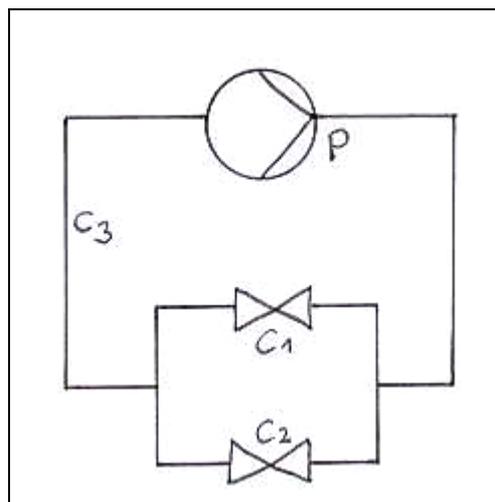


Beispiele - Hydraulik Verschaltungen

1. Beispiel: Untersuchung des Einflusses des Zuleitungswiderstandes auf die Volumenstromschwankungen parallel geschalteter Verbraucher

- Beweis der Behauptung: Je höher der Zuleitungswiderstand (im Verhältnis zum Verbraucherwiderstand), desto höher sind die Volumenstromschwankungen bei Zu- und Abschaltung parallel geschalteter Verbraucher.
- Untersuchung von drei Fällen des Zuleitungswiderstandes:
 - a) $\Delta p_z = 0,4 \text{ bar}$, $\dot{V}_{\text{ges}} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$, c_1 und c_2 im Netz $\Leftrightarrow c_2$ allein im Netz
 - b) $\Delta p_z = 0 \text{ bar}$, $\dot{V}_{\text{ges}} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$, c_1 und c_2 im Netz $\Leftrightarrow c_2$ allein im Netz
 - c) $\Delta p_z = 1,4 \text{ bar}$, $\dot{V}_{\text{ges}} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$, c_1 und c_2 im Netz $\Leftrightarrow c_2$ allein im Netz
- Weiterführung des Beispiels des vorigen Kapitels:



- die Pumpe wird jeweils neu gewählt mit einer Nullförderhöhe 1,5 mal über der des Betriebspunktes.

a) Erster Fall $\Delta p_z = 0,4 \text{ bar}$

- beide Ventile offen

am Widerstand c_1 gilt:

$$\Delta p_{c1} = 0,2 \text{ bar} \quad \dot{V}_{c1} = 1 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Betriebspunkt des Netzes:

$$\Delta p_{\text{ges}} = 0,6 \text{ bar} \quad \dot{V}_{\text{ges}} = 2 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Pumpenkennlinie:

$$\Delta p_p = 0,9 \text{ bar} - 0,075 \text{ barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2$$

- c_2 ist geschlossen

Widerstand der Zuleitung:

$$c_z = \frac{0,4 \text{ barh}^2}{2^2 \text{ m}^6} = 0,1 \frac{\text{barh}^2}{\text{m}^6}$$

Widerstand des Verbrauchers:

$$c_1 = \frac{0,2 \text{ barh}^2}{1^2 \text{ m}^6} = 0,2 \frac{\text{barh}^2}{\text{m}^6}$$

Widerstand des Netzes:

$$c_E = c_z + c_1 = 0,3 \frac{\text{barh}^2}{\text{m}^6}$$

Netzkennlinie:

$$\Delta p_p = 0,3 \text{ barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2$$

Bestimmung des neuen Betriebspunktes durch Gleichsetzen von Pumpen- und Netzkennlinie: $0,3 \text{ barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2 = 0,9 \text{ bar} - 0,075 \text{ barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2$

Volumenstrom durch die Pumpe und Verbraucher 1: $\dot{V} = 1,55 \text{ m}^3 / \text{h}$

- Vergleich

Steigerung des Volumenstromes um ca. 55 % durch den Verbraucher c_1 bei Abschaltung von c_2 .

b) Zweiter Fall $\Delta p_z = 0 \text{ bar}$

- beide Ventile offen

am Widerstand c_1 gilt:

$$\Delta p_{c1} = 0,2 \text{ bar} \quad \dot{V}_{c1} = 1 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Betriebspunkt des Netzes:

$$\Delta p_{\text{ges}} = 0,2 \text{ bar} \quad \dot{V}_{\text{ges}} = 2 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Nullförderhöhe der Pumpe:

$$\Delta p_0 = 1,5 \cdot 0,2 \text{ bar} = 0,3 \text{ bar}$$

Bestimmung des Parameters b der Pumpenkennlinie (für Betriebspunkt):

$$0,2 = 0,3 - b \cdot 2^2 \text{ m}^6 / \text{h}^2$$

$$b = 0,025 \text{ barh}^2 / \text{m}^6$$

Pumpenkennlinie:

$$\Delta p_p = 0,3 \text{ bar} - 0,025 \text{ barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2$$

- c₂ ist geschlossen

Widerstand des Verbrauchers: $c_1 = \frac{0,2\text{barh}^2}{1^2\text{m}^6} = 0,2 \frac{\text{barh}^2}{\text{m}^6}$

Widerstand des Netzes: $c_E = c_z + c_1 = 0,2 \frac{\text{barh}^2}{\text{m}^6}$

Netzkenlinie: $\Delta p_p = 0,2\text{barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2$

Bestimmung des neuen Betriebspunktes durch Gleichsetzen von Pumpen- und Netzkenlinie: $0,2\text{barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2 = 0,3\text{bar} - 0,025\text{barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2$

Volumenstrom durch die Pumpe und Verbraucher 1: $\dot{V} = 1,15\text{m}^3 / \text{h}$

- Vergleich

Steigerung des Volumenstromes um ca. 15 % durch den Verbraucher c₁ bei Abschaltung von c₂.

c) Dritter Fall $\Delta p_z = 1,4 \text{ bar}$

- beide Ventile offen

am Widerstand c₁ gilt: $\Delta p_{c1} = 0,2 \text{ bar}$ $\dot{V}_{c1} = 1\text{m}^3 / \text{h}$

Betriebspunkt des Netzes: $\Delta p_{\text{ges}} = 1,6 \text{ bar}$ $\dot{V}_{\text{ges}} = 2\text{m}^3 / \text{h}$

Nullförderhöhe der Pumpe: $\Delta p_0 = 1,5 \cdot 1,6 \text{ bar} = 2,4 \text{ bar}$

Bestimmung des Parameters b der Pumpenkenlinie (für Betriebspunkt):

$$0,2 = 2,4 - b \cdot 2^2\text{m}^6 / \text{h}^2$$

$$b = 0,2 \text{ barh}^2 / \text{m}^6$$

Pumpenkenlinie: $\Delta p_p = 2,4\text{bar} - 0,2\text{barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2$

- c₂ ist geschlossen

Widerstand der Zuleitung: $c_z = \frac{1,4\text{barh}^2}{2^2\text{m}^6} = 0,35 \frac{\text{barh}^2}{\text{m}^6}$

Widerstand des Verbrauchers: $c_1 = \frac{0,2\text{barh}^2}{1^2\text{m}^6} = 0,2 \frac{\text{barh}^2}{\text{m}^6}$

Widerstand des Netzes: $c_E = c_z + c_1 = 0,55 \frac{\text{barh}^2}{\text{m}^6}$

Netzkenlinie: $\Delta p_p = 0,55\text{barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2$

Bestimmung des neuen Betriebspunktes durch Gleichsetzen von Pumpen- und Netzkenlinie: $0,55\text{barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2 = 2,4\text{bar} - 0,2\text{barh}^2 / \text{m}^6 \cdot \dot{V}^2$

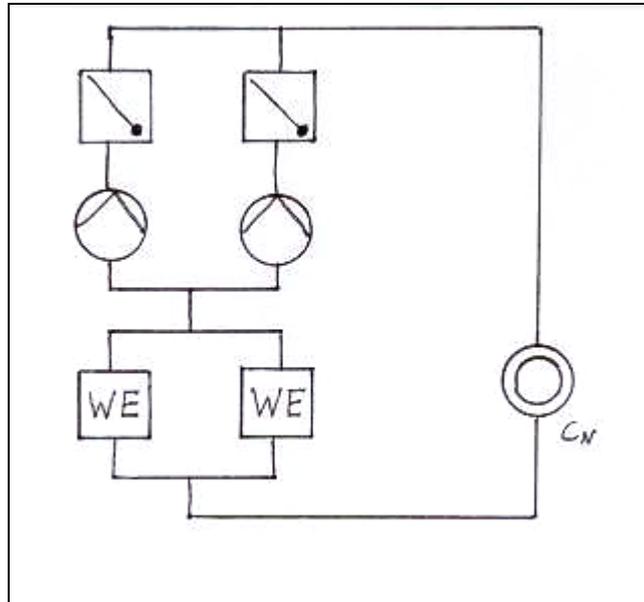
Volumenstrom durch die Pumpe und Verbraucher 1: $\dot{V} = 1,79\text{m}^3 / \text{h}$

- Vergleich

Steigerung des Volumenstromes um ca. 79 % durch den Verbraucher c₁ bei Abschaltung von c₂.

2. Beispiel: Untersuchung des Einflusses des Netzwide- standes auf ein Netz mit zwei Pumpen und zwei Kesseln

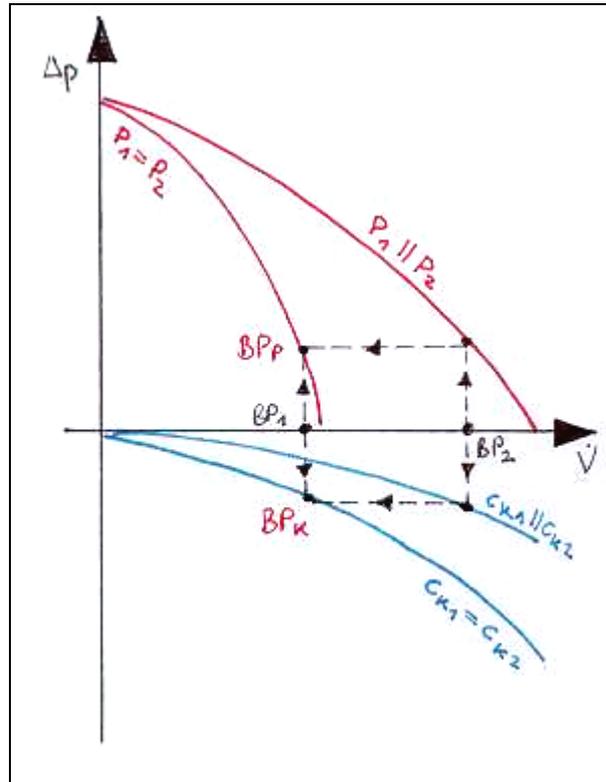
- gegeben ist das folgende System mit 2 Kesseln ($c_{K1}=c_{K2}$) und Pumpen ($P_1=P_2$):



- Gesucht: Wie verhalten sich die Volumenströme durch die Wärmeerzeuger bei verschiedenen Netzwide-
ständen? Es sind jeweils 2 gleiche Pumpen und 2 gleiche Kessel eingebaut. Das System ist so geregelt, dass entweder ein Kessel und eine Pumpe oder zwei Kessel und zwei Pumpen laufen.

a) vernachlässigbarer Netz Widerstand c_N gegenüber den Kesselwiderständen ($c_N=0$)

$\Delta p, \dot{V}$ -Diagramm:

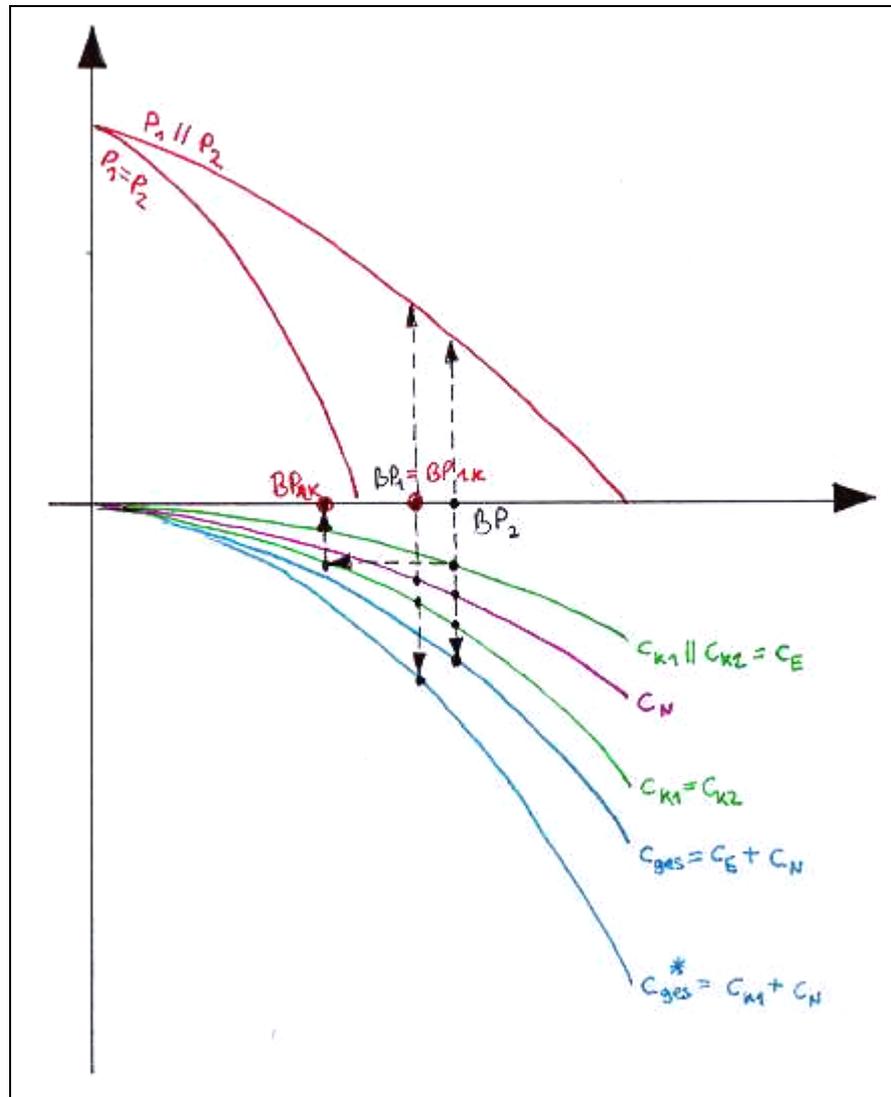


Unabhängig davon, ob ein Kessel und eine Pumpe laufen (BP_1) oder beide Kessel und beide Pumpen (BP_2) ergibt sich für jeden Kessel jeweils derselbe BP_K und für die Pumpen BP_P .

Der Volumenstrom über die Kessel ist konstant bei vernachlässigbar kleinem Netz Widerstand.

b) der Netz Widerstand c_N ist ein endlicher Wert

$\Delta p, \dot{V}$ -Diagramm:

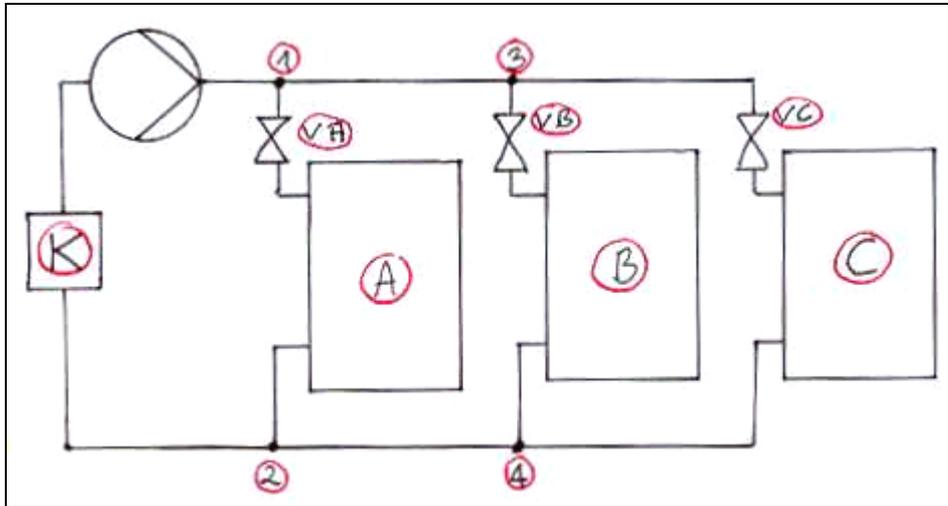


Wenn zwei Kessel und zwei Pumpen laufen (BP_2), dann ist der Volumenstrom durch die Kessel kleiner (BP_{2K}), als wenn nur ein Kessel und eine Pumpe laufen (BP_1, BP_{1K}). Der Unterschied hängt von der Größe des Zuleitungswiderstandes (c_N) im Verhältnis zum Kesselwiderstand ab.

Abhilfe: Einführung eines druckarmen Verteilers bzw. einer hydraulischen Weiche und geringe Zuleitungswiderstände.

3. Beispiel: Verhalten einer Zweirohranlage mit geringem Druckabfall über dem Kessel

- Gegeben ist das folgende System:



- Daten für die Auslegung:

$$\dot{V}_{A,A} = \dot{V}_{B,A} = \dot{V}_{C,A} = 50 \text{ l/h}$$

$$\Delta p_{3-C-A} = 4500 \text{ Pa} \quad \text{davon } \Delta p_{V_C} = 4000 \text{ Pa über dem Ventil}$$

$$\Delta p_{1-3 \& 2-4} = 500 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{2-K-1} = 1000 \text{ Pa}$$

- Fragen:

- Anlagenkennlinie und Pumpenkennlinie für den Auslegungsfall?
- Wie ändert sich die Anlagenkennlinie, wenn A und B weggeschaltet werden?
- Wie ändert sich nach a) \dot{V}_C ?
- Welcher Druckabfall stellt sich nach a) zwischen Punkt 3 und 4 ein?
- Welche Förderhöhen für die Pumpe (Regelpumpe) werden mindestens benötigt für den Fall nach a) bzw. für den Fall, dass B und C weggeschaltet werden?
- Schematische Konstruktion einer Δp_{var} -geregelten Pumpenkennlinie aus den Ergebnissen von a) bis e)
- Welche hydraulischen Leistungen ergeben sich für den Auslegungsfall und die folgenden Teillastfälle: A und B sind geschlossen und die Pumpe ist ungeregelt bzw. A und B sind geschlossen und die Pumpe ist geregelt.

a)

- Pumpendruckerhöhung: $\Delta p_p = \Delta p_{2-K-1} + \Delta p_{1-3\&2-4} + \Delta p_{3-C-4} = 6000\text{Pa}$
- Pumpenvolumenstrom: $\dot{V}_p = \dot{V}_{A,A} + \dot{V}_{B,A} + \dot{V}_{C,A} = 150\text{m}^3/\text{h}$
- Pumpenkennlinie: $\Delta p_p = \Delta p_0 - b \cdot \dot{V}^2$
mit $b=0,133\text{Pa h}^2/\text{l}^2$ für den Auslegungspunkt
und $\Delta p_0 = \Delta p_{BP} \cdot 1,5 = 9000\text{Pa}$
 $\Delta p_p = 9000\text{Pa} - 0,133\text{Pa h}^2/\text{l}^2 \cdot \dot{V}^2$

- Verschaltungstabelle für Auslegungsfall:

Zeichenschritt	1. Element	2. Element	Verschaltung	Ersatzelement
1	3-C-4	3-B-4	P	I
2	I	1-3&2-4	R	II
3	II	1-A-2	P	III
4	III	1-K-2	R	N
5	N	P	P	E

- Rechnerische Verschaltung:

$$c_{3-C-4} = c_{3-B-4} = \frac{4500\text{Pa}}{(50\text{l/h})^2} = 1,8\text{Pa h}^2/\text{l}^2$$

$$c_{1-3\&2-4} = \frac{500\text{Pa}}{(100\text{l/h})^2} = 0,05\text{Pa h}^2/\text{l}^2$$

$$c_I = \frac{1,8 \cdot 1,8}{(\sqrt{1,8} + \sqrt{1,8})^2} \frac{\text{Pa h}^2}{\text{l}^2} = 0,45\text{Pa h}^2/\text{l}^2$$

$$c_{II} = (0,05 + 0,45) \frac{\text{Pa h}^2}{\text{l}^2} = 0,5\text{Pa h}^2/\text{l}^2$$

$$\Delta p_{II} = c_{II} \cdot \dot{V}_{II} = 0,5\text{Pa h}^2/\text{l}^2 \cdot (100\text{l/h})^2 = 5000\text{Pa} = \Delta p_{1-A-2}$$

$$c_{1-A-2} = \frac{5000\text{Pa}}{(50\text{l/h})^2} = 2\text{Pa h}^2/\text{l}^2$$

$$c_{III} = \frac{0,5 \cdot 2}{(\sqrt{0,5} + \sqrt{2})^2} \frac{\text{Pa h}^2}{\text{l}^2} = 0,222\text{Pa h}^2/\text{l}^2$$

$$c_{2-K-1} = \frac{1000\text{Pa}}{(150\text{l/h})^2} = 0,044\text{Pa h}^2/\text{l}^2$$

$$c_N = (0,222 + 0,044) \frac{\text{Pa h}^2}{\text{l}^2} = 0,266\text{Pa h}^2/\text{l}^2$$

- Netzkennlinie: $\Delta p_N = 0,266\text{Pa h}^2/\text{l}^2 \cdot \dot{V}^2$

b)

- neuer Netzwidestand:

$$C_{\text{neu}} = C_{2-K-1} + C_{1-3\&2-4} + C_{3-C-4} = 1,894\text{Pa}h^2 / l^2$$

- neue Netzkennlinie:

$$\Delta p_{N,\text{neu}} = 1,894\text{Pa}h^2 / l^2 \cdot \dot{V}^2$$

Die neue Netzkennlinie ist steiler.

c)

- alter Volumenstrom durch HK C: 50l/h

- Gleichsetzung Pumpenkennlinie und neue Netzkennlinie:

$$9000\text{Pa} - 0,133\text{Pa}h^2 / l^2 \cdot \dot{V}^2 = 1,894\text{Pa}h^2 / l^2 \cdot \dot{V}^2$$

- neuer Volumenstrom durch HK C: $\dot{V}_k = 66,6\text{l/h}$
Erhöhung um ca. 1/3.

d)

- Druckabfall über 3-C-4: $\Delta p_{3-C-4} = c_{3-C-4} \cdot \dot{V}_{3-C-4}^2 = 1,8\text{Pa}h^2 / l^2 \cdot (66,6\text{l/h})^2 = 7984\text{Pa}$

e)

- Mindestförderhöhe für A und B abgeschaltet und 50 l/h durch C (Einsatz einer geregelten Pumpe):

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{min}} &= \Delta p_{2-K-1,\text{neu}} + \Delta p_{1-3\&2-4,\text{neu}} + \Delta p_{3-C-4,\text{neu}} \\ &= \left(\frac{50}{150}\right)^2 \cdot \Delta p_{2-K-1} + \left(\frac{50}{100}\right)^2 \cdot \Delta p_{1-3\&2-4} + \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot \Delta p_{3-C-4} \\ &= \frac{1}{9} \cdot 1000\text{Pa} + \frac{1}{4} \cdot 500\text{Pa} + \frac{1}{1} \cdot 4500\text{Pa} \\ &= 4736\text{Pa}\end{aligned}$$

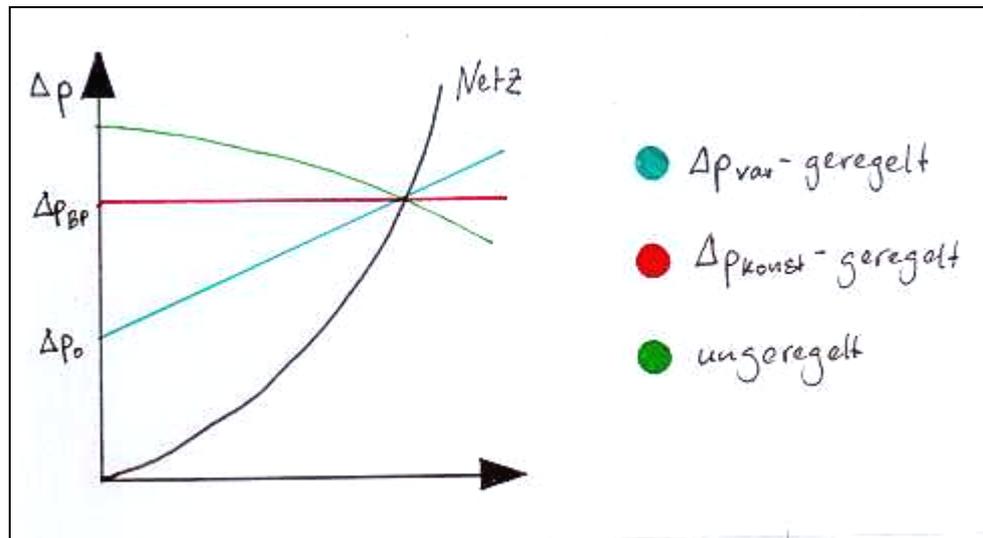
- Mindestförderhöhe für C und B abgeschaltet und 50 l/h durch A (Einsatz einer geregelten Pumpe):

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{min}} &= \Delta p_{1-A-2,\text{neu}} + \Delta p_{1-K-2,\text{neu}} \\ &= \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot 5000\text{Pa} + \left(\frac{50}{150}\right)^2 \cdot 1000\text{Pa} \\ &= 5111\text{Pa}\end{aligned}$$

- Fazit: nicht der Fall, dass C (am weitesten entfernt von der Pumpe) geschlossen ist, bestimmt die Mindestförderhöhe für den Teillastfall, sondern der Fall, daß A geschlossen ist (pumpennahster HK)!

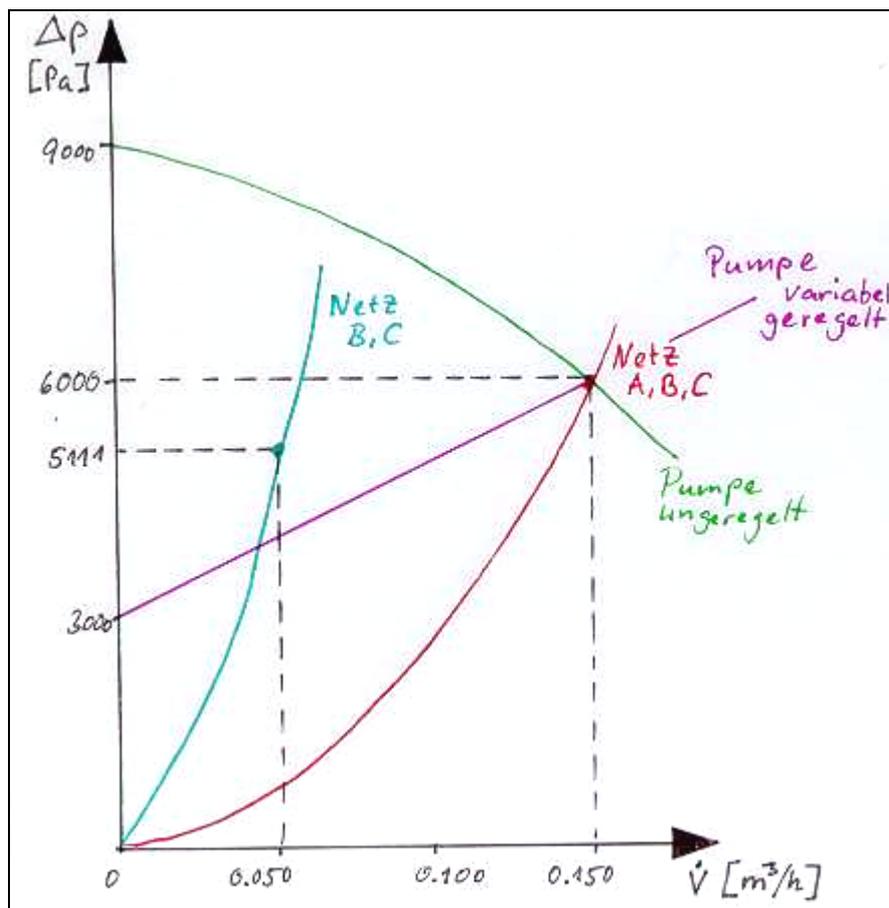
f)

- Allgemeine Übersicht zu Pumpenregelstrategien:



Δp_0 ist bei der variablen geregelten Pumpe meist auf $\frac{1}{2} \Delta p_{BP}$ eingestellt.

- schematische Konstruktion der Δp_{var} -geregelten Pumpenkennlinie:



Die übliche variabel geregelte Pumpe, wie sie oben beschrieben wurde, reicht in diesem Fall für den Teillastbetrieb nicht aus!

- Bei Einsatz von Regelpumpen (mit Δp_{var} -Einstellung) ist zu untersuchen, ob der erforderliche Differenzdruck für den Verbraucher zur Verfügung steht, welcher der Pumpe am nächsten liegt.

g)

- Volllast:

$$P_{\text{Hyd}} = \dot{V}_p \cdot \Delta p_p = 150 \text{ l/h} \cdot 6000 \text{ Pa} = 0,25 \text{ W}$$

- A/B geschlossen, Pumpe ungeregelt:

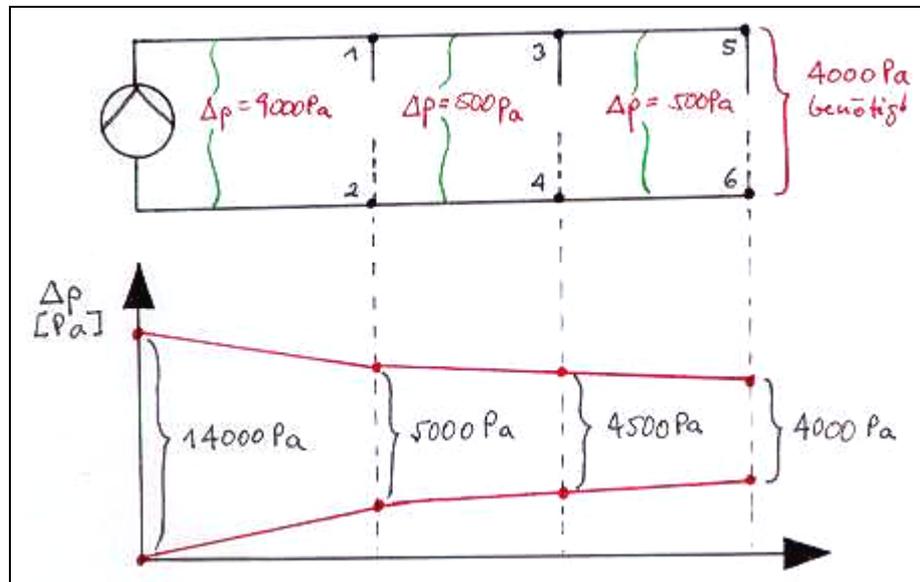
$$P_{\text{Hyd}} = \dot{V}_p \cdot \Delta p_p = 66 \text{ l/h} \cdot \approx 9000 \text{ Pa} = 0,17 \text{ W}$$

- A/B geschlossen, Pumpe geregelt:

$$P_{\text{Hyd}} = \dot{V}_p \cdot \Delta p_p = 50 \text{ l/h} \cdot 4736 \text{ Pa} = 0,07 \text{ W}$$

4. Beispiel: Verhalten einer Zweirohranlage mit hohem Druckabfall über dem Kessel

- gegeben ist das folgende System mit eingetragenen Druckverlusten:



- folgende Daten gelten für den Auslegungsfall:

$$\Delta p_p = 14000 \text{ Pa} \quad \dot{V}_p = 150 \text{ l/h}$$

$$\Delta p_{1-2} = 9000 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{1-3\&2-4} = \Delta p_{3-5\&4-6} = 500 \text{ Pa}$$

$$\text{benötigte Druckdifferenz am Verbraucher: } \Delta p_{\text{Verbraucher}} \geq 4000 \text{ Pa}$$

- Frage: Welche Pumpendruckhöhung wird für den Fall gebraucht, dass nur Verbraucher 5-6 in Betrieb ist? Welche, wenn nur 1-2 in Betrieb ist? Kann eine variabel geregelte Pumpe mit $\Delta p_0 = 0,5 \cdot \Delta p_{\text{BP,A}}$ eingesetzt werden?

- Teillastfall 1: nur 5-6 am Netz

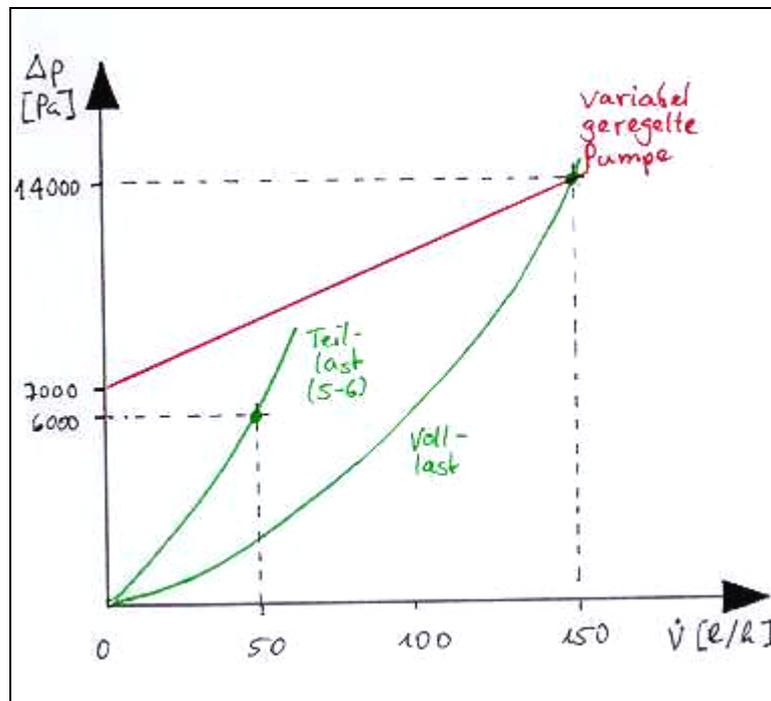
$$\Delta p_p = \left(\frac{50}{150}\right)^2 \cdot 9000 \text{ Pa} + \left(\frac{50}{100}\right)^2 \cdot 500 \text{ Pa} + \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot 500 \text{ Pa} + 4000 \text{ Pa} = 6250 \text{ Pa}$$

- Teillastfall 2: nur 1-2 am Netz

$$\Delta p_p = \left(\frac{50}{150}\right)^2 \cdot 9000 \text{ Pa} + \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot 5000 \text{ Pa} = 6000 \text{ Pa}$$

Der ungünstigste Teillastfall liegt hier vor, wenn nur Verbraucher 5-6 am Netz hängt.

- Kennlinie der variabel geregelten Pumpe:
 $\Delta p_{p,A} = 14000\text{Pa}$
 $\Delta p_0 = 0,5 \cdot 14000\text{Pa} = 7000\text{Pa}$



- Pumpendruckhöhung bei einem benötigten Volumenstrom von 50l/h:

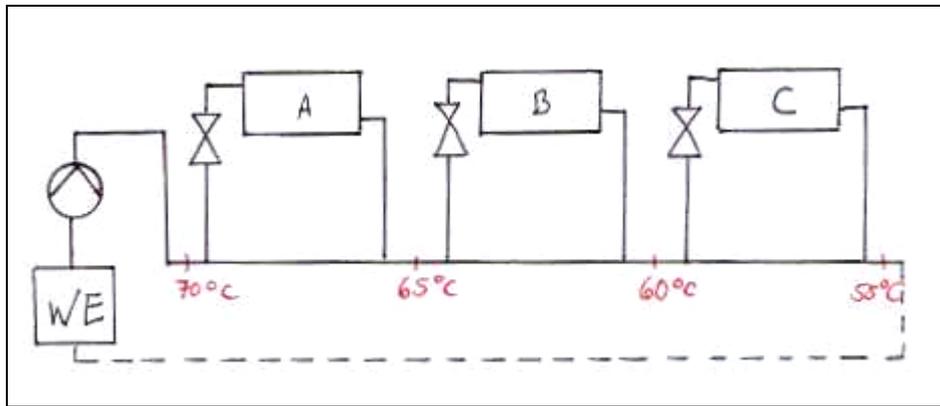
$$\Delta p_{p,\text{teil}} = \Delta p_0 + \frac{50}{150} \cdot (\Delta p_{p,\text{voll}} - \Delta p_0) = 7000\text{Pa} + \frac{50}{150} \cdot (14000 - 7000)\text{Pa}$$

$$= 9333\text{Pa}$$

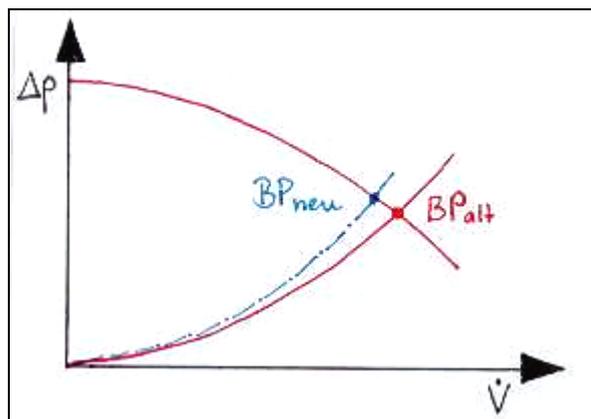
Die Pumpendruckhöhung von 9333 Pa reicht für den Teillastbetrieb aus, die variabel geregelte Pumpe kann eingesetzt werden.

5. Beispiel: Einrohrheizung mit Nebenschluss

- Frage: Was passiert bei Abschalten von HK aus dem System mit den Volumenströmen in den anderen HK?
- Anlagenschema:



- $\Delta p, \dot{V}$ -Diagramm:



- der Hauptwiderstand liegt im Heizkörper mit Ventil; das Bypassrohr selbst hat kaum Widerstand; das heißt die Parallelschaltung aus beiden hat sehr geringen Widerstand (geringer als die geringste Einzelkomponente = Bypass)
- wenn aus der Parallelschaltung der HK durch Abschalten herausgenommen wird, wird die Anlagenkennlinie nur sehr geringfügig steiler; BP bleibt fast erhalten
- Einsatz von einer Regelpumpe ist nicht sinnvoll und erforderlich

Quelle: Skript zur Vorlesung "Neue Heiz- und Energietechnologien" an der Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel; erarbeitet von Prof. Dr.-Ing. D. Wolff und erstellt von Dipl.-Ing. (FH) K. Jagnow; Wolfenbüttel; 2000