] wird festgestellt, dass rund 20 Prozent aller Störfälle auf defekte Flanschverbindungen zurückzuführen sind. Es ist nicht wichtig, wie dieser Prozentsatz

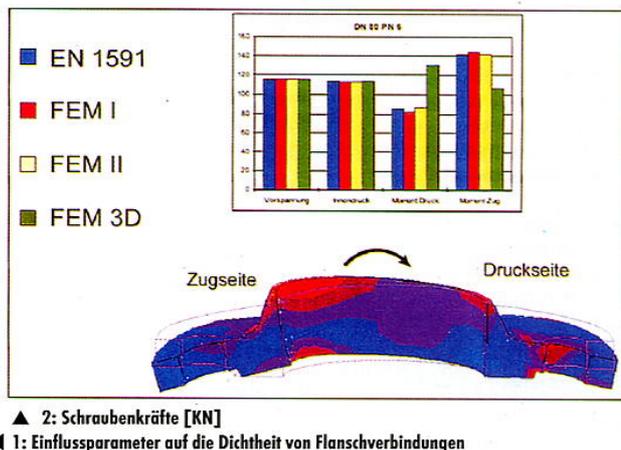
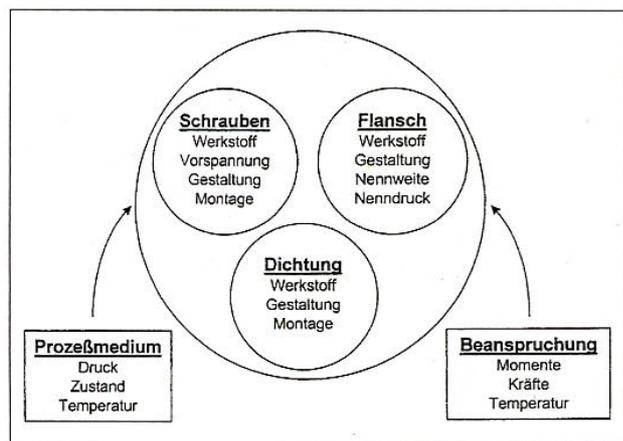
heute lautet. Flanschverbindungen und ihre Leckagen sind auf jeden Fall im Rahmen des BImSchG (Bundesimmissionsschutzgesetz) Gegenstand der Störfallverordnung und damit auch eine Angelegenheit des Umweltbundesamtes. In dessen Handbuch „Störfälle“ findet sich ein Unfallbericht aus dem Jahre 1969. Er beschreibt ein symptomatisches Beispiel für das Versagen einer Flanschverbindung. Stichworte daraus:

Störfallereignis: Explosion in einer Chemiefabrik  
Produkt: Ethylenoxid  
Ursache: fehlerhafte Flanschverbindung  
Betriebsvorgang: Prozess  
Auswirkungen: ein Toter, 40 Verletzte, erhebliche Sachschäden  
Zum Unfallhergang heißt es: „Eine undichte Flanschverbindung in der Ethylenoxidanlage ließ Ethylenoxid austreten. Das Gas explodierte und verursachte dadurch die Überhitzung einer Entwässerungskolonnen. Die Kolonne zerbarst anschließend und wurde dabei völlig zerstört.“

### Störfallrelevante Leckagen

Robert Kauer zitiert diesen Unfallbericht in seiner Arbeit „Störfallrelevante Leckagen an Flanschverbindungen“ [2]. Die Störfallverordnung, schreibt er einleitend, verpflichtet den Betreiber einer Anlage im Rahmen des Genehmigungsverfahrens gesetzlich zur Erstellung und Fortführung einer Sicherheitsanalyse. Dazu müssten denkbare Störfälle aufgezeichnet und sich daraus ergebende Schadensszenarien dargestellt werden.

Wie aber soll das gelingen, wenn die Voraussetzungen, unter denen ein Störfall eintreten kann, nicht zu beschreiben, ge-



schweige denn zu definieren sind? Wenn die zu betrachtenden Störfälle damit ihren Anfang nehmen, dass Leckagen aufgetreten sind, dann, so Kauer, liege es auf der Hand, dass Kenntnisse über die Abmessungen der möglichen Leckagestellen und die aus diesen austretenden Mengenströme von großer Bedeutung sind. Mangels genaueren Wissens über die mechanischen Zusammenhänge am Bauteil würden oft fiktive und möglichst große Leckquerschnitte bis hin zum Abriss einer ganzen Leitung unterstellt, um Gefährdungspotenziale abzuschätzen.

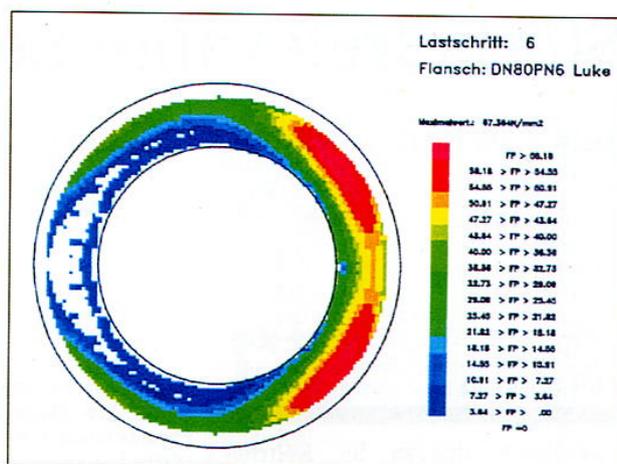
**Berechnungsgrundlagen mangelhaft**

Dr.-Ing. Robert Kauer, heute Project Director TTC (TÜV Technical Consultancy) beim TÜV Süddeutschland in München, betont, dass neben dem Festigkeitsverhalten einer Flanschverbindung auch deren Dichtverhalten durch zahlreiche Faktoren bestimmt werde (Bild 1). Von besonderer Bedeutung seien die Verformungseigenschaften der Verbindung unter Be- und Entlastung, ihre Dichtheitscharakteristika, Stabilitätseigenschaften sowie das Verhalten unter Temperatur und Dauerbeanspruchungen. Das Verformungsverhalten eines Flansches wird im Wesentlichen durch folgende Parameter beeinflusst: Geometrie des Flansches und der Dichtfläche, Höhe der Schraubenvorspannung und Elastizität der Schrauben (Bild 2); hinzu kommen Druck- und Temperatureinflüsse sowie Beanspruchungen durch die Rohrleitungsreaktionen auf diese und andere äußere Einflüsse.

Das Zusammenspiel all dieser Einflussfaktoren auf die Dichtleistung einer Flanschverbindung ist analytisch nur unbefriedigend zu erfassen. Ein Ausweis dafür ist die Tatsache, dass noch immer keine gültige Version der DIN 2505 „Statische Dichtungen für Flanschverbindungen“ verabschiedet wurde. In der letzten Fassung vom September 1995 heißt es: „Zweck dieser Norm ist es, die für die Berechnung von Flanschverbindungen mit Dichtungen relevanten Dichtungskennwerte zu definieren und die zu deren Ermittlung notwendigen Prüfverfahren festzulegen. Die Dichtungskennwerte sind für die fachgerechte Auslegung von Flanschverbindungen bestimmt. Sie erlauben jedoch nur eine Abschätzung des Verhaltens im Betriebszustand, insbesondere hinsichtlich des Leckageverhaltens.“ Die DIN 2505 endet mit dem Hinweis: „Wegen der großen Komplexität bei der Beanspruchung von Dichtungen in Flanschverbindungen und der auf nur wenigen Instituten und Firmen lastenden Entwicklungsarbeit werden zur abschließenden Beantwortung offener Fragen noch einige Jahre benötigt.“

Unter welchen Umständen im laufenden Betrieb einer Rohrleitung welche Leckagen an einer Flanschverbindung wahrscheinlich sind, war theoretisch bisher nicht zu ermitteln. Berechnungen, die von steifen Flanschen, statischen Lasten bei Raumtemperatur und von einer rotationssymmetrischen Beanspruchung der Dichtung ausgehen, sind angesichts der Fragen, die die Betriebspraxis nahe legt, nicht zielführend. Befriedigende Berechnungen, sagt Kauer, müssten

3: Dichtungspressung

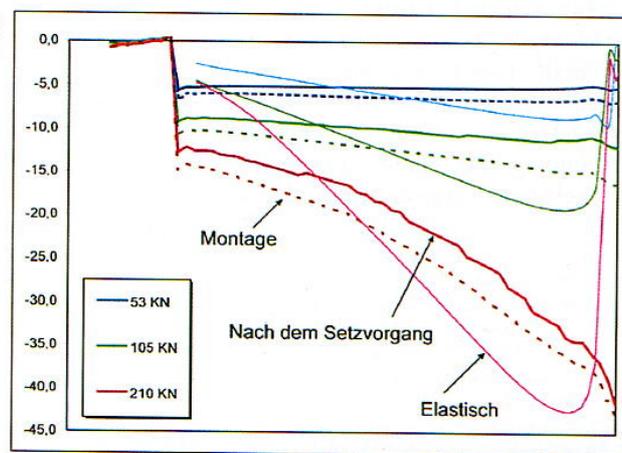


auch die Vorgaben berücksichtigen, die sich auf die zulässigen Leckageraten in Anlagen und an einzelnen Komponenten beziehen. Voraussetzung dafür seien ausreichende Kenntnisse über das Verformungsverhalten des Gesamtsystems Flansch – Dichtung – Schrauben. Das von ihm entwickelte Finite-Elemente-Dichtungsmodell leistet dazu einen wichtigen Beitrag. Nicht metallische Dichtungen werden dabei als viskos-elastisch-plastische Elemente behandelt, deren Verformung unter Last in einer Prüfapparatur ermittelt wird. Mit seinen Versuchen, dem Berechnungsverfahren und dem

Schrauben ebenfalls der Werkstoff, deren Gestaltung, ihre Montage und die Vorspannung; für die Dichtung wiederum der Werkstoff, ihre Gestaltung und die Montage.

Entscheidend für die Dichtheit einer Flanschverbindung ist die Verteilung der Flächenpressung an der Dichtung (Bilder 3 und 4). Sie dürfte selbst nach der umsichtigsten Flanschmontage nur theoretisch gleichmäßig sein, weder über den Umfang hinweg noch radial. Das bringen schon die Dichtwerkstoffe mit sich, die sich unter Be- und Entlastung und im Verlaufe der Zeit

4: Dichtungspressung [Mpa]



Simulationsmodell hat Robert Kauer viel Licht in die verborgenen Vorgänge im Dichtungsbereich der Flansche gebracht. Fazit: Die bisher übliche Abschätzung von Gefährdungspotenzialen ist unzureichend, für besonders kritische Anlagenteile vielleicht sogar unverträglich. – Diese Aussage ist zumindest im Blick auf die von Kauer erarbeiteten Analysewerkzeuge nicht verfehlt.

**Ursachen für Leckagen**

Die Dichtheit einer „anspruchsvollen“ Flanschverbindung hängt generell von der Qualität ihrer Bestandteile und davon ab, wie diese bei der Montage behandelt werden; hinzu kommen die zahlreichen Einflüsse, die der Anlagenbetrieb mit sich bringt. Für den Flansch sind kennzeichnend die Nennweite, der Nenndruck, seine Gestaltung und der Werkstoff; für die

nie linear verformen. Bereits Minuten oder Stunden nach der Montage fängt die Dichtung an, sich zu setzen, zu kriechen. Dadurch wiederum verändert sich – bezogen auf die Dichtfläche – ihre Dicke mehr oder weniger ungleichmäßig. Das hat einen allgemeinen und partiell unterschiedlichen Abbau der Flächenpressung (Relaxation) zur Folge (Bild 5). Eine richtig gewählte und bemessene Dichtung toleriert nicht nur diese Vorgänge, sondern eine Zeit lang auch die unterschiedlichsten „Störgrößen“, die der reguläre und erst recht ein gestörter Anlagenbetrieb mit sich bringt. Selbst wenn im Einzelnen alles vorhersehbar wäre, das zufällige zeitliche Zusammentreffen bestimmter Vorgänge entzieht sich jedem soliden Kalkül.

Von geringen diffusen Dichtungsverlusten abgesehen, die aus der Betriebs-

erfahrung bekannt sein sollten und hingenommen werden müssen, entsteht irgendwann an irgendeiner Stelle der Dichtung ein Leckagespalt. Auch das ist normal, man sollte ihn nur möglichst frühzeitig entdecken. Noch besser wäre es – im Sinne einer vorbeugenden Instandhaltung – , wenn sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens „störfallrelevanter“ Spaltbildungen statistisch und möglichst auch auf konkrete Situationen bezogen vorhersagen ließe. Robert Kauer weist dazu einen praktikablen Weg. Wegweisend, um im Bild zu bleiben, sind die Ergebnisse seiner Computersimulationen auch deshalb, weil sie weitgehend zufrieden stellend mit entsprechenden praktischen Versuchen übereinstimmen. Ein Rezeptbuch zur Störfallprävention liegt damit freilich nicht vor.

**O-Ringe als Alternative zur Flachdichtung**

Der Autor dieses Beitrags ist auf Dr.-Ing. Robert Kauer und seine Studien aufmerksam geworden, weil er seit vielen Jahren die allmähliche Verbreitung einer anderen Flanschdichtung als der flachen verfolgt. Wäre diese Standard, so seine Vermutung, dürfte den Kauerschen Erkenntnissen weit hin der Gegenstand fehlen, auf den sie anzuwenden sind. Dass Flanschverbindungen Kummer bereiten können und ihr Versagen teuer zu stehen kommen kann, liegt nicht an den Eigenschaften der Flachdichtungen „an sich“, vielmehr daran, wie diese im Flansch platziert werden müssen: nämlich im Krafthauptschluss der Rohrverbindung. Damit bekommt die Dichtung sozusagen alle Veränderungen im Leitungssystem mit. Sie muss Biegespannungen aus Formänderungen der Flanschverbindung und temperaturbedingte Spannungen aufnehmen, Schwingungen weiterleiten und zuweilen regelrechte Druckstöße parieren. Damit nicht genug. Das flexible und oft stark mechanisch beanspruchte Dichtelement kommt an seinem inneren Rand auch noch direkt mit dem geförderten Medium in Berührung. Selbst wenn sein Material gut auf die Eigenschaften des Fördermediums abgestimmt ist, durch den Kontakt mit ihm ist es stets einer gewissen Abnutzung ausgesetzt.

Was geschieht, wenn man die Flanschdichtung aus dem Kraftfluss des Leitungstranges herausnimmt? Vieles änderte sich. Die Schwachstelle im System, die von so

**Flanschverbindungen – ein grundsätzlicher Vergleich**

Bei den üblichen Flanschen mit Flachdichtungen liegt das Dichtelement stets im Krafthauptschluss (KHS) der Rohrverbindung. Die Unwägbarkeiten und Komplikationen, die aus dieser Tatsache resultieren können, verdeutlicht die in diesem Artikel reflektierte Doktorarbeit „Störfallrelevante Leckagen an Flanschverbindungen“ von Robert Kauer. Flanschverbindungen mit Kraftnebenschluss (KNS) kommen häufig dann zum Einsatz, wenn hohe Biegemomente und transiente Belastungen wie Vibrationen und Druckstöße zu erwarten sind. Mit dieser Feststellung ist im Mai 2001 auf dem XII. Dichtungskolloquium der Fachhochschule Münster ein Referat über die Auslegung von Flanschverbindungen mit KNS eingeleitet worden. Für den Inhalt zeichneten verantwortlich: Dr.-Ing. Jaroslav Bartonicek, Gemeinschafts-Kernkraftwerk Neckar GmbH; Dipl.-Ing. Rolf Hahn, Dr.-Ing. Hans Kockelmann und Prof. Dr.-Ing. Eberhard Roos, alle Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), Universität Stuttgart. Als Hauptvorteile von KNS-Verbindungen wurden herausgestellt:

- hohe Steifigkeit bzw. begrenzte Verformung der Flansche,
- keine Änderung der Dichtungspressung mit äußeren Zusatzlasten,
- definierte Dicke der Dichtung nach der Montage.

Den behandelten Auslegungskriterien sind zwei KNS-Flanschtypen zugrunde gelegt worden: a) Dichting in einer Nut mit rechteckigem Querschnitt, eingedreht in eines der beiden Flanschblätter; b) Dichting in einem Distanzring zwischen den Flanschblättern, der im KHS liegt. In beiden Fällen ist der KNS-Zustand erreicht, wenn es zur sog. Blocklage gekommen ist, wenn beide Flanschblätter direkt (a) oder indirekt via Distanzring (b) Kontakt miteinander haben. Dann ist die Dichtung auf Nuttiefe gestaucht und horizontal (Nutbreite) „breit gequetscht“.

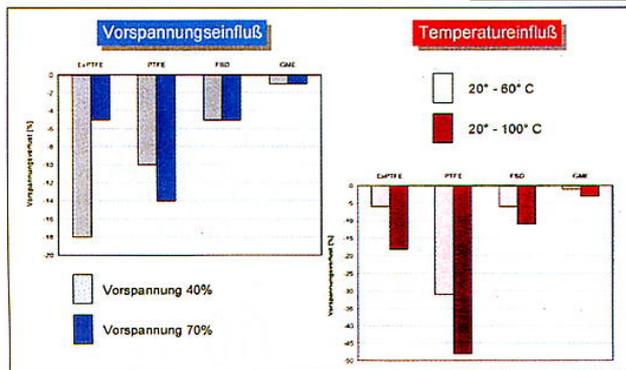
Eine geeignete Wahl und Abstimmung der geometrischen Abmessungen von Dichtung und Nut vorausgesetzt, sind für die Bemessung dieser Art. Flansch-

abdichtung drei Kennwerte zu ermitteln und zu beachten:

- Mindestpressung im Einbauzustand für das Erreichen des Kraftnebenschlusses
- abdichtbarer Betriebsdruck für die angestrebte Dichtheitsklasse
- Relaxation der Dichtungsflächenpressung und deren Auswirkung auf die Abdichtungseigenschaften (der Relaxationsfaktor ist das Verhältnis von verbleibender Dichtungspressung und ursprünlicher Pressung).

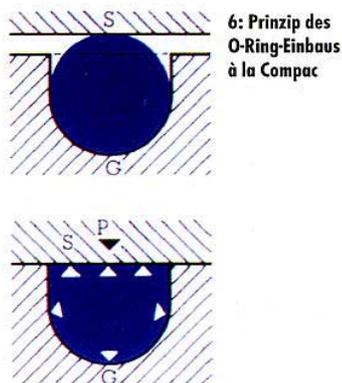
Neben der Nuttiefe habe vor allem das radiale Spiel für die Dichtung große Bedeutung. Bei idealen geometrischen Bedingungen, so die Autoren weiter, nimmt die Leckagerate mit steigender Pressung und Verformung der Dichtung ab. Die elastische Rückfederung der Dichtung bei Entlastung und Verlassen des KNS-Zustandes müsse bei Störfallbetrachtungen, beispielsweise Lösen der Blocklage als Folge von Druckstößen, beachtet werden. Das alles ist plausibel, denn die Dichtwirkung eines O-Ringes beruht auf der axialen oder radialen Verformung seines Querschnittes im eingebauten Zustand. Die dadurch hervorgerufene Reaktionskraft des O-Ringes ergibt die für die Abdichtung erforderliche Anpresskraft.

Soweit die Erklärung der Funktionsweise jeder statischen O-Ring-Dichtung. Die Elastizität des Dichtungsmaterials ist die Ursache für das Dichtvermögen und ist maßgebend für die Nutgeometrie. Anders dagegen – und das steht in keinem Handbuch für den O-Ring-Einbau – beim Compac-Flansch. Bei ihm wird der Ringquerschnitt der Dichtung bis zum Erreichen der Blocklage gezwungen, zu kontrahieren. Das Material wird praktisch nur komprimiert, kaum deformiert. Daraus resultiert auch hier die für die Abdichtung erforderliche Anpresskraft. Das ist ein grundlegend anderes Verhalten als das bekannte, zu dem der altbekannte O-Ring hier gezwungen wird. Dessen Dichtwirkung beruht nicht, wie bewiesen, ausschließlich auf seinen elastischen Eigenschaften. Bei besonders anspruchsvollen KNS-Verbindungen dürfte sich selbstverständlich auch für den Compac-Flansch die Ermittlung der drei genannten Kennwerte empfehlen.



5: Kriech-Relaxation

vielen äußeren Einwirkungen in ihrer Funktion beeinträchtigt werden kann, wäre eliminiert. Mit oft aufwändigen Konstruktionen lassen sich Flanschverbindungen mit solch einem Kraftnebenschluss verwirklichen. Aber es gibt auch eine einfache Alternative, ebenfalls ohne Flachdichtung. Diese kann man schließlich nicht anders als bekannt einbauen und zwischen den Flanschblättern zusammenpressen. Aber der Flansch mit alternativer Dichtung ist längst erfunden. Compac heißt er. Diese Flanschverbindung wird von einem einzigen simplen O-Ring abgedichtet. Bestens, denn der liegt nicht im Krafthauptschluss



6: Prinzip des O-Ring-Einbaus à la Compac

der Leitung. Praktisch alles, was die Flachdichtung berührt, läuft geradezu um ihn herum, tangiert ihn bestenfalls peripher.

**Dichtung außerhalb des Kraft Hauptschlusses**

Ein Blick darauf, wie der O-Ring den Flanschspalt abdichtet, veranschaulicht diesen Sachverhalt. Der Ring wird in eine Nut eingelegt, die in ein Flanschblatt eingestochen wurde. Auf deren Querschnitt kommt es an. Er ist so bemessen, dass er dem Dichtring keinen Spielraum lässt, in dem er sich unter dem Anpressdruck elastisch verformen könnte. Bis zu einem gewissen Grad ragt der O-Ring über die Flanschhälfte hinaus. Das andere Flanschblatt ist glatt – ohne Nut. Wird es, wie üblich, durch Anziehen der Schrauben gegen das erste verspannt, bleibt dem O-Ring nichts anderes übrig, als vollständig in die Nut hinein zu kontrahieren; das Volumen, das vorher überstand, verschwindet in der Nut (Bild 6). Für den, der Gummi – und Elastomere generell – für inkompressibel hält, ist das unmöglich. Aber die Realität widerspricht dieser Ansicht. Auch Gummi ist kompressibel, wenngleich nur geringfügig. Natürlich habe auch Gummi eine Kompressibilität, schrieb Prof. Dr. W. Pechhold vom Institut für dynamische Materialprüfung (IdM) an der Universität

Ulm dem Autor vor einigen Jahren; sie liege in dem für Flüssigkeiten üblichen Bereich.

Beim Compac-Flansch, der von der Firma Albert Zimmermann & Söhne, Lenne-stadt, als Lizenznehmer der schweizerischen Innotech AG hergestellt wird, genügt die geringe Kompressibilität des O-Ring-Materials, um eine ungewöhnlich hohe Dichtleistung zu erreichen. Die derzeit angebotene und vom TÜV geprüfte Flanschreihe bestätigt das auch ganz augenfällig (Bild 7). Verglichen mit DIN-Flanschen für gleiche Nennweiten (DN 10 bis 200) und Nenndrücke (PN 6 bis 100) ist das Volumen (Gewicht) der Compac-Flansche wesentlich geringer; mit zunehmender Nennweite nimmt es relativ immer mehr ab – bis um rund 70 Prozent. Der Grund: Im Gegensatz zur Flachdichtung sind nicht mehr die Größe der Dichtfläche und die Flächenpressung ausschlaggebend für die Dichtleistung.

Das Wichtigste vor dem Hintergrund der praxisorientierten Studien von Robert Kauer ist die Tatsache, dass die O-Ring-Dichtung nicht im Kraft Hauptschluss der Rohrleitung liegt. Sie liegt auch fast völlig geschützt vor dem Medium im Flansch, denn der Ringspalt ist minimal, durch den dieses überhaupt an den Dichtring gelangen kann. Ob es „Störgrößen“ gibt, die die Dichtheit eines Compac-Flansches nennenswert beeinträchtigen können, wäre im Einzelfall festzustellen. Die Untersuchung einer Flanschverbindung à la Compac nach der Kauerschen Simulationsmethode steht noch aus.

Dort, wo bislang Compac-Flansche in größeren Mengen eingesetzt werden, hat es dem Vernehmen nach noch keine Betriebsstörungen gegeben, die auf Leckagen an ihnen zurückzuführen gewesen wären. Im übrigen eignet sich für diesen Flanschtyp der größte Teil aller Materialien, aus denen O-Ringe heute hergestellt werden. Hemmschwellen für Probeinstallationen sollten angesichts der unschwer erkennbaren wirtschaftlichen Vorteile, die die neue Flansch-



7: Beim Compac-Flansch genügt die geringe Kompressibilität des O-Ring-Materials, um eine ungewöhnlich hohe Dichtleistung zu erreichen

verbindung verspricht, leicht zu überwinden sein.

Um Kontakt mit dem Autor dieses Beitrages aufnehmen zu können, nutzen interessierte Leser die untenstehende Anschrift.

*Literaturhinweise*

- [1] Plötner, W.: VVB Chemieanlagen, Heft 1/1978
- [2] Kauer, R.: „Störfallrelevante Leckagen an Flanschverbindungen“, Promotionsarbeit Feb. 2000 am Lehrstuhl für Apparate- und Anlagenbau – Experimentelle Spannungsanalyse – der Technischen Universität München

Dipl.-Ing. G. Hilscher, Journalist, Oberfeld 25, 82418 Murnau, Tel.: 08841/49824