

## STRÖMUNGSTECHNIK UND THERMODYNAMIK IN DER THEORIE

In den folgenden Kapiteln dieser Homepage werden verschiedenste Probleme der Strömungstechnik und Thermodynamik in Dampf- und Kondensatanlagen beschrieben. Wie in der Einleitung zu lesen, soll dies nach Möglichkeit mit sehr wenigen theoretischen Erläuterungen zu physikalischen Gesetzen erfolgen. In diesem Kapitel werden nur ganz kurz grundsätzliche Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik und Strömungstechnik erklärt. In den Kapiteln selbst wird dann noch ausführlicher über Formeln der Strömungstechnik und Thermodynamik, sowie über die Vorgehensweise zur Auslegung von Geräten informiert.

### 1. Strömungstechnik

#### 1.1. Die Kontinuitätsgleichung

Frage: Warum entsteht ein Stau auf der Autobahn?

Antwort: Weil es zu viele Autofahrer gibt, die sich untermotorisiert und mit zu großen Wohnwagen durch die Autobahn-Baustellen schleppen.

Die Autofahrer sind die Strömungsteilchen, welche durch die Rohrleitung strömen. Kommt es zu einer Verengung in der Rohrleitung (Baustelle) staut sich die Strömung an. Soll die gleiche Menge an Autos durch die verengte Baustelle fahren, müssten die Autos in der Baustelle bzw. kurz vor der Baustelle schneller fahren. Mit Wohnwagen geht das aber nicht...

Den Zusammenhang zwischen Strom, Querschnitt und Geschwindigkeit erklärt die Kontinuitätsgleichung.

$$V_s = V \cdot A$$

$V_s$  – Volumenstrom in  $m^3/s$   
 $V$  – Geschwindigkeit in  $m/s$   
 $A$  – Fläche in  $m^2$

Wird die Kontinuitätsgleichung nach der Geschwindigkeit umgestellt, so ergibt sich bei gleichem Volumenstrom der Zusammenhang, dass je kleiner der Querschnitt einer Rohrleitung wird, die Geschwindigkeit des Kondensats bzw. des Dampfes ansteigt und umgekehrt.

**Je kleiner der Querschnitt, desto größer ist die Geschwindigkeit (und umgekehrt)**

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung lässt sich dann auch die Tabelle zu den Strömungsgeschwindigkeiten im Kapitel „Rohrleitungen“ nachrechnen.

*Hinweis: Der Volumenstrom hat die Einheit  $m^3/s$ . Dampfmengen werden meist in  $t/h$  oder  $kg/h$  angegeben. Durch die Multiplikation mit dem vom Druck abhängigen spezifischen Volumen kann die Dampfmenge in einen Volumenstrom umgerechnet werden. (siehe Kapitel „Rohrleitungen“)*

Wir wollen für die Rohrleitung DN200 die Tabelle zu den Strömungsgeschwindigkeiten im Kapitel „Rohrleitungen“ überprüfen. In dieser Tabelle ist aufgeführt, dass bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s ein Volumenstrom von ca. 125 m<sup>3</sup>/h Dampf oder Kondensat durch die Rohrleitung DN200 strömt.

► **Nachrechnung mit der Kontinuitätsgleichung:**

Rohr DN200 Durchmesser: 219 mm (Wandstärke 3 mm wird vernachlässigt)

$V_S = V \cdot A$  Fläche A: ca. 0,037 m<sup>2</sup>

Geschwindigkeit V: 1 m/s laut Tabelle, soll überprüft werden

Volumenstrom  $V_S$ : 125 m<sup>3</sup>/h

$V = V_S / A = 125 \text{ m}^3/\text{h} / 0,037 \text{ m}^2 = 3378 \text{ m/h}$  (Wert umrechnen in m/s)

$V = 0,93 \text{ m/s}$

Die Überprüfung des Tabellenwertes hat ergeben, dass bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s (0,93) ein Volumenstrom von 125 m<sup>3</sup>/h durch das Rohr DN200 fließt.

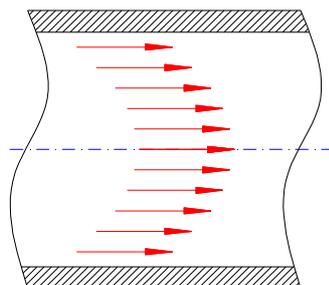
Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten in Rohrleitungen	
Nennweite	Durchfluss (*)
	<u>m<sup>3</sup>/h</u> m/s
200	125

(\*) siehe Tabelle Kapitel Rohrleitungen

**Strömungsprofil in Rohrleitungen**

Der Begriff Stromlinie ist allgemein bekannt. Vereinfacht man die Strömung auf einzelne Stromlinien oder technisch richtig auf Stromfäden, so würde ein Volumenstrom (m<sup>3</sup>/h) oder Massenstrom (kg/h) in einer Rohrleitung wie in der Zeichnung unten aussehen.

Strömungsprofil in einer Rohrleitung



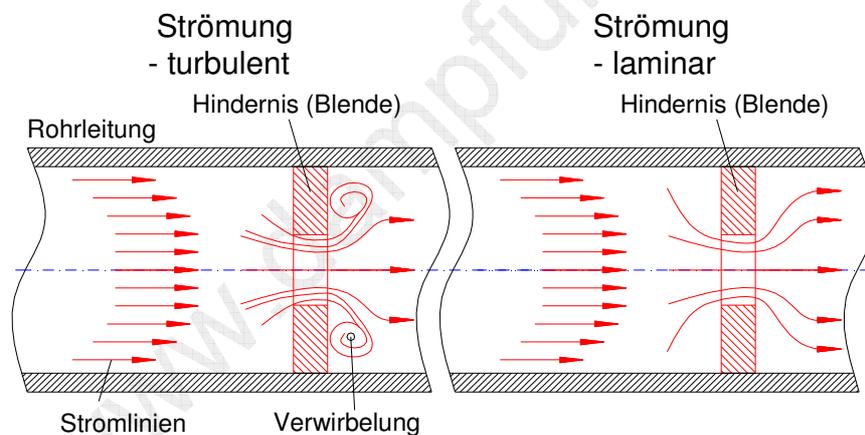
Auf Grund der fehlenden Reibung mit der Rohrinneenseite, ist die Geschwindigkeit in der Mitte der Rohrleitung am größten. Direkt an der Rohrinneenseite ist die Geschwindigkeit Null, egal wie glatt die Rohrleitung an der Innenseite ist. Dieses Wissen ist für den Planer einer Dampf- und Kondensatanlage erst einmal unwichtig. Wer achtet schon auf Reibung in der Rohrleitung? Die Reibung bewirkt aber einen Druckverlust. Dieser Druckverlust steigt an je größer die Strömungsgeschwindigkeit wird. **Deshalb muß bei der Dimensionierung von Rohrleitungen die Einhaltung der Strömungsgeschwindigkeiten beachtet werden.** Wie dies gemacht wird, ist ausführlich im Kapitel zu den Rohrleitungen zu lesen.

## 1.2. Strömungszustände in Rohrleitungen

„Bei euch geht's ja ganz schön turbulent zu...“

Generell werden zwei Arten von Strömungen unterschieden. Diese sind die **laminare** und die **turbulente** Strömung. Turbulent bedeutet im lateinischen ...drehen, verwirren, beunruhigen... Laminar bedeutet im lateinischen ...Platte, Schicht.

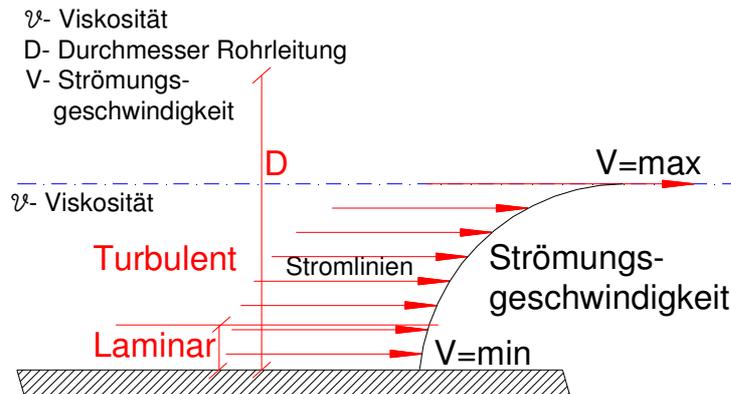
D.h., zum einen gibt es eine Strömung, welche sich turbulent dreht und bewegt und eine Strömung, welche sich nicht vermischt, sondern gleichmäßig, laminar in Schichten strömt. Dabei ist der Begriff der Bewegung dreidimensional auf die Strömung anzuwenden und nicht die Strömung um Körper gemeint. Benutzt man den gesunden Menschenverstand, so fallen einem zunächst nicht allzu viele Strömungen ein, welche ohne Verwirbelung der Strömung (laminar) ablaufen. Honig, dickflüssiges Öl oder Zahncreme sind solche Strömungen. Turbulente Strömungen dagegen sind vielfach zu beobachten. Das Flusswasser, der Wind und ca. 99% aller Strömungen in der technischen Anwendung sind turbulent.



Es gibt demnach nur sehr wenige laminare Strömungen. Aber jede turbulente Strömung besitzt auch einen sehr kleinen laminaren Bereich. Wird z.B. eine Tischplatte von Luft überströmt, so ist direkt über der Tischplatte in einem sehr kleinen Abstand von der Tischplatte ein laminarer Abschnitt vorzufinden. Genauso verhält sich dies auch an der Innenoberfläche in Rohrleitungen. Ursache hierfür ist die Geschwindigkeit der Strömung über der Tischplatte bzw. in der Rohrleitung, welche wiederum von der Reibung der Strömung mit der Oberfläche abhängt.

Ab einem bestimmten Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit der Strömung, dem Durchmesser der Rohrleitung bzw. der Länge der Tischplatte und der Viskosität wird zwischen einer laminaren und turbulenten Strömung unterschieden. Diesen Zusammenhang hat vor mehr als 100 Jahren schon ein Physiker namens Osborne Reynolds herausgefunden. Deshalb heißt diese Kennzahl nun auch Reynoldszahl.

$$Re = \varrho * D / V$$



Für den Übergang einer laminaren in eine turbulente Strömung in einer Rohrleitung wurde die Reynoldszahl 2300 ermittelt. D.h., ergibt sich bei der rechnerischen Überprüfung der Strömung eine Reynoldszahl von 3000, so ist die Strömung turbulent.

Wie kann die Reynoldszahl bei der Auslegung eines Dampf- und Kondensatsystems helfen? Kurz gesagt, gar nicht. Es genügt, wenn man das Wissen besitzt, dass die laminare Strömung sehr selten in der Technik anzutreffen ist. Laminare Strömungen verursachen wenig Druckverlust. Turbulente Strömungen sind sehr gut für alle Wärmetauschervorgänge (*dazu später mehr*). Um die Auslegung von Rohrleitungen, Pumpen und Regelventilen nicht so kompliziert zu gestalten, basieren die meisten Formeln auf ideale, laminare Strömungen. Anschließend werden mit Hilfe von Sicherheitszuschlägen die realen Strömungsvorgänge berücksichtigt.

### 1.3. Druckverlust in Rohrleitungen

Druckverluste entstehen durch die Rohrleitungen und die Rohrleitungseinbauten. Bei Rohrleitungen wird meist Kunststoff, Edelstahl oder Stahl verwendet. Auf Grund der Strömung reibt sich das Kondensat oder der Dampf an der Oberfläche der Rohrleitung. Ist die Oberfläche glatt ist die Reibung gering. Die Druckverluste in einer Rohrleitung sollten so gering wie möglich sein weil: **Druckverlust ist Energieverlust.**

Rohrleitungseinbauten wie z.B. Regelventile, Schmutzfänger, Handabsperrventile usw. oder auch Rohrbögen und T-Stücke stellen innerhalb der Strömung auf Grund der Bauform der Strömung einen Widerstand entgegen. Die Überwindung dieses Widerstandes führt ebenfalls zu einem Druckverlust. Bei einer Rohrleitung mit mehreren Armaturen und Rohrbögen usw.

ist der Druckverlust durch diese Rohreinbauten höher zu bewerten, als der Druckverlust durch die Rauigkeit des Rohrmaterials.

Ein Armaturenhersteller könnte den Druckverlust eines Schmutzfängers angeben. Diese werden aber eigentlich nicht bei einer Dimensionierung einer Anlage berücksichtigt. Zumindest hat der Verfasser noch nie diese Einzeldruckverluste (Einzelwiderstände) beachtet und hatte durch diese Nichtbeachtung auch noch keine Probleme. Armaturen wie z.B. Schmutzfänger werden meist in der gleichen Nennweite verwendet wie die Nennweite der Rohrleitung. Wird in einer Rohrleitung DN100 ein Schmutzfänger DN25 montiert hat man augenscheinlich schon ein Problem.

Bei Geräten, wie z.B. Wärmetauscher oder Filter, wird der Druckverlust auf Grund der Konstruktion vom Hersteller ermittelt und muss dann bei einer Pumpenauslegung beachtet werden (*siehe Kapitel Pumpen*).

Die Ermittlung bzw. das Abschätzen der Druckverluste ist vor allem bei der Auslegung einer Pumpe wichtig. *Das wird im Kapitel Kondensatpumpen und im Kapitel Beispiele ausführlich beschrieben.*

Für das allgemeine Verständnis genügt es zu wissen, dass der Druckverlust einer Dampf- und Kondensatströmung mit der Geschwindigkeit steigt.

- **Je größer die Strömungsgeschwindigkeit, desto größer ist der Druckverlust. Um die Druckverluste so gering wie möglich zu halten, sind unbedingt die Strömungsgeschwindigkeiten in der Rohrleitung bei allen Betriebsverhältnissen zu beachten.**

### **Druck und Energie in Rohrleitungen**

Wir wollen es nicht übertreiben mit der Theorie, aber zum Druck und zur Energie müssen auch noch ein paar Zeilen geschrieben werden.

Kondensat strömt durch Rohrleitungen auf Grund eines Druckgefälles. Auf der einen Seite des Rohres ist ein höherer Druck als auf der anderen Seite. Den Druck kann z.B. eine Pumpe erzeugen. Das Kondensat besitzt auf Grund der Strömungsgeschwindigkeit eine bestimmte Bewegungsenergie.

Kondensat fließt durch eine Rohrleitung auch auf Grund eines Höhenunterschiedes. Ähnlich einer Kugel auf einer schiefen Ebene fließt das Kondensat auf Grund der Schwerkraft durch eine Rohrleitung mit Gefälle oder auch aus einem Behälter. Das fließende Kondensat hat auf Grund der Lage eine bestimmte Lageenergie.

Dampf strömt wie das Kondensat auf Grund eines Druckgefälles durch die Rohrleitung. Dampf hat auf Grund der geringen Dichte fast kein Gewicht und so hat die Schwerkraft der Erde fast keinen Einfluss auf die Strömung von Dampf. Zu überwindende Höhenunterschiede sind dem Dampf egal. Für die Strömung von Dampf wird keine Kreiselpumpe oder Seitenkanalpumpe benötigt. (*Kapitel Kondensatpumpen*)

Mit Druck und Energie in Rohrleitungen hat sich ein Forscher namens Bernoulli beschäftigt. Mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung lassen sich Strömungszustände beschreiben. (Daniel Bernoulli 1700-1782)

## Die Bernoulli - Gleichung

Ob man sich mit der Bernoulli - Gleichung auskennt oder nicht, ist für die Auslegung einer Dampf- und Kondensatanlage nicht unbedingt notwendig. Indirekt steckt aber in jeder Formel zur Strömungstechnik der folgenden Kapiteln etwas von der Bernoulli-Gleichung. Wie aus dem Physikunterricht bekannt, geht Energie nicht verloren. Energie wandelt sich um und liegt in einer anderen Form wieder vor. Der Energieerhaltungssatz für Strömungen ist die Bernoulli-Gleichung. Diese Gleichung soll nur kurz erläutert werden.

$$\rho * g * h + p + \rho / 2 * V^2 = \text{konstant}$$

$\rho$  – Dichte /  $g$  – Fallbeschleunigung /  $h$  – Höhe /  $p$  – Druck /  $V$  – Geschwindigkeit

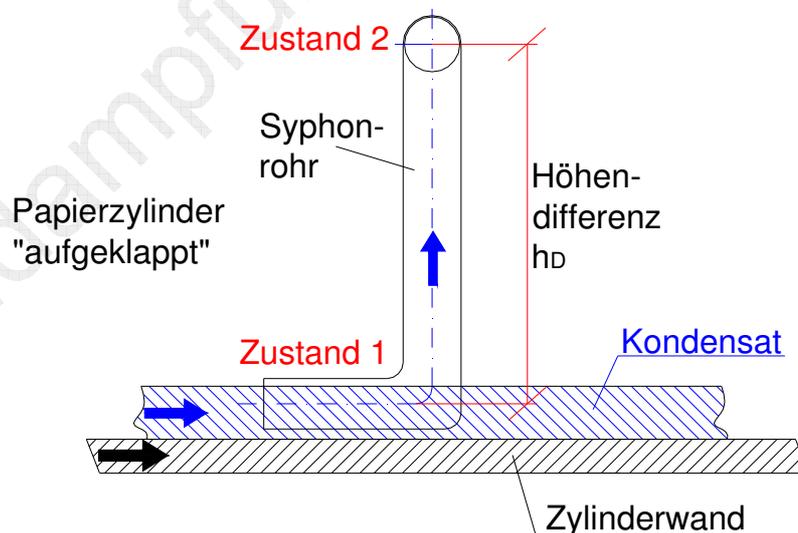
$\rho * g * h$  - Lageenergie

$p$  - statischer Druck

$\rho / 2 * V^2$  - Bewegungsenergie

### Beispiel zur Erklärung:

Entwässerung eines Trockenzylinders mit Hilfe eines stehenden Syphons.



Es soll berechnet werden, ab welcher Geschwindigkeit Kondensat in einem Trockenzylinder einer Papiermaschine einen Höhenunterschied  $h_D$  von 600mm überwindet.

Papierzylinder werden bei der Papierherstellung verwendet. Die Papierzylinder sind je nach Arbeitsbreite einer Papiermaschine ca. 3 m bis 10 m lang und besitzen einen Durchmesser von 1,5 m bis 1,8 m. Die Wandstärke der Zylinderwand ist ca. 10 mm bis 20 mm dick. Die Papierzylinder drehen sich und werden mit Dampf beheizt. Die Wärmeenergie wird an die Papierbahn abgegeben und das Kondensat sammelt sich auf Grund der Drehbewegung an der Zylinderinnenwand. Die Kondensatschicht soll im Papierzylinder so gering wie möglich gehalten werden. Mit Hilfe eines Syphon wird das Kondensat aus dem sich drehenden Papierzylinder transportiert. Wichtig: Das Kondensat hat annähernd die gleiche Geschwindigkeit wie der rotierende Papierzylinder. Das Kondensat rotiert auf Grund der hohen Zentrifugalkräfte mit der Innenwand des Papierzylinders mit.

Mit Hilfe der Bernoulli - Gleichung kann man nun den Zustand 1 und Zustand 2 miteinander vergleichen und man stellt so eine Energiebilanz vorher (unten) – nachher (oben) auf. Nicht vor dem Wort Energiebilanz erschrecken. Das ist wirklich einfach! (es geht nun teilweise handschriftlich weiter, weil der Verfasser mit der Software Word nicht perfekt umgehen kann)

### Energiebilanz:

$$\rho \cdot g \cdot h + p + \rho / 2 \cdot V^2 = \text{konstant}$$

$$\rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 + \frac{\rho}{2} V_1^2 = \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2 + \frac{\rho}{2} V_2^2$$

Annahme:  $p_1 = p_2$

$p_1$  = Druck im Einlauf / Syphon  
 $p_2$  = Druck im Rohr

$$\rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho}{2} V_1^2 = \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{\rho}{2} V_2^2$$

Annahme:  $V_2 = 0$

Wir suchen die Geschwindigkeit  $V_1$  bei welcher das Kondensat gerade so bis zum obersten Punkt strömt.

$$\rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho}{2} V_1^2 = \rho \cdot g \cdot h_2 \quad | - \rho \cdot g \cdot h_1$$

$$\frac{\rho}{2} V_1^2 = \rho \cdot g \cdot \underbrace{(h_2 - h_1)}_{h_0} \quad \left| \begin{array}{l} \rho = \text{Dichte} \\ g = 9,81 \text{ m/s}^2 \end{array} \right.$$

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} = h_0 \quad \frac{\text{m}^2 \text{ s}^2}{\text{s}^2 \text{ m}}$$

$$\underline{V_1 = 200 \text{ m/min} \rightarrow h = 0,55 \text{ m}}$$

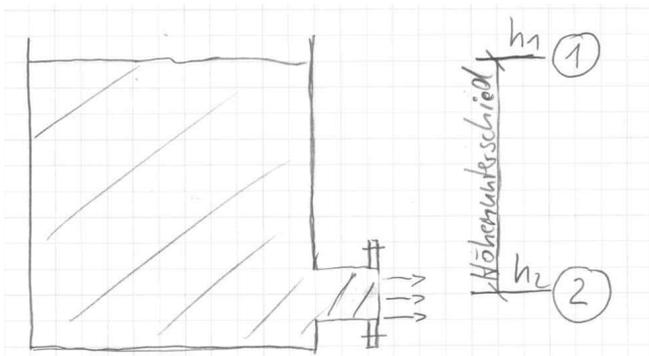
Sieht kompliziert aus, ist es aber wirklich nicht. Es werden verschiedene Annahmen getroffen, auf welche man durch Überlegung kommt. Diese Annahmen vereinfachen die gesamte Berechnung.

Der Druck im Rohr ist unten genauso groß wie oben. Die Dichte des Kondensats sowie die Fallbeschleunigung sind in beiden Zuständen auch gleich. Dass die Geschwindigkeit des Kondensats im Zustand 2 Null beträgt, ergibt sich aus der Annahme, dass genau die Anströmgeschwindigkeit des Kondensats im Papierzylinder gesucht wird, bei welcher das Kondensat gerade so zu Punkt 2 strömt. (das Kondensat überwindet gerade so die Höhe  $h_D$ )

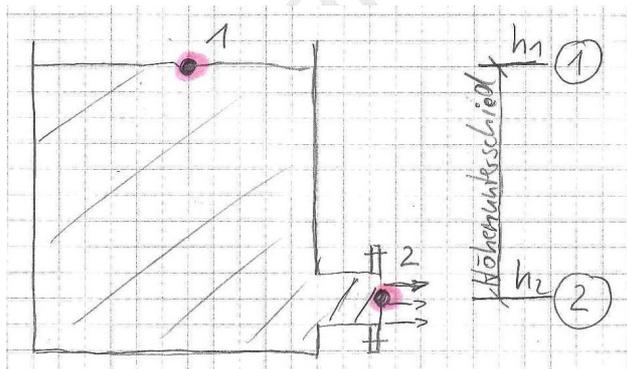
### Und noch ein Beispiel zur Erklärung:

Ein Wasserbehälter mit einem Volumen von  $300\text{m}^3/\text{h}$  hat am Boden des Behälters eine kleinere Leckage. Um diese Stelle zu reparieren, muss das Wasser aus diesem Behälter mit Hilfe einer Entleerung DN150 abgelassen werden. Damit der Montageeinsatz gut organisiert werden kann, wäre es gut zu wissen wie lange es dauert bis der Behälter leer ist.

Zunächst wird eine einfache Skizze angefertigt

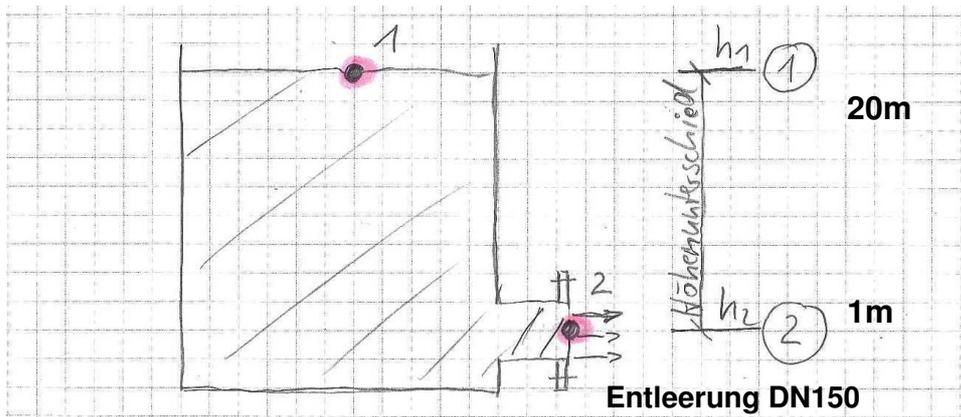


Mit Hilfe der Bernoulli - Gleichung wird nun wieder der Zustand 1 und der Zustand 2 miteinander verglichen. Es wird wieder die Energiebilanz zwischen vorher (1) und nachher (2) aufgestellt.



Annahme zur Vereinfachung: Die Strömungsgeschwindigkeit auf der Wasseroberfläche (1) ist Null.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Flansch (2) ist groß und wird gesucht, damit dann mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung die Zeit des Entleerens ermittelt werden kann.



Energiebilanz nach Bernoulli-Gleichung

$$\underbrace{\rho \cdot g \cdot h_1}_{\text{Lage}} + \underbrace{p_1}_{\text{Druck}} + \underbrace{\frac{\rho}{2} V_1^2}_{\text{Bewegung}} = 0$$

Vergleich:

$$\rho_1 \cdot g_1 \cdot h_1 + p_1 + \frac{\rho}{2} V_1^2 = \rho_2 \cdot g_2 \cdot h_2 + p_2 + \frac{\rho}{2} V_2^2$$

Vereinfachung:

$$\rho_1 \cdot g_1 \cdot h_1 + p_1 + \frac{\rho}{2} V_1^2 = \rho_2 \cdot g_2 \cdot h_2 + p_2 + \frac{\rho}{2} V_2^2$$

$p_1$  u.  $p_2$  sind gleich groß  $\rightarrow$  Druck Atm.

$\frac{\rho}{2} V_1^2$  ist Null weil keine Geschwindigkeit an Wasseroberfläche

$$\rho_1 \cdot g_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot g_2 \cdot h_2 + \frac{\rho}{2} V_2^2$$

$$\rho_1 = \rho_2 ; g_1 = g_2$$

$$\rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = \frac{\rho}{2} V_2^2 \quad \left| \sqrt{\frac{m}{s^2} \cdot m} \right.$$

$$\sqrt{2 \cdot g \cdot h} = V_2 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$P_1$  und  $P_2$  sind gleich groß, weil außerhalb des Behälters herrscht Atmosphärendruck

Annahme:

$$V_1 = 0$$

Dichte und Fallbeschleunigung sind gleich

Diese Formel hat ein italienischer Wissenschaftler entdeckt und wurde auch nach ihm benannt. Man nennt diese Formel Torricelli Ausflußformel. (Evangelista Torricelli 1608-1647)

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung (siehe Seite 1) kann nun die Zeit ermittelt werden, welche zum Entleeren des Behälters benötigt wird.

$$V_s = V \cdot A \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad \begin{array}{l} V = \text{Geschwindigkeit} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \\ A = \text{Fläche} \left[ \text{m}^2 \right] \end{array}$$

$$V_s = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot A \quad \begin{array}{l} g = \text{Fallbeschleunigung} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \\ h = \text{Höhendifferenz} \\ \quad (19 \text{ m}) \end{array}$$

$$V_s = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 19} \cdot A$$

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{Kreisfläche})$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot 0,168^2 \quad (\text{DN150, 3 mm Wandstärke wird vernachlässigt})$$

$$A = 0,022 \text{ m}^2$$

$$V_s = 19,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,022 \text{ m}^2$$

$$V_s = 0,43 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{m}^2 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

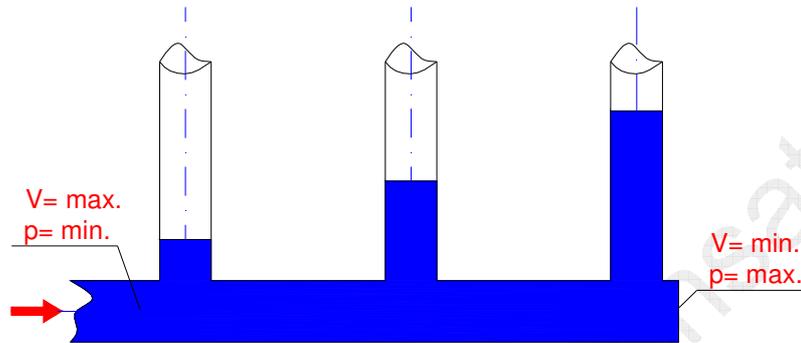
$$V_s \approx 0,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Volumen Behälter} = 300 \text{ m}^3$$

↳ in ca. 10 min ist der Behälter leer.

Wer hätte es erwartet, der Behälter mit einem Volumen von 300m<sup>3</sup> ist in 10 Minuten leer.

Eines könnte man sich von der Bernoulli - Gleichung auch noch merken: Da, wo die Strömungsgeschwindigkeit am größten ist, ist der Druck niedrig. Umgekehrt ist der Druck am größten, wenn die Strömungsgeschwindigkeit niedrig ist (beliebte Frage in der Physikprüfung).

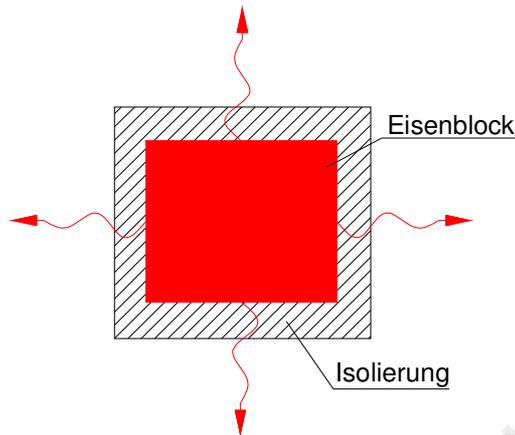


## 2. Thermodynamik

### 2.1. Die Wärmeübertragung

In den weiteren Kapiteln der Homepage wird meist über das Erwärmen von Wasser oder Luft mit Hilfe von Wärmetauschern (WT) berichtet. Deshalb hier nun einige wichtige Anmerkungen zur Wärmeübertragung (*siehe auch Kapitel zu Wärmetauscher*).

Die Isolierung eines heißen Eisenblocks oder ähnlichem kann noch so gut sein, der Eisenblock gibt an seine Umgebung Wärme ab. Diese Abgabe der Wärme geht umso schneller, je kühler die Umgebung ist. D.h., der Temperaturunterschied zwischen Eisenblock und Umgebung bestimmt die Geschwindigkeit der Wärmeübertragung.



Der Prozess des Wärmeüberganges erfolgt nur so lange, bis der Temperaturunterschied zwischen Eisenblock und Umgebung nicht mehr vorhanden ist. Der Eisenblock hat sich abgekühlt und die Umgebung wurde erwärmt.

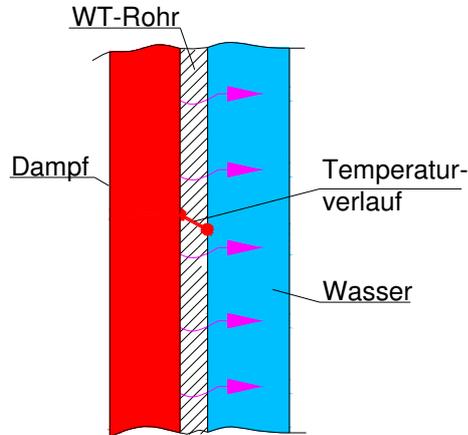
#### Arten der Wärmeübertragung:

Generell werden drei verschiedene Vorgänge der Wärmeübertragung definiert:

- **Wärmeleitung** zwischen den Teilchen eines (des gleichen) Materials von z.B. Eisen oder nicht strömendem Wasser.
- **Wärmeübertragung durch Konvektion**, dabei wird die Wärme durch strömendes Wasser oder Dampf bzw. Luft (Gas) übertragen. Wird die Strömung z.B. durch eine Pumpe verursacht, so ist die Strömung erzwungen. Bei der ungezwungenen oder auch freien Strömung erfolgt die Bewegung von allein (z.B. Heizkörper-Luft).
- Und dann ist da noch die **Wärmestrahlung**. Bei der Wärmestrahlung ist kein Medium zur Wärmeübertragung notwendig. Photonen transportieren kleine Energiemengen (z.B. Wärmestrahlung durch eine Flamme). Die Wärmestrahlung wird auf dieser Homepage nicht weiter behandelt.

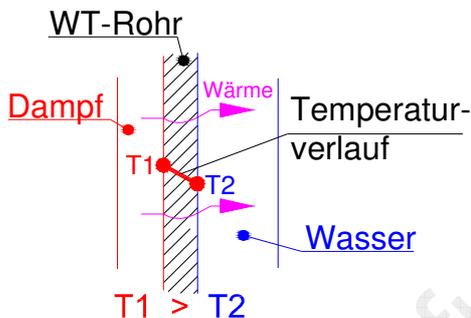
### Erklärung Wärmeleitung:

Temperaturverlauf bei Wärmeübertragung an einem Wärmetauscherrohr (WT-Rohr)



Heißer Dampf gibt Wärme an das kühlere Wasser ab. Die Wärme strömt an jeder Stelle der Rohrleitung durch das Rohr des Wärmetauschers. Das WT-Rohr stellt einen materialabhängigen Widerstand für die Wärmeleitung dar.

Wie gut oder wie schlecht ein Material die Wärme leitet, wird durch den **Wärmeleitkoeffizienten  $\lambda$**  beschrieben. Dieser Wert ist nicht nur vom Material abhängig, sondern auch von der Temperatur.



Je größer der Wärmeleitkoeffizient, desto geringer der Widerstand und desto flacher verläuft die Kurve des Temperaturverlaufes.

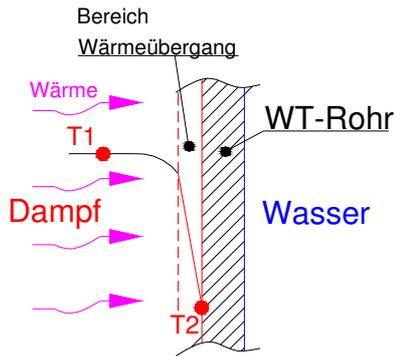
Aluminium leitet Wärme ca. 200 x besser als Fensterglas, obwohl die Dichte beider Materialien fast gleich ist.

### Erklärung Wärmeübergang durch Konvektion:

Wärmeübertragung zwischen bewegten Flüssigkeiten, Gasen, Dämpfen und festen Körpern

Oder anders, wie gibt Dampf oder Kondensat Wärme an ein Wärmetauscherrohr ab?

Der Wärmeübergang ist ein komplizierter Vorgang und deshalb auch nicht so einfach zu erklären. In der Homepage wird auf Details des Wärmeübergangs nicht weiter eingegangen. Für die einfache Auslegung eines Wärmetauschers ist die rechnerische Berücksichtigung des Wärmeüberganges eigentlich nicht notwendig. Die detaillierte Berechnung der Wärmeleitung bzw. des Wärmeüberganges ist eigentlich nur etwas für studierte Physiker. Deshalb hier nur das allerwichtigste (das Allernotwendigste).

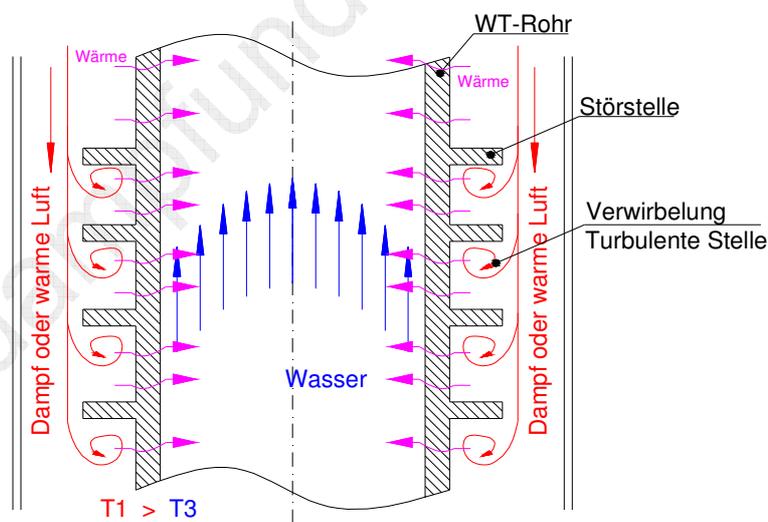


Der Wärmeübergang ist abhängig von den Eigenschaften der Strömung sowie von der Form der Heizfläche. Das bedeutet aber auch: so viele verschiedene Strömungen und Heizflächen es gibt, so unterschiedlich ist der Wärmeübergang. Beim Wärmeübergang, sind deshalb eine Vielzahl von Einflussgrößen zu beachten.

Ähnlich wie der Wärmeleitkoeffizienten  $\lambda$  für den Vorgang der Wärmeleitung, gibt es für den Wärmeübergang den **Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$** . Dieser Wert wird zumeist experimentell ermittelt. Auf Grund der Vielzahl von Einflussgrößen ist eine rechnerische Bestimmung schwierig bzw. unmöglich.

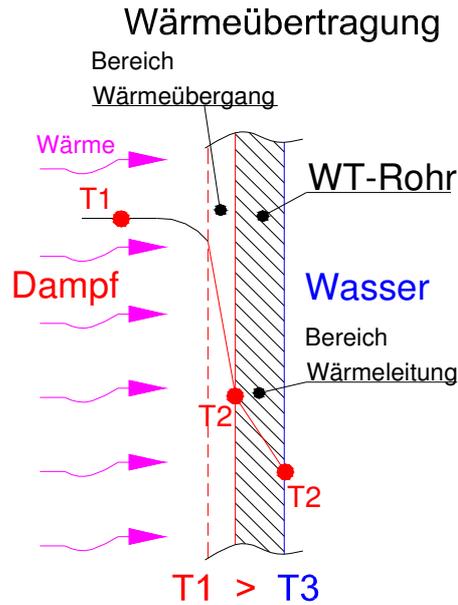
Was kann man sich aber für den täglichen Gebrauch zum Wärmeübergang merken?

- gut sind große, saubere Oberflächen
- besser sind große, saubere Oberflächen mit „Störstellen“. An diesen „Störstellen“ wird die Strömung aufgerissen und verwirbelt. Durch diese Turbulenz verbessert sich der Wärmeübergang.



- noch besser sind große und saubere Oberflächen mit „Störstellen“ und schnelle Strömungen, Je größer die Turbulenz, je besser der Wärmeübergang. Aber Achtung: Störstellen bedeuten auch Druckverlust. Druckverlust ist Energieverlust (siehe Kapitel oben).

Was die Ermittlung der Wärmeübertragung noch etwas komplizierter gestaltet, ist die Tatsache, dass die Vorgänge des Wärmeübergangs und der Wärmeleitung nicht getrennt voneinander ablaufen.



### Welchen Einfluss haben der Wärmeleitkoeffizient und der Wärmeübergangskoeffizient auf die rechnerische Auslegung z.B. eines Wärmetauschers?

In den Kapiteln der Homepage wird zur Auslegung eines Wärmetauschers die Formel:

$$Q_{zu} = Q_{ab}$$

verwendet. Bedeutet, dass die zugeführte Wärmemenge genauso groß sein muss wie die abgegebene Wärmemenge. Wärme ist eine Energieform. Für Energie gilt der Energieerhaltungssatz: „...Energie geht nicht verloren...wird nur umgewandelt...“.

Die aufgeführte Formel ist physikalisch völlig korrekt. Zur **exakten** Auslegung eines Wärmetauschers aber eigentlich nur bedingt zu gebrauchen.

Warum? Weil die Formel z.B. nicht den Widerstand des Materials berücksichtigt. Erfahrungsgemäß leitet Kupfer Wärme besser als Stahl. Wo ist in der Formel der Wärmeleitkoeffizient?

Die Formel berücksichtigt auch nicht die Art der Strömung. Wie im Abschnitt zum Wärmeübergang erklärt, ist es nicht ganz unwichtig wie groß die Strömungsgeschwindigkeit in den WT-Rohren ist, wie lange die Strömung in den WT-Rohren bleibt usw. kurz, der Wärmeübergangskoeffizient fehlt.

Das bedeutet, dass zur Auslegung eines Wärmetauschers die Formel  $Q_{zu} = Q_{ab}$  erweitert werden müsste. In der Formel sind die Verluste zu berücksichtigen, welche auf Grund des Materials und des Wärmeübergangs entstehen.

$$Q_{zu} > Q_{ab}$$

**Auf Grund der Verluste ist die zugeführte Wärmemenge immer größer als die abgeführte Wärmemenge.**

Im Kapitel zu den Wärmetauschern wird diese Tatsache berücksichtigt, in dem der errechnete Wert zum Dampfbedarf deutlich aufgerundet wird.

Physikalisch richtig ist diese Vorgehensweise nicht. Bringt für die einfachen Berechnungen aber auch keine Probleme. Wer genauere Berechnungen benötigt, muss den Wärmeleitkoeffizienten und den Wärmeübergangskoeffizienten beachten.

Damit die Berechnungen nicht zu kompliziert werden, hat man beide Werte zu einem **Wärmedurchgangskoeffizienten K** zusammen gefasst.

Die Formel  $Q_{zu} = Q_{ab}$  ändert sich nun zu

$$Q_{zu} = K * A * (\Delta T)$$

und gibt die tatsächlich übertragenen Wärmemenge exakter an.

### Demnächst geht's weiter...

Die Physik der Strömungstechnik und Thermodynamik ist sicherlich etwas zu kurz gekommen. Der Verfasser möchte aber kein Physikbuch erstellen, sondern über Dampf- und Kondensatsysteme berichten. Wie oben schon geschrieben, wird in den einzelnen Kapiteln noch etwas ausführlicher über physikalische Gesetzmäßigkeiten informiert.