

Hochdrucktechnik in der Chemie IV

Hochdruckkompressoren bis 7000 at für Laboratorien und die chemische Industrie*

Von Dipl.-Ing. H. BAUER
Maschinenfabrik Burckhardt AG, Basel

Außerordentlich hohe Drücke werden in Forschungslaboratorien in einem einzigen Hub mit Pressen erzeugt. Bei Großversuchen im industriellen Maßstab werden jedoch Kompressoren erforderlich, welche einen dauernden Strom von Gas unter sehr hohem Druck zu liefern vermögen. Die Beanspruchungen in den Wandungen der Zylinder und der Ventilköpfe derartiger Kompressoren sind jedoch recht verschieden von den in Pressen oder in Hochdruckgefäßen auftretenden, und die erreichbaren Drücke sind infolgedessen wesentlich bescheidener.

Die Berechnung der Beanspruchung in Zylindern erfolgt zwar im wesentlichen nach denselben Formeln wie bei Hochdruckgefäßen oder Pressen, jedoch sind die Kriterien, nach denen die zulässige Anstrengung des Materials beurteilt werden muß, wesentlich verschieden. Bei Hochdruckgefäßen handelt es sich um ruhenden Druck, und dieser Zustand kann der Berechnung zugrunde gelegt werden, selbst wenn die Beanspruchung Hunderte von Malen wiederholt wird.

Eine zusätzliche Beanspruchung durch höhere Temperatur oder chemischen Angriff ist oft überlagert.

Die Zylinder von Kompressoren hingegen müssen auf Dauerfestigkeit gerechnet werden, da die Beanspruchung sich millionenfach wiederholt. Die zulässige Beanspruchung des Materials wird dabei stark reduziert und erreicht entsprechend der sogenannten Wöhler-Kurve einen Grenzwert von etwa $\frac{1}{3}$ der Zugfestigkeit.

Andererseits haben die Zylinder an Kompressoren keinen wesentlichen Temperaturbeanspruchungen standzuhalten, und im allgemeinen treten infolge der niederen Temperatur keine chemischen Beanspruchungen des Materials auf.

In einem starkwandigen Rohr unter hohem Innendruck verteilt sich die Beanspruchung über die Wand außerordentlich ungleich und erreicht einen sehr hohen Wert an der inneren Faser, während die äußere Faser sehr wenig beansprucht wird.

Um das starkwandige Rohr gegen höheren Innendruck widerstandsfähig zu machen, kann zunächst der Außendurchmesser vergrößert werden. Die Beanspruchungen an der Innenfaser können jedoch nicht mehr wesentlich reduziert werden, wenn ein Verhältnis von Außen- zu Innendurchmesser von 3:1 überschritten wird. Bei statischer Beanspruchung ist es möglich, die Beanspruchung über die Streckgrenze zu steigern. Dabei wird die plastische Deformation nahe dem Innendurchmesser zugelassen, und ein Bruch ist nicht zu befürchten, so lange die plastische Deformation nicht über den ganzen Querschnitt geht.

Bei Kompressorzylindern muß die höchste Beanspruchung unter allen Umständen unter der Streckgrenze bleiben. Da die Beanspruchung ständig zwischen einem Höchst- und einem Niedrigstwert schwankt (entsprechend dem Enddruck und dem Saugdruck im Zylinder), muß darauf geachtet werden, daß die Spannungsveränderung das zulässige Maß nicht überschreitet, das für jeden Werkstoff durch das Wechselfestigkeitsdiagramm gegeben ist. Aus Abb. 1 ergibt sich, daß die zulässigen Beanspruchungen erheblich geringer sind als bei Behältern für ruhenden Druck und daß die Bruchgefahr nicht so sehr von der größten Spannung bestimmt wird (selbst wenn diese nahe an der Streckgrenze liegt), sondern vom Wechsel der Spannungen. Um diesen Wechsel

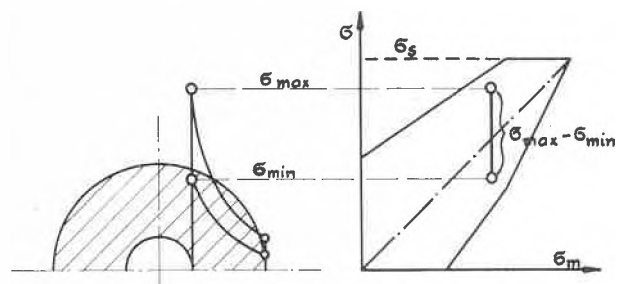
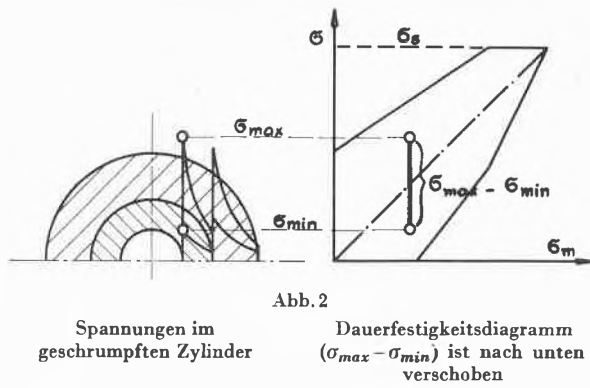


Abb. 1

Spannungen im Zylinder
 σ_{max} bei Enddruck
 σ_{min} bei Saugdruck

Dauerfestigkeitsdiagramm
Die Dauerbruchgefahr hängt von
($\sigma_{max} - \sigma_{min}$) ab

* Vortrag, gehalten am «Symposium über Hochdrucktechnik in der Chemie», 26. Oktober 1963, Zürich.



in zulässigen Grenzen zu halten, darf daher die Differenz zwischen Enddruck und Saugdruck ein bestimmtes Maß nicht überschreiten.

Die ungleiche Spannungsverteilung über den Querschnitt einer dicken Wand kann bekanntlich durch Schrumpfung oder Autofrettage verbessert werden. Dieser Kunstgriff ist seit langem bekannt und wird im Geschützbau oder im Bau von Hochdruckbehältern angewendet. Leider hat er beim Bau von Kompressorzylindern bei weitem nicht dieselbe Wirksamkeit, wie aus Abb. 2 hervorgeht. Bei ruhendem Druck gestattet die Schrumpfung den erreichbaren Enddruck etwa zu verdoppeln, denn die Grenze ist dadurch gegeben, daß bei drucklosem Behälter die Innenfaser wiederum nicht über die Streckgrenze beansprucht werden darf. Bei der Beanspruchung durch wechselnden Druck hingegen bleibt die Differenz der Beanspruchungen gleich und wird nur in ein Gebiet geringerer Spannungen verschoben. Dadurch wird lediglich eine sehr geringe Erhöhung der Dauerfestigkeit erreicht, da das Diagramm an seinem unteren Ende etwas breiter ist. Trotzdem wird die Schrumpfung bei Hochdruckzylindern angewendet, da sie es leichter möglich macht, im Fortschritt begriffene Dauerbrüche zu erkennen, bevor sie durch den ganzen Materialquerschnitt hindurchgegangen sind.

Ferner muß mit einem Hochdruckkompressorzylinder mit zusätzlichen Beanspruchungen gerechnet werden, da die Idealform des glatten, durchgehenden Rohres nicht verwirklicht werden kann. Kerbwirkungen sind unver-

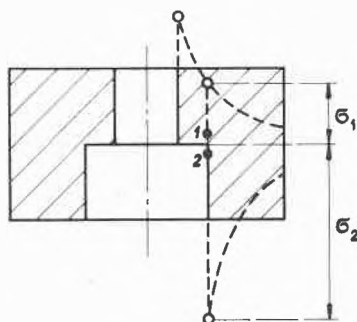


Abb. 3. Zylinder mit abgesetzter Bohrung. Die Spannungen zweier unmittelbar benachbarter Punkte 1 und 2 sind sehr verschieden, wodurch eine Kerbwirkung entsteht

meidlich, die die Spannungen um ein Mehrfaches erhöhen, vor allem dort, wo Querbohrungen angebracht werden müssen. Bei Behältern für ruhenden Druck bewirkt die Spannungserhöhung ein örtliches Überschreiten der Streckgrenze, und die Spannungsspitzen bauen sich gewissermaßen selbst ab. Bei wechselndem Druck darf jedoch die höchste Spannung niemals die Streckgrenze überschreiten. Die Kerbwirkung kann durch sorgfältige Ausrundung des Überganges vermindert, aber niemals vollständig beseitigt werden.

Eine weitere Ursache für Kerbwirkungen sind scharfe Veränderungen der Wandstärken (siehe Abb. 3).

Zwei Punkte unmittelbar links und rechts der gedachten Trennlinie haben infolge verschiedener Spannungen das Bestreben, verschiedene Formänderungen durchzuführen, was aber nicht möglich ist. Dadurch kommt eine Kerbwirkung zustande, die unter Umständen zu einem Riß führen kann.

Es muß daher das Bestreben des Konstrukteurs von Hochdruckkompressoren sein, Kerbwirkungen entweder ganz zu vermeiden oder nach Möglichkeit unschädlich zu machen.

Bei Querbohrungen kann dies dadurch geschehen, daß man den gefährdeten Teil unter sehr hohem Außendruck setzt und damit die Spannungen ins Druckgebiet verlagert. Ein anderer, sehr eleganter Weg ist, die unvermeidlichen Durchdringungen für den Anschluß von Saug- und Druckbohrungen an eine Stelle zu legen, die nicht mehr unter Wechseldruck steht, so daß plastische Formänderungen unbedenklich zugelassen werden können. Bei unvermeidbarer Veränderung der Wandstärke kann man die einzelnen Teile trennen und zylindrische Ringe aufeinanderschichten.

Es scheint naheliegend, die Zylinder dadurch widerstandsfähiger zu machen, daß ein Material höherer Festigkeit verwendet wird. Leider ist aber die Kerbempfindlichkeit von Stählen höherer Festigkeit wesentlich größer als diejenige von gewöhnlichen Stählen und die Sorgfalt bei der Vermeidung von Kerbwirkungen gewinnt dadurch erhöhte Bedeutung.

Die praktische Anwendung dieser Gedankengänge, die in vereinfachter Form vorstehend erläutert sind, wird

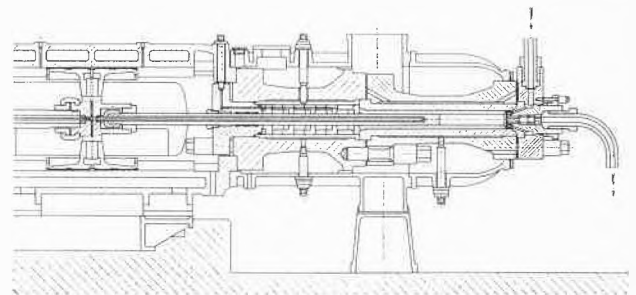


Abb. 4. Hochdruckzylinder eines Kompressors aus den zwanziger Jahren für 1000 at. Bereits weitgehende Auflösung in zylindrische Teile, Kerbwirkung der Saugbohrung unschädlich, weil im Bereich konstanten Druckes, jedoch noch Querschnittswechsel in den Kammeringen der Plungerdichtung

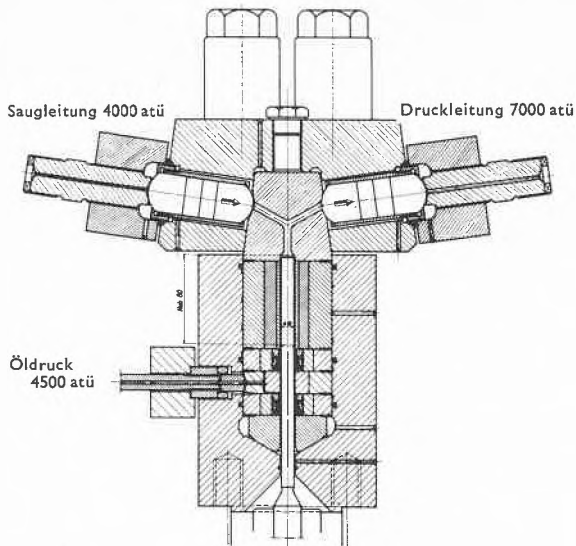


Abb. 5. Laborkompressor 7000 at, Plungerdurchmesser 12 mm. Schroffe Querschnittsveränderungen, vermieden durch Auflösung in zylindrische Ringe. Kerbwirkung der Durchdringung von Bohrungen im Ventilkopf, kompensiert durch (konische) Schrumpfung

durch Abbildungen 4 bis 6 am Beispiel ausgeführter Maschinen gezeigt. Es ist bemerkenswert, wie die gleichen Überlegungen sowohl bei sehr kleinen (Abb. 5) und bei sehr großen Maschinen (Abb. 6) zu ähnlichen Formen geführt haben.

Durch sorgfältige Konstruktion ist es heute möglich, Drücke von 3500 atm für industrielle Kompressoren und große Leistungen vollkommen betriebssicher zu beherrschen. Für Laborkompressoren ist es zulässig, nicht auf Dauerfestigkeit, sondern auf Zeitfestigkeit zu rechnen, da die Betriebsdauer dieser Maschinen geringer

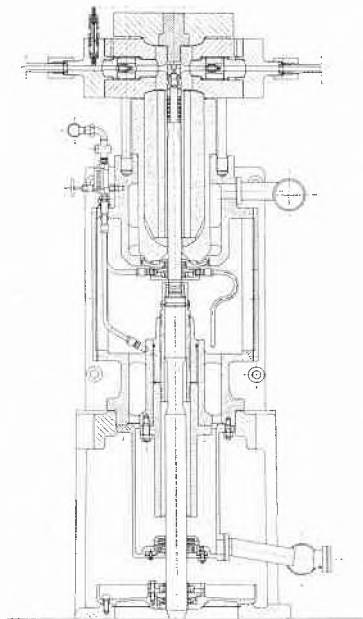


Abb. 6. Großkompressor für 2000 at, Kolbendurchmesser 45 mm. Kerbwirkung der Durchdringung im Ventilkopf, kompensiert durch Schrumpfung

ist. Man kann daher höhere Druckverhältnisse und höhere Druckdifferenzen zulassen, um Drücke bis 7000, ja sogar bis 10 000 atm zu bewältigen.

Aus den Problemen des Kompressorenbaus sind im vorstehenden nur Fragen der Festigkeit herausgegriffen und in vereinfachter Form geschildert. Die Fragen der Bauart der Ventile und der Abdichtung müssen unbehandelt bleiben, um den verfügbaren Raum nicht zu sprengen.

Es soll jedoch noch kurz auf das Problem des Baus von schmierungslosen Maschinen hingewiesen werden, die den Chemiker besonders interessieren, da das Produkt nicht durch Spuren von Schmiermitteln verunreinigt wird.

Solche Maschinen werden heute mit Erfolg für Drücke bis 80 at gebaut, und die Beherrschung von 300 at scheint nicht unmöglich zu sein.

Für noch höhere Drücke ist es leider jedoch heute noch nicht möglich, schmierungslose Maschinen zu bauen, da die selbstschmierenden Materialien, wie Kohle, Teflon, den auftretenden Flächendrücken nicht gewachsen sind.

Bei einem kleinen Laborkompressor für einen Enddruck von 7000 at ist dieses Problem gelöst durch die Zwischenschaltung einer Stahlmembran, welche durch den Druck einer pendelnden Ölsäule hin- und hergebogen wird.

Da die ertragbaren Durchbiegungen einer Stahlmembran sehr gering sind, muß auf einen sehr großen Durchmesser abgedichtet werden. Dies bedingt enorme Schrau-

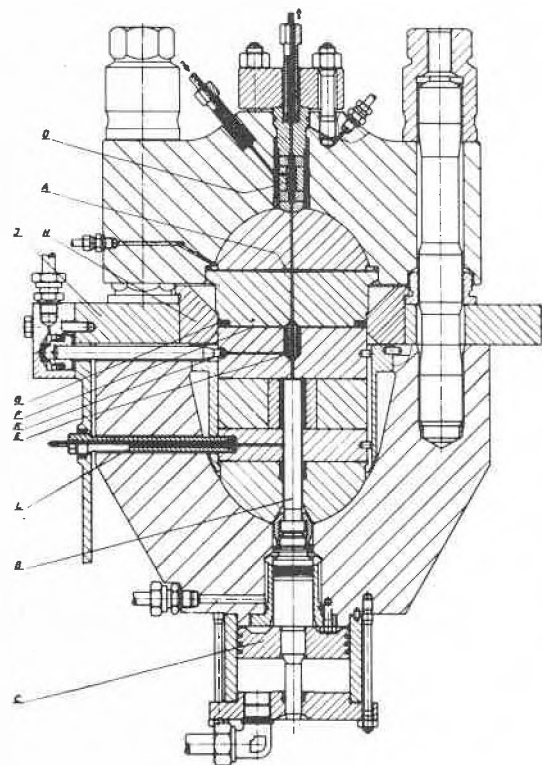


Abb. 7. Membrankompressor (schmierungslos für 7000 at, Plungerdurchmesser 15 mm. Hydraulische Betätigung der Membran

ben, so daß die Vorspannung hydraulisch durch den Arbeitsdruck selbst erzeugt werden muß.

Der Anpreßdruck der Membran muß proportional zum jeweiligen Enddruck geregelt werden, damit nach Entlasten der Maschine der spezifische Flächendruck in der Dichtfläche nicht so groß wird, daß er die Membran zerstört.

Die Kompressibilität des Öles ist bei diesen hohen Drücken bereits außerordentlich merkbar. Damit bei vollem Enddruck die Membran ihren vollen Hub machen kann, muß das Hubvolumen des Antriebsplungers

größer sein als das Hubvolumen der Membran. Um die Membran vor Überlastung und Zerstörung zu schützen, ist infolgedessen eine Einrichtung vorgesehen, die den Hub des Plungers beendet, sowie die Membran an den Anschlag gekommen ist.

Die Schwierigkeiten, einen solchen schmierungslosen Kompressor zu konstruieren, konnten zwar in den bescheidenen Dimensionen eines Laboratoriumskompresors gelöst werden; jedoch liegt die Anwendung dieses Prinzips für großtechnische Ausführung nicht im Bereich der Möglichkeit.