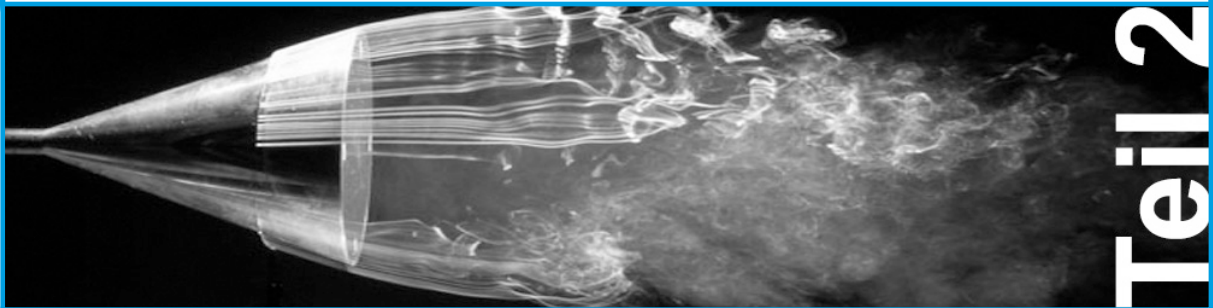


FORMELSAMMLUNG



STRÖMUNGSLEHRE TEIL 2

by Marcel Laube

FORMELSAMMLUNG STRÖMUNGSLEHRE

<i>Die Leitungskennlinie</i>	4
Definition	4
Serieschaltung von Leitungsnetzen	4
Parallelschaltung von Leitungsnetzen	5
Vermaschte Schaltungen von Leitungsnetzen	6
Mengenverteilung bei nicht abgeglichen Netzen	6
<i>Die Pumpen- und Ventilator-kennlinie</i>	7
Begriff	7
Serieschaltung von Pumpen/Ventilatoren	8
Parallelschaltung von Pumpen/Ventilatoren	9
Mischschaltungen	10
<i>Drosselung des Volumenstromes</i>	12
Drehzahländerung und Drosselung	12
Drosselung:.....	12
Drehzahländerung:.....	13
Drosselkennlinie.....	13
Drosselung von Teilströmen.....	16
<i>Zeitlich veränderte Strömung</i>	17
Der bei Beschleunigung auftretende Druck:	17
<i>Kraftwirkung und Energieaustausch bei Strömungsvorgängen</i>	17
Strömungskräfte	17
Kräfte an einem Rohrbogen	18
Rückstosskraft beim Ausfluss aus einem Gefäß	19
Strahlstosskräfte	19
Senkrechter Stoss an eine feste Wand.....	19
Senkrechter Stoss an eine sich in Stossrichtung bewegende Wand.....	19
Schiefer Stoss gegen eine feststehende Wand.....	20
Gewölbter Stoss gegen eine gewölbte Platte.....	20
Energiezufuhr oder Energieabgabe bei Strömung	21
<i>Kavitation</i>	22
Kritisch Geschwindigkeit	22
Folgen der Kavitation	22
NPSH-Wert (=Haltedruckhöhe = Druckhaltehöhe)	22
Vorhandener NPSH-Wert.....	23
Kennlinien.....	24
Die Pumpenaufstellung.....	25
<i>Strömung um Körper</i>	26
Strömungswiderstand	26
Der Druck- oder Formwiderstand	27

FORMELSAMMLUNG STRÖMUNGSLEHRE

Der c_w -Wert.....	27
Dynamischer Auftrieb.....	28
<u>Pumpen und Ventilatoren.....</u>	<u>28</u>

Die Leitungskennlinie

Definition

$$\Delta p = c * V^2 \quad [\text{Pa}]$$

c = Leitungs- oder Netzkonstante
V = Volumenstrom [m³/s] [m³/h]

Oder in der Höhenform

$$h_v = c * V^2 \quad [\text{m}]$$

daraus entsteht die folgende Beziehung:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{V'_1}{V'_2} \right)^2$$

Der c-Wert kann auch (analog zur Regeltechnik) als k_v-Wert beschrieben werden:

$$\Delta p = \left(\frac{V'}{k_v} \right)^2$$

Entsprechen der Druckverlust und die Dichte nicht den Definitionsbedingungen, so kann der k_v-Wert umgerechnet werden:

$$k_v = V' \sqrt{\frac{\Delta p_o}{\Delta p}} * \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}}$$

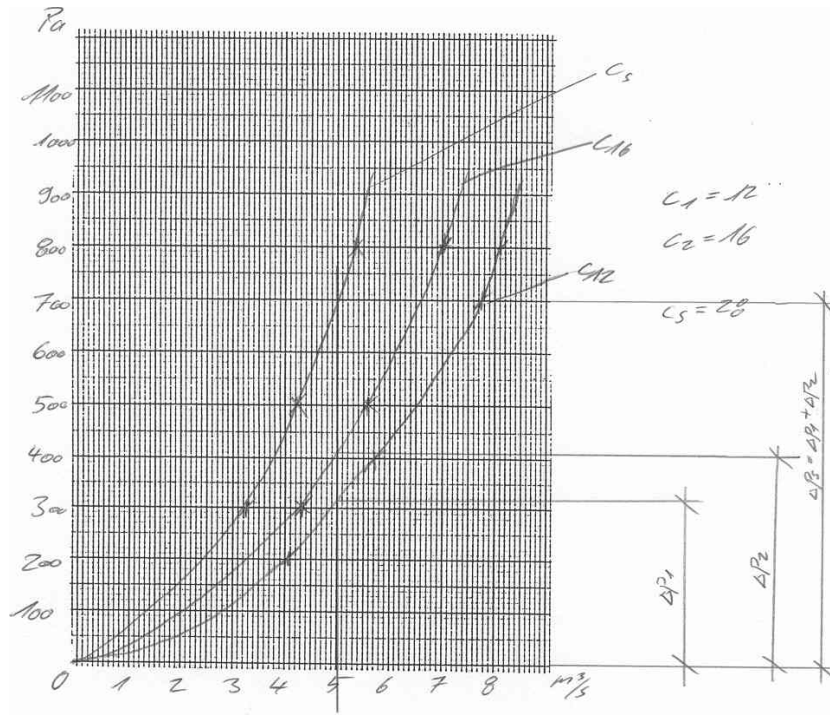
Serieschaltung von Leitungsnetzen

Es gilt: **Bei gegebenem Volumenstrom addieren sich die Druckverluste.**

$$c_s = c_1 + c_2 + c_3 + \dots$$

oder

$$k_{vs} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{k_{v1}} \right)^2 + \left(\frac{1}{k_{v2}} \right)^2 + \left(\frac{1}{k_{v3}} \right)^2 + \dots}}$$



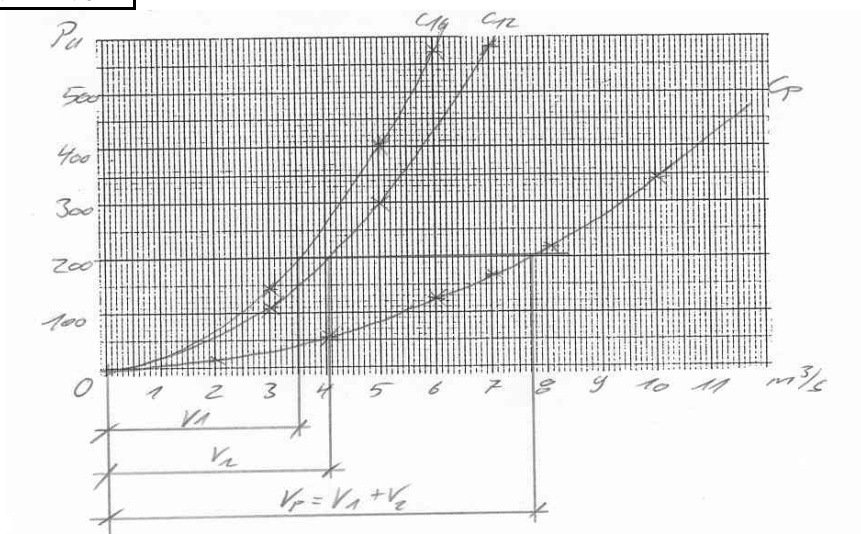
Parallelschaltung von Leitungszweigen

Es gilt: Bei gegebenem Druckverlust addieren sich die Volumenströme.

$$c_p = \left(\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{c_1}} + \frac{1}{\sqrt{c_2}} + \frac{1}{\sqrt{c_3}} + \dots} \right)^2$$

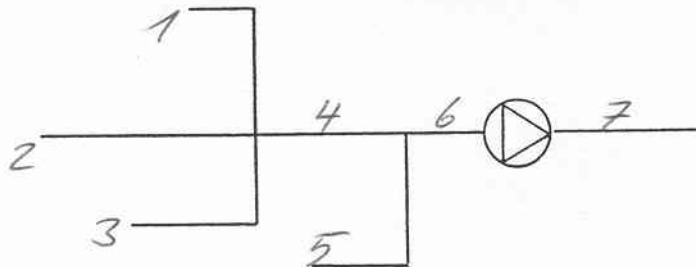
oder

$$k_{VP} = k_{V1} + k_{V2} + k_{V3} + \dots$$



Vermaschte Schaltungen von Leitungsnetzen

Man beginnt bei der Berechnung des hintersten Netzteiles und verknüpft dann Teilstück um Teilstück.



- | | | | |
|------------|-----------------------|---------|-----------------------------------|
| 1. Schritt | Parallelschaltung | 1, 2, 3 | C_{1-3} |
| 2. Schritt | Serieschaltung mit | 4 | $C_{1-3} + C_4 = C_{1-4}$ |
| 3. Schritt | Parallelschaltung mit | 5 | $C_{1-4} \parallel C_5 = C_{1-5}$ |
| 4. Schritt | Serieschaltung mit | 6 | $C_{1-5} + C_6 = C_{1-6}$ |
| 5. Schritt | Serieschaltung mit | 7 | $C_{1-6} + C_7 = C_{1-7}$ |

Resultierende oder gemeinsame Netzkonstante ist in diesem Fall somit:

$$C_{1-7} = C_R$$

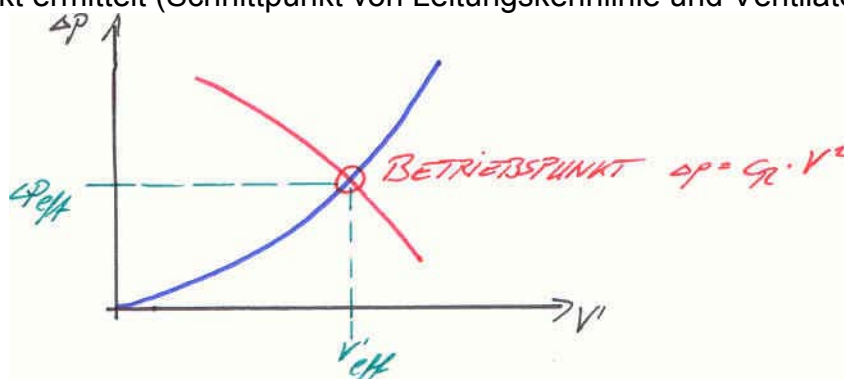
Mengenverteilung bei nicht abgeglichenen Netzen

1. Schritt:

Man bestimmt die resultierende Netzkonstante.

2. Schritt:

Man bestimmt den tatsächlich fließenden Volumenstrom, indem man den Betriebspunkt ermittelt (Schnittpunkt von Leitungskennlinie und Ventilator-kennlinie)



3. Schritt:

- Den effektiven Druckverlust erhält man nun:

$$\Delta p_{\text{eff}} = c_R \cdot V'_{\text{eff}}$$

- Der Druckverlust der gemeinsamen Netzteilen wird bestimmt: z.B.

$$\Delta p_{3-4} = (c_3 + c_4) \cdot V'_{\text{eff}}$$

- Der an der Verzweigung zur Verfügung stehende Druck ist:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{eff}} - \Delta p_{3-4}$$

4. Schritt:

Mit Hilfe des an der Verzweigung anstehenden Druckes und den Netzkonstanten der einzelnen Netzteile können die Luftmengen berechnet werden:

$$V'_1 = \sqrt{\frac{\Delta p}{c_1}} \quad V'_2 = \sqrt{\frac{\Delta p}{c_2}}$$

Die Pumpen- und Ventilator Kennlinie

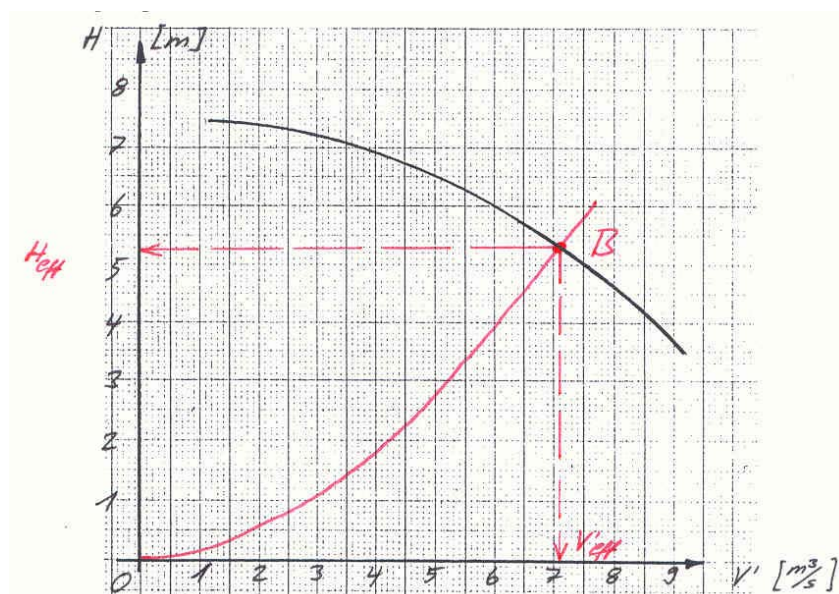
Begriff

Unter der Ventilator Kennlinie (Pumpen Kennlinie) versteht man die Abhängigkeit des Förderdrucks (Förderhöhe) vom Volumenstrom.

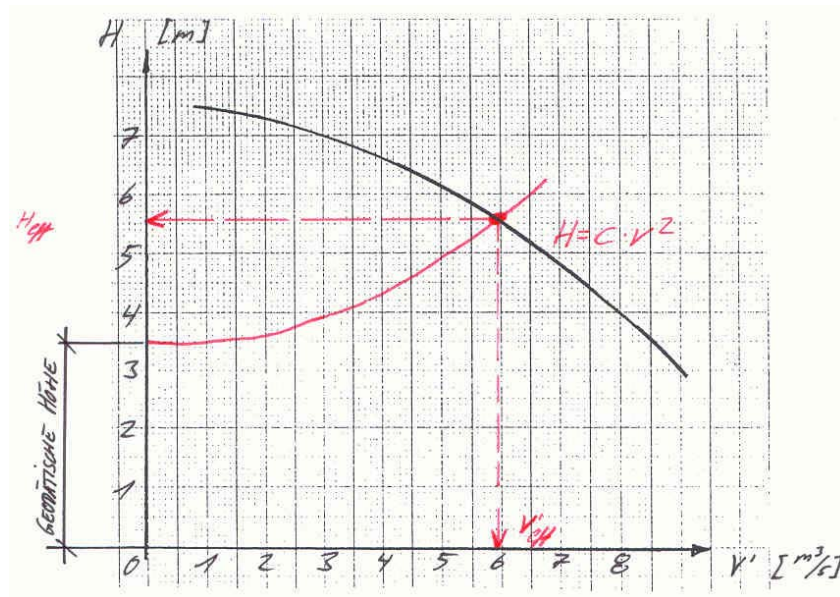
$$\begin{array}{l} \Delta p = f(v') \\ H = f(V') \end{array}$$

Die Ventilatoren Kennlinie kann nicht berechnet werden. Es sind empirische Werte.

Umwälzpumpen und Ventilatoren

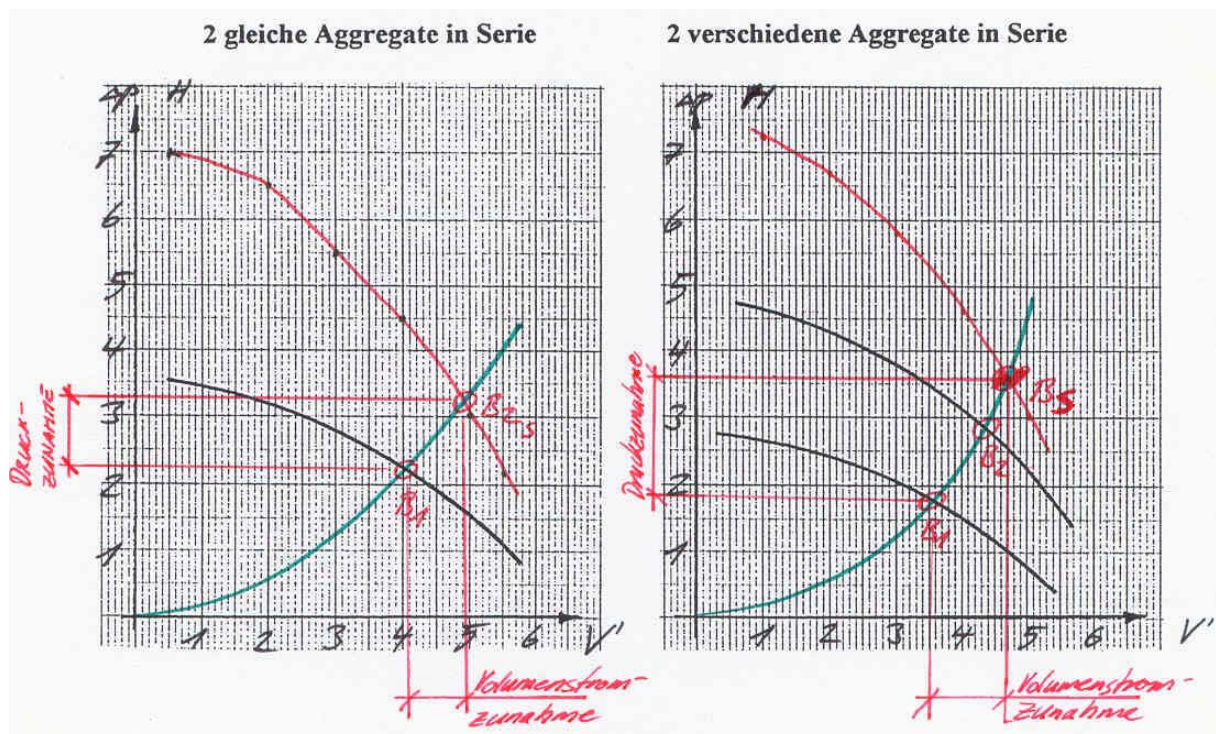


Förderpumpen



Serieschaltung von Pumpen/Ventilatoren

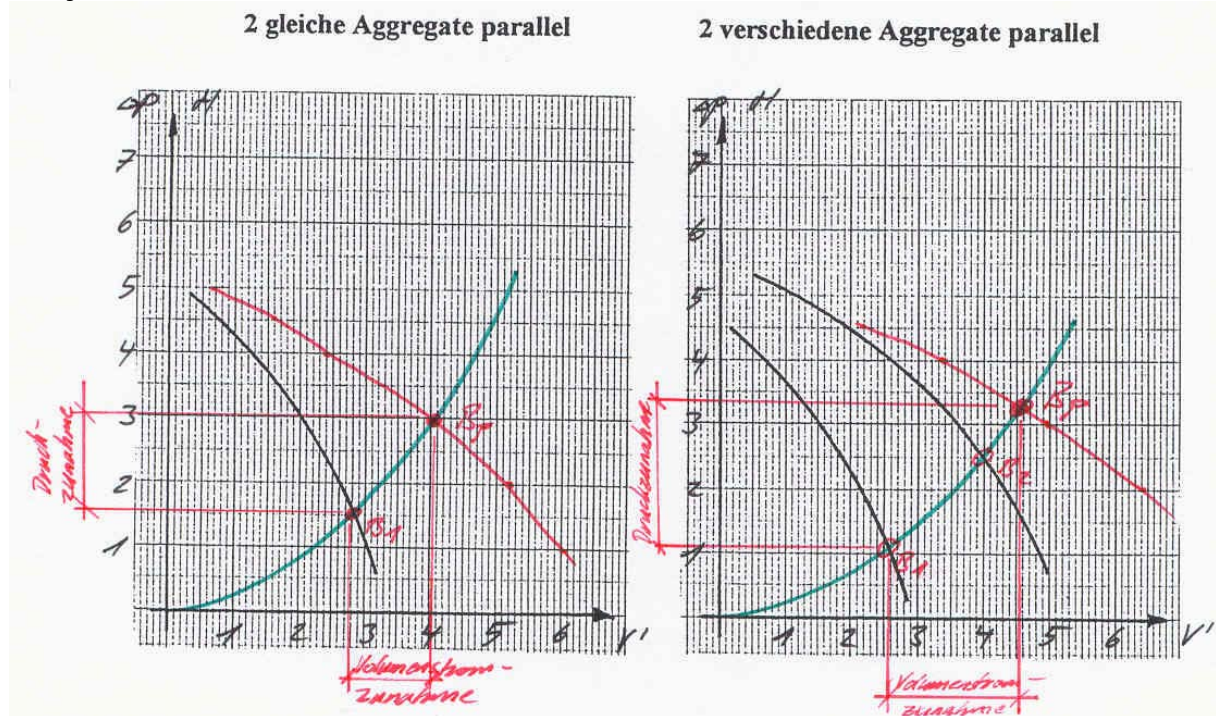
Bei jedem Volumenstrom werden die Drücke der einzelnen Ventilatoren addiert.



Für Serieschaltungen sollen immer Ventilatoren mit flachen Kennlinien gewählt werden.

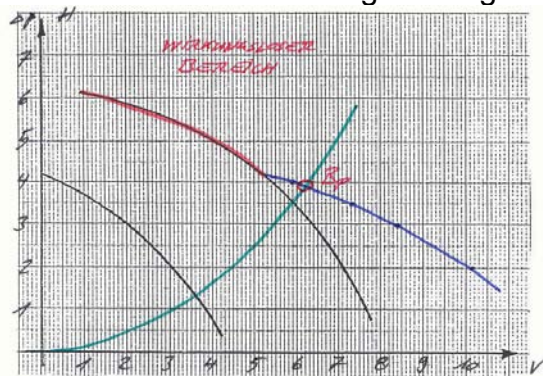
Parallelschaltung von Pumpen/Ventilatoren

Bei jedem Druck werden die Volumenströme der einzelnen Ventilatoren addiert.

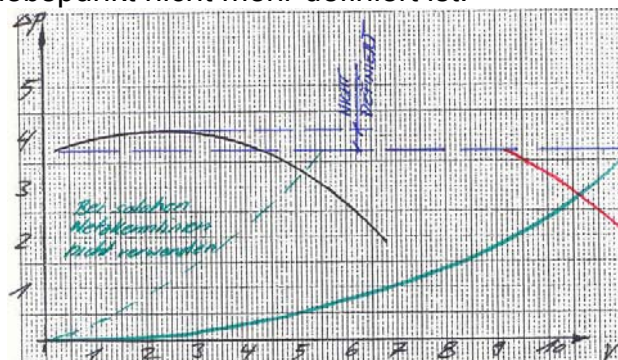


Für Parallelschaltungen sollen immer Ventilatoren mit steiler Kennlinie gewählt werden.

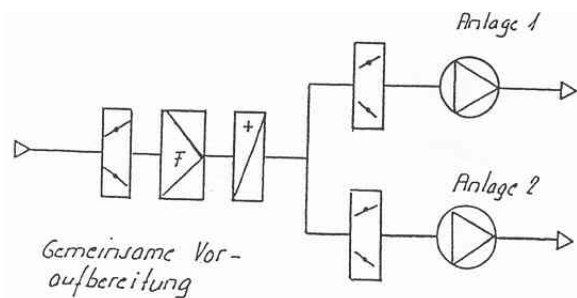
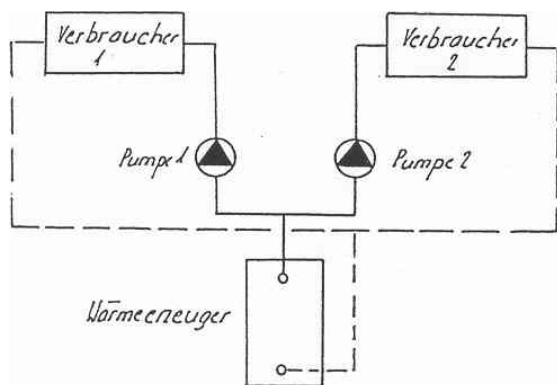
Es gibt Bereiche, in welchen die Parallelschaltung wirkungslos sind:



Bei Parallelschaltung von Ventilatoren mit einem Scheitelpunkt gibt es einen Bereich, in welchem der Betriebspunkt nicht mehr definiert ist.



Mischschaltungen



Hier gibt es verschiedene Betriebsarten:

- Pumpe 1 ist allein in Betrieb
- Pumpe 2 ist allein in Betrieb
- Beide Pumpen sind im Betrieb

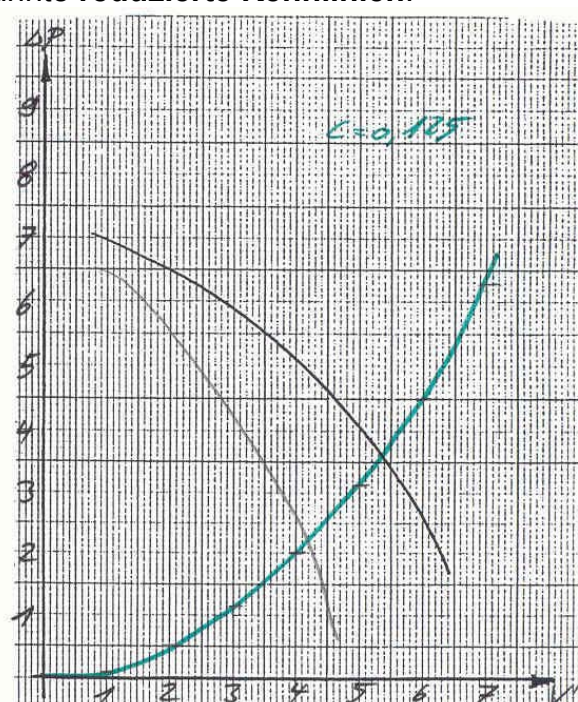
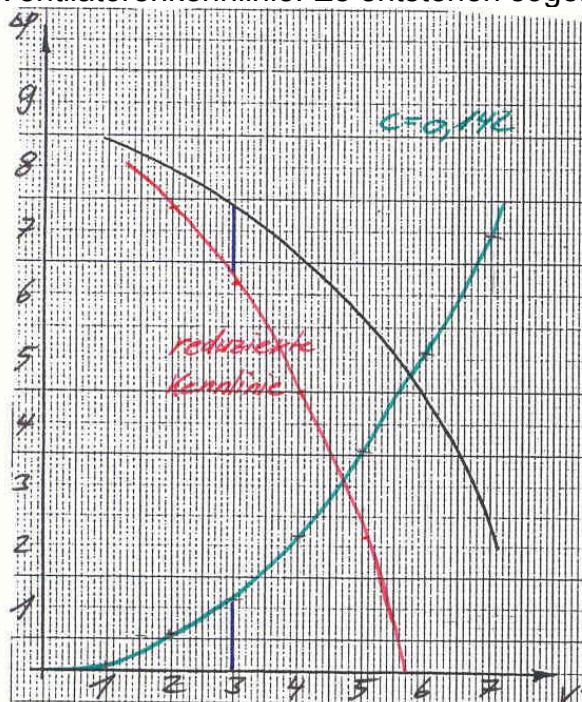
Die Bestimmung des Betriebspunktes erfolgt wie folgt:

1. Schritt:

Bestimmung der Netzkonstante für
den gemeinsamen Netzteil
die Einzelteilnetze

2. Schritt:

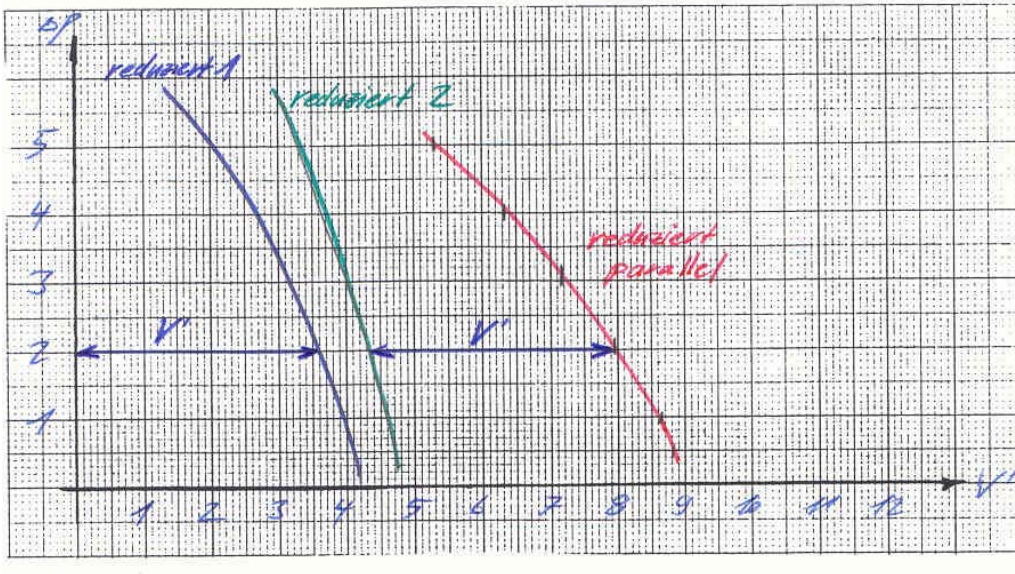
Aufzeichnen der Einzelkennlinien und Subtraktion derselben von der zugehörigen Ventilatorenkennlinie. Es entstehen sogenannte **reduzierte Kennlinien**.



FORMELSAMMLUNG STRÖMUNGSLEHRE

3. Schritt:

Addieren der reduzierten Kennlinien zu einer Parallelschaltung

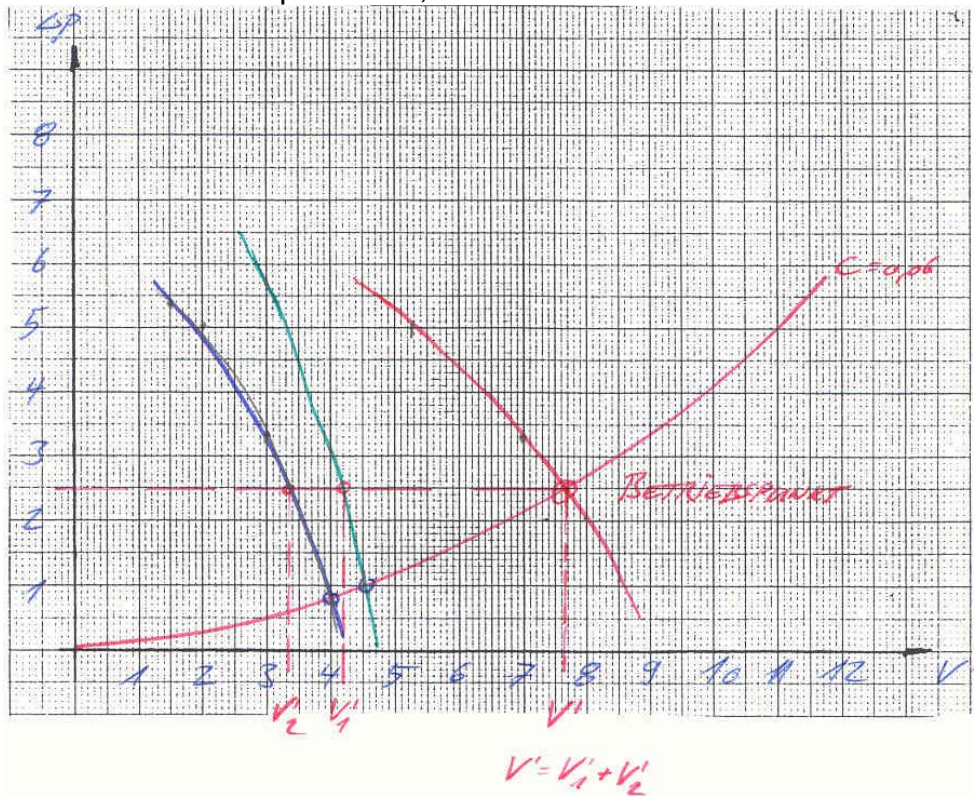


4. Schritt:

Aufzeichnen der Netzkennlinie für den gemeinsamen Netzteil. Der Schnittpunkt mit der reduzierten parallelen Ventilatorenkennlinie ist der Betriebspunkt.

5. Schritt:

Bestimmen der Betriebspunkte der Einzelaggregat. Dies sind die Schnittpunkte der Waagrechtchen vom Betriebspunkt aus, mit den reduzierten Kennlinien.



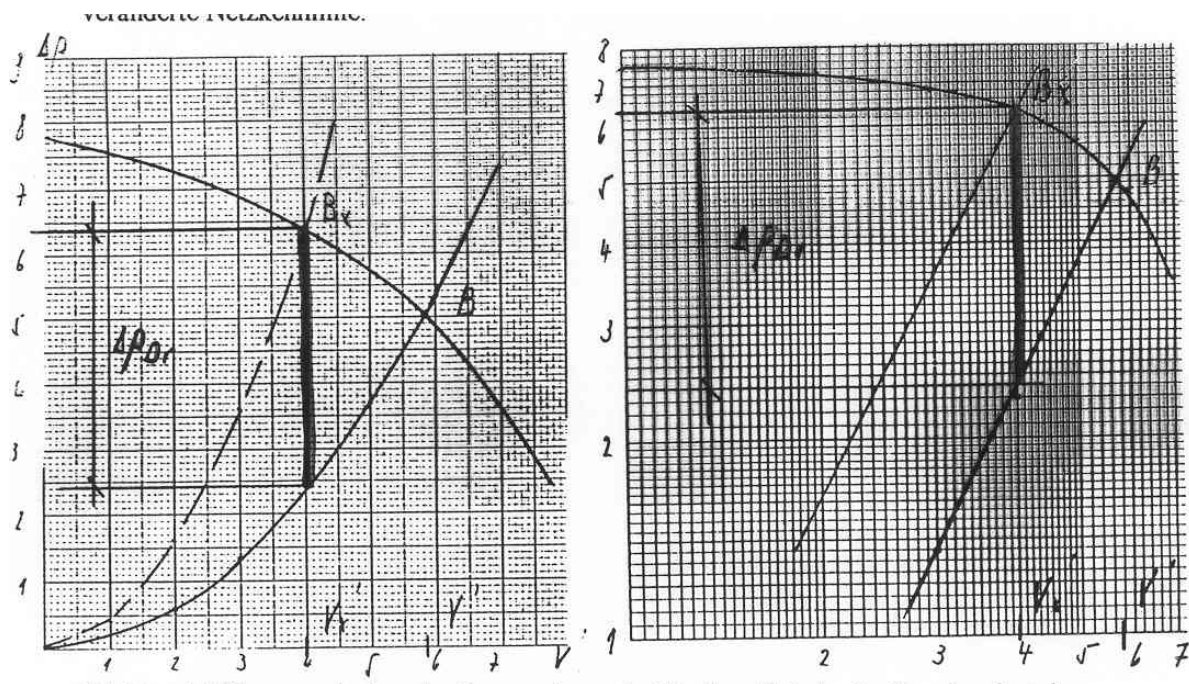
Drosselung des Volumenstromes

Drehzahländerung und Drosselung

Drosselung:

Man sagt: „Der Betriebspunkt wandert auf der Ventilatorenkennlinie nach links“

In Wirklichkeit entsteht jedoch eine veränderte Netzkennlinie!



Die Leistung eines Ventilators/Pumpe berechnet sich wie folgt:

Ventilator:

$$P = \frac{V' * \Delta p}{\eta * 3600}$$

Pumpe:

$$P = \frac{V' * \rho * g * H}{\eta * 3600}$$

Leistungsmehrverbrauch:

$$P = \frac{V' * \Delta p_{Dv}}{3600 * \eta_V * \eta_M * \eta_A * 1000}$$

$$P = \frac{V' * \rho * g * h_{Dv}}{3600 * \eta_P * \eta_M * 1000} \text{ [kW]}$$

V' = Volumenstrom [m³/h]

h_{Dv} = Verlusthöhe der Drossel [m]

Δp_{Dv} = Druckverlust der Drossel [Pa]

η_P = Wirkungsgrad der Pumpe [-]

η_V = Wirkungsgrad des Ventis [-]

η_M = Wirkungsgrad des Motors [-]

η_A = Wirkungsgrad des Antriebs [-]

Energieverbrauch:

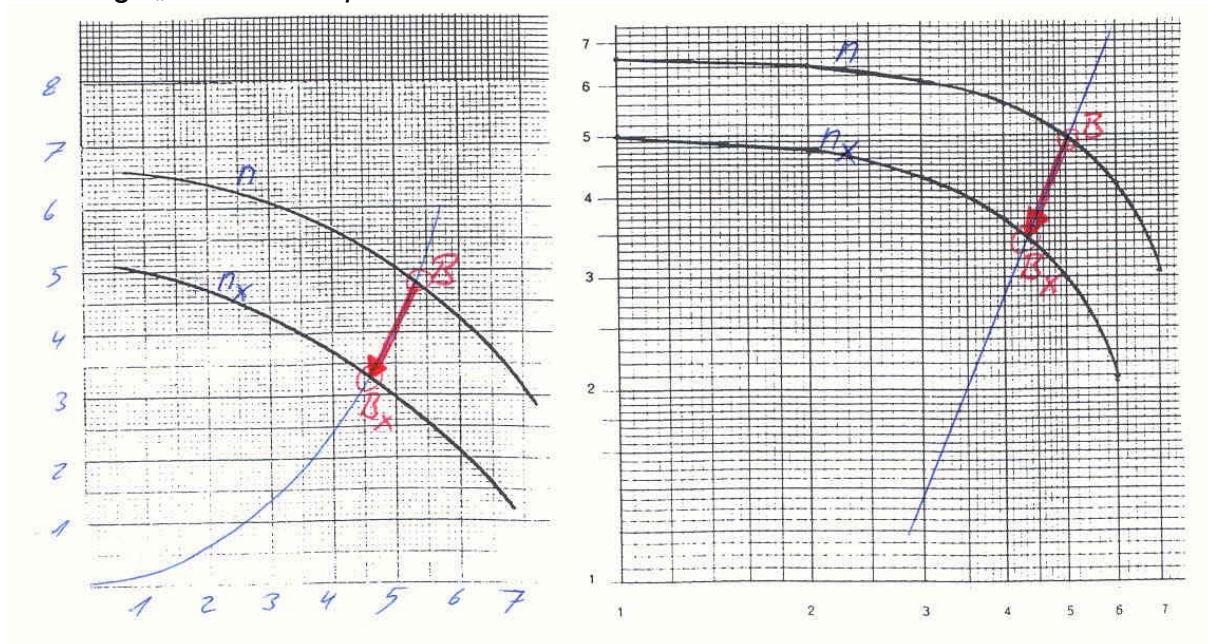
$$W = P * h \text{ [kWh]}$$

h = Betriebsstunden [h]

Drehzahländerung:

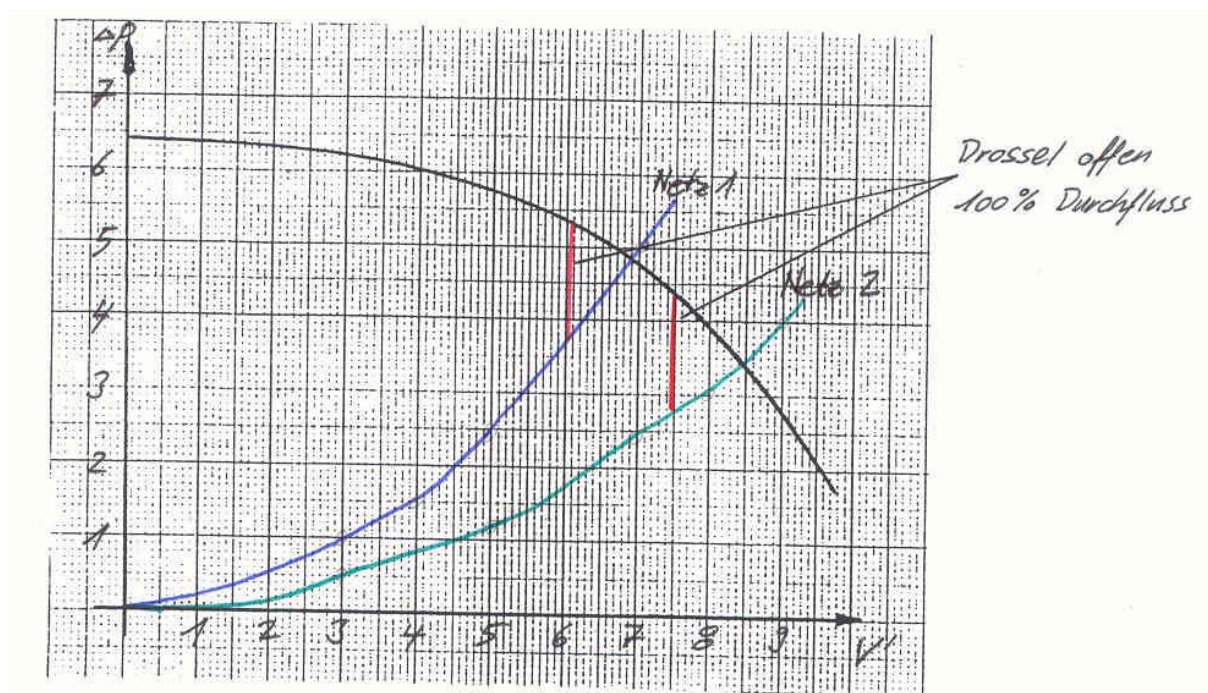
Hier findet kein Eingriff am Leitungsnetz statt. Die **Netzkennlinie bleibt also unverändert**. Es findet **keine Energievernichtung** statt.

Man sagt: „Der Betriebspunkt wandert auf der Netzkennlinie nach unten“



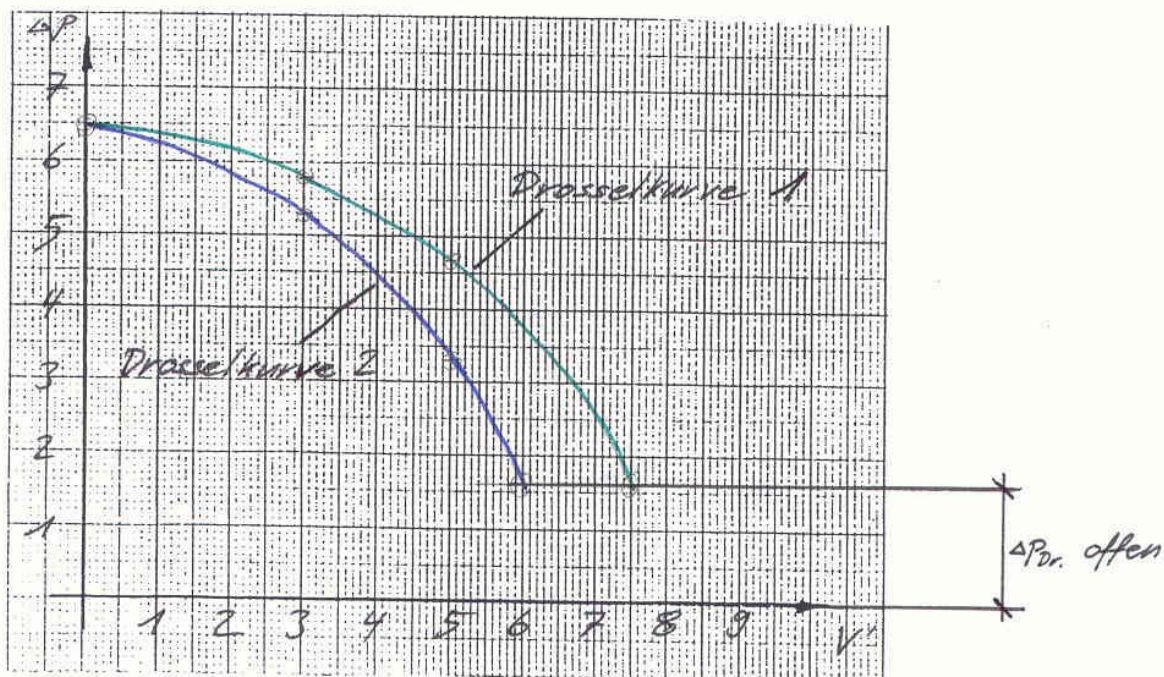
Drosselkennlinie

Druckverlust einer Drosselinrichtung (für zwei verschiedene Leitungsnetze bei verschiedenen Volumenströmen):



FORMELSAMMLUNG STRÖMUNGSLEHRE

Werden die oben erhaltenen Druckverluste in ein neues Diagramm übertragen, ergeben sich die folgenden **Kennlinien**. (der Volumenstrom wird oft in Prozent angegeben):

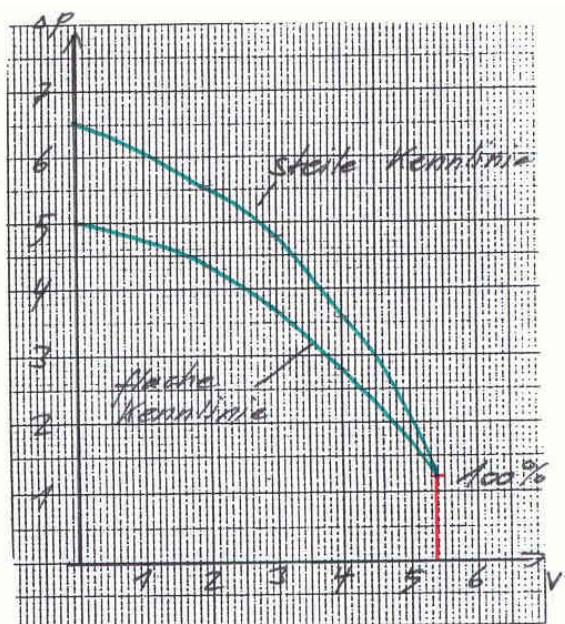
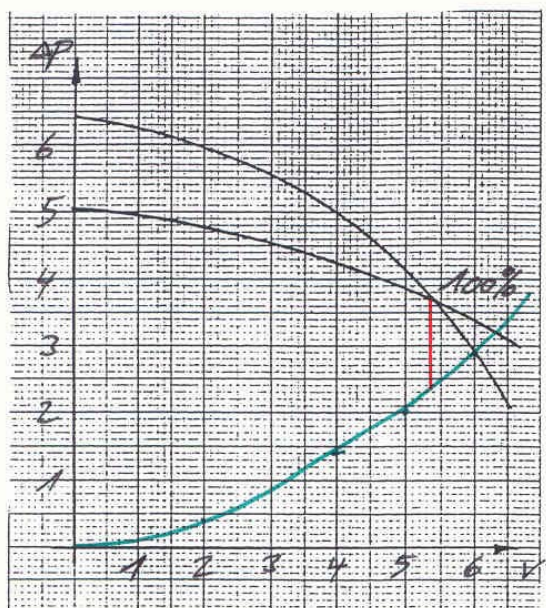


Einflussgrößen der Ventilator Kennlinie auf die Drossel Kennlinie

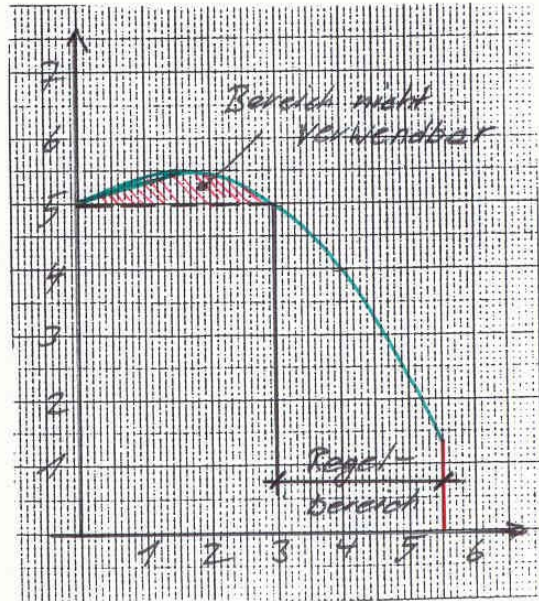
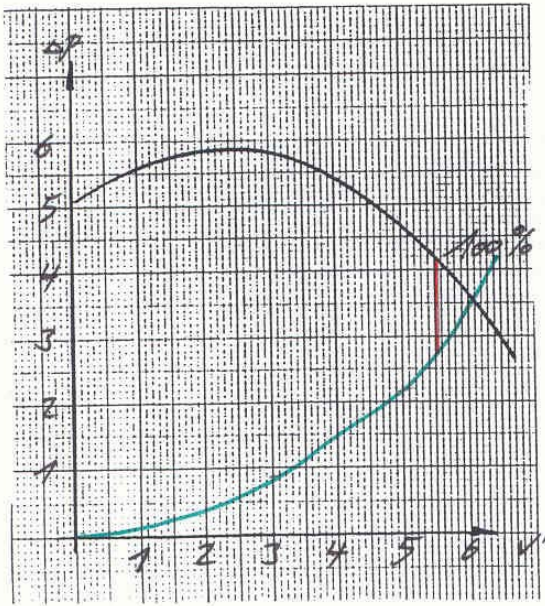
Der Verlauf der Drosselkennlinie ist nicht nur von der Leitungskennlinie abhängig, sondern sehr stark auch von der Ventilator Kennlinie.

Typische Einflussgrößen:

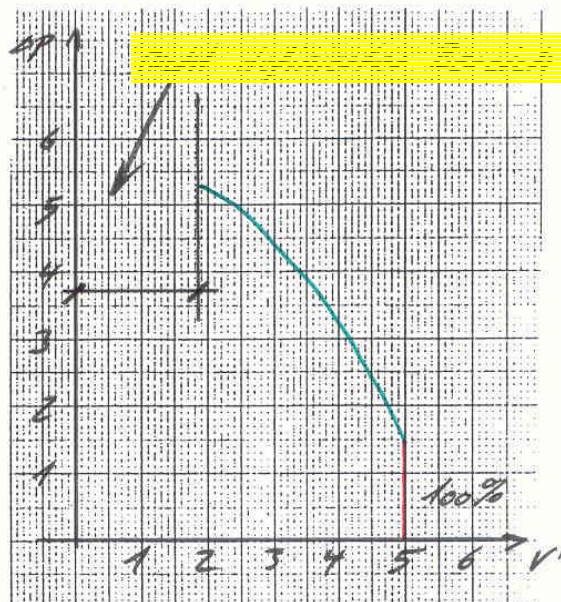
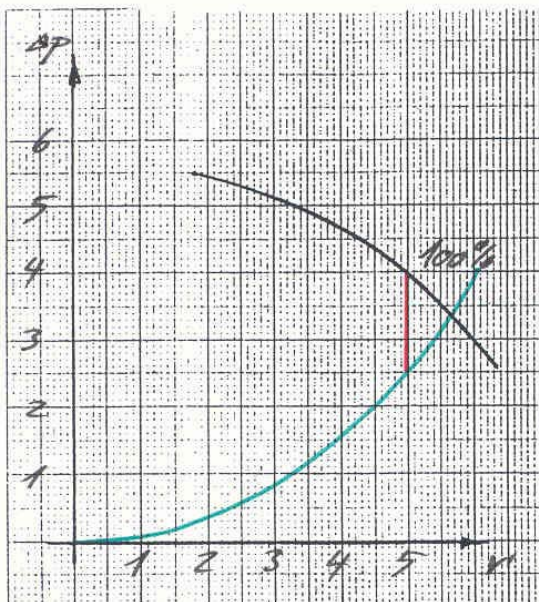
Steile oder flache Ventilator Kennlinie:



Scheitelpunktkennlinie



ACHTUNG: Die Kennlinien in den Auswahldiagrammen sind nur im stabilen Bereich angegeben. Sie **dürfen nicht willkürlich verlängert werden.**

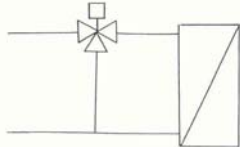


Drosselung von Teilströmen

Sie erfolgt in der Regel durch

- Abschaltung von Netzteilen
- Verteilung oder Mischung in Stellgliedern

Bsp: Verteilventil:



- Alles Wasser fließt durch den Wärmetauscher
- Alles Wasser fließt durch den Beipass
- Das Wasser fließt parallel durch Beipass und WT

Man kann diese Funktionsweise als eine Schaltung von Leitungsnetzen auffassen:

$$C_1 = 0,0084$$

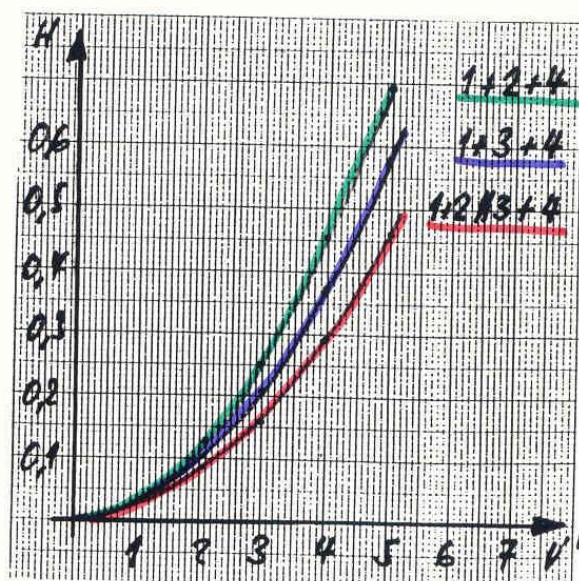
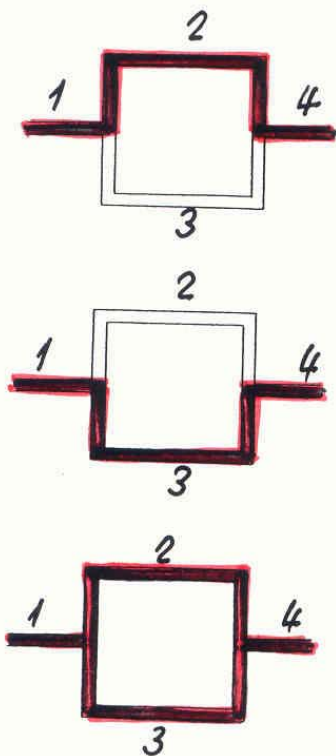
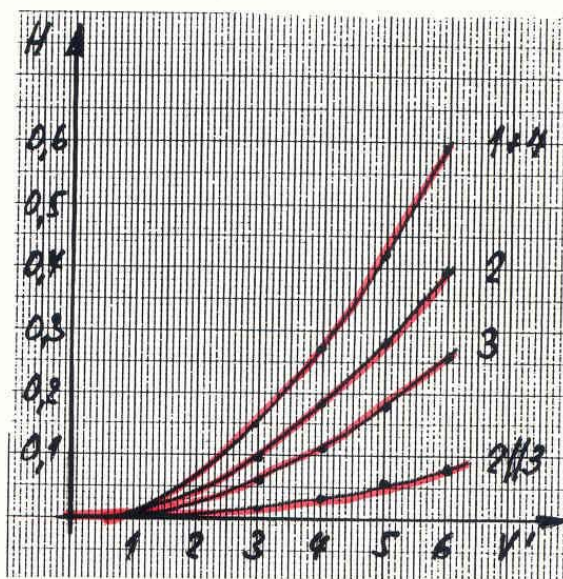
$$C_2 = 0,0112$$

$$C_3 = 0,0072$$

$$C_4 = 0,0084$$

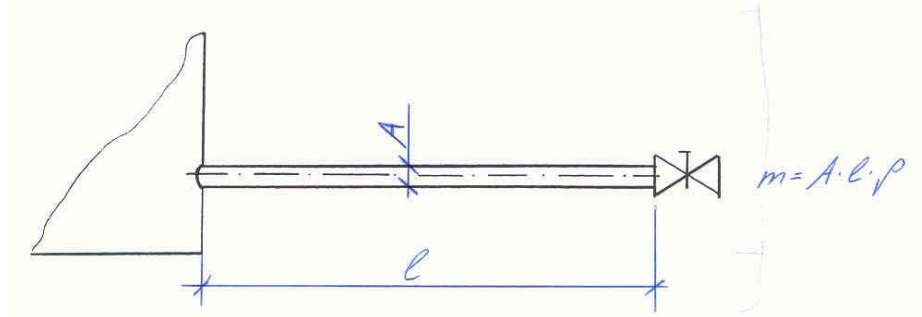
$$C_{1+4} = 0,0168$$

$$C_{2+3} = 0,0022$$



Zeitlich veränderte Strömung

Durch **schnelles Öffnen / Schliessen** eines Absperr- oder Regelorgans oder durch **Anfahren von Pumpen/Ventilatoren** kann sich der Volumenstrom in einer Rohrleitung zeitlich verändern. Es tritt **Beschleunigung / Verzögerung** auf.



Der bei Beschleunigung auftretende Druck:

$$\boxed{p_a = l * \rho * a} \text{ [Pa]} \quad a = \text{Beschleunigung [m/s}^2\text{]}$$

In der Bernoulli-Gleichung wird dann anstelle des dynamischen der Beschleunigungsdruck eingesetzt:

$$p_{st} + \rho * g * h = konst.$$

Kraftwirkung und Energieaustausch bei Strömungsvorgängen

Strömungskräfte

Ausgangslage: **Inkompressibles Fluid**

Impulskraft:

$$F_I = \rho * V' * \Delta w$$

Druckkraft:

$$F_p = p_u * A$$

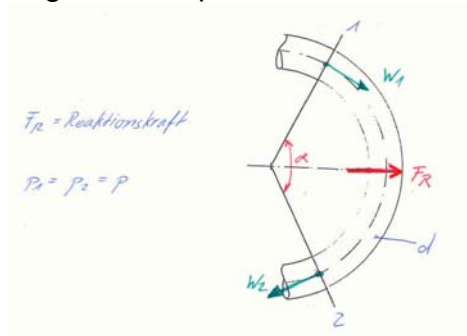
Man unterscheidet nun zwei Kraftwirkungen:

Reaktionskräfte: Kräfte, die das strömende Fluid **auf die Begrenzungsflächen** ausübt.

Aktionskräfte: Kräfte, die ein **Flüssigkeitsstrahl** auf eine **Fläche** ausübt.
(Strahlstosskräfte)

Kräfte an einem Rohrbogen

Durch die Richtungsänderung treten Impulskräfte auf.



Stelle 1: Druckkraft $F_{p1} = p * A = p_1 \frac{d^2 * \pi}{4}$

Impulskraft $F_I = \rho * V * w_1$ $F_I = \rho * w_1^2 * A = \rho * w_1^2 * \frac{d^2 * \pi}{4}$

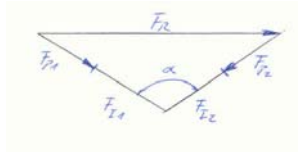
Diese Kräfte wirken in der Strömungsrichtung

Stelle 2: Druckkraft $F_{p2} = p * A = p_2 \frac{d^2 * \pi}{4}$

Impulskraft $F_I = \rho * V * w_2$ $F_I = \rho * w_2^2 * A = \rho * w_2^2 * \frac{d^2 * \pi}{4}$

Da das Rückstossprinzip (Aktion gleich Reaktion) gilt, wirken diese Kräfte gegen die Strömungsrichtung

Das Kräftedreieck sieht wie folgt aus:



Die **ausgeübte Reaktionskraft** ist dann:

$$F_R = 2 * \sin \frac{\alpha}{2} * \frac{d^2 * \pi}{4} (p + \rho * w^2) \quad [\text{N}]$$

Die Wirkungslinie fällt mit der Winkelhalbierenden des Bogen zusammen und wirkt demzufolge nach aussen.

Die Kraft, die auf die Schrauben einer Flanschverbindung wirken:

$$F_S = \frac{d^2 * \pi}{4} (p + \rho * w^2)$$

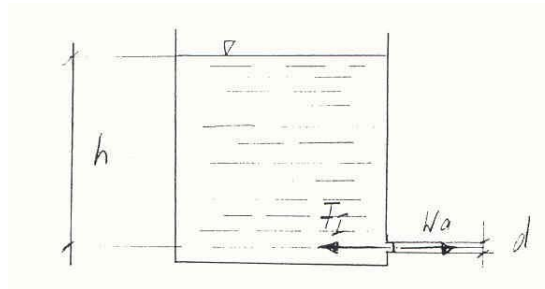
Rückstosskraft beim Ausfluss aus einem Gefäß

Austrittsgeschwindigkeit

$$w_a = \sqrt{2 * g * h} \text{ [m/s]}$$

Hier tritt nur eine **Impulskraft** auf:

$$F_I = \frac{\rho * g * h * d^2 * \pi}{2} \text{ [N]}$$

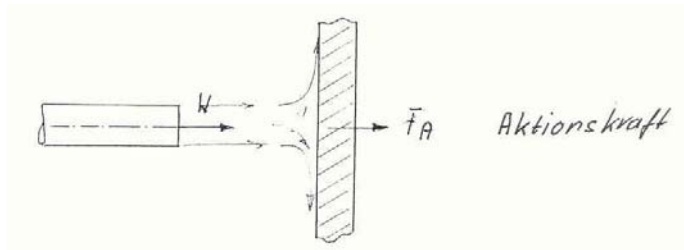


Wäre die Öffnung geschlossen würde die Kraft $F = \rho * g * h * A$ wirken.

Die dynamische Reaktionskraft ist als **doppelt so gross**, wie die statische Druckkraft.

Strahlstosskräfte

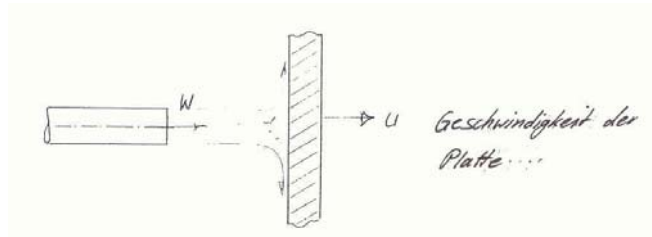
Senkrechter Stoss an eine feste Wand



Unter Vernachlässigung der Reibung ist die Stosskraft = die Impulskraft:

$$F_A = \rho * w^2 * A \text{ [N]}$$

Senkrechter Stoss an eine sich in Stossrichtung bewegende Wand



Da sich die Platte bewegt entsteht eine Arbeit bzw. eine Leistung:

$$P = \rho * A (w^2 * u - 2wu^2 + u^3)$$

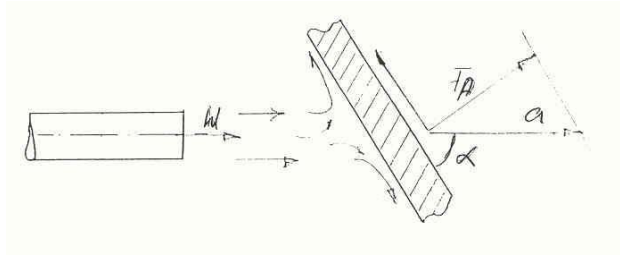
Minimale Leistung (wenn $w=u$):

$$P_{\min} = 0$$

Maximale Leistung (wenn $u = \frac{1}{3} * w$)

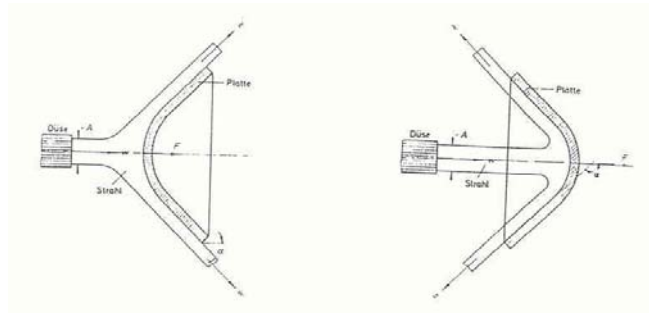
$$P_{\max} = \frac{4}{27} * \rho * A * w^3$$

Schiefer Stoss gegen eine feststehende Wand



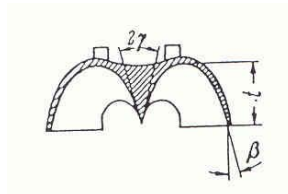
$$F_A = \rho * A * w^2 * \sin \alpha \quad [\text{N}]$$

Gewölbter Stoss gegen eine gewölbte Platte



$$F_A = A * \rho * w^2 (1 - \cos \alpha) \quad [\text{N}]$$

Eine Anwendung hierfür ist die Pelton-turbine:



$$F_A = A * \rho * w(w - u)(1 + \cos \beta) \quad [\text{N}]$$

u = Umfangsgeschwindigkeit
A = wirk. Strahlquerschnitt

Theoretische Leistung:

$$P = F_A * u$$

Energiezufuhr oder Energieabgabe bei Strömung

Erweiterte Bernoulli-Gleichung in der Höhenform:

$$H + h_s + \frac{p_s}{\rho \cdot g} + \frac{w_s^2}{2 \cdot g} = h_d + \frac{p_d}{\rho \cdot g} + \frac{w_d^2}{2 \cdot g} + h_v$$

Index: s = Saugseite
 d = Druckseite

In einer Heizungsanlage ist $h_s = h_d$, $p_s = p_d$ und eine allfällige **Druckdifferenz** zwischen w_s und w_d kann vernachlässigt werden.

Daher: Förderhöhe der Umwälzpumpe:

$$H = h_v$$

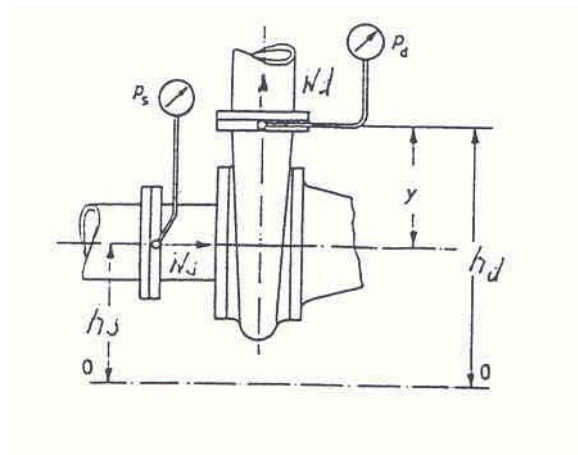
Erweiterte Bernoulli-Gleichung in der Druckform:

$$\Delta p + \rho \cdot g \cdot h_s + \frac{w_s^2 \cdot \rho}{2} = \rho \cdot g \cdot h_d + p_d + \frac{w_d^2 \cdot \rho}{2} + p_v$$

Bei der Lüftungsanlage gilt dieselbe Überlegung wie oben bei der Heizung:

$$\Delta p = \Delta p_v$$

Die oben aufgeführte erweiterte Bernoulli-Gleichung dient hauptsächlich zur Bestimmung der Förderhöhe/Förderdruck einer Pumpe/Ventilator auf dem Prüfstand:



$$H = y + \frac{p_d - p_s}{\rho \cdot g} + \frac{w_d^2 - w_s^2}{2g}$$

Kavitation

Kritisch Geschwindigkeit

(bei der Kavitation auftreten kann)

$$w_{kritisch} = \sqrt{\frac{(p_a - p_s) \cdot 2}{\rho}} \quad [\text{m/s}]$$

p_a = absoluter Gesamtdruck

$$p_a = p_{stat} + p_{dyn}$$

p_s = Sättigungsdruck des Fluid

Folgen der Kavitation

Merkmale:

- Geräuschbildung
- Beginnende Kavitation -> Knistern, leichtes Rauschen
- vollständige Hohlraumbildung -> Maschinengewehrknattern oder Donner

Kann auftreten bei:

- Turbinen
- Pumpen
- Armaturen

Bei länger andauernder Kavitation kann es zu Zerstörungen des Wandmaterials kommen (Kavitationskorrosion).

Weitere Folgen:

- Absinken des Wirkungsgrades

Bei Pumpen:

- Abfall der Förderhöhe bei gleichen Fördervolumen
- Laufunruhe (Schwingungen)

NPSH-Wert (=Haltedruckhöhe = Druckhaltehöhe)

= **Minimaler saugseitiger Druck**, der erforderlich ist, **damit keine Dampfblasen (Kavitation) entstehen** können.

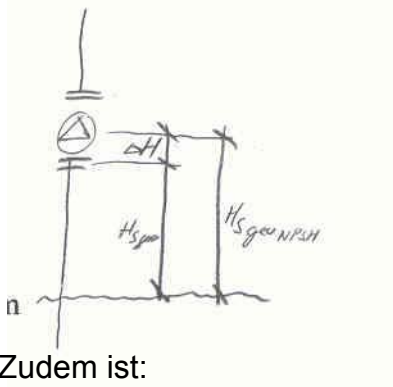
Der Betriebspunkt einer Pumpe muss folgende Ungleichung mit einer **Sicherheit von 0,5 m** erfüllen:

$$\boxed{NPSH_{vorh.} > NPSH_{erf.}}$$

Vorhandener NPSH-Wert

Er hängt ab von: - Wassertemperatur
 - Barometerstand
 - Disposition der Anlage

$$NPSH_{\text{vorh}} = \frac{p_e + p_b - p_s}{\rho \cdot g} + \frac{w_e^2}{2g} - H_{S_{\text{geoNPSH}}} - H_{\text{vs}}$$



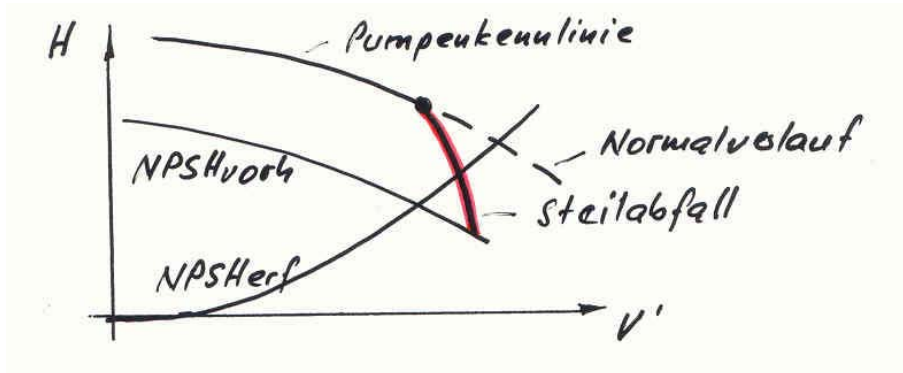
Zudem ist:

$$H_{S_{\text{geoNPSH}}} = H_{S_{\text{geo}}} + \Delta H$$

- p_e = Überdruck am Eintritt (falls vorhanden), Druck auf den Saugspiegel [Pa]
- p_b = Barometerdruck [Pa]
- p_s = Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeit [Pa]
- w_e = Zuströmgeschwindigkeit beim Saugroheintritt [m/s]
- H_{vs} = Saugseitige Verlusthöhe [m]
- $H_{S_{\text{geo}}}$ = Saughöhe [m]
- ΔH = Distanz zwischen Mitte Saugstutzen u. Laufradmitte [m]

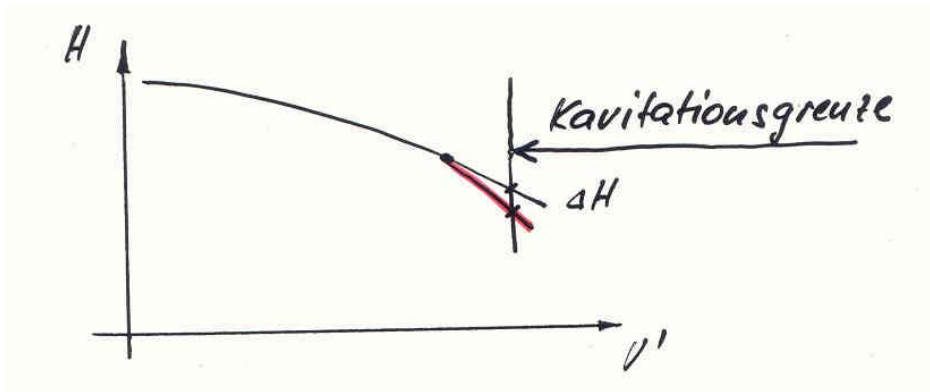
Kennlinien

Bei auftretender Kavitation fällt die Pumpenkennlinie plötzlich steil ab (Steilabfall).

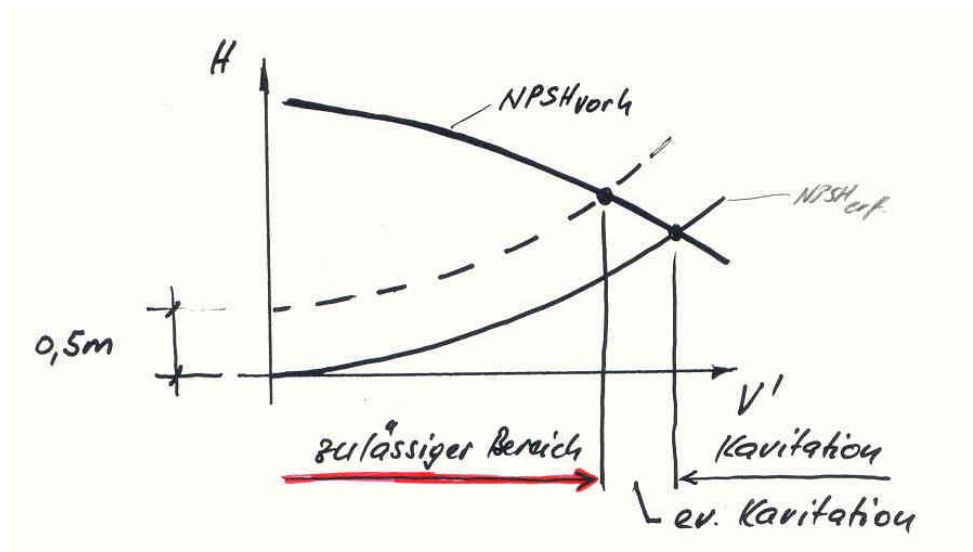


Kavitationsgrenze (in der Praxis):

$$\Delta H \geq 3\% \quad \text{oder} \quad \Delta H \geq 1\%$$



Bei dem vom Pumpenhersteller angegebenen $NPSH_{erf}$ ist in der Regel die oben erwähnte Sicherheit von 0.5m bereits zugeschlagen.



Die Pumpenaufstellung

$$-H_{Sgeo} = NPSH_{erf} - \frac{p_e + p_b - p_s}{\rho * g} - \frac{w_e^2}{2g} + H_{vs}$$

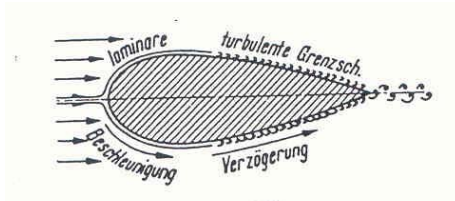
negativer Wert: die **Pumpe** darf um so viele Meter **über dem Saugspiegel** aufgestellt werden.

positiver Wert: die **Pumpe** muss um so viele Meter **unter dem Saugspiegel** aufgestellt werden.

Strömung um Körper

Strömungswiderstand

- Bei jedem angeströmten Körper teilt sich die Strömung im **Staupunkt** (Der Punkt vorne am Punkt)
- Die Strömungsgeschwindigkeit ist am **Staupunkt Null**
- Von nun an findet eine **Beschleunigung** statt
- Vom Staupunkt an entsteht eine **laminare Grenzschicht** (auch bei turbulenter Anströmung)
- Ab einem bestimmten Punkt findet eine **Strömungsablösung** statt. Die Strömung wird **turbulent**.



Der bei der Umströmung eines Körpers auftretende Strömungswiderstand wird unterteilt in:

- **Reibungswiderstand oder Flächenwiderstand**
- **Druckwiderstand oder Formwiderstand**

*FAST AUSSCHLIESSLICH
REIBUNGSWIDERSTAND*

Querangeströmte ebene Platte

*FAST AUSSCHLIESSLICH
DRUCKWIDERSTAND*

DRUCKWIDERSTAND > REIBUNGSWIDERSTAND

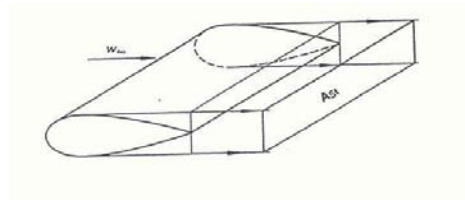
Symmetrisches Profil

REIBUNGSWIDERSTAND > DRUCKWIDERSTAND

Der Druck- oder Formwiderstand

Weil in Wirklichkeit der Druck an der Vorderseite und der Rückseite eines umströmten Körpers nicht gleich gross ist entsteht folgender **Druckunterschied**:

$$F_D = c_D * A_{St} \frac{w_\infty^2 * \rho}{2}$$

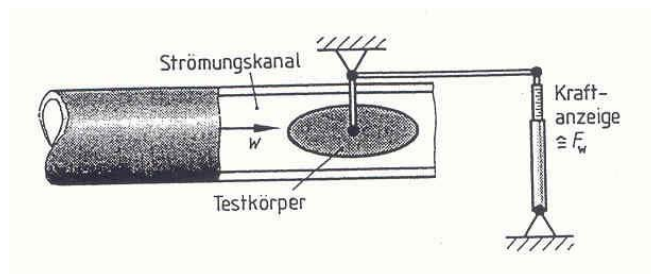


- c_D = Widerstandszahl [-]
 A_{St} = in Strömungsrichtung projizierte Stirnfläche [m^2]
 w_∞ = Anströmgeschwindigkeit [m/s]

Der c_w -Wert

Er wird im Strömungskanal gemessen.

=Proportionalitätsfaktor, welcher den Reibungs- und den Druckwiderstand erfasst.

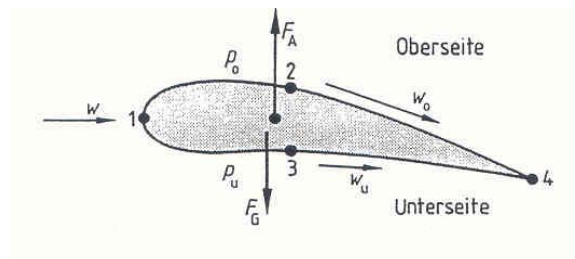


-> Widerstandskraft

$$F_w = c_w * A_{St} \frac{w_\infty^2 * \rho}{2}$$

Dynamischer Auftrieb

Der dynamische Auftrieb entsteht, weil die **Geschwindigkeit** (und somit der dynamische Druck) **an der Oberseite grösser** ist als an der Unterseite. Dadurch ist der **statische Druck an der Unterseite grösser** als an der Oberseite. Durch diesen **statischen Unterdruck** entsteht eine **dynamische Auftriebskraft** quer zur Strömungsrichtung.



Auftriebskraft:

$$F_A = c_A * A_{St} \frac{w^2 * \rho}{2}$$

c_A = Auftriebsbeiwert [-]

A_{St} = (im Strömungskanal gemessen)
angeströmte Fläche (senkrechte
Projektion des Tragflügels)

Pumpen und Ventilatoren

Siehe Lehrmittel Strömungslehre 2 ab Seite 41.