



Autoren: Prof. Dr.-Ing. Heinz K. Müller und Dr. Bernard S. Nau

Eine besondere Herausforderung an den Ingenieur ist eine sichere Abdichtung von Maschinen und Anlagen. Wenn es um den unerwünschten Austritt von Flüssigkeiten oder Gasen aus Maschinen, Aggregaten und Anlagen geht, wird die häufig unterschätzte Kunst des Abdichtens zum zentralen Thema.

www.fachwissen-dichtungstechnik.de befasst sich auf allen Ebenen mit dem Vermeiden oder mit der kontrollierten Eindämmung von Leckage. In 24 Fachkapiteln werden die physikalischen Grundlagen und die vielfältigen Techniken des Abdichtens in klarer Sprache und mit prägnanten Bildern beschrieben. **fachwissen-dichtungstechnik** liefert damit die notwendigen Informationen zu Gestaltung, Auswahl, Entwicklung und Betrieb von Dichtungen und Dichtsystemen.

Inhaltsverzeichnis der Fachkapitel

Allgemeine Grundlagen

1. Grundbegriffe der Dichtungstechnik
2. Polymerwerkstoffe
3. O-Ring: Theorie und Praxis
4. Fluidströmung im engen Dichtspalt

Abdichtung bewegter Maschinenteile

5. Hydraulikdichtungen
6. Pneumatikdichtungen
7. Abstreifer
8. Wellendichtringe ohne Überdruck
9. Wellendichtringe mit Überdruck
10. Fanglabyrinth-Dichtungen
11. Stopfbuchs-Packungen
12. Gleitringdichtungen: Grundlagen

13. Gleitringdichtungen: Gestaltung
14. Gleitringdichtungen: Werkstoffe
15. Kolbenringe für Motoren und Verdichter
16. Drosseldichtungen für Flüssigkeiten
17. Drosseldichtungen für Gase
18. Gewinde-Wellendichtungen
19. Zentrifugal-Wellendichtungen
20. Magnetflüssigkeits-Dichtungen
21. Membran- und Faltenbalgdichtungen

Abdichtung ruhender Maschinenteile

22. Flanschabdichtung: Grundlagen
23. Flanschdichtungen: Bauformen
24. Statische Dichtungen: Sonderbauformen

Sponsoren: www.fachwissen-dichtungstechnik.de wird unterstützt von

 ISGATEC [®] Dichten. Kleben. Polymer.	ISGATEC GmbH Am Exerzierplatz1A • 68167 Mannheim Tel:+49(0)621-7176888-0 • Fax:+49(0)621-7176888-8 info@isgatec.com • www.isgatec.com
 SEALWARE [®]	SEALWARE International Dichtungstechnik GmbH Feldbergstr.2 • 65555 Limburg Tel:+49(0)6431-9585-0 • Fax:+49(0)6431-9585-25 info@sealware.de • www.sealware.de
 VTH VERBAND TECHNISCHER HANDEL Fachgruppe Dichtungstechnik	VTH Verband Technischer Handel e.V. Prinz-Georg-Straße 106 • 40479 Düsseldorf Tel:+49(0)211-445322 • Fax:+49(0)211-460919 info@vth-verband.de • www.vth-verband.de
 Xpress seals Dichtungen für Hydraulik	xpress seals GmbH Elbring 14 • 22880 Wedel Tel:+49(0)4103 92828-10 • Fax:+49(0)4103 92828-69 michael.mueller@xpress-seals.com • www.xpress-seals.com



24

Prof.Dr.-Ing. Heinz K. Müller · Dr. Bernard S. Nau

Statische Dichtungen: Sonderbauformen

Übersicht. Flüssigdichtungen und Dichtmembranen. Statische Dichtungen im Automobilbau. Abdichtung von Bauverglasungen. Elastomer-Formdichtungen in der Bautechnik. Abdichtung von Wasserversorgungsleitungen. Rohrverbindungen und Druckschläuche. Abdichtung von elektrischen Durchleitungen. Abdichtung von Dosen, Gläsern und Flaschen.

24.1 EINFÜHRUNG

In diesem letzten Kapitel werden noch einige der weniger bekannten statischen Dichtungen behandelt, deren Bauweisen und Anwendungsgebiete ziemlich heterogen sind. Dazu gehören Membranen, Dichtpasten und die vielen Arten von Flüssigdichtungen, Getriebe-, Tür- und Fensterdichtungen von Automobilen, Dichtelemente für Fugen und Verglasungen in der Bautechnik, Hochdruck-Rohrverbindungen, Dicht- und Druckhüllen für Hydraulikschläuche und Offshore-Ölleitungen, die Durchführung elektrischer Leiter durch Glas und nicht zuletzt diverse Dichtungen für Behälter der Lebensmittel- und Medizintechnik. Aus dieser großen Vielfalt werden nun beispielhaft einige Aufgaben und ihre Lösungen besprochen.

24.2 FLÜSSIGDICHTUNGEN UND DICHTMEMBRANEN

Terminologie

Die Begriffe „Dichtungsmasse“, „Weichdichtungsmasse“, „Dichtmittel“, „Dichtstoff“, „Dichtungskitt“, „Flüssigdichtung“, „Dichtpaste“, „Dichtlack“, (englisch z.B.: ‘sealant’, ‘putty’, ‘mastic’, ‘caulk’ und ‘paint’) sind im praktischen Gebrauch meist nicht klar unterscheidbar. Eine Substanz, die zur Verhinderung von Leckagen eingesetzt wird, kann man allgemein als Dichtmittel bezeichnen. Die technische Bezeichnung „Flüssigdichtung“ bezieht sich heute aber im engeren Sinn auf Flüssigkeiten oder Pasten, die beim Einsatz vor Ort – meist durch eine chemische Reaktion – zu einem festen, oft elastomerartigen Dichtelement aushärten. Solche Substanzen kann man auch als chemisch reaktive Dichtmittel bezeichnen. Außerdem gibt es abdichtende Beschichtungen für Holz, Beton und Mauerwerk, die häufig durch Verdunsten eines



Lösungsmittels aushärten und außer zur Abdichtung oft noch dekorativen Zwecken dienen. Es gibt in der Natur vorkommende bituminöse Dichtpasten, dickflüssige Kohlenwasserstoffmischungen, die als Teer und Asphalt unter anderem Straßenbeläge binden und abdichten. Sie härten infolge der erheblichen Zunahme ihrer Viskosität beim Abkühlen. Nach Worten der Bibel wurde Bitumen bereits beim Turmbau zu Babel verwendet.

Zur Abdichtung von Fensterglas in Holzrahmen wurde lange Zeit der traditionell aus Schlämme, Kreide und Leinöl hergestellte Dichtungskitt verwendet. Weil dieser aber mit der Zeit hart wird, verwendet man bei modernen Metall- und Kunststoffen fast nur noch Elastomerdichtungen. Im Altertum wurde das Harz des im Mittelmeerraum wachsenden Pistazienbaums *Pistacia lentiscus* als *Mastix* zur Herstellung von Firnis und Lack verwendet, übrigens auch als Kaugummi! Im Bootsbau verwendet man zur Abdichtung der Fugen zwischen Holzplanen einen besonderen Dichtkitt (engl. *caulk*). Auch das sogenannte *oakum* ist eine traditionelle Dichtmasse, bestehend aus teerimprägnierten Hanffasern. Diese Dichtmittel traten in den Hintergrund, als im Schiffsbau fugenlose Rumpfe aufkamen und für den industriellen und bautechnischen Bedarf beständigere Dichtmassen zur Verfügung standen.

Dichtmembranen

Dichtmembranen sind zweidimensional ausgedehnte Dichtungen, die entweder aus vulkanisierten Gummiformteilen bestehen oder vor Ort mittels einer Dichtmasse hergestellt werden. Sie werden deshalb hier zusammen mit den anderen Dichtstoffen behandelt. Sie werden in der Bautechnik verwendet um zu verhindern, daß Wasser oder Feuchtigkeit in Beton oder Mauerwerk eindringt, Bild 1. Man unterscheidet zwei Arten, zum einen ca. 1,5 mm dicke, vulkanisierte Polymerfolien, die mit der Unterlage verklebt werden, zum anderen flüssige oder pastenförmige Dichtmittel, die vor Ort durch Verdunsten eines Lösungsmittels aushärten. Derartige Dichtmembranen werden vielfältig angewendet, zur Abdichtung von Böden, Wänden, Fußwegen, Brückenplatten, Tunnelwänden und Teichen. Normalerweise sind sie nicht widerstandsfähig gegen abrasiven Verschleiß. Gegebenenfalls werden sie zusätzlich mit einem ver-

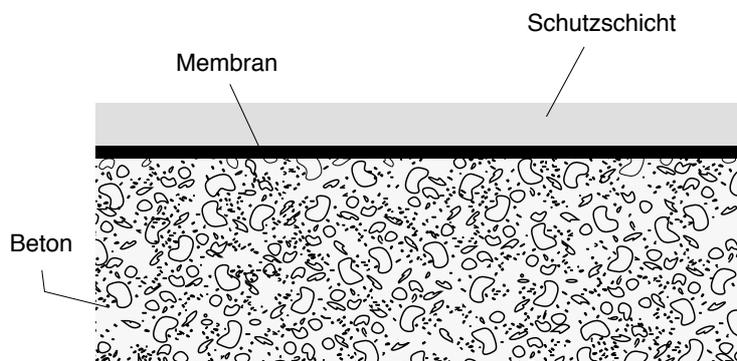


Bild 1 Membrandichtung auf Betondecke mit Schutzschicht



schleißfesten Material beschichtet. Dichtmembranen bestehen typischerweise aus ca. 1 m breiten Neoprene-Bahnen die vor Ort verklebt werden. Wenn im Betrieb Leckage entsteht, ist es mitunter schwierig, die Leckstelle zu finden, weil die Leckflüssigkeit zwischen der Membran und einer nicht fehlerfrei mit ihr verbundenen Unterlage beträchtliche Distanzen überwinden kann, bevor sie zutage tritt. Neoprenfolien sind in mehreren Compounds verfügbar, die sich im Basispolymer unterscheiden sowie durch die Art der Vulkanisation, die Füll- und Streckmittel, durch Zusatzstoffe und die Art der Verstärkung. Eine aus Heißbitumen und Filz hergestellte traditionelle Dichtmembran kann wegen ihrer geringen Nachgiebigkeit thermische Dehnungen schlecht ausgleichen und wird überdies mit der Zeit brüchig. Zudem ist es schwierig, sie instandzuhalten, wenn sie zugedeckt ist.

Eine bessere und zuverlässigere Alternative ist, vor Ort mittels einer kalt aufgetragenen Gummimasse eine Membran herzustellen. Dazu werden beispielsweise lösungsmittelhaltige Gummi-Asphalt-Mischungen, Urethan-Bitumen und Polysulfid-Bitumen eingesetzt. Die Dichtmassen werden mit Walzen, Kellen oder durch Spritzen aufgebracht. Sie haben im Vergleich zu den vorher besprochenen Lösungen einige Vorteile. Zum Beispiel ergibt sich eine gleichmäßige Verbindung mit dem Untergrund, auch wenn dieser beschädigt war. Damit wird das Eindringen von Wasser zwischen die Dichtschicht und den Untergrund verhindert. Überdies können solche Beschichtungen auch bei kompliziert geformten Oberflächen angewendet werden. Die Dichtschichten sind zwischen -50°C und etwa 80°C beständig und die Hersteller lassen Dehnungen bis 300% zu, bei einer Rückverformung von 85...90%.

Dichtmittel zur Fugenabdichtung

Große Baukörper dehnen sich bei Änderung der Umgebungstemperatur stark aus, beispielsweise infolge Sonneneinstrahlung. Die dabei auftretenden Relativbewegungen werden von abgedichteten Dehnfugen aufgenommen. Die Fugendichtungen werden für eine Änderung der Fugenbreite bis zu $\pm 25\%$ ausgelegt. Die chemischen Dichtmittel für Baukörperfugen und andere Spaltabdichtungen werden als Paste geliefert, die aus Kartuschen oder Pistolen direkt in die Fuge gepreßt wird, Bild 2. Verwendet werden Silikonelastomere oder Polysulfide die zu einer elastischen Dichtung aushärten.

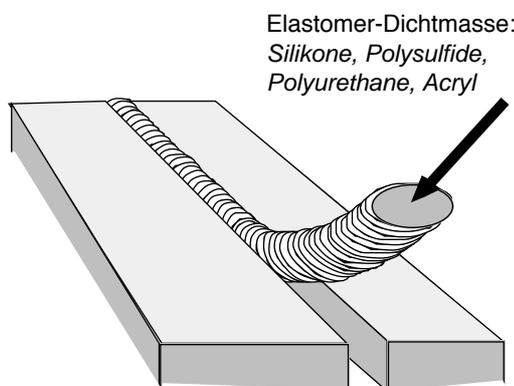


Bild 2 Einbringen eines flüssigen Dichtmittels in die Fuge zwischen Baukörpern



Silikondichtmassen werden in der Haustechnik und in der Industrie häufig verwendet. Ihr Nachteil ist, daß sie beim Aushärten Säuredämpfe abgeben, was zu Korrosionsproblemen führen kann. Polysulfide sind seit 1943 bekannt, als sie erstmals zur Abdichtung von Flugzeug-Kraftstofftanks eingesetzt wurden und man arbeitet mit ihnen bis heute im Flugzeugbau. Später fanden sie eine breite Anwendung als Fugendichtung in der Bautechnik. Sie sind von -50° bis zu $+130^{\circ}\text{C}$ einsetzbar. Andere Dichtstoffe für dieses Anwendungsfeld sind unter anderem gummiartige Thermoplaste auf der Basis von Polyurethan und Acryl.

Das zum Ausfüllen von Baufugen erforderliche beträchtliche Volumen wird durch Füllstoffe in den Fugendichtmitteln erreicht. Verwendet werden unter anderem Ruß, kohlen saure Kalke und Ton. Der pH-Wert von chemisch aktiven Füllstoffen kann den Härungsprozeß des Dichtmittels beeinflussen. Nach dem Aushärten muß das Dichtmittel fest an den abzudichtenden Fugenwänden haften und dabei nachgiebig bleiben. Als Folge thermischer Dehnung, Feuchtigkeitsaufnahme, anfänglichem Schrumpfen von Beton, Verschiebungen unter Windlasten und Setzen von Baukörpern muß die Dichtung im Betrieb Relativbewegungen der angrenzenden Bauteile von mehreren Millimetern zulassen. Einen Hinweis auf die zu erwartenden wärmebedingten Relativbewegungen geben die thermischen Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Baustoffe. Sie reichen von $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei Mauerwerk und Marmor über $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei Glas, $12 \dots 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei Stahl und Aluminium bis zu $50 \dots 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei Holz und gegossenen Acrylglas scheiben. Wichtig sind dabei die Abmessungen und die Orientierung der Baukörper, weil davon unter anderem die Zeitdauer bis zum Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustands abhängt. Zu beachten ist auch, daß bei gegebener Relativbewegung der Baukörper in der Dichtung eine um so größere Spannung entsteht, je enger die Dichtfuge ist. Man sollte deshalb sehr enge Dichtfugen tunlichst vermeiden.

Zur Verbesserung der Haftung, besonders an porösen Oberflächen des Baukörpers, können diese vor dem Einbringen der Dichtmasse vorbehandelt werden. Dazu werden unter anderem chlorierte Gummilösungen, Urethane, Silane und Epoxysulfide verwendet. Damit die Dichtmasse nicht zu weit in den Spalt einsinkt, wird darunter oft noch eine Stüttschicht vorgesehen, beispielsweise aus geschlossenporigem Polyethyleneschaum, Bild 3a. Dabei entsteht aber ein Problem, wenn die Stüttschicht sich fest mit der nachher darübergelegten Dichtung verbindet. Gewöhnlich bewegt sich die Stüttschicht zusammen mit einer der Spaltwände relativ zur anderen. Wenn nun die Dichtung an der Stüttschicht haftet, entstehen hohe Spannungsspitzen, Bild 3b. Die Dichtung kann sich dabei von der relativ bewegten Spaltwand ablösen und die Verbindung wird undicht. Man sollte also tunlichst Maßnahmen treffen, um das Verkleben der Dichtung mit der Stüttschicht zu verhindern, Bild 3c. Eine andere Lösung ist eine überlappende Verbindung, bei der die Dichtung eine Schubverformung erfährt, Bild 3d. Damit werden hohe Zug- oder Druckbeanspruchungen vermieden. Solche Dichtstellen sind jedoch wegen der komplizierteren Gestaltung der Fugen teurer und zudem schlecht zugänglich für das Einbringen der Dichtmasse und für Wartungsarbeiten. Andererseits sind sie aber gegen Beschädigung besser geschützt. Jedoch muß auch in diesem Fall ein Verkleben von Dichtmasse und Stüttschicht vermieden werden.

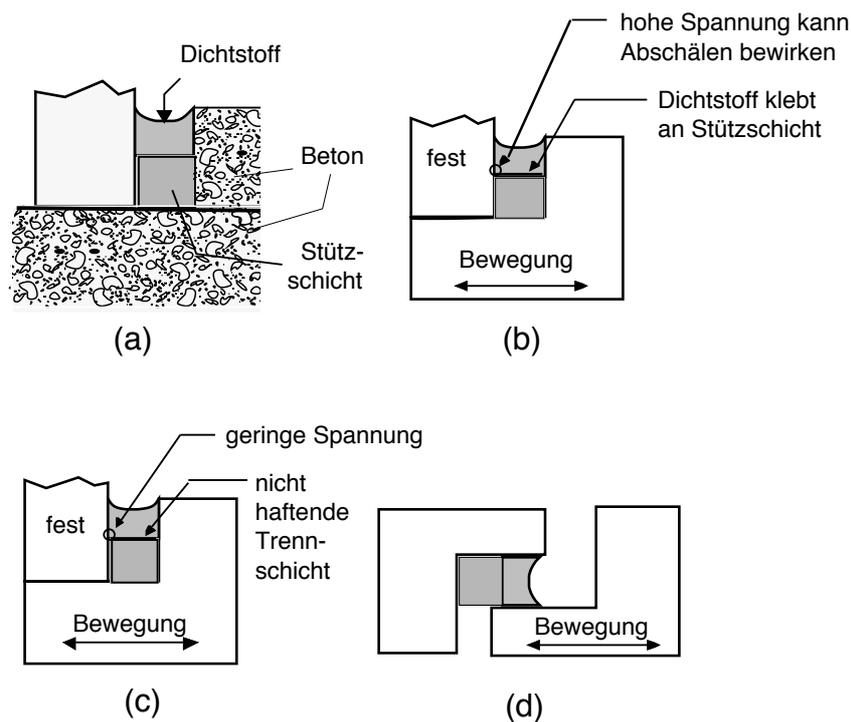


Bild 3 Beispiele zur Abdichtung von Baukörperfugen mit elastischen Dichtstoffen

Die höchsten Zugspannungen treten normalerweise am Übergang zwischen Baukörper und Dichtung auf, deshalb ist der Grad der Haftfähigkeit dort besonders wichtig. Entscheidend ist dabei das Kantenverhältnis der ausgehärteten Dichtung in der Fuge. Eine Finite Elemente Analyse zeigt, daß die lokale Spannung am Übergang um so größer ist, je größer die Dicke t der Dichtung im Verhältnis zur Breite w der Fuge ist, Bild 4. Dies ist die Folge der Inkompresibilität des Elastomers und des mit der Dicke t zunehmenden, deformierten Elastomervolumens. Die Dichtung sollte demgemäß möglichst dünn, mit anderen Worten, das Verhältnis t/w sollte möglichst klein sein.

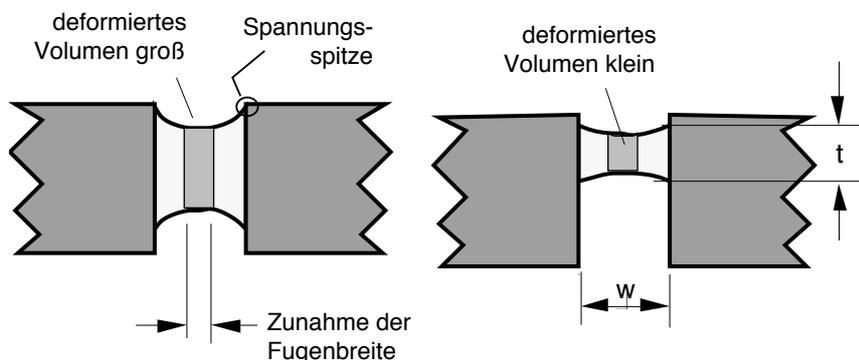


Bild 4 Einfluß der Fugenbreite auf die Spannungsänderung der Dichtung bei atmender Fuge



Abdichtung von Gewinden

Eine besondere Kategorie von Spaltdichtungen sind die Flüssigdichtungen zur Abdichtung und Drehsicherung von Gewinden. In der Regel werden dabei anaerob aushärtende Flüssigdichtungen verwendet, die im Gewindespalt einen polymeren Dichtkörper erzeugen. Sie widerstehen einem hohen Fluiddruck, jedoch ist ihre Wärmebeständigkeit gering. Weitere Einzelheiten der anaeroben Flüssigdichtstoffe werden im folgenden Abschnitt ausführlicher besprochen. Früher wurden Gewinde auch mit einem Öl-Füllstoffgemisch abgedichtet, das manchmal auch ein Lösungsmittel enthielt. Das hatte den Nachteil, daß beim Schrumpfen Leckagekanäle entstehen können und die Dichtung nicht aushärtet, wodurch nur eine geringe Druckdifferenz zulässig ist. Eine ganz andere Methode ist die Gewindeabdichtung mit Teflonband, das vor der Montage um das Bolzengewinde gewickelt wird. Teflonbänder werden häufig angewendet, auch bei gasförmigem Sauerstoff, bei dem organische Flüssigdichtungen nicht in Frage kommen. Ein besonderer Vorteil ist der große Temperaturbereich von PTFE. Ein ernstes Problem können aber abgescherte PTFE-Teilchen verursachen, wenn sie in das abgedichtete Fluidsystem gelangen und dort funktionswichtige Strömungsquerschnitte wie Düsen oder Ventilsitze blockieren.

Anaerob aushärtende Flüssigdichtungen

Die chemische Basis anaerob aushärtender Kleb- und Dichtstoffe sind spezielle Acrylate (Diacrylat, Di-Methacrylat, Methacrylatester). Diese Dichtstoffe werden durch eine nach der Montage einsetzende anaerobe chemische Reaktion aktiviert. Da in den Spalt zwischen den abzudichtenden Bauteilen kaum Luftsauerstoff gelangt, polymerisiert die Dichtflüssigkeit infolge der katalytischen Wirkung der Metalloberflächen zu einer fest haftenden Dichtung.

Bei einer vollflächigen Flanschabdichtung liegt die ganze Stirnfläche auf einem dünnen Dichtmittelfilm, der nach dem Aushärten eine sehr steife „Flachdichtung“ bildet. Dadurch wird sowohl das Stülpen der Flansche als auch ein Abfall der Schraubenvorspannung durch Setzen weitestgehend verhindert. Anfänglich benetzt die Dichtflüssigkeit die Oberflächen und dringt in die Rauheitsstrukturen ein, vorausgesetzt, daß die Oberflächenenergie der Dichtflüssigkeit *kleiner* ist als die Oberflächenenergie der spaltbildenden Bauteile. Typische anaerobe Flüssigdichtmittel haben eine Oberflächenenergie im Bereich 30...45 mN/m. Bei den im Maschinenbau verwendeten Bauteilen reichen die Oberflächenenergien von beispielsweise 18 mN/m bei PTFE, über 40...50 mN/m bei Thermoplasten, bis zu einigen Tausend mN/m bei Metallen. Sollen also Thermoplaste – z.B. Polypropylen und Polyethylen – anaerob verklebt bzw. abgedichtet werden, so ist zur Vergrößerung der Oberflächenenergie das Aufsprühen einer 'Grundierung' erforderlich. Selbstverständlich müssen die Oberflächen frei von Fett, Oxidschichten und anderen nichtmetallischen Schichten sein. Ein schneller Test ist das Aufbringen eines Tropfens des flüssigen Dichtmittels, um zu sehen, ob es auf der betreffenden Fläche spreitet. Die Polymerisation anaerober Dichtflüssigkeiten setzt die Anwesenheit von Kupferionen oder



Eisenionen voraus, deshalb sind Kohlenstoffstahl und Kupferlegierungen gut geeignete Oberflächen. Legierte Stähle, Aluminium, Nickel, Zink, Silber und Gold sind hingegen problematisch, ebenso eloxierte oder keramische Oberflächen. Solche Oberflächen erfordern die Vorbehandlung mit einem geeigneten Aktivator.

Neben der Abdichtwirkung ist die Klebewirkung eine oft erwünschte Eigenschaft der chemisch reagierenden Dichtmittel. Je nach Dichtflüssigkeit werden Zugfestigkeiten zwischen 4 und 12 MPa erreicht. Die Aushärtezeiten liegen zwischen 6 und 72 Stunden. Die dünnen Dichtschichten zeigen kein nennenswertes Setzen. Auch durch diese Eigenschaften unterscheiden sich Flüssigdichtungen von herkömmlichen statischen Dichtungen. Außer für Flansche eignen sich anaerobe Flüssigdichtungen auch zum Versiegeln von Haarrissen, porösen Teilen und Schweißnähten sowie zum Sichern, Befestigen und Dichten von Gewinden.

Ein wesentlicher Nachteil ist allerdings die geringe Wärmebelastbarkeit der Flüssigdichtungen, mit einer Obergrenze von 150 ... (200) °C. Die chemische Beständigkeit gegen abzudichtende Fluide ist im allgemeinen gut, sie muß aber bei kritischen Bedingungen überprüft werden.

Aufgedruckte Dichtungen

Von einer *bedruckten, aufgedruckten oder aufgespritzten* Dichtung spricht man, wenn eine chemisch reagierende Flüssigdichtung direkt auf die Dichtflächen aufgebracht wird und dort aushärtet. Das Dichtmittel kann von Hand, mit einer automatisch (Roboter-) geführten Düse oder im Siebdruckverfahren aufgetragen werden. Die Aushärtung kann vor der Montage erfolgen oder – bei anaerobem Aushärten – nach dem Zusammenfügen der Bauteile. Eine als Raupe, Streifen oder vollflächig aufgebrachte und vor der Montage ausgehärtete Dichtung bildet ein fest mit der Flanschfläche verbundenes Elastomerteil. Durch ein geschlossenes Herumführen der Raupe um die Schraubenlöcher werden die Durchbrüche sicher abgedichtet, Bild 5. Eine besonders nachgiebige Dichtung erhält man mit geschäumtem Silikongummi. Spezielle Dichtmittel (bestimmte Silikone, Urethanmethacrylat) härten bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht in kurzer Zeit aus.

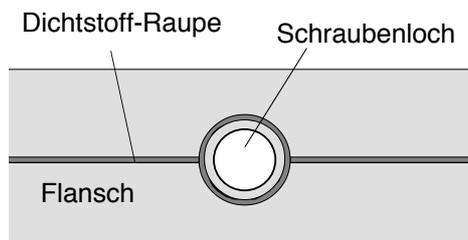


Bild 5

Aufgedruckte Flüssigdichtung
(als 'Öse' um das Schraubenloch geführt)



Die Vorteile von Flüssigdichtmitteln im Vergleich zu herkömmlichen Flanschdichtungen ist neben der vereinfachten Lagerhaltung die stets präzise Position der Dichtung, ein besonderer Vorteil bei der automatisierten Montage von komplex gestalteten Bauteilen. Flüssigdichtungen aus Silikongummi werden in großem Umfang im Automobilbau angewendet, beispielsweise für die Abdichtung von Ölwanne. Dabei werden 2,5 bis 3 mm dicke Raupen der Flüssigdichtung mit dem Roboter aufgetragen und unmittelbar mit einer Kamera auf Unregelmäßigkeiten überprüft. Auch dreidimensionale Dichtungsspuren können so auf einfache Weise hergestellt werden.

Die Nachgiebigkeit der Dichtung kann durch die Breite der Dichtspur den speziellen Erfordernissen angepaßt werden. Beispielsweise ist es möglich, die Steifigkeit der Dichtung in Abhängigkeit von der Distanz zu den Schrauben so zu variieren, daß die Dichtungspressung entlang der ganzen Dichtspur möglichst einheitlich wird. Eine Maßnahme zur Begrenzung der Zusammenpressung ist beispielsweise die Integration von Elementen aus Epoxydharz.

24.3 STATISCHE DICHTUNGEN IM AUTOMOBILBAU

Im Automobilbau gibt es eine fast unüberschaubare Zahl von statischen und dynamischen Dichtstellen. Wellendichtungen für Kurbel-, Nocken- und Radwellen sind in *Kapitel 8* behandelt, Kolben- und Stangendichtungen für hydraulische Aggregate und Bremsen in *Kapitel 5* und, nicht zu vergessen, die O-Ringdichtungen in *Kapitel 3*. Eine extrem komplexe Aufgabe ist die Abdichtung der zahlreichen Heißgas- und Flüssigkeitskanäle, die aus dem Kurbelgehäuse zum Zylinderkopf führen. Die Zylinderkopfdichtungen sind deshalb die komplexesten statischen Dichtelemente im Motor und ihre Entwicklung ist noch immer im Fluß. Sie sind den pulsierenden Verbrennungsgasen und den damit verbundenen Schwingungen ausgesetzt, und müssen doch dauerhaft die Gas und Flüssigkeitsräume voneinander trennen. Im Grunde besteht eine Zylinderkopfdichtung aus einem oft mehrlagigen, speziell beschichteten Blechträger mit anvulkanisierten oder aufgespritzten Elastomerzonen im Bereich der Flüssigkeitskanäle. Die Beschreibung der Konstruktion und der physikalischen Probleme der einzelnen Gestaltungszonen einer modernen Zylinderkopfdichtung würde jedoch den Rahmen dieses Kapitels sprengen und wir verweisen zu diesem Thema auf die Literatur. Anstatt dessen besprechen wir kurz ein ähnliches, jedoch weniger komplexes Problem, nämlich die Flächenabdichtung an den Trennfugen von Hochleistungs-Fahrzeuggetrieben. Danach werden noch verschiedene statische Dichtungen im Bereich der Karosserie an Türen, Fenstern, Hauben und Deckeln behandelt.

Abdichtung der Trennfugen von Fahrzeuggetrieben

Mit diesem Thema kehren wir noch einmal zurück zu den anderweitig in den *Kapiteln 22* und *23* behandelten Flanschdichtungen. Flanschdichtungen im Rohrleitungs- und Druckbehälterbau sind keinen nennenswerten Scherbeanspruchungen ausgesetzt, das heißt, die Flanschflächen rutschen im Betrieb nicht aufeinander. Dies ist bei den Trennfugen von Hochleistungs-

Fahrzeuggetrieben anders. Die hohen Drehmomente, die zum Teil über die Trennfugen übertragen werden, können bei den Leichtbaugehäusen zu dynamischen Reibbewegungen an den Dichtflächen führen. Bild 6a veranschaulicht die Trennstelle und die Dichtung eines derartigen Getriebes. Flächendichtungen, die im Montagezustand dicht sind, können im Betrieb infolge der dynamischen Beanspruchung versagen. Neben dem Zerreißen der Dichtung kommen als Versagensursachen auch der Verlust der Vorspannung durch Setzen der Dichtung und generell eine konstruktionsbedingt ungleichmäßige Dichtpressung in Frage. Traditionell werden faserverstärkte Weichstoffdichtungen eingesetzt, mit einer Höchstflächenpressung zwischen 50 und 100 MPa. Im Versuch zeigte sich, daß dünne, harte Aramidfaserdichtungen den weicheren Cellulosefaserdichtungen bezüglich des Pressungsabfalls im Betrieb überlegen sind. Alternativ werden in der Praxis auch anaerob aushärtende Flüssigdichtungen (Siebdruck, Raupen), dauerplastische Dichtmassen (Raupen) und mit Elastomer beschichtete Metallsicken-dichtungen angewendet. Neben einer möglichst hohen Steifigkeit der Dichtung erwies sich als entscheidender Faktor die Gleichmäßigkeit der Dichtpressung. Dies kann bei Flachdichtungen durch eine veränderliche Dichtungsbreite (breiter an den Schrauben und schmaler zwischen den Schrauben) erreicht werden. Für die Konstruktion ergibt sich die Forderung, das Getriebegehäuse im Bereich der Dichtzone möglichst steif, die Verschraubung hingegen möglichst weich zu machen. Beides erreicht man durch lange Schrauben und hohe Augen am Gehäuse, so daß die Schraubenkräfte möglichst weit entfernt von der Dichtfuge in das Getriebegehäuse eingeleitet werden. Außerdem ist es günstig, die Schraubenabstände klein zu halten, was aber funktionelle und wirtschaftliche Grenzen hat.

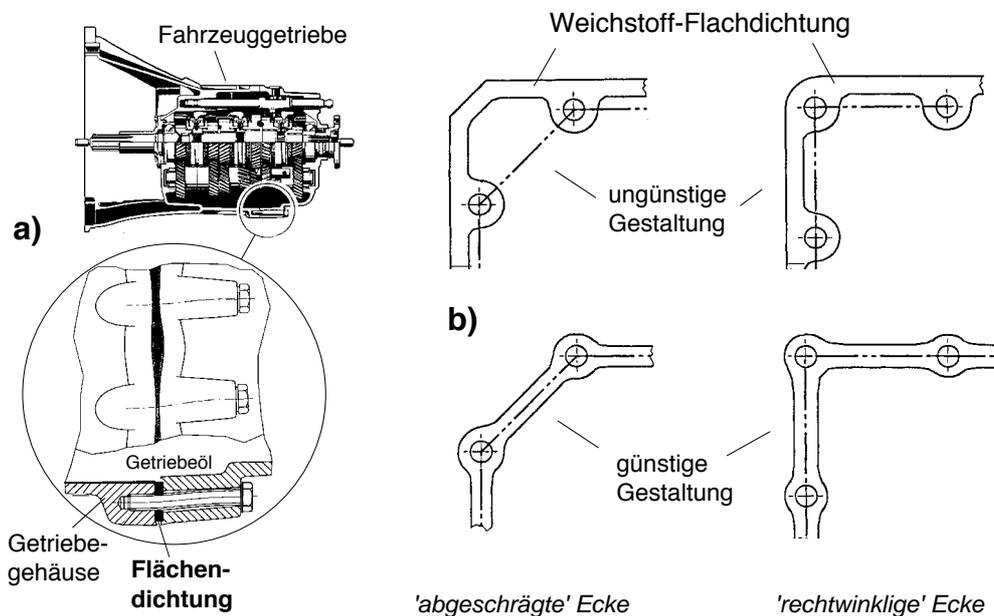


Bild 6

Flächendichtung in der Trennfuge eines Fahrzeuggetriebegehäuses

a) Übersicht; b) Gestaltung der Flachdichtung an der Ecke des Getriebegehäuses



Diese Maßnahmen allein genügen aber nicht für eine optimale Lösung. Es zeigte sich, daß auch die Position der Schrauben relativ zur Lage und zum Verlauf der Dichtung eine entscheidende Rolle spielt, genauer ausgedrückt: die gedachte Verbindungslinie zwischen den Schrauben sollte so gut wie möglich mit der Mittellinie der Kontaktfläche der Dichtung zusammenfallen. Bild 6b veranschaulicht dies an einer abgeschrägten und einer rechtwinkligen Gehäuseecke.

Karosseriedichtungen

Die zahlreichen Dichtungen im Bereich der Karosserie eines Kraftfahrzeugs müssen vielen Anforderungen des Betriebs, der Fertigung und des Fahrzeugdesigns gerecht werden. Sie dienen der Abdichtung von Öffnungen, die häufig geschlossen und geöffnet werden. Die abzudichtenden Stoffe sind hauptsächlich Wasser und Staub von außen. Zugleich sollen die Dichtungen zusammen mit den Fensterscheiben Außengeräusche dämpfen, aber die Luftströmung über die Außenhaut des Fahrzeugs nicht beeinträchtigen. Weiterhin verlangt man, ebenfalls aus akustischen Gründen, daß an diesen Dichtungen wenig Reibung und kein Stick-Slip entsteht. Selbstverständlich müssen die Dichtungen den Forderungen einer hochautomatisierten Massenproduktion genügen. Auch in Flugzeugen gibt es ähnliche Abdichtprobleme, mit dem Unterschied, daß die Dichtungen hier zusätzlich erheblichen Druck- und Temperaturunterschieden ausgesetzt sind, im Flug auch extrem tiefen Temperaturen auf der Außenseite. Allerdings sind hier die Stückzahlen wesentlich kleiner. Bei beiden Anwendungen, im Fahrzeug- und im Flugzeugbau, wird eine lange Gebrauchsdauer erwartet, ohne merklichen Verschleiß und ohne Ermüdungserscheinungen.

Bild 7 zeigt einige Beispiele von Tür- und Fensterdichtungen in Automobilen. Bild 7a veranschaulicht ein extrudiertes Formteil aus Elastomerwerkstoff für die gleitende Abdichtung einer Fensterscheibe mit bündigem Anschlag. Der hohle Innenraum des Dichtschlauchs sorgt für eine weiche Anpassung und ermöglicht größere Toleranzen. Dank moderner Fertigungstechniken kann der Querschnitt der extrudierten Dichtung in Längsrichtung variabel gestaltet werden. Dies ist von Vorteil, wenn beispielsweise an der Türoberseite eine Rinne anzuformen ist, oder wenn im Bereich enger Radien das Profil nicht beulen darf. Der Bereich, auf den die Fensterscheibe aufgleitet, wird mit einer reibungsmindernden Schicht versehen, beispielsweise mit einer Flocksicht aus Polyamid. Alternativ werden auch sehr dünne PTFE-Schichten ($<100\mu\text{m}$) verwendet. Die Beschichtung verhindert Geräusche durch Stick-Slip und das Anfrieren der Scheibe bei tiefer Außentemperatur. Der Reibungskoeffizient einer Flocksicht beträgt etwa $f = 0,4$. Mit Lackierungen auf der Basis von Polyurethan oder Silikongummi kommt man auf etwa $f = 0,2$, also bereits in die Nähe von PTFE mit $f \leq 0,1$.

Bild 7b zeigt einen Dichtstreifen in einer abgesetzten Aufnahmenut ('Wetterstreifen') für eine Fensterscheibe. In Bild 7c ist der obere Bereich einer Türdichtung mit integrierter Dachrinne dargestellt. Die Tür biegt beim Schließen eine Lippe nach innen und verschließt die Rinne. Bild 7d zeigt den oberen Bereich einer zweiteiligen Fensterdichtung für gebogene Fenster-

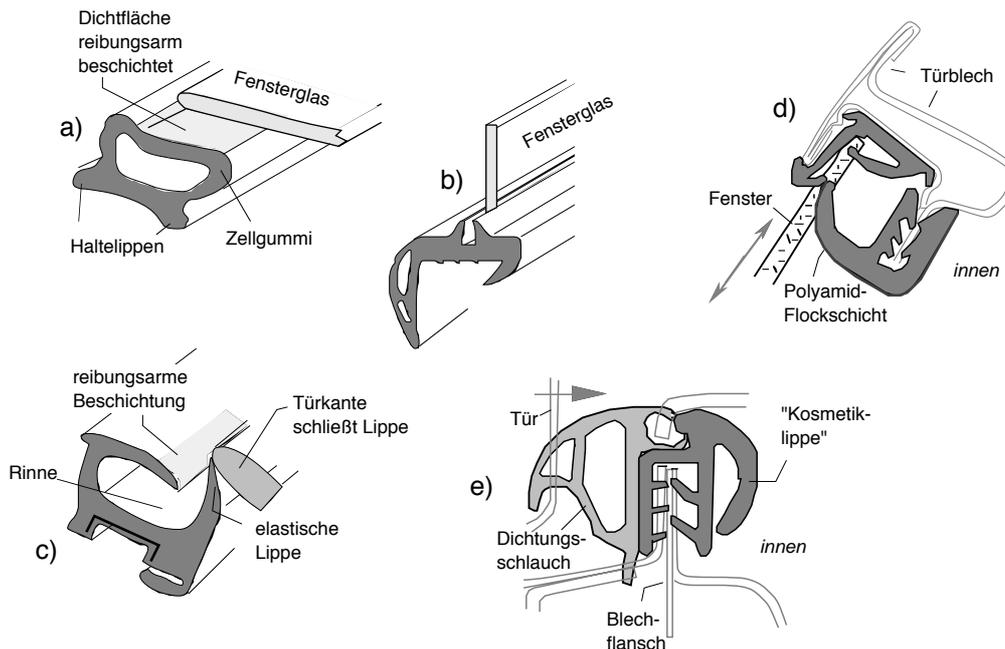


Bild 7 Tür- und Fensterdichtungen von Fahrzeug-Karosserien

- a) Kantendichtung für ebene Glasfenster
b) untere Dichtungsfassung für Fensterscheibe
c) Türdichtung mit integrierter Regenrinne (oben)
d) zweiteilige Fensterdichtung (oben)
e) Verbund-Türdichtung (unten)
[Ausführungen d) und e) aus Meise et al. 2001]

scheiben. Schließlich zeigt Bild 7e ein ko-extrudiertes Türdichtungsprofil, bestehend aus zwei Zonen, die aus unterschiedlichen Elastomeren bestehen. Der Dreikammerschlauch der eigentlichen Türdichtung besteht aus Zellgummi, der zur Reibungsminderung mit einem Gleitlack beschichtet ist. Das an einem Flansch der Karosserie befestigte Haftteil und die innere „Kosmetiklippe“ bestehen aus 'massivem' Elastomer. In den Bildern 7d,e sind die Dichtungen in der ungespannten Einbaulage dargestellt, die Position der Bleche nach der Montage ist angedeutet.

Ein herkömmlicher Werkstoff für die Dichtschläuche ist EPDM, neuerdings werden zunehmend thermoplastische Elastomere (TPE) verwendet. Diese physikalisch vernetzten Polymere haben den Vorteil der einfachen Formgebung von Thermoplasten und trotzdem im wesentlichen die Elastizität von Gummi. Die Möglichkeit des einfachen Recyclings der TPE-Werkstoffe ist in Anbetracht der Forderungen des Umweltschutzes ein weiteres Argument für ihre Verwendung im Automobilbau. Weitere zukunftsweisende Entwicklungen sind ko-extrudierte TPE/PP-Verbundteile, bei denen beispielsweise die Dichtzonen aus TPE und die angeformten Haftteile aus Polypropylen bestehen. Bei einer proprietären Ausführung einer TPE-Türdichtung besteht die elastische Zone aus geschäumtem TPE, wodurch die Dichtung insgesamt wesentlich leichter wird. Zum Schutz gegen Wasserabsorption und Reibverschleiß umgibt eine ko-extrudierte, lackierbare Haut den geschäumten Dichtungsschlauch (Meise et al, 2001).

24.4 ABDICHTUNG VON BAUVERGLASUNGEN

Die Anforderungen an die Abdichtung von Fensterverglasungen in großen Gebäuden sind den oben besprochenen zwar ähnlich, sie unterscheiden sich aber doch in wesentlichen Punkten. Das Aufkommen großer Glasfassaden in den 1950er Jahren brachte auch das Problem großer thermischer Verschiebungen in den Fensterdichtungen mit sich. Anders als bei Mauerwerk reagieren große Fassadenfenster sehr schnell auf Temperaturänderungen. Ein starker Regen- und Schneeauflauf kann die Scheibe rapide abkühlen und selbst die täglichen Temperaturschwankungen führen schon zu beträchtlichen Bewegungen in den Dichtungen. Nachfolgend werden beispielhaft zwei Konzepte für die Abdichtung großer Glasscheiben besprochen. Eine Lösung ist gekennzeichnet durch eine gelenkige Lippe, die nach dem Einführen der Glasscheibe mittels eines Füllstücks angepreßt wird. Bei der anderen Lösung wird auf einer Seite nachträglich eine keilförmige Leiste eingeschoben. Von beiden Konzepten gibt es viele Varianten.

Zur Lagerung und Abdichtung von großen Fensterglasplatten werden seit langem Dichtungen aus Elastomer mit Verschlußstreifen verwendet. Davon gibt es im Prinzip zwei Ausführungen, nämlich Gummileisten mit annähernd H-förmigem und solche mit T-förmigem Profil. Zum Einfahren der Glasscheibe in ihren Sitz haben die Profile eine gelenkige Lippe, Bilder 8a,b. Nach dem Einbau der Scheibe wird ein Verschlußstreifen aus härterem Gummi in eine Nut an der (inneren oder äußeren) Stirnseite der Dichtung eingeknöpft, wodurch sich die Lippe fest

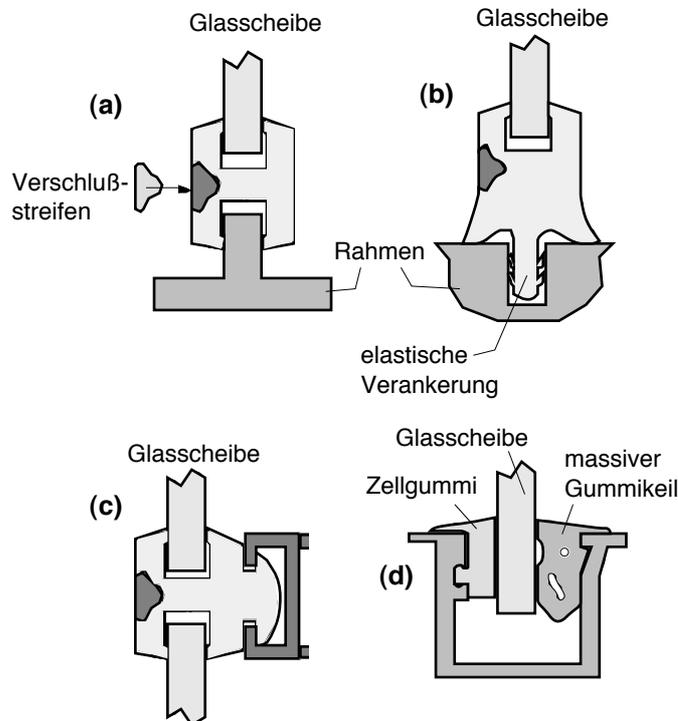


Bild 8 Abdichtungen für Bauverglasungen



und dichtend an das Glas anlegt. Beide Bauarten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Befestigung in der Fensteröffnung. Das H-Profil (Bild 8a) wird in einen vorstehenden Flansch eines Rahmens eingeschoben, während das T-Profil (Bild 8b) mit einem angeformten Flansch in einer Nut des Rahmens verankert wird. Das T-Profil nimmt seitliche Windkräfte besser auf, es ist jedoch teurer und der Einbau ist infolge des steiferen Halteteils etwas schwieriger. Die Dichtungen bestehen aus Neoprene, EPDM oder Butylgummi, wobei der erstgenannte Werkstoff wegen seines günstigeren Rückverformungsvermögens vorzuziehen ist. Die Härte der Dichtungen liegt im Bereich 70...80 IRHD, die des Verschlusstreifens bei 75...85 IRHD. Die Dichtprofile sollten wegen der Toleranzen und lokalen Beschädigungen möglichst nicht direkt im Betonbaukörper gelagert werden.

Bei einer anderen Fensterabdichtung wird die Kompressibilität von Zellgummi zum Halten und Abdichten genutzt, Bild 8c. Bekanntlich ist 'massiver' Gummi zwar verformbar aber inkompressibel. Wenn also ein Gummiteil beim Zusammenpressen weich federnd nachgeben soll, sollte es innere Hohlräume aufweisen. Dies ist bei Zellgummi der Fall. Die Glasscheibe liegt somit einseitig an einer Dichtleiste aus Zellgummi an, die in das Halteteil eingeknüpft ist. Auf der anderen Seite wird sie von einer nachträglich eingeschobenen keilförmigen Leiste aus härterem Gummi so angepreßt, daß die Zellgummileiste um ca. 30% zusammengedrückt wird. Die Linienlast der Dichtung beträgt danach 700...1800 N/m. Wegen der Toleranzen der einzelnen Bauteile ist der Bereich notwendigerweise groß.

Bei großen Glasscheiben über 1 Quadratmeter reicht die Reibkraft der Lippe nicht aus, um ein Rutschen des Glases dauerhaft zu unterbinden. Damit keine Undichtheit entsteht, werden in die Aufnahmenut zur Zentrierung der Glasscheibe Distanzblöcke aus hartem Gummi eingelegt. Die Größe dieser Blöcke wird so gewählt, daß der Auflagedruck 0,1 MPa nicht übersteigt. Wahlweise können kleine Entwässerungskanäle vorgesehen werden, damit allenfalls an den Dichtlippen eindringendes Leckwasser aus dem Nutraum entweichen kann. Ein weiteres Zusatzelement ist eine an der Fensteroberseite an die Dichtleiste angeformte Tropflippe, die von oben kommendes Wasser vom Fenster abweist.

Das Aussehen von glasverkleideten Gebäudefassaden wurde mit rückseitig befestigten Dichtleisten entscheidend verbessert, Bild 8d. Damit erreicht man geschlossen wirkende Glasfassaden, nahezu ohne störende Rahmen und Spalte. Muß mit starken Windlasten gerechnet werden, so kann man die Haltewirkung der Dichtlippen durch eine angemessene Zahl geschraubter Haltescheiben unterstützen. Damit wird auch ein Ausbiegen der Dichtlippen und das Herausfallen der Scheibe sicher ausgeschlossen.

Wie bei anderen statischen Abdichtaufgaben entstehen auch bei den Bauverglasungen ernste praktische Probleme durch die Kette der vielen Maßtoleranzen der Dichtungen, der Glasscheiben und insbesondere der Fensteröffnungen.



24.5 ELASTOMER-FORMDICHTUNGEN IN DER BAUTECHNIK

Dieser Abschnitt behandelt speziell geformte Elastomerdichtungen für die Dehnfugen in Baukörpern, beispielsweise Straßen, Brücken, Fußgängerzonen, Fahrzeugabstellflächen, Parkflächen und Startbahnen von Flughäfen usw. Diese Dichtungen sollen den Durchtritt von Wasser durch die Fugen in beiden Richtungen verhindern. Charakteristisch für diese Abdichtaufgaben sind verhältnismäßig große Relativbewegungen, denen die abzudichtenden Fugen durch Temperatur- und Laständerungen sowie durch Setzen unterworfen sein können. Bei großen monolithischen Baukörpern, etwa Brückenteilen, kommen im Extremfall relative Verschiebungen bis zu mehreren hundert Millimeter vor. Im allgemeinen liegen die Relativbewegungen allerdings im Bereich von einigen bis zu mehreren zehn Millimetern. Meistens bleiben die Fugenkanten bei ihrer relativen Verschiebung parallel, jedoch kommen auch stufenbildende und winkelige Verschiebungen vor.

Die Dichtungen müssen vor Beschädigungen durch überrollende Fahrzeugen geschützt sein, auch dürfen keine Stolperfallen für Fußgänger entstehen. Auf Flughäfen sind die Dichtungen mitunter Treibstoffen, Hydraulikflüssigkeiten oder Enteisungsfluiden ausgesetzt und müssen somit gegen diese Stoffe beständig sein. Viele Dichtfugen sind dem Sonnenlicht und bei -50°C bis $+50^{\circ}\text{C}$ der Atmosphäre ausgesetzt, zuweilen auch nicht unbeträchtlichen Ozonkonzentrationen. Wird in der Kälte die Glasübergangstemperatur eines Elastomers unterschritten, so wird es brüchig; hohe Temperaturen führen zu verstärkter Alterung und demgemäß mit der Zeit zur Abnahme der Elastizität. Die meisten der genannten Einflüsse – bis auf die niederen Temperaturen – bekommt man mit Neoprene-Compounds in den Griff.

Grundsätzlich gibt es Fugendichtungen in zwei verschiedenen Bauweisen, nämlich Rollmembranen und schlauchförmige Mehrkammerdichtungen. In beiden Fällen ist der wunde Punkt die Anbindung der Dichtung an die (Beton-)Struktur. In den 1950er und 1960er Jahren waren schlauchförmige Dichtungen üblich, die direkt in die Dehnfuge gepreßt wurden. Ein Klebstoff mit etwa 65% Füllstoffanteil diente zunächst zur Schmierung beim Einbau. Anschließend sicherte er die Lage der Dichtung und verschloss die Rauheitsspalte zwischen Dichtung und Wand. Manche dieser Dichtungen hatten ebene Kontaktflächen, Bild 9a, andere vorstehende Rippen die die Dichtpressung an den Kontaktstellen erhöhen, Bild 9b. Später wurde die Dichtwirkung durch Hinzufügen von Stahlprofilen verbessert, die die Betonkanten schützen und einen günstigeren Dichtkontakt mit der Gummidichtung ergeben, Bild 9c. Der Schutz der Fugenkanten ist besonders wichtig, weil ausbrechende Kanten die Dichtfunktion nachhaltig beeinträchtigen.

Die Aufgabe, große Verschiebungen aufzunehmen ohne daß sich dabei die Spannung in der Dichtung exzessiv verändert, erforderte einigen Erfindungsreichtum. So entstanden unter anderem spezielle Dichtungsschläuche mit gitterförmigen Kammern, bei denen unabhängig von der Ausdehnung die abdichtenden Seitenflächen parallel bleiben. Damit war es möglich, bei

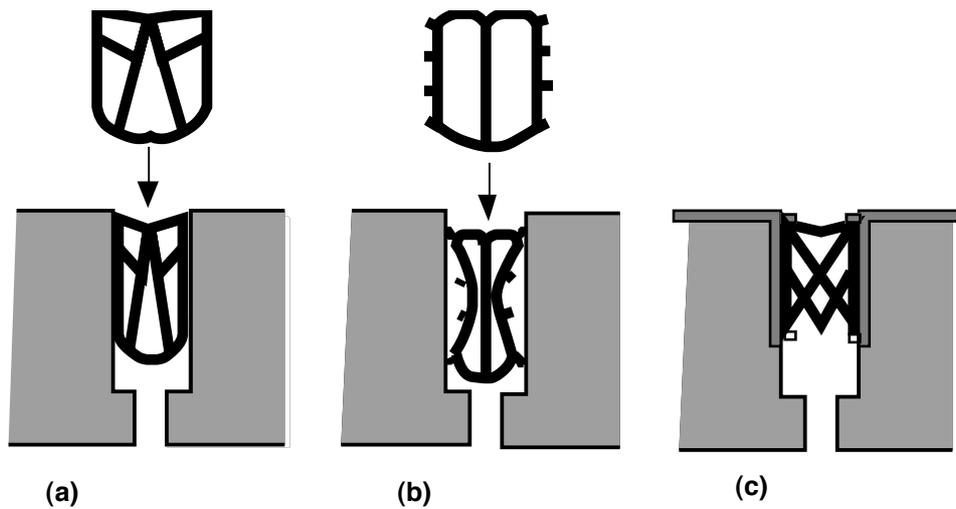


Bild 9 Grundformen schlauchartiger Mehrkammerdichtungen für Baukörperfugen

6...75 mm breiten Fugen Änderungen der Fugenbreite bis zu $\pm 40\%$ zu beherrschen. Bei extrem großen Verschiebungen, beispielsweise in Brückenfahrbahnen, können solche Dichtungen auch mehrfach nebeneinander angeordnet werden, mit Zwischenstücken, die in Gleitführungen gelagert sind. Bei den membranartigen Dichtungen ist die einfachste Lösung eine in die Dehnfuge eintauchende Rollmembran, Bild 10. Sie werden bei langen Fußgängerzonen verwendet, beispielsweise auf Flughäfen. Die Enden der Rollmembran werden mit Metallplatten auf dem Betonuntergrund festgeklemmt. Überlappende Enden der Metallteile sorgen für eine ständige Überdeckung der Fuge. Damit werden Verschiebungen bis zu 75 mm aufgenommen.

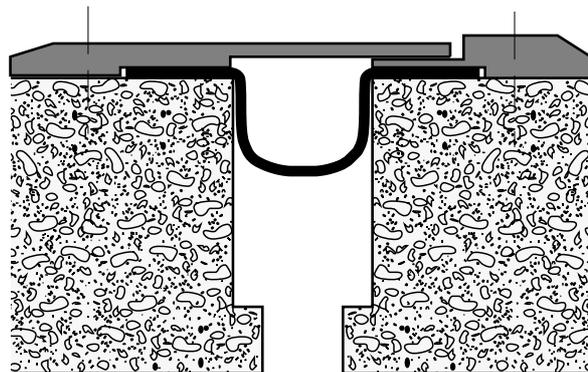


Bild 10 Rollmembran mit beweglicher Metallabdeckung

Eine andere Membrandichtung hat ein sickenartiges Gummigelenk, das in der Fuge absinkt, wenn sich die Fugenwände aufeinander zu bewegen, Bild 11. Die Ränder der Dichtung sind zu

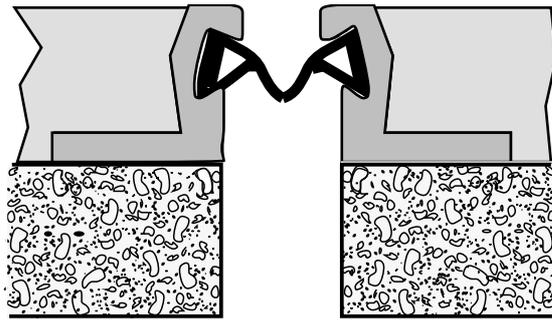


Bild 11

Membrandichtung mit Gummigelenk, in Schutzschienen eingeknüpft

kantigen Schläuchen verdickt, die in metallische Schutzschienen eingeknüpft sind. Bei einer besonderen Bauart dieser Schienen ist dafür gesorgt, daß die vorspringenden Metallkanten zusammenstoßen, bevor die Dichtung zu stark zusammengepreßt wird. Damit sind Bewegungen bis zu 100 mm möglich. Bild 12 zeigt eine hoch beanspruchbare Sonderkonstruktion mit einem Gummigelenk. Sie ist in der Lage, seitliche und vertikale Bewegungen und Winkelversätze aufzunehmen, ohne daß das Gelenk überbeansprucht wird.

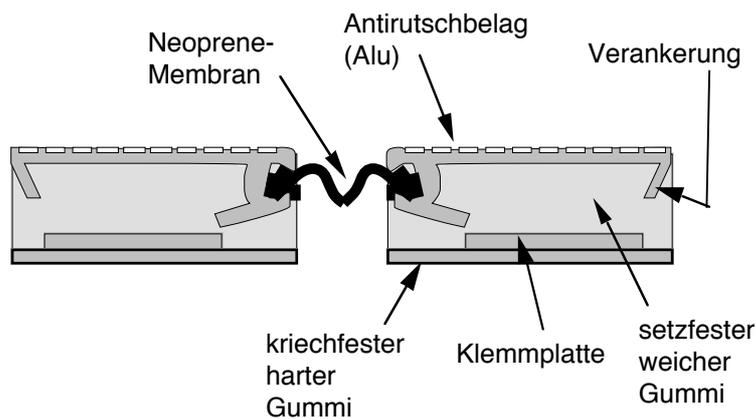


Bild 12 Hochbeanspruchbare Baueinheit mit Faltmembran als Fugendichtung

24.6 ABDICHTUNG VON WASSERVERSORGUNGSLEITUNGEN

Unterirdische Rohre für Frischwasser und Abwasserleitungen bestanden bis ins 19. Jahrhundert hauptsächlich aus einfachem Gußeisen, noch früher verwendete man auch Bleirohre. Die Maßhaltigkeit dieser Gußrohre ließ jedoch zu wünschen übrig, bis dann um 1930 Graugußrohre im Schleudergußverfahren hergestellt werden konnten, mit geringeren Toleranzen und besserem Gefüge. Mit der Beimengung von Magnesium oder Cer zur Umwandlung des lamellaren Grafit in Kugelgrafit wurde das Gefüge weiter verbessert und man erhielt ein hochfestes 'elastisches' Gußeisen. Aus diesem Werkstoff können ohne weiteres Rohre von ein bis zwei Meter Durchmesser hergestellt werden. Wasserleitungsrohre wurden aber auch aus anderen Werkstoffen hergestellt, von Asbestzement über Spannbeton bis zu PVC und GFK.

Unterirdisch verlegte Wasserleitungen werden durch Setzen des Erdreichs und durch Verkehrslasten deformiert, und die Verformungen müssen von den Verbindungen und den Dichtungen aufgenommen werden, wobei ein Winkelversatz von mehreren Grad vorkommen kann. Ältere Metallrohrverbindungen hatten Stemm-Muffenverbindungen, wobei in den Spalt zwischen der Muffe und dem anderen Rohrende zuerst ein plastischer Dichtstoff und nachfolgend metallisches Blei gestemmt wurde. Später wurden Gummiringe verwendet. Diese wurden zum Beispiel vor dem Einschleiben des Rohrendes in die Muffe eingeknöpft, Bild 13a, oder mit einer angeschraubten „Stopfbuchsbrille“ unter Druck gesetzt und dabei radial dichtend an das andere Rohrende angepresst, Bild 13b. Von jeder dieser prinzipiellen Anordnungen gib es in der Praxis viele, zum Teil rechtlich geschützte Gestaltungsvarianten.

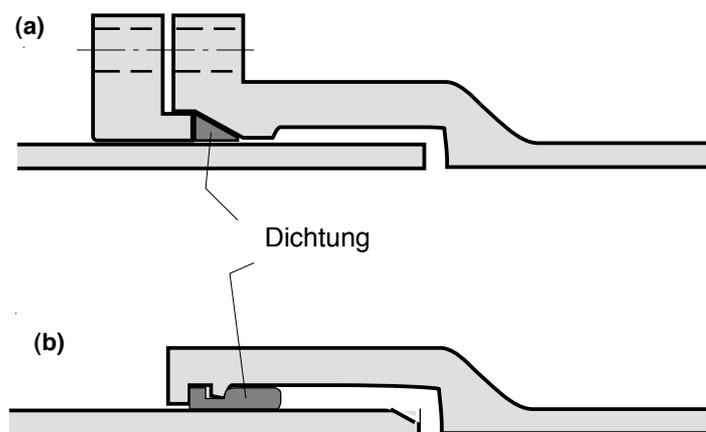


Bild 13 Abdichtung großer Rohre für die Wasserversorgung

24.7 ROHRVERBINDUNGEN UND DRUCKSCHLÄUCHE

In Ölhydraulikanlagen, beispielsweise für Pressen, Flugzeuge, Roboter, Erdbewegungsmaschinen etc, müssen zwischen Rohren und Druckschläuchen oder zwischen diesen und Ventilen, Pumpen und Hydraulikzylindern lösbare Verbindungsstellen vorgesehen werden. Dies erfordert lösbare Rohrverbindungen, für manche Anwendungen auch steckbare Flüssigkeitskupplungen, die unter Druck getrennt werden können.

Starre Rohrverbindungen

Eine einfache Art der Rohrverbindung sind sind mit Innen- und Außengewinde ineinander geschraubte Rohre, bei denen der Gewindespalt mit einem Dichtmittel (Hanf, PTFE-Band, Flüssigdichtung, usw.) abgedichtet ist. Solche Verbindungen sind bei Querkraften und Schwingungen unzuverlässig. Bei vielen Anwendungen werden heute mehrteilige Rohrverschraubungen mit integrierten Dichtringen verwendet.

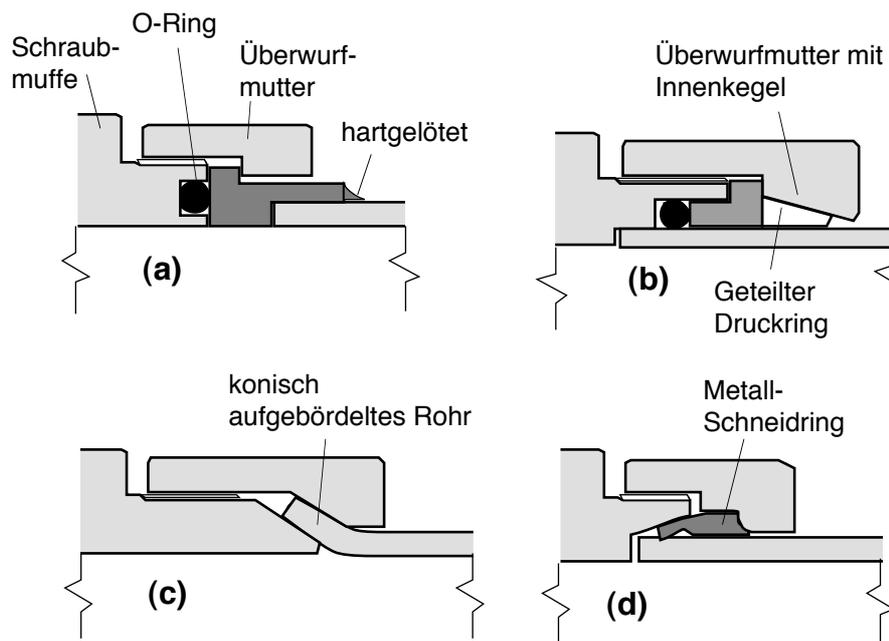


Bild 14 Rohrverschraubungen für starre Rohrverbindungen

Die einfachste Bauweise einer Rohrverschraubung enthält einen zwischen den Stirnflächen der angrenzenden Bauteile axial vorgespannten Elastomer-O-Ring, Bild 14a. Die Verbindung wird von einer Überwurfmutter zusammengehalten, die einen Lötband gegen das mit Außengewinde versehene Rohrende zieht. Dies ist im Prinzip eine sehr kompakte „Flanschdichtung“ für Hydraulikdrücke bis 400 bar und höher.

Bei einer anderen Rohrverschraubung ist der O-Ring in einer von den Rohrenden gebildeten axial offenen Ringnut radial vorgespannt, Bild 14b. Eine weitere Variante ist die in Bild 14c dargestellte Bördelverschraubung. Hier wird ein Rohrende mit einem Spezialwerkzeug kegelig aufgebördelt, üblicherweise mit einem Winkel von 37° zur Rohrachse. Die Abdichtung erfolgt im Konus, Metall auf Metall. Zur dichtenden Anpassung der Dichtflächen muß beim Anziehen die Fließgrenze des Werkstoffs erreicht werden. Solche Verbindungen werden bis 200 bar angewendet. Obwohl das Konzept einfach ist, hängt die Zuverlässigkeit der Dichtung letztlich von der Erfahrung und der Geschicklichkeit des Monteurs ab. Wichtig ist zunächst die Einhaltung des richtigen Anziehmoments. Jedoch kann auch die notwendige Fließfähigkeit des Rohrwerkstoffs durch ungewolltes Härten des Stahls beeinträchtigt werden, wenn man das Rohr mit einer Bügelsäge ablängt. Deshalb muß das Rohr mit einer speziellen Rohr-schneidvorrichtung kalt abgeschnitten werden.

Häufig verwendet wird in der Praxis die Schneidringverschraubung, Bild 14d. Sie hat den Vorteil, daß das freie Rohrende nicht bearbeitet werden muß. Bei der Montage wird die Über-



wurfmutter angezogen, dabei schiebt sie den Schneidring in die konische Bohrung einer Gewindemuffe. Dadurch wird die scharfe Vorderkante des Schneidrings radial dichtend in den Rohrwerkstoff gedrängt, das heißt, der Ring schneidet in das Rohr ein. Praktisch gibt es viele proprietäre Varianten dieses Grundkonzepts.

Für Rohre im Durchmesserbereich 50...100 mm gibt es eine weitere kompakte, mit einem O-Ring abgedichtete Rohrverschraubung mit Einzelschrauben, Bild 15. Ein geschlitzter, innen gezahnter und außen konischer Ring wird durch einen Druckring mittels Schrauben axial an die Gegenmuffe gezogen. Ein O-Ring dichtet radial auf dem Außenumfang des Rohrs. Diese Art der Rohrverbindung hat sich bis 500 bar bewährt.

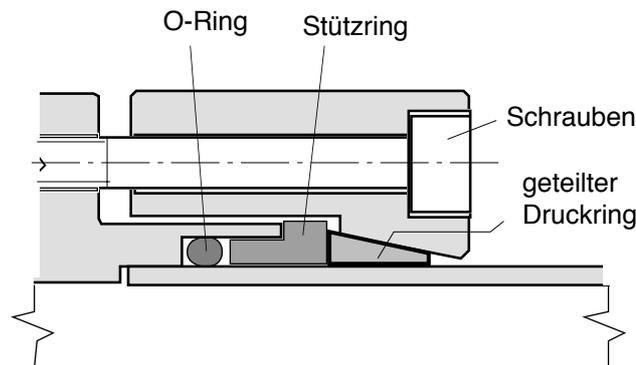


Bild 15 Kompakte Rohrverschraubungen mit O-Ring auf dem Umfang des angeschlossenen Rohrs

Flexible Verbindungen

Die Verbindung von flexiblen Druckleitungen mit den Anschlußteilen ist keine einfache Aufgabe. Dies hängt zum Teil mit den komplexen mehrschichtigen Wänden dieser Leitungen zusammen, die aus mehreren Lagen von polymeren Werkstoffen und metallischen Verstärkungen bestehen. Ein zweites Problem ist das Kriechen der Polymerwerkstoffe. Flexible Druckleitungen können in zwei Kategorien eingeteilt werden. Das sind zum einen die Druckschläuche für die Hydrauliktechnik mit verhältnismäßig kleinem Durchmesser und zum anderen die großen Schlauchleitungen für den Öl/Gas-Transport in der Offshore-Technik.

Druckschläuche für die Hydrauliktechnik: Ein Druckschlauch für die Hydrauliktechnik hat im Prinzip den in Bild 16a gezeigten Aufbau. Die innerste Wandschicht ist eine elastomere Dichtschicht, die den Durchtritt des Hydraulikfluids durch die Wand unterbindet. Darüber befinden sich abwechselnd verschiedene Trenn- und Verstärkungsschichten. Für Drücke bis 500 bar werden als Verstärkungen synthetische Fasergewebe verwendet, beispielsweise Aramid. Für höhere Drücke oder bei großem Durchmesser werden Gewebe oder Spiralwicklun-

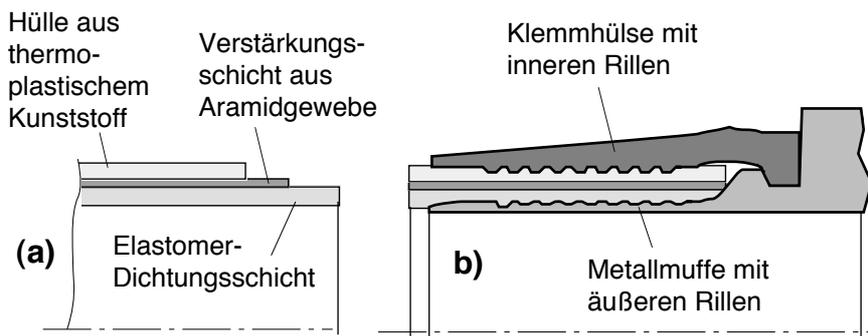


Bild 16 Druckschlauch für die Hydrauliktechnik (Prinzip)

a) Prinzipieller Schichtaufbau b) Endzustand nach Montage

gen aus Stahl eingesetzt. Trennschichten vermindern die Reibung und den Verschleiß der druckfesten Schichten, und verhindern die Extrusion der Dichtschicht in die darüberliegenden Schichten. Außen ist der Druckschlauch umgeben mit einer verschleißfesten Elastomerhülle. Praktisch kann ein Druckschlauch aus einem halben Dutzend oder aus noch mehr Schichten bestehen. Bei aggressiven Fluiden besteht die innere Dichtschicht und die äußere Hülle aus einem chemisch widerstandsfähigen Polymer, in extremen Fällen aus PTFE. Die innere Dichtschicht muß unbedingt völlig dichtend mit der Endarmatur (Verschraubung, Muffe) verbunden sein. Dazu wird zuerst eine Metallmuffe mit gerippter Bohrung über die Hülle des Druckschlauchs geschoben. Dann wird die außen gerillte Muffe des metallischen Anschlußstücks in die Bohrung der Dichtschicht des Druckschlauchs gepreßt und dadurch verankert. Schließlich wird die Metallmuffe hydraulisch mit sechs oder acht Klauen eines Spezialwerkzeugs radial nach innen 'geprägt', so daß eine feste und dichte Verbindung zwischen der Muffe und der Dichtschicht des Schlauches entsteht, Bild 16b. Zugleich werden dabei auch die Verstärkungslagen festgeklemmt und axial festgehalten. Wegen der Fließneigung und der Kerbempfindlichkeit der Polymerwerkstoffe müssen die ringförmigen Rillen gerundete Kämme aufweisen. Auch sollte der Druckschlauch bei der Montage nicht axial unter Spannung stehen.

Druckschläuche für die Offshore-Technik: Die in der Offshore-Technik eingesetzten großen flexiblen Druckschläuche sind schwierigen Betriebsbedingungen ausgesetzt. In größerer Wassertiefe lastet auf ihnen ein hoher Außendruck, eventuell in Kombination mit einem hohen Innendruck. Es herrschen also zeitlich veränderliche Druckdifferenzen in wechselnder Richtung. Infolge der großen Durchmesser sind auch die radialen und axialen Beanspruchungen groß. Das zu transportierende Fluid – Gas oder ein Flüssigkeits-Gasgemisch – kann über 100°C heiß sein, und es kann aggressive Verunreinigungen wie Schwefelwasserstoff und Amine enthalten. Im normalen Betrieb diffundieren unter Druck Gase in Elastomerschichten und werden dort quasi in gelöster Form gespeichert. Wenn nun, beispielsweise bei Wartungsarbeiten, der Druck plötzlich abfällt, gehen die gelösten Gase plötzlich wieder in den gasförmigen

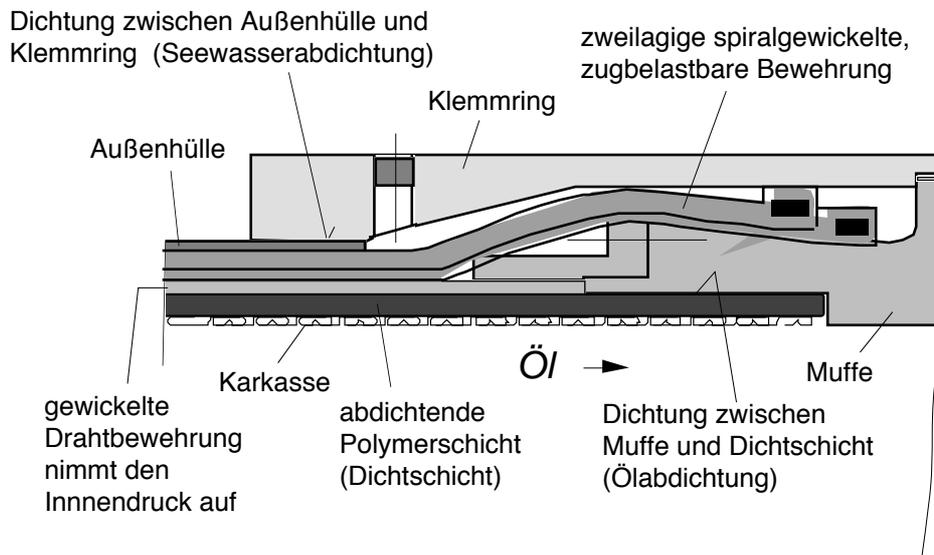


Bild 17 Schematischer Aufbau und Anschluß einer Ölschlauchleitung für die Offshore-Technik

Zustand über. Da dies sehr schnell geschieht, spricht man von einer „explosiven Dekompression“, die die Schichten zerstören kann (s. auch Kapitel 2). Diese Bedingungen führen insgesamt zu dem komplexen Aufbau dieser Druckleitungen. Bild 17 zeigt ein prinzipielles Beispiel dafür, wobei die Details bei den einzelnen Herstellern voneinander abweichen. Die innerste, als „Karkasse“ bezeichnete Schicht besteht aus einem Metallgewebe, das die nach innen gerichteten Kräfte des Wasserdrucks und der weiter außen liegenden, vorgespannten Bewehrungsschichten aufnimmt. Darüber liegt eine Druckhülle aus Polymerwerkstoff, die verhindert, daß Leckage des transportierten Fluids nach außen dringt. Darüber liegt eine den Innendruck aufnehmende, gewickelte Drahtbewehrung. Weiter außen folgt eine zweilagige, gegensinnig spiralgewickelte Bewehrung, die axiale und bedingt auch radiale Kräfte aufnimmt. Ganz außen folgt schließlich eine Schutz- und Dichtungshülle aus Polymerwerkstoff, die das Eindringen von Seewasser und den abrasiven Verschleiß verhindert. Dieser Grundaufbau kann noch ergänzt werden durch weitere Zwischenschichten, etwa zur Verminderung von Verschleiß, Reibung oder Extrusion. Auch kann die innere Druckhülle mehrschichtig ausgeführt werden.

Eine besondere Aufgabe ist die zweckgerechte Gestaltung der Übergänge zwischen jeder Schicht und der Armatur am Ende des Schlauches. Selbstverständlich muß jede Druckhülle dicht angeschlossen werden, die die Axialkraft aufnehmenden Lagen müssen so verankert werden, daß ein zweckmäßiger Kraftübergang erreicht wird. Radiale und axiale Bewegungen infolge sich ändernder Temperaturen und Drücke, sowie von außen einwirkende Kräfte müssen aufgenommen werden. Hohlräume in der Abschlußarmatur können mit Epoxidharz ausgegossen werden.



Die zweckmäßige Ausführung der abdichtenden Zonen wird besonders schwierig, wenn das transportierte Fluid Gasanteile aufweist, weil wegen der Gefahr der explosiven Dekompression Elastomere nicht in Frage kommen. In diesem Fall werden thermoplastische Werkstoffe eingesetzt, jedoch ist dann unter Druck mit Kriechen und Spannungsabbau zu rechnen. Problematisch ist zudem, daß die abdichtenden Schichten im Extrusionsverfahren hergestellt werden, wozu natürlich der Werkstoff gut fließfähig sein muß. Gerade diese Eigenschaft ist aber in einem Druckschlauch höchst unerwünscht. Schließlich steht der Hersteller wegen der großen Dimensionen auch noch vor außergewöhnlichen Toleranzproblemen.

24.8 ABDICHTUNG VON ELEKTRISCHEN DURCHLEITUNGEN

Oft ist es notwendig, zur Übertragung von Energie oder von Signalen elektrische Leiter durch eine Wand zu führen, die zwei mit unterschiedlichen Gasen gefüllte Räume trennt, oder deren Druckniveau verschieden ist. Bekannte Beispiele sind Leitungen durch die Glaswand von Glühlampen oder Fernsehröhren; bei industriellen Anwendungen gilt es, Signale aus Druckgefäßen oder Reaktionskammern den Meßgeräten zuzuführen, oder es geht um die Verbindung von Bauelementen elektronischer Schaltkreise mit anderen Bauteilen in luftdicht versiegelten Einheiten. Ein besonderes Problem sind dabei oft die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungs-

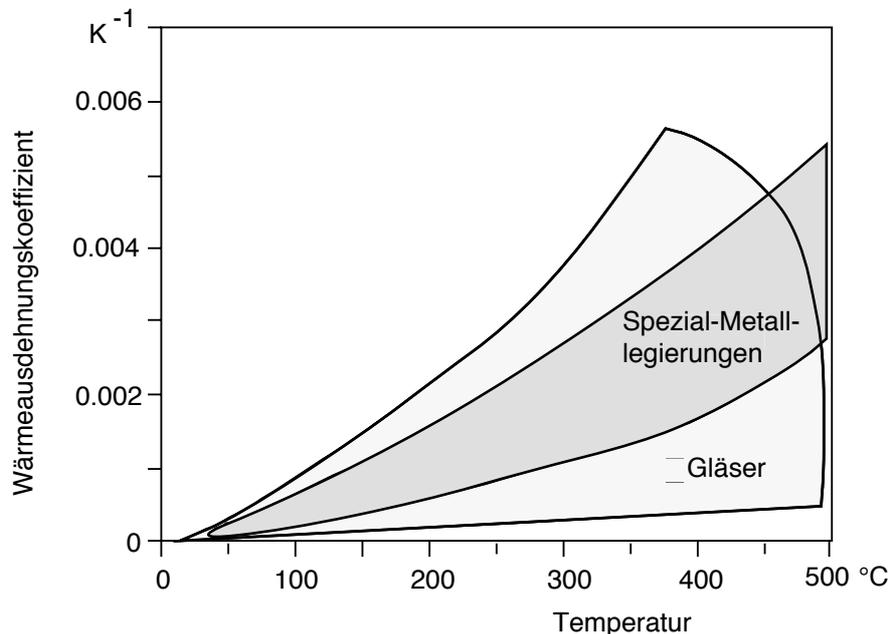


Bild 18 Vergleich der Wärmeausdehnungskoeffizienten bei der Durchführung von elektrisch leitenden Metallegierungen durch Glas



koeffizienten der Leiter und Isolatoren. Die thermische Dehnung ist gering bei Isolatoren wie Glas oder Keramik und hoch bei den meisten elektrischen Leitern. Dies ist von Bedeutung wenn die Fertigung hohe Temperaturen verlangt oder wenn die Betriebstemperatur stark schwankt oder sich über einen großen Bereich verändert. Dieses Problem wurde durch die Entwicklung von Metalllegierungen gelöst, deren thermische Ausdehnung an die der verwendeten Gläser und Keramiken angepaßt ist, Bild 18. Solche Legierungen enthalten typischerweise hohe Anteile von Kobalt (17%...25%), oder es sind Legierungen aus Eisen und Nickel oder Eisen und Chrom. Die Wahl hängt ab vom Isolatorwerkstoff oder auch von den Bedingungen des Fertigungsprozesses - etwa der Eignung für die Massenproduktion.

Ein weiteres Problem ist die Verbindung dieser Metalle mit Gläsern, quasi unterkühlten Flüssigkeiten, oder mit Keramiken, die mikro-kristalline Festkörper sind. Bei den erstgenannten modifiziert man normalerweise zu diesem Zweck die Metalloberfläche so, daß sie von der Glasschmelze benetzt werden kann. Das ist der Fall bei oxidierten Metalloberflächen, die entweder bereits in diesem Zustand sind oder in einem Ofen unter kontrolliert oxidierender Atmosphäre behandelt werden. Die Oberfläche keramischer Isolatoren wie Aluminiumoxid oder Berylliumoxid wird zuerst metallisiert, beispielsweise durch Plattieren mit Nickel oder Gold. Danach kann sie durch Weich- oder Hartlötens mit den Leitern verbunden werden.

24.9 ABDICHTUNG VON DOSEN, GLÄSERN UND FLASCHEN

Am Schluß dieser kurzen Übersicht über spezielle statische Abdichtaufgaben und Lösungen wenden wir uns noch den scheinbar banalen Verschlüssen der vielen Arten von Dosen, Gläsern und Flaschen zu, in die oft leicht verderbliche Nahrungsmittel oder Getränke gefüllt werden. Tatsächlich findet man darunter jedoch sehr anspruchsvolle Anwendungen der statischen Dichtungstechnik, die zugleich den Anforderungen genügen müssen, die die Herstellung und Befüllung in extrem großen Stückzahlen mit sich bringt.

Abdichten bedeutet hier nicht nur daß „technische“ Dichtheit erreicht wird, daß sozusagen keine Flüssigkeit ausläuft. Vielmehr muß bei Lebensmitteln wie auch in der Medizin und bei pharmazeutischen Produkten auch „biologische“ Dichtheit gewährleistet werden. Dabei ist zu bedenken, daß Bakterien ungefähr ein Mikrometer groß und Viren noch kleiner sind. Während der gesamten, oft jahrelangen Lagerzeit dürfen diese kleinen Strukturen nicht in das Produkt gelangen. Viele Dichtspalte zwischen *relativ bewegten* Teilen sind etwa ein Mikrometer groß. Daß bei *relativ ruhenden*, statischen Dichtungen viel kleinere Restspalte erreichen kann, wurde im Kapitel 23 schon besprochen. Glücklicherweise wirken bei den hier betrachteten Dichtungen nur geringe Druckdifferenzen und zudem sind die Strecken, die „Leckage-Moleküle“ in den minimalen Restspalten zurücklegen müßten, im Vergleich zu einem Mikrometer sehr groß. Diese Dichtungen müssen aber auch äußere Luftfeuchtigkeit vom Produkt fernhalten. Weiterhin müssen manche Verschlüsse häufig geöffnet und wieder verschlossen werden.

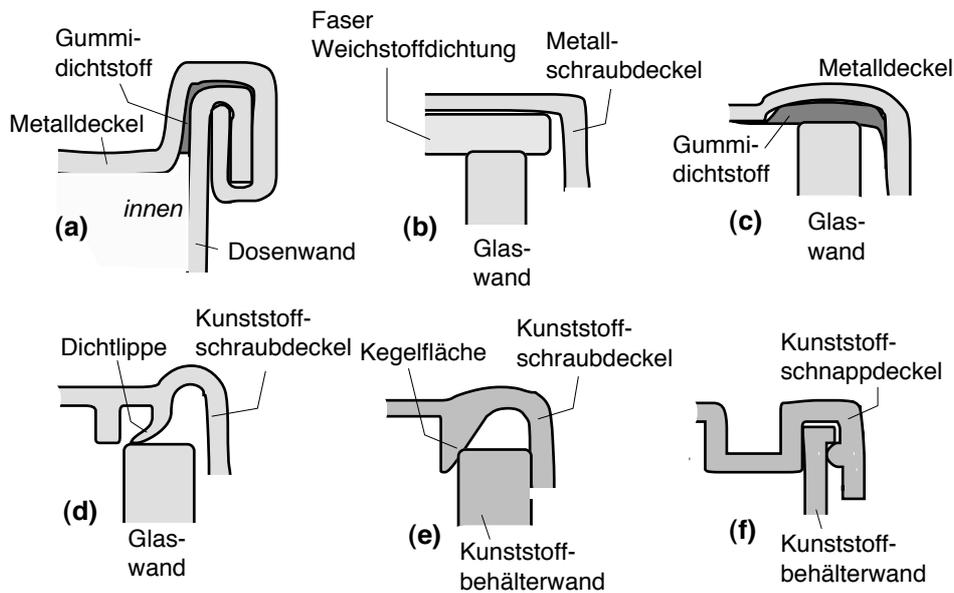


Bild 19 Abdichtung von Blechdosen, Kunststoffdosen und Gläsern
(die Gewinde der Schraubdeckel sind in den Bildern nicht dargestellt)

Bild 19 zeigt einige Beispiele. Der in Bild 19a gezeigte Verschluss einer Fischdose enthält eine biologisch kritische Dichtstelle. Das Tiefziehblech der Dose ist nur 0,2 mm dick, und die Wände sind deshalb mit Sicken versteift. Abgedichtet wird hier, indem eine bedruckte Silikonichtung am Rand einer 360°-Faltung zwischen Deckel und Unterschale eingeklemmt wird. Dabei entsteht lokal eine steife Verbindung, wobei die Dose außerhalb der Dichtstelle elastisch bleibt. Bild 19b zeigt eine Dichtung für weniger kritische Bedingungen. Hier wird eine Weichstoffdichtung zwischen den Metalldeckel und den Rand eines Glases oder einer Flasche eingespannt. Um das Eindringen von Flüssigkeit in die Dichtung aus Faserstoff zu verhindern, wird sie mit einer Kunststoffschicht laminiert.

In Bild 19c ist das vorige Konzept bei einem Verschluss eines Glasbehälters noch einen Schritt weiter geführt, indem in den verzinnnten Schraubdeckel aus Stahlblech eine gedruckte Silikonichtung integriert wurde. Die Gefahr des Abschälens der Dichtung vom Deckel ist gering, wenn die Dichtung deutlich über den Rand des Dichtkontakts hinausreicht, weil damit die Spannungen in der kritischen Randzone vermindert werden. Dies ist zweckmäßig bei Behältern für verderbliche Stoffe. Bei der Lösung nach Bild 19d bedarf es keines separaten Dichtelements, da der Schraubdeckel aus plastischem Kunststoff eine verformbare Dichtlippe aufweist, die auf dem oberen Rand des Glasbehälters aufliegt. Ein erhabener Rand innerhalb der Dichtlippe verhindert, daß die Lippe durch Überziehen beschädigt wird. Bild 19e zeigt einen ganz aus Polyethylen bestehenden Behälter mit Schraubdeckel, geeignet für Trockengut, bei-



spielsweise Arzneikapseln. Wiederum fehlt hier eine separate Dichtung, da der Deckel mit einer angeformten konischen Lippe beim Einschrauben am Innenrand des Behälters mit hoher Pressung abdichtet. Dabei wird der Behälterrund nach außen gebogen und kommt dabei mit der Innenfläche des Schraubdeckels zur Berührung. Damit wird ein Überziehen verhindert und zugleich entsteht eine zweite Dichtstelle. Schließlich zeigt Bild 19f die Abdichtung einer ganz aus Polyethylen bestehenden Filmdose mit einem Schnappverschluss. Der Deckel zentriert sich zuerst am Innenrand der Dose und wird dann unter Aufweitung einer abgerundeten Sicke über den Dosenrand gedrückt. Abgedichtet wird durch die Berührung des Deckels am Innenrand und am Bund der Dose. Konische Kontaktflächen sorgen für die zur Wasserdichtigkeit nötige Dichtungspressung.

25.10 LITERATUR

Roth, A.: Vacuum sealing techniques. Pergamon Press, Oxford, 1966

Damasis, A.: Sealants. Reinhold Publishing Corp., New York, 1967.

Anon. Manual of good practice in sealant application. Construction Industry research & Information Association, London, 1976, ISBN 0-86017-011-X.

Panek, J. (ed): Building seals and sealants. ASTM public. STP 606, Philadelphia, 1976.

Yeaple, F.: Fluid power design handbook. 2nd edition, Marcel Decker Inc., New York, 1990

Twort, A. C., Crowley, F. W., Ratnayaka, D. D.: Water supply., Arnold, London, 1994.

Anon. Loctite worldwide design handbook. Loctite Corp., Rocky Hill, Conn., USA, 1995

Hettich, V., Jäckle, M., Lechner, G.: Materialverhalten dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen, Tribologie + Schmierungstechnik 42, Heft 1, und Heft 2, 1995

Krieg, W.-E., Jäckle, M., Lechner, G.: Gehäuseabdichtung hochbelasteter Getriebe, Antriebs-technik 35, Nr.7, 1996

Klöpfer, M., Jäckle, M., Lechner, G.: Flächendichtverbindungen hochbelasteter Getriebe-gehäuse, Antriebstechnik 38, Nr.6, 1999

anon. Bitte dicht halten, Zylinderkopfdichtungen, Z. Automobilindustrie, 9, 2000

Meise, K., van den Oord, H., Rosen, F.: Materialinnovationen im Automobilssektor. Anwendungsfall: Dynamische Karosserieabdichtsysteme. in: Untersuchung und Anwendung von Dichtelementen, XII Dichtungskolloquium, Vulkan-Verlag, 2001.

Zündorf, E.: Untersuchung des Steifigkeitsverhaltens von Metall-Weichstoff-Zylinderkopfdichtungen von Industriemotoren, Diplomarbeit, FHS Bonn-Rhein-Sieg, 2002



Hinweise auf Inhaber, Urheberrecht und Verwertung von *www.fachwissen-dichtungstechnik.de*

Inhaber und Betreiber der Domain www.fachwissen-dichtungstechnik.de ist Evelyn Voigt-Müller, Samlandstr. 38, 81825 München, Deutschland.

Der gesamte Inhalt der unter der Domain www.fachwissen-dichtungstechnik.de veröffentlichten Internetpublikation einschließlich der Fachkapitel, die als PDF herunterladbar sind, ist urheberrechtlich geschützt und darf insgesamt oder in Teilen ausschließlich für den persönlichen Gebrauch ohne Vergütung kopiert und verwendet werden. Zitate sind mit Angabe der Quelle ausführlich zu kennzeichnen. Jede anderweitige Verwendung oder Verwertung, Vervielfältigung, Übersetzung, Nachdruck, Vortrag, Entnahme von Abbildungen, Funksendung, Mikroverfilmung und Speicherung auf elektronischen Datenträgern ist vergütungspflichtig und bedarf der schriftlichen Genehmigung durch den Inhaber der Domain (s.o.).

Inhaber des Urheberrechts (Copyright ©) und verantwortlich für den Inhalt von www.fachwissen-dichtungstechnik.de sind die Autoren Dr. Heinz Konrad Müller und Dr. Bernard S. Nau.

Hinweise auf den Inhalt bezüglich Handelsnamen, Warenzeichen und den gewerblichen Rechtsschutz:

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenzeichen usw. in www.fachwissen-dichtungstechnik.de berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten sind und von jedermann benutzt werden dürfen.

Ein Teil der in www.fachwissen-dichtungstechnik.de beschriebenen oder im Bild wiedergegebenen Dichtelemente und Dichtsysteme sind, ohne dass darauf hingewiesen ist, durch Patentanmeldungen, Patente oder Gebrauchsmuster rechtlich geschützt. Insofern berechtigen die wiedergegebenen Beschreibungen und Bilder nicht zu der Annahme, dass die beschriebenen oder dargestellten Gegenstände im Sinne des gewerblichen Rechtsschutzes als frei zu betrachten sind und von jedermann hergestellt oder benutzt werden dürfen. Für die Richtigkeit der Wiedergabe der in www.fachwissen-dichtungstechnik.de direkt oder indirekt zitierten Vorschriften, Richtlinien und Normen sowie für die Anwendbarkeit der konstruktiven Regeln und Hinweise im Einzelfall übernehmen die Autoren und der Betreiber der Domain keine Gewähr.