

Druckgeräte

aus Glas / Teil 2

von Gerhard Becker

Wie schon im ersten Teil des Berichtes (VDG-N 1/2017) erläutert, fallen Glasgeräte mit einem Betriebsüberdruck größer 0,5 bar unter die Druckgeräterichtlinie und müssen laut DGRL so ausgelegt und gefertigt werden, dass sie unter den geplanten maximalen Betriebsbedingungen sicher betrieben werden können.

Die Umsetzung der konformen Auslegung von Druckgeräten kann über das Regelwerk AD 2000 erfolgen. Die erforderlichen Wandstärken der Glaswandungen können durch eine Festigkeitsberechnung errechnet werden. Das AD 2000-Regelwerk stellt hierfür die erforderlichen Berechnungsgrundlagen mit den Merkblättern der sogenannten B-Reihe bereit.

Zwar werden Druckgeräte vorwiegend aus Metall gefertigt und die Berechnungsvarianten berücksichtigen insbesondere die Eigenschaften von Metallen, aber die Berechnungsmodule der B-Reihe können unter Berücksichtigung von AD 2000-Merkblatt N4 „Druckbehälter aus Borosilicatglas 3.3“ und Anlage 1, auch für Druckgeräte aus Glas verwendet werden.

Eine händische Rechnung anhand von vorgegebenen Formeln und erforderlicher Beiwerte kann recht mühsam und fehleranfällig sein. Daher erfolgt in der Regel die Berechnung mit zertifizierten Berechnungsprogrammen am PC. Dieser Komfort hat seinen Preis, die zur Wanddickenberechnung erforderlichen Programm-Module der B-Reihe kosten im Paket ca. 5000 Euro. Der Preis verdeutlicht aber auch, dass es bei Festigkeitsberechnungen über den „Dreisatz“ hinausgeht und es umfangreiche fachliche Kenntnisse erfordert, damit unter dem Strich

auch das Ergebnis stimmt.

Die korrekte Auslegung von Druckgeräten nach der DGRL und deren Einhaltung, sollten entsprechend schwarz auf weiß dokumentiert werden. Denn wenn im Schadensfall nicht nachgewiesen werden kann, dass das Glasteil den Sicherheitsanforderungen entsprochen hat, steht im Streitfall „Haus und Hof“ auf dem Spiel.

Die Festigkeit von Glas

Die ersten Erfahrungen mit der Festigkeit von Glas sammelt man bereits in den ersten Ausbildungswochen zum Glasbläser. Schnell hat man den Bogen raus, dass ein Rohr besonders dann leicht bricht, wenn man es an der gewünschten Stelle gekonnt anritz, etwas mit Spucke befeuchtet und durch Auseinanderziehen einer leichten Zug- und Biegespannung aussetzt, oder man macht die unliebsame Erfahrung, dass ein zu schnelles Aufwärmen oder Abkühlen zu ungewolltem Glasbruch führt.

Diese praktischen Erkenntnisse zeigen auf:

- Der Festigkeitswert von Glas ist von der Oberflächen-güte abhängig.
- Der Glasbruch erfolgt durch Zug- und Biegespannungen und geht von der Stelle mit der größten Oberflächenverletzung aus.
- Durch Temperaturdifferenzen auftretende thermische Wandspannungen im Glas, können den Festigkeitswert von Glas soweit schwächen, dass es bis zum Glasbruch kommt.

Im AD200-Merkblatt N4 sind die Festigkeitswerte wie folgt festgelegt und enthalten bereits einen zahlenmäßig nicht genannten Sicherheitsbeiwert:

Die zulässige Beanspruchung von Borosilicatglas 3.3 durch Zug und Biegung beträgt

$K/S = 6 \text{ N/mm}^2$ und berücksichtigt in der Praxis vorkommende Oberflächenveränderungen durch geschliffene Flächen oder durch mechanische Einwirkungen entstehende kleine Kratzer während der Einsatzdauer.

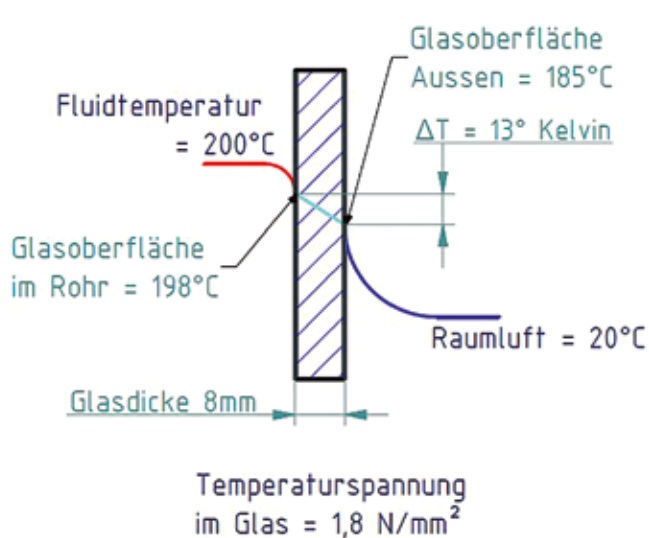
(Anmerkung: Die DIN EN 1595 „Druckgeräte aus Borosilicatglas 3.3“ nennt hier einen Wert von 7 N/mm^2)

Der ebenfalls aufgeführte höhere Wert $K/S = 10 \text{ N/mm}^2$ setzt dagegen voraus, dass die durch Heißverformung gebildete feuerblanke Oberfläche nicht verändert wurde bzw. ausgeschlossen werden kann, dass eine Veränderung eintritt. Gewöhnlich dürfte der Laboralltag aber seine Spuren im Glas hinterlassen und daher sollte dieser Wert zur Berechnung nicht verwendet werden.

Der im Merkblatt genannte zulässige Wert für Druck $K/S = 100 \text{ N/mm}^2$ verdeutlicht die hohe Druckfestigkeit von Glas, ist aber eher unbedeutend, da gewöhnlich auf Zug- und Biegespannung gerechnet wird.

Thermische Wandspannung

Temperaturunterschiede zwischen der Innen- und Außenwandung führen zu thermischen Wandspannungen im Glas und sind laut AD 2000 Merkblatt N4 zu berücksichtigen.



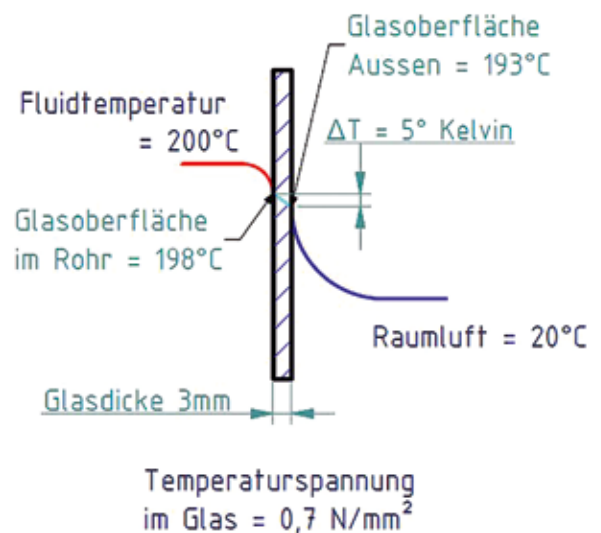
Zur Ermittlung dieser Temperaturspannung muss man die Mathematik bemühen, wobei das Ergebnis mitunter abhängig ist von der

- spezifischen Wärmekapazität der jeweiligen Medien an der Innen- und Außenwand
- Temperaturdifferenz der jeweiligen Medien und deren Fließgeschwindigkeit
- Glasdicke und der geometrischen Form, Zylinder, Kugel usw.

Auch ohne Einser-Abschluss in Mathe lässt sich erahnen, dass eine genaue Berechnung nur möglich ist, wenn alle Größen im Vorfeld genau bekannt sind.

In der Praxis werden Glasgeräte mit unterschiedlichen Parametern gefahren und es ist daher erforderlich für das Glasdruckgerät einen realen max. zulässigen Grenzwert für die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenwand festzulegen. Dieser Wert wird als Delta T bezeichnet und in Grad Kelvin angegeben.

Die Abbildung unten erklärt den Wert Delta T anschaulich und zeigt hier den Einfluss der Rohrwandstärke auf Delta T und die resultierenden Temperaturspannungen in der Glaswandung des Rohres.



Wird ein Glasdruckgerät mit 8 mm Wandstärke z.B. für die Temperaturdifferenz Delta T = 13°K ausgelegt, ist der Festigkeitswert für die Berechnung $K/S = 6 \text{ N/mm}^2$ um die Temperaturspannung $1,8 \text{ N/mm}^2$ zu verringern. Der für die Festigkeitsberechnung eingesetzte Wert beträgt somit $K/S = 4,2 \text{ N/mm}^2$.

Die Festigkeitsberechnung

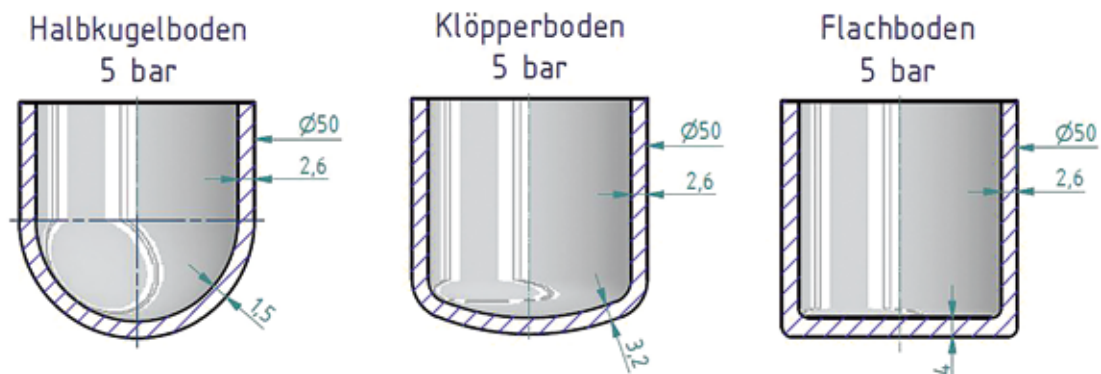
Die erforderlichen Mindestwandstärken werden nach den Merkblättern der B-Reihe mit der in AD 2000 N4 genannten zulässigen Zug- und Biegespannung von $K/S = 6 \text{ N/mm}^2$ und im Falle einer Temperaturbelastung abzüglich der max. zulässigen Temperaturspannung berechnet.

Die Berechnung eines Druckgerätes erfolgt nicht als Ganzes, sondern es werden, wie bei einer Volumenberechnung, jeweils einzeln die unterschiedlichen geometrischen Formteile des Glasbehälters, wie Rohrzylinder, Bodenform, Rohrbögen, Ausschnitte/Stutzen usw. betrachtet, eventuelle Abhängigkeiten zueinander werden berücksichtigt und mit gegenseitiger Beeinflussung berechnet.

Im Falle der unten abgebildeten Bodenformen erfolgt die Berechnung des Zylinders über das Merkblatt B1 „Zylinderschalen und Kugelschalen unter innerem Überdruck“

Die gewölbte Bodenform erfolgt über Merkblatt B3 „Gewölbte Böden unter innerem oder äußerem Überdruck“ Damit lassen sich Halbkugel-, Klöpfer- und Korbbogenböden berechnen.

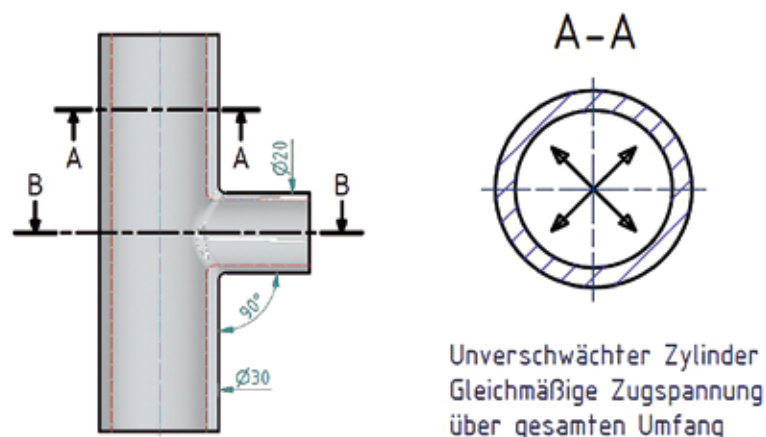
Der Flachboden erfolgt über Merkblatt B5 „Ebene Böden und Platten nebst Verankerung“



Die Wanddicken sind die erforderlichen Mindestwanddicken

Wie das Ergebnis aufzeigt ist die Kugelform die stabilste Form und benötigt daher die kleinste Wandung. Am fertigen Glasteil dürfen diese Mindestwandstärken nicht unterschritten werden.

Der Schnitt A-A zeigt einen ungeschwächten Glaszylinder. Der innere Überdruck erzeugt in der Glaswandung eine gleichmäßig verteilte Zugspannung, da sich das Rohr gleichmäßig nach allen Seiten „aufblasen“ möchte.



Ungeschwächter Zylinder
Gleichmäßige Zugspannung
über gesamten Umfang

$$s = \frac{D_a \cdot p}{20 \frac{K}{S} \cdot v + p} + c_1 + c_2$$

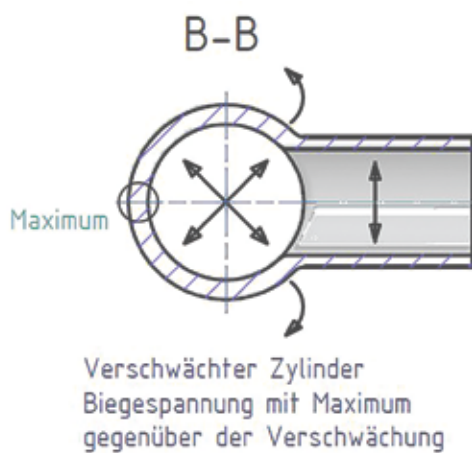
Die Berechnungsformel nach AD 2000 ist hier relativ einfach und diese kann auch ohne große Anforderungen mit dem Taschenrechner erfolgen.

Die Formelzeichen v , c_1 und c_2 werden bei Glas nicht berücksichtigt und sind für metalltypische Abschlüsse bzw. Abnutzungsfaktoren reserviert.

Für einen inneren Überdruck von 5 bar wäre unter der Berücksichtigung einer Temperaturspannung für das Rohr $d = 30$ mm eine Wandung von 1,6 mm erforderlich. Ein 30er Rohr mit 2,0 mm Wandung würde somit den Anforderungen gerecht werden.

Verschwächung und gegenseitige Beeinflussung

Der Schnitt B-B zeigt den gleichen Glaszylinder, jedoch mit einem seitlichen Ansatzrohr $d = 20$ mm.



Der Hauptzylinder $d = 30$ mm wird durch die seitliche Öffnung geschwächt und das Rohr neigt zum „aufklappen“.

Es entsteht eine Biegespannung, die nun nicht mehr gleichmäßig in der Wandung verteilt ist, sondern ein Maximum gegenüber dem Stutzen bildet.

Die Berechnung ist hier aufwendiger, denn wie stark die Verschwächung ausfällt ist vom seitlichen Stutzendurchmesser und dessen Wandstärke abhängig.

Dabei gilt: ein seitlicher Stutzen mit großer Wandung kann die Schwächung entsprechend besser kompensieren als ein Stutzen mit kleiner Wandung.

Beispiel: Der seitliche Stutzen soll mit einem Rohr $d = 20$ und 1,8 mm Wandung ausgeführt werden.

Die rechnerische Mindestwandung für das 20er Rohr alleine betrachtet ergibt 1,1 mm.

Der seitliche Stutzen erfordert am 30er Rohr ein Loch mit 16,4 mm Durchmesser.

Diese Öffnung führt zu einer Verschwächung und das 30er Rohr benötigt nun laut Berechnungsmodul „B9 Ausschnitte in Zylindern, Kegeln und Kugeln“ eine Wandung von 3 mm um diese Schwächung auszugleichen.

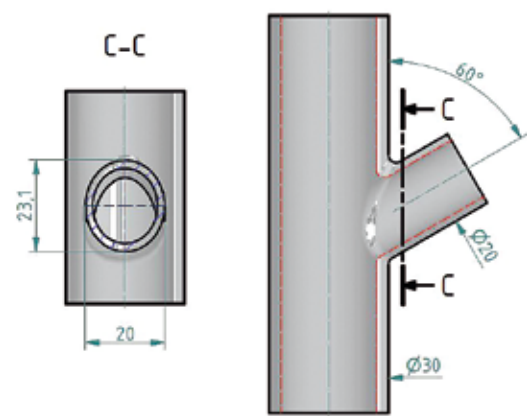
Belässt man die Mindestwandung des seitlichen Stutzens bei 1,1 mm, kann der Stutzen die Schwächung nicht reduzieren.

Da aber ein Rohr mit einer Wandung von 1,8 mm vorgesehen ist, kann die Mindestwandung für das seitliche 20er Rohr auf 1,6 mm angehoben werden. Diese „Reserve“ von 0,5 mm kann einen Teil der Verschwächung kompensieren.

Das 30er Rohr benötigt nun eine Wandung von 2,5 mm und könnte mit einem 30er Rohr mit 2,8 mm Wandung realisiert werden.

Das Ergebnis gilt aber nur dann, wenn der Stutzen rechtwinklig mit 90° angesetzt wird, denn auch die Neigung des Stutzens hat Einfluss auf die Verschwächung.

Der Schnitt C-C verdeutlicht die Vergrößerung der Öffnung und somit die Verschwächung in Abhängigkeit zur Stutzenneigung.



Beträgt die Neigung, wie in der Abbildung 60° , benötigt das 30er Rohr eine Mindestwandung von 2,9 mm.

Durch die Erhöhung der Mindestwandung des 20er Rohres auf 2,1 mm kann die Wandung des 30er Rohres wieder auf 2,5 mm gedrückt werden.

Liegen zwei oder mehrere Stutzen mit wenig Abstand zueinander vor, ist eine weitere Schwächung möglich, die durch einen Flächenvergleich zu ermitteln ist.

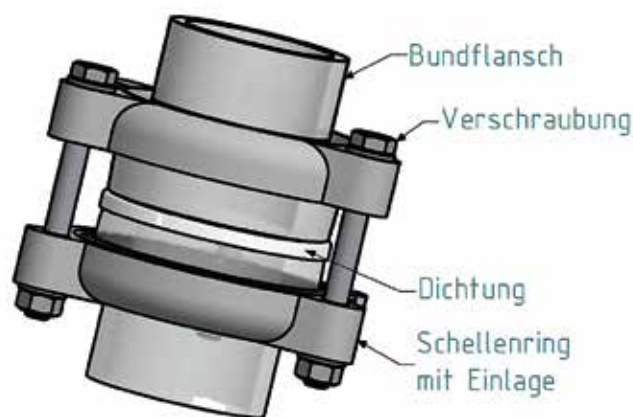
Die ganze Rechnerei nützt aber wenig, wenn die berechneten Wandungen am Glasteil nicht kontrolliert werden. Wandungen an Ansatzstellen oder die Stärke von Böden können mit einem Messschieber nicht gemessen werden. Hierzu ist ein Ultraschall-Wanddickenmessgerät die beste Wahl.

Die Verbindungen

Besondere Aufmerksamkeit erfordern bei Druckbehältern die Verbindungen und Anschlüsse. Die üblichen Normschliffe sind bei innerem Überdruck eher als Startrampen für eingesteckte Glasteile, als eine sichere kraftschlüssige Verbindung anzusehen. Es gibt auch keine allgemeingültige Richtlinie, die den zulässigen Überdruck für Normschliffverbindungen regelt.

Kleine Schläuche oder Rohre können durch GL-Gewinderohre eingeführt und mit entsprechenden GL-Schraubkappen verklemmt werden. Die eingeführten Einbauteile sollten gegen Herausrutschen gesichert werden. Allerdings ist zu beachten, dass die von Herstellern in Produktkatalogen genannten Daten für max. Druck und Temperatur meistens nicht in Kombination gelten. Die maximale Druckangabe bezieht sich auf Raumtemperatur und umgekehrt die maximale Temperatur auf eine drucklose Verbindung.

Es liegt daher kein AD-2000 konformer Nachweis vor, dass eine GL-Schraubverbindung z.B. bei 200°C und 5 bar Überdruck dauerhaft dicht ist. Dies lässt sich nur durch Testreihen unter realen Betriebsbedingungen ermitteln.



Für den Zusammenbau von Glasdruckgeräten sind daher Planflansch-Verbindungen am besten geeignet. Wegen der guten chemischen Beständigkeit werden für Glas-Flanschverbindungen meistens Dichtungen aus PTFE verwendet. Bei sehr hohen Temperaturen können Graphitdichtungen und bei hohen Drücken O-Ringe mit Nuteinbau verwendet werden.

In den technischen Datenblättern der Werkstoffe werden die max. Temperaturen z.B. für PTFE oder O-Ringe aus

Elastomere als „Lufttemperatur“ angegeben. Das heißt, die Temperaturgrenzen gelten ohne jegliche einwirkende, mechanische Belastung, was im eingebauten Zustand ja nicht mehr der Fall ist. Die realen Temperaturgrenzen sollten daher um einiges niedriger angesetzt werden.

Damit eine Dichtung überhaupt ihren Sinn erfüllen kann und dicht ist, wird eine entsprechend hohe Verpressung benötigt, die durch das Zusammenschrauben, entsprechend stabil ausgelegter Schellenringe, erfolgt. Der erforderliche Anpressdruck ist wiederum abhängig vom Dichtungswerkstoff, der Größe und Qualität der Auflagefläche und den maximalen Betriebsdaten.

Da die Verpressung im Bundflansch eine mechanische Glasspannung erzeugt, ist diese durch einen ausreichend dimensionierten starken Glas-Bund zu kompensieren.

Die rechnerisch anspruchsvolle Auslegung der Parameter einer Planflanschverbindung erfolgt über Modul 7 und Modul 8 der B-Reihe.

Die Prüfung von Glasdruckgeräten

Für Druckbehälter aus Glas ist keine Prüfung mit dem maximalen, zulässigen Druck vorgesehen, sondern eine visuelle Prüfung auf Fehlerfreiheit, eine optische Prüfung auf Spannungsfreiheit und die Prüfung auf Einhaltung der Mindestwandstärken.

Nach erfolgtem Auf- und Zusammenbau sind die Glasteile nochmals auf die hierdurch verursachte mechanische Spannung hin zu überprüfen. Vor der ersten Inbetriebnahme ist eine Dichtheitsprüfung durchzuführen, die den maximalen Betriebsdruck nicht übersteigen darf.

Die Absicherung im Betrieb

Selbst mit einer genauen Berechnung aller Parameter und einer fehlerfreien Herstellung durch den Glasapparatebauer: Glas bleibt Glas, es kann zerbrechen. Nicht vorhersehbare Reaktionen können im Betrieb zu schnellem Druckanstieg und plötzlichen thermischen Reaktionen führen.

Durch den Einbau von Berstscheiben oder Überströmventilen können Glasgeräte gegen ein Überschreiten des zulässigen Druckes abgesichert werden.

Diese Sicherheitseinrichtungen haben eine Toleranz im Ansprechverhalten, die bei der Auslegung des Druckgerätes zu berücksichtigen ist.

Wenn Glasdruckgeräte zerbersten, dann schlagartig ohne Vorwarnung. Dies stellt aufgrund umherfliegender Scherben und gefährlicher Fluide eine erhebliche Gefahr für das Umfeld da.

Als Betreiber sollte man sich dieser Gefahr bewusst sein und Glasdruckgeräte mit weiteren Sicherheitsmaßnahmen, wie z.B. Splitterschutzvorrichtungen und Auffangwannen absichern.