

DIE WANDDICKENBESTIMMUNG VON ROHREN?



Bockwurst- Formel

Wie bestimmt man die Wandstärke von Rohren
oder auch rotationssymmetrischen Körpern?

Versuchen Sie sich mal zu erinnern. Wann haben Sie zuletzt eine geplatzte Bockwurst gesehen, die einen Riss quer zur Längsachse aufwies? Wahrscheinlich noch nie und wenn, dann hatte vorher jemand reingeritzt. Eine Bockwurst platzt immer parallel zur Längsachse.

Dieser Umstand war Grund genug, eine wichtige Formel, die auch uns Anlagenmechaniker angeht, als Bockwurst-Formel zu bezeichnen. Ein anderer, auch sehr gebräuchlicher Begriff dafür ist die Kesselformel. Gemeint ist der rechnerische Ansatz, der beschreibt, welcher

Belastung das Rohrmaterial durch einen im Rohr herrschenden Überdruck ausgesetzt werden kann. Mit diesem Ansatz werden dann nicht etwa philosophische Fragen verknüpft. Vielmehr geht es um handfeste Probleme von Rohrherstellern oder auch Herstellern von zylindrischen Pufferspeichern oder

ähnlichen Behältern. Alles, was sich als runder Gegenstand einem Innendruck ausgesetzt sieht, läuft Gefahr, bei einem gewissen Druck zu platzen. Und für sämtliche Hersteller gilt es, von diesem Belastungspunkt weit entfernt zu bleiben. Dies kann man natürlich über die Wandstärke des Rohres oder Behälters bewerkstelligen. Aber dicke Wandstärken kosten Material und verteuern ein Produkt. Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Werkstoff mit entsprechender Eigenschaft auszuwählen, um ein Bersten zu verhindern. Aber auch bei dieser Wahl sind Grenzen gesetzt, die sich aus dem Preis, der Handhabbarkeit, Verfügbarkeit oder auch dem Gewicht des gewählten Materials ergeben.

DIE FORMEL

Zuerst soll anhand der Bockwurst-Formel einiges an Zusammenhängen abgeleitet werden. Die Mindestwanddicke eines rotationssymmetrischen Körpers, also eines Rohres, ergibt sich aus

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_{zul}}$$

wobei

s = Wanddicke

p = Druck

D = Durchmesser

σ_{zul} = zulässige Zugspannung des Werkstoffes (gesprochen Sigma zul)

Bei den folgenden Ausführungen steht das Rohr im Mittelpunkt der Betrachtungen. Die Zusammenhänge lassen sich aber immer auch auf einen Pufferspeicher oder Ähnliches übertragen. Man kann, wenn man möchte, auf Anhieb die logischen Zusammenhänge aus der Formel herauslesen. Die Unterscheidung zwischen Zähler und Nenner lässt nämlich tief blicken. Je größer Druck oder Durchmesser sind, desto größer muss die Wandstärke des Rohres sein. Klar, denn diese Kürzel stehen als Zähler auf dem Bruchstrich ($2/1 < 3/1$). Wenn aber etwas unter dem Bruchstrich steht, dann verkleinert es das Ergebnis, je größer dieser Zahlenwert wird. Klar, je größer der Nenner, desto kleiner das Ergebnis ($3/4 < 3/2$). Je größer also die zulässige Spannung eines Werkstoffes ist, desto kleiner kann die Wandstärke für ein Rohr aus diesem Werkstoff ausfallen. Wenn von Spannung die Rede ist, landet man jedoch nicht, wie man vermuten könnte, bei der Elektrotechnik.

SPANNUNG?

In der Werkstofftechnik spricht man bei einer ziehenden Belastung in einem Werkstoff von einer Zugspannung. Und

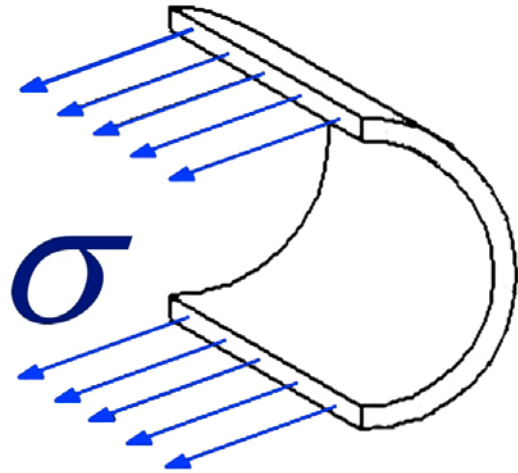


Bild: IBH

Die Spannungen in einem mit Innendruck belasteten Rohr, dargestellt als Vektoren

jeder feste Körper hat eine maximale Zugspannung, der er ausgesetzt werden kann, ohne zerrissen zu werden.

Der Wert der Zugfestigkeit wird gerne in Newton pro Quadratmillimeter (N/mm^2) angegeben. Zehn Newton kann man sich sehr leicht vorstellen als die Gewichtskraft von einem Kilogramm Masse. Hängt diese Masse von einem Kilogramm an einem Faden mit einem Millimeter Querschnittsfläche und reißt dieser Faden dann so gerade eben nicht, entspricht dies einer Zugfestigkeit von zehn Newton pro Quadratmillimeter ($10 N/mm^2$).

Zugfestigkeit verschiedener Werkstoffe in N/mm^2

Edelstahl	500
Stahl	350
Grauguss	250
Kupfer	200
Aluminium	100
Polyvinylchlorid (PVC)	50
Polyethylen vernetzt (PEX)	18
Polybutylen (PB)	17

(Die realen Werte aus der Praxis variieren stark in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der aufgeführten Werkstoffe. Die abgebildeten Werte sind daher nur zur Verwendung als Rechenbeispiel geeignet).

An einen Edelstahlfadens mit der Querschnittsfläche von $1 mm^2$ könnte also ein Gewicht von 50 kg befestigt werden. An einen Faden mit gleicher Dicke aus Polybutylen hingegen nur ein Gewicht von 1,7 kg Masse.

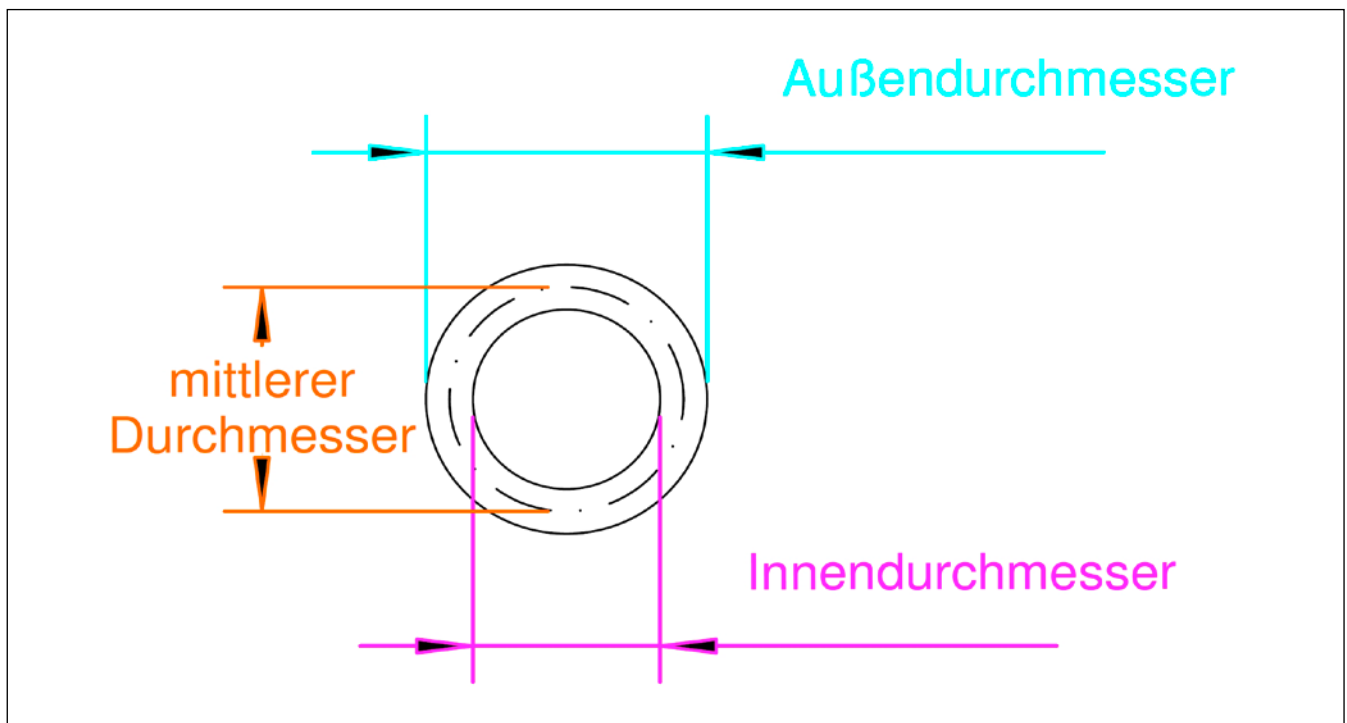


Bild: IBH

Für die Bockwurst-Formel wird der mittlere Durchmesser eingesetzt

SPANNENDE ÜBERTRAGUNG

An einem Rohr hängen natürlich keine Gewichte, welche die Außenhaut fadenförmig auseinanderziehen. Aber an der uralten Konstruktion eines Weinfasses kann man sehr leicht erahnen, welche Kräfte dort wirksam werden. Es sind Zugkräfte, die in Längsrichtung diesen Hohlkörper aufreißen wollen. Und nur die schweren Eisenreifen eines Fasses verhindern das Bersten. Der Druck im Rohr verhält sich genauso. Der Innendruck möchte das zum Kreis geformte Rohrmaterial gewissermaßen wieder platt auseinander walzen.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Ein Rohrhersteller möchte mit einem geheimnisvollen neuen Rohrwerkstoff den Sanitärmarkt aufrollen. Die Zugfestigkeit des Werkstoffes beträgt 20 N/mm^2 . Es soll zu einem mittleren

Durchmesser von 15 mm gefertigt werden. Das Rohr soll in der Erprobung einem Druck von 10 bar standhalten. Welche Wandstärke der Prototyp erhält, kann man dann näherungsweise ausrechnen.

Gegeben:

$$p = \text{Druck} = 10 \text{ bar} = 1,0 \text{ N/mm}^2$$

(denn $1 \text{ bar} = 0,1 \text{ N/mm}^2$)

$$D = 15 \text{ mm}$$

$$\sigma_{zul} = 20 \text{ N/mm}^2$$

$$s = \frac{1,0 \text{ N/mm}^2 \cdot 15 \text{ mm}}{2 \cdot 20 \text{ N/mm}^2} = 0,375 \text{ mm}$$

Die Erprobung könnte also erfolgreich mit einer Rohrwandstärke von 0,375 mm erfolgen. Allerdings sind dann noch keine Sicherheiten gegen das Platzen eingeplant. Man würde für den praktischen Einsatz die Wandstärke wahrscheinlich zumindest noch verzweifachen, um eine doppelte Sicherheit zu erreichen.



DICTIONARY

Platzen	=	burst
Wandstärke	=	wall thickness
Sicherheit	=	safety
Zugbelastung	=	tensile load
Wurst	=	sausage

ÜBERPRÜFUNG VON ROHREN

Um die in der Praxis verwendeten Rohre mal zu prüfen, kann die Formel natürlich auch auf gängige Rohre angewandt werden.

Nehmen wir mal ein CU- und ein PEX-Rohr.

Das CU-Rohr in der Dimension 15 x 1 und das PEX-Rohr in 17 x 2,2.

Welchen Drücken halten diese marktüblichen Rohre stand?
Die Umstellung der Sausage-Formel ist einfach:

$$p = \frac{2 \cdot \sigma_{zul} \cdot s}{D}$$

Der mittlere Durchmesser für das CU-Rohr beträgt 14 mm und für das PEX-Rohr 14,8 mm. Eingesetzt ergibt das:
Gegeben für CU-Rohr (für PEX in Klammern):

$$\sigma_{zul} = 200 \text{ N/mm}^2 \text{ (18 N/mm}^2\text{)}$$

$$s = 1 \text{ mm (2,2 mm)}$$

$$D = 14 \text{ mm (14,8 mm)}$$

$$p_{CU} = \frac{2 \cdot 200 \text{ N/mm}^2 \cdot 1 \text{ mm}}{14 \text{ mm}} = 28,57 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{PEX} = \frac{2 \cdot 18 \text{ N/mm}^2 \cdot 2,2 \text{ mm}}{14,8 \text{ mm}} = 5,35 \text{ N/mm}^2$$

Der Druck im CU-Rohr könnte also theoretisch auf sagenhafte 285,7 bar ansteigen. Beim PEX wäre bei 53,5 bar Einhalt geboten. Kunststoffrohre werden also von Hause aus schon sehr viel dickwandiger ausgeführt als metallene Rohre. Die Belastbarkeit oder besser die zulässige Zugspannung von heutigen metallenen Rohrwerkstoffen ist deutlich größer.

PRAXISBEZUG

In der Praxis erfordern sämtliche Kunststoffrohre erheblich dickere Wandstärken als die metallene Verwandtschaft. Eine Kompromisslösung stellen Mehrschichtverbundrohre dar. Die Sandwich-Lösung Kunststoff-Metall-Kunststoff schützt einerseits die Metalle vor Korrosion und sichert andererseits die Druckfestigkeit durch den Metallkern. Verblüffend, aber anhand der Bockwurst-Formel belegbar ist der Zusammenhang vom Innendurchmesser und der Belastung. Als letztes Rechenbeispiel sei dieser Zusammenhang anhand des Vergleichs von Stahl-Pufferspeicher und Stahlrohr aufgezeigt. Vergleicht man den Druck, dem ein Stahlrohr mit 10 mm Innendurchmesser und ein Pufferspeicher mit 500 mm Innendurchmesser bei einer identischen Wandstärke von 1 mm ausgesetzt werden können, erkennt man die Zusammenhänge der Praxis anhand der berühmten Bockwurst-Formel:

Gegeben für das Rohr (für Puffer in Klammern):

$$\sigma_{zul} = 350 \text{ N/mm}^2$$

$$s = 1 \text{ mm}$$

$$D = 11 \text{ mm (501 mm)}$$



Ein Rohr-Platzer wie im Bilderbuch, parallel zur Längsachse

$$p_{Rohr} = \frac{2 \cdot 350 \text{ N/mm}^2 \cdot 1 \text{ mm}}{11 \text{ mm}} = 63,6 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{Puffer} = \frac{2 \cdot 350 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,0 \text{ mm}}{501 \text{ mm}} = 1,4 \text{ N/mm}^2$$

Das Stahlrohr könnte einen Druck bis 636 bar vertragen, der Puffer würde, bei gleicher Wandstärke, bereits bei 14 bar schwächeln. Für die Praxis wird die beschriebene Formel zur Bestimmung der Wandstärke noch um Komponenten erweitert. Beispielsweise können Wandstärken-Toleranzen bei der Fertigung von Rohren eine Schwachstelle darstellen. Auch die absehbare Korrosion eines Rohres oder Behälters kann von den Herstellern einkalkuliert werden. Ein pauschaler Zuschlag kann diese Einflüsse entsprechend berücksichtigen. Die am Markt zugelassenen Rohre und Behälter werden daher in der Regel einen bestimmungsgemäßen Einsatz überstehen. Aber schon das Einfrieren kann bockwursttypische Risse hervorrufen. Rechnerisch ist das auf jeden Fall nachvollziehbar. ■