

Grundlagen der Hydraulik



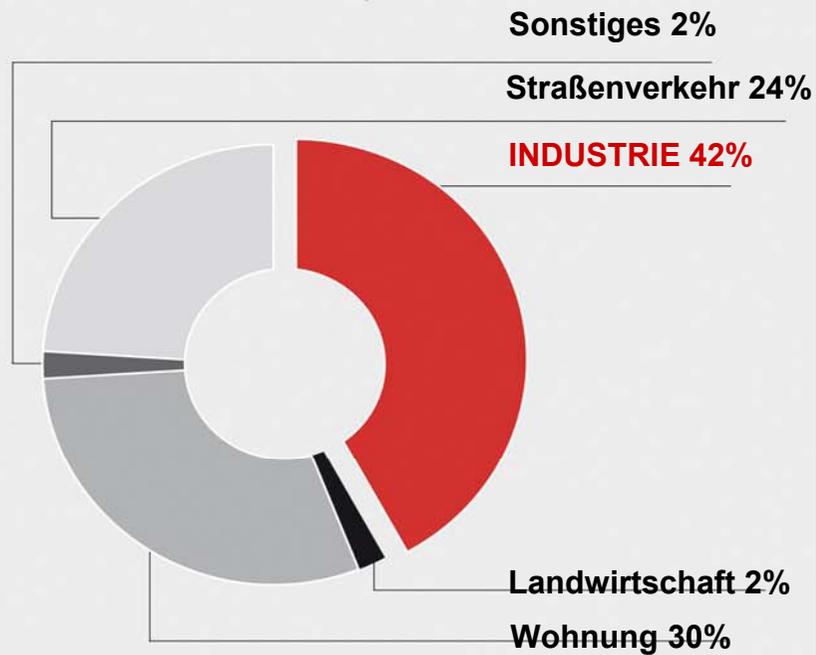
Dipl.- Ing. Christoph Brandt
KLIMAhaus Klima- und Gebäudetechnik GmbH



Bedeutung des Themas Hydraulik

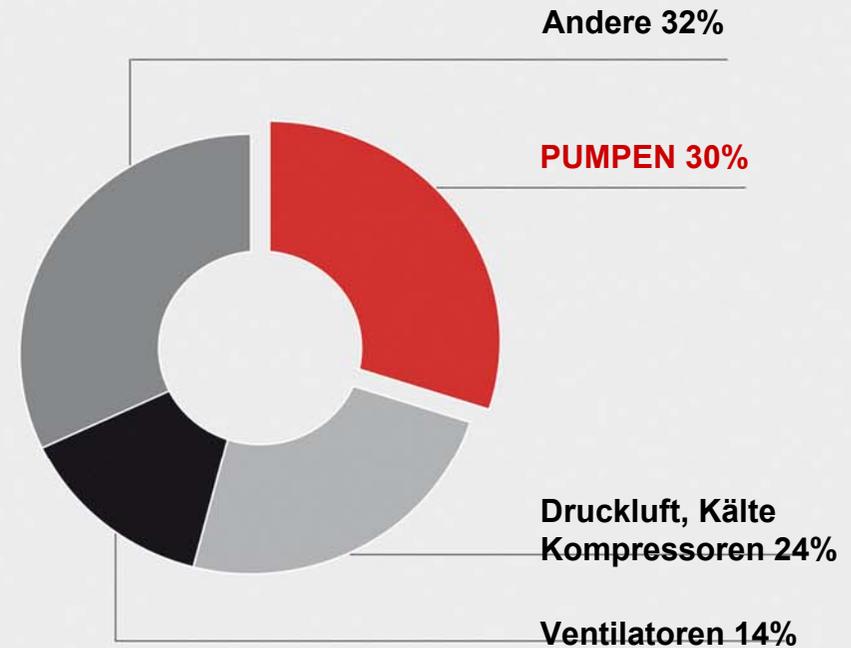
Energieeffizienz das zentrale Thema des 21. Jahrhunderts

Stromverbrauch in der EU



Bildnachweis: KSB

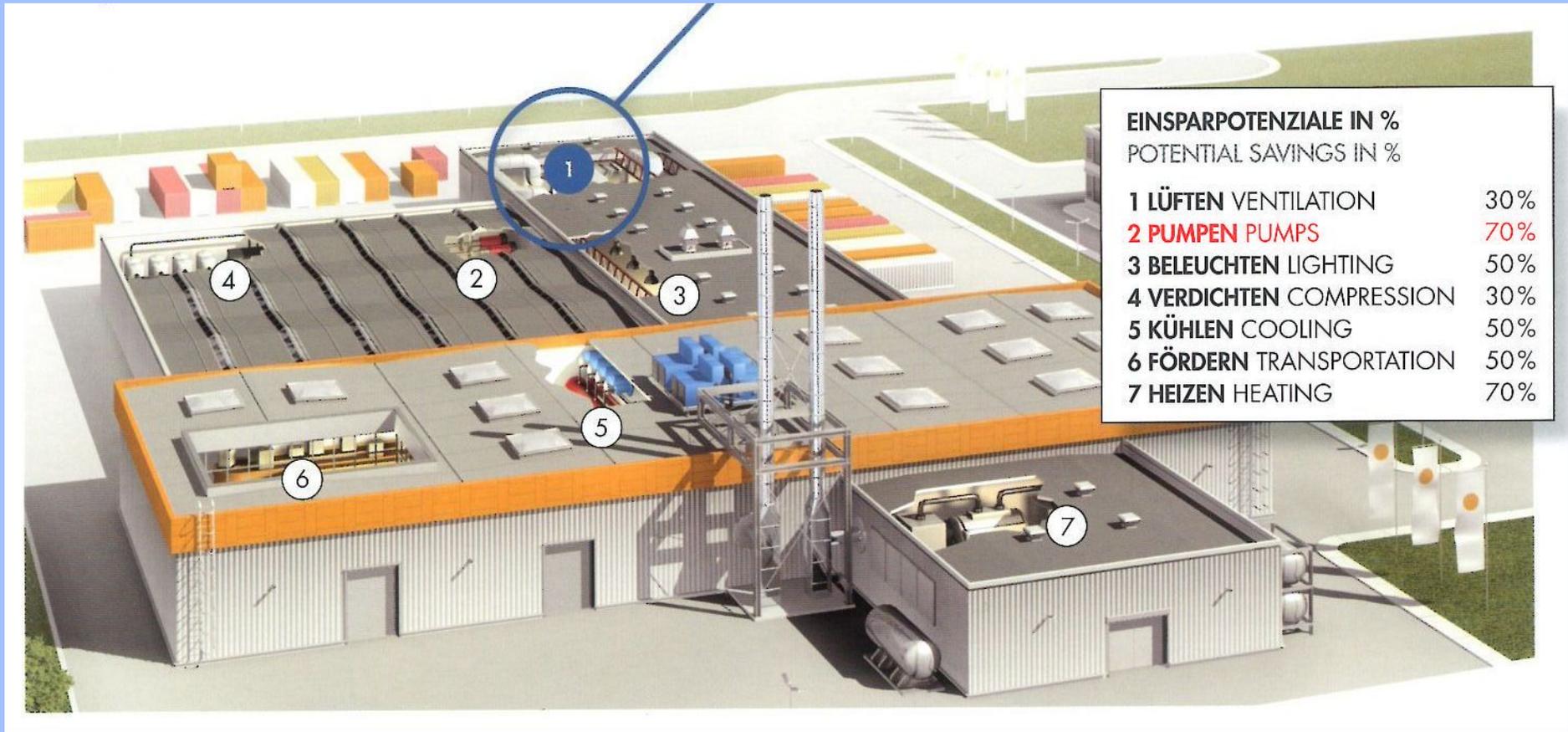
Stromverbrauch in der Industrie



Stromverbrauch

Die Industrie verbraucht mit Abstand am meisten elektrische Energie. Innerhalb der Industrie sind die Pumpen die größten Energieverbraucher.

Bedeutung des Themas Hydraulik



Bildnachweis: Imtech

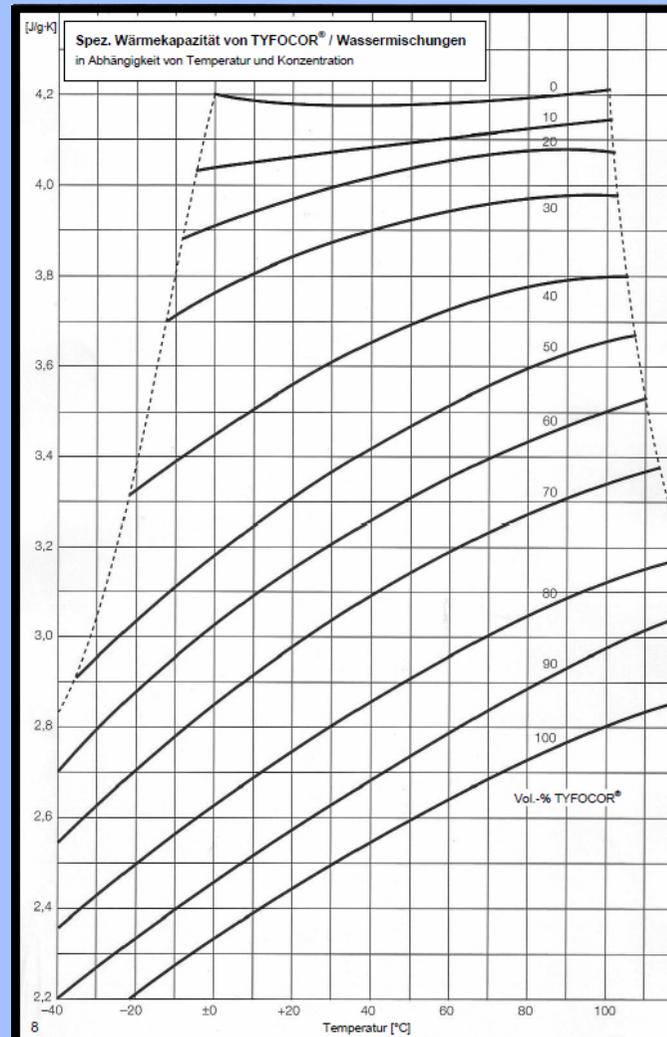
Grundlagen zur Hydraulik - Energietransport

Größe:	Formeln zum Energietransport		
	Formelzeichen	Einheit	Berechnungsformel
Wärmeleistung	\dot{Q}	W	$\dot{Q} = \dot{m} \times c \times \Delta \vartheta$
Massenstrom	\dot{m}	kg/s	$\dot{m} = \dot{V} \times \rho = A \times v \times \rho$
Spez. Wärmekapazität	C	$J/(kg \times K)$	Wasser 20 °C; 4.190 J/(kg x K); Ethylenglykol 40/60%; 20 °C; 3.560 J/(kg x K)
Fließgeschwindigkeit	v	m/s	$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{m}}{\rho \times A} = \frac{4 \times \dot{m}}{\rho \times d_i^2 \times \pi}$
Volumenstrom	\dot{V}	m^3/h	$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = A \times v$
Rohrquerschnitt	A	m^2	$A = \frac{\pi}{4} \times d_i^2$



Grundlagen zur Hydraulik - Energietransport

Spez. Wärmekapazität von Wasser- / Ethylenglykollgemischen:



Bildnachweis: Tyfo



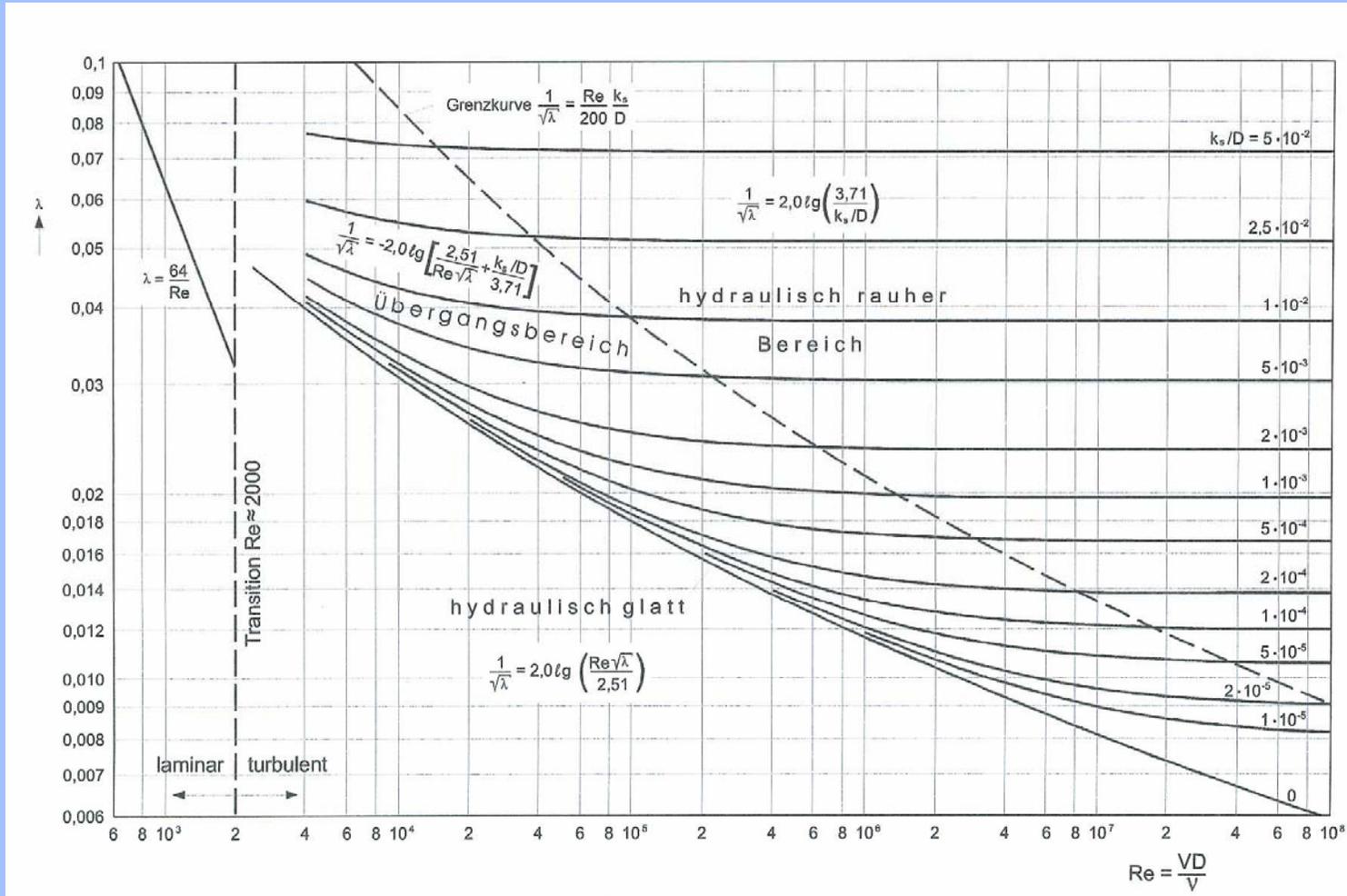
Grundlagen zur Hydraulik – Rohrnetz (geschl. System)

Größe:	Formeln zur Rohrnetzberechnung		
	Formelzeichen	Einheit	Berechnungsformel
Rohrreibung (inkompressible Medien)	Δ_{pR}	$N / m^2 = Pa$	$\Delta_{pR} = \lambda \times \frac{l}{d_i} \times \frac{\rho}{2} \times v^2 = R$
Rohrreibungszahl (laminare Strömung)	λ	-	$\lambda = \frac{64}{Re}$ (laminare Strömung bei Rohrströmung praktisch nicht relevant)
Reynolds-Zahl Re $\leq 2.320 \rightarrow$ laminar $\geq 2.320 \rightarrow$ turbulent	Re	-	$Re = \frac{v \times d_i}{\nu}$
kinematische Viskosität	ν	m^2 / s	Tabellenwert, z.B. Wasser 20° C : $1,006 \times 10^{-6}$
Rohrreibungszahl (turbulente Strömung)	λ	-	$\lambda = f (Re, d/k)$ div. Berechnungsansätze, besser: Colebrook-Diagramm
Rohrreibung (vereinfachte Ermittlung)	Δ_{pR}	Pa	$\Delta_{pR} = R \times l$



Grundlagen zur Hydraulik – Rohrnetz

Moody-Colebrook-Diagramm



Moody-Diagramm: Reibungsbeiwerte für Rohrleitungsströmungen als Funktion der Reynoldszahl Re und relativen Rauheit k_s/D



Grundlagen zur Hydraulik – Rohrnetz

Nahtloses Stahlrohr nach DIN 2448 ($k = 0,045 \text{ mm}$, $t = 60 \text{ °C}$)

DN	40		50		65		80		100		125		150	
d_i (mm)	43,1		51,2		70,3		82,5		100,8		125		150	
R (Pa/m)	kg/h	m/s	kg/h	m/s	kg/h	m/s	kg/h	m/s	kg/h	m/s	kg/h	m/s	kg/h	m/s
5	604	0,12	965	0,13	2273	0,17	3497	0,18	5987	0,21	10650	0,25	17327	0,28
10	891	0,17	1420	0,19	3332	0,24	5118	0,27	8745	0,31	15522	0,36	25210	0,40
15	1117	0,22	1776	0,24	4160	0,30	6382	0,34	10892	0,39	19312	0,44	31335	0,50
20	1309	0,25	2080	0,29	4864	0,35	7458	0,39	12718	0,45	22530	0,52	36534	0,58
25	1479	0,29	2349	0,32	5489	0,40	8411	0,44	14335	0,51	25379	0,58	41133	0,66
30	1634	0,32	2595	0,36	6056	0,44	9277	0,49	15803	0,56	27964	0,64	45305	0,72
35	1778	0,34	2821	0,39	6580	0,48	10076	0,53	17157	0,61	30347	0,70	49150	0,79
40	1912	0,37	3032	0,42	7069	0,51	10821	0,57	18420	0,65	32570	0,75	52736	0,84
45	2038	0,39	3232	0,44	7529	0,55	11523	0,61	19609	0,69	34661	0,80	56108	0,90
50	2158	0,42	3420	0,47	7965	0,58	12188	0,64	20735	0,73	36642	0,84	59302	0,95
55	2272	0,44	3600	0,49	8381	0,61	12821	0,68	21807	0,77	38528	0,89	62343	1,00
60	2381	0,46	3773	0,52	8778	0,64	13427	0,71	22833	0,81	40333	0,93	65252	1,04
65	2486	0,48	3938	0,54	9160	0,67	14009	0,74	23818	0,84	42064	0,97	68044	1,09
70	2587	0,50	4098	0,56	9528	0,69	14570	0,77	24767	0,88	43732	1,01	70732	1,13
75	2685	0,52	4252	0,58	9884	0,72	15111	0,80	25683	0,91	45343	1,04	73327	1,17
80	2779	0,54	4401	0,60	10228	0,74	15635	0,83	26570	0,94	46901	1,08	75839	1,21
85	2871	0,56	4546	0,62	10561	0,77	16143	0,85	27430	0,97	48413	1,11	78274	1,25
90	2961	0,57	4686	0,64	10886	0,79	16637	0,88	28265	1,00	49881	1,15	80640	1,29
95	3047	0,59	4823	0,66	11201	0,82	17118	0,90	29078	1,03	51310	1,18	82942	1,33
100	3132	0,61	4957	0,68	11509	0,84	17586	0,93	29871	1,06	52702	1,21	85185	1,36
105	3215	0,62	5087	0,70	11809	0,86	18043	0,95	30644	1,08	54061	1,24	87374	1,40
110	3296	0,64	5214	0,72	12102	0,88	18490	0,98	31399	1,11	55387	1,28	89511	1,43
115	3375	0,65	5339	0,73	12389	0,90	18926	1,00	32138	1,14	56685	1,31	91602	1,46
120	3452	0,67	5461	0,75	12670	0,92	19354	1,02	32861	1,16	57955	1,33	93647	1,50
125	3528	0,68	5580	0,77	12945	0,94	19773	1,05	33569	1,19	59199	1,36	95651	1,53
130	3602	0,70	5697	0,78	13215	0,96	20184	1,07	34263	1,21	60419	1,39	97616	1,56
135	3675	0,71	5812	0,80	13480	0,98	20587	1,09	34945	1,24	61616	1,42	99544	1,59
140	3747	0,73	5925	0,81	13740	1,00	20982	1,11	35614	1,26	62791	1,45	101437	1,62
145	3818	0,74	6036	0,83	13995	1,02	21371	1,13	36271	1,28	63946	1,47	103297	1,65
150	3887	0,75	6145	0,84	14246	1,04	21754	1,15	36918	1,31	65081	1,50	105125	1,68
155	3955	0,77	6253	0,86	14493	1,05	22130	1,17	37554	1,33	66198	1,52	106923	1,71
160	4022	0,78	6358	0,87	14737	1,07	22500	1,19	38180	1,35	67297	1,55	108693	1,74
165	4088	0,79	6462	0,89	14976	1,09	22864	1,21	38796	1,37	68379	1,57	110436	1,77
170	4153	0,80	6565	0,90	15212	1,11	23224	1,23	39403	1,40	69445	1,60	112153	1,79
175	4218	0,82	6666	0,91	15445	1,12	23578	1,25	40001	1,42	70496	1,62	113845	1,82
180	4281	0,83	6766	0,93	15674	1,14	23927	1,26	40591	1,44	71532	1,65	115513	1,85
185	4343	0,84	6864	0,94	15901	1,16	24271	1,28	41173	1,46	72554	1,67	117158	1,87
190	4405	0,85	6961	0,96	16124	1,17	24611	1,30	41748	1,48	73562	1,69	118782	1,90
195	4466	0,86	7057	0,97	16344	1,19	24946	1,32	42314	1,50	74557	1,72	120384	1,92
200	4526	0,88	7152	0,98	16562	1,21	25277	1,34	42874	1,52	75540	1,74	121966	1,95
210	4644	0,90	7337	1,01	16989	1,24	25928	1,37	43973	1,56	77469	1,78	125073	2,00
220	4760	0,92	7519	1,03	17407	1,27	26563	1,40	45047	1,59	79354	1,83	128107	2,05
230	4872	0,94	7696	1,06	17815	1,30	27184	1,44	46096	1,63	81196	1,87	131073	2,10
240	4983	0,96	7870	1,08	18215	1,33	27792	1,47	47123	1,67	82999	1,91	133976	2,14
250	5091	0,99	8040	1,10	18606	1,35	28387	1,50	48130	1,70	84766	1,95	136820	2,19
260	5197	1,01	8207	1,13	18990	1,38	28971	1,53	49116	1,74	86498	1,99	139608	2,23
270	5301	1,03	8371	1,15	19366	1,41	29544	1,56	50084	1,77	88197	2,03	142343	2,28
280	5403	1,05	8532	1,17	19736	1,44	30106	1,59	51034	1,81	89865	2,07	145028	2,32
290	5504	1,07	8690	1,19	20100	1,46	30659	1,62	51968	1,84	91503	2,11	147666	2,36
300	5603	1,08	8845	1,21	20457	1,49	31202	1,65	52886	1,87	93114	2,14	150259	2,40

Rohrreibungstabelle (Beispiel)



Grundlagen zur Hydraulik - Rohrnetz

Größe:	Formeln zur Rohrnetzberechnung		
	Formelzeichen	Einheit	Berechnungsformel
Druckverlust durch Einzelwiderstände	Z	Pa	$Z = \sum \zeta \times \frac{\rho}{2} \times v^2$
Einzelwiderstände	$\sum \zeta$	-	Addition aller Einzelwiderstände je TS
Druckverlust geamt	$\Delta_{p_{ges}}$	Pa	$\Delta_{p_{ges}} = \Delta_{p_R} + Z$
Druckverlust über kvs-Wert (Ventile)	Δ_{pv}	kPa	bei bekanntem kvs-Wert $\Delta_{pv} = \left[\frac{Q [m^3/h]}{kvs} \right]^2 \times 100$
Druckverlust aus geodätischer Höhe	$\Delta_{p_{geo}}$	Pa, m	$\Delta_{p_{geo}} = \rho \times h_{geo} \times g$ (bei geschlossenen Systemen nicht relevant)



Grundlagen zur Hydraulik - Rohrnetz

Druckverluste durch Einzelwiderstände

Tafel 1.4.8-1 Widerstandsbeiwerte ζ_w von Rohrleitungsteilen¹⁾
Weitere Werte in Abschn. 2.2.2 s. S. 675 und 3.3.5 s. S. 1409

Teil	Darstellung	Widerstandsbeiwert ζ_w	Druckverlust Δp in N/m ²
Bogen 90° glatt $r/d = 0,5$ 1,0 2,0 3,0		1,0	$\Delta p = \zeta_w \cdot \frac{\rho}{2} w^2$
		0,35	
		0,20	
		0,15	
Knie $\beta = 90^\circ$ 60° 45°		1,3	$\Delta p = \zeta_w \frac{\rho}{2} w^2$
		0,8	
		0,4	
Erweiterung, rund stetig $\beta = 10^\circ$ (in einem 20° langen 30° Rohr) 40°		$A_1/A_2 = 0,5$ 0,25	$\Delta p = \zeta_1 \frac{\rho}{2} w_1^2$
		$\zeta_1^2 = 0,12$ 0,24	
		0,17 0,37	
		0,21 0,46	
		0,27 0,60	
plötzlich (Borda-Carnot)		$\zeta_1 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$	$\Delta p = \zeta_1 \frac{\rho}{2} w_1^2$
		$\zeta_1 = 1,0$	$\Delta p = \frac{\rho}{2} w_1^2$
Verengung, stetig $\beta = 20 \dots 90^\circ$		$A_2/A_1 = 0,2$ $\zeta_2 = 0,08$	$\Delta p = \zeta_2 \frac{\rho}{2} w_2^2$
		0,4 0,08	
		0,6 0,06	
		0,8 0,02	
plötzlich		$\zeta_2 = \frac{1}{\alpha} (1 - \alpha)^2$ $(1 - A_2/A_1)$	$\Delta p = \zeta_2 \frac{\rho}{2} w_2^2$
		Kante: scharf ²⁾ $\alpha = 0,59$ gebrochen $\alpha = 0,75$ gerundet $\alpha = 0,90$ düsenförmig $\alpha = 0,99$	
Einströmung		$\zeta_2 = (1/\alpha - 1)^2$	
Blende, scharfkantig		$\zeta = \left(\frac{A}{\alpha A_0} - 1\right)^2$	$\Delta p = \zeta \frac{\rho}{2} w^2$
		$\zeta_2 = \left(\frac{A_2}{\alpha A_0} - 1\right)^2$	$\Delta p = \zeta_2 \frac{\rho}{2} w_2^2$
Abzweigung, scharfkantig $w_2/w_1 = 0,5$ 1,0 2,0 3,0		$\beta = 90^\circ$ 60° 45°	$\Delta p = \zeta_2 \cdot \frac{\rho}{2} w_2^2$
		4,5 3,1 2,0	
		1,5 0,77 0,43	
		0,74 0,47 0,45	
		0,62 0,58 0,54	
Querschnitt $a/b = 0,10$ 0,25 0,50		■	$\Delta p = \zeta \frac{\rho}{2} w^2$
		○	
		0,7 0,2 0,07	
		1,4 0,55 0,23	
4,0 2,0 0,9			

¹⁾ Rietschel-Raiss 1970. - Eck: Technische Strömungslehre Bd.1. 1978. Bd.2. 1981. - Richter, H.: Rohrhydraulik 1962. - Stradmann: Stahlrohr-Handbuch 1982. - Idel'chik-Handbuch 1966. - Gersten, K.: Einführung in die Strömungsmechanik 1974. - Kalide, W.: Techn. Strömungslehre 1976 u. FLT-Handbuch 1988.
²⁾ einschl. Rohrreibung ($\lambda = 0,02$); turbulentes Zustromprofil.
³⁾ Glück, B.: Druckverluste, VEB-Verlag, Berlin 1988.

Tafel 1.4.8-2 Widerstandsbeiwerte ζ_w von Armaturen

Teil	Bild	ζ_w -Wert bei DN			
		25	50	100	200 mm
Kugelhahn		0	0	0	0
Absperrklappe		-	0,8 1,5	0,27 0,4	0,15 0,3
Absperrventile Normalventil		5,9	3,7	4,9	5,5
mit Faltenbalg und Standardkegel Durchgang Eckventil		5,7	4,9	5,5	5,8
		4,5	4,5	4,5	6,0
mit Faltenbalg und Drosselkegel Durchgang Eckventil		13	11	19	12
		12	10	18	11
Schieber ohne Leitrohr mit Leitrohr			0,2 0,1	0,30 0,15	
Rückschlagklappe Gummi Metall - 1 Flügel Metall - 2 Flügel		-	7,0	5,5	3,2
		-	3,2	3,2	3,1
		-	-	1,5	1,3
Rückschlagventil waagrecht senkrecht		10,5	10,3	8,0	5,0
		3,7	3,4	-	-
Hahn		1,0	-	-	-
Lyrabogen glatt gefaltet		-	0,75	0,75	0,75
		-	1,5	1,5	1,5
Wellrohrausgleicher je Welle		-	0,2	0,2	0,2
Wasserabscheider Eintritt normal Eintritt tangential		-	3,0	3,0	3,0
		-	5...8	5...8	5...8



Grundlagen zur Hydraulik – Rohrnetz (geschlossen)

Entgegen des SI-Einheitenystems werden für Rohrnetz- und Pumpenauslegung abweichende Formelzeichen verwendet:

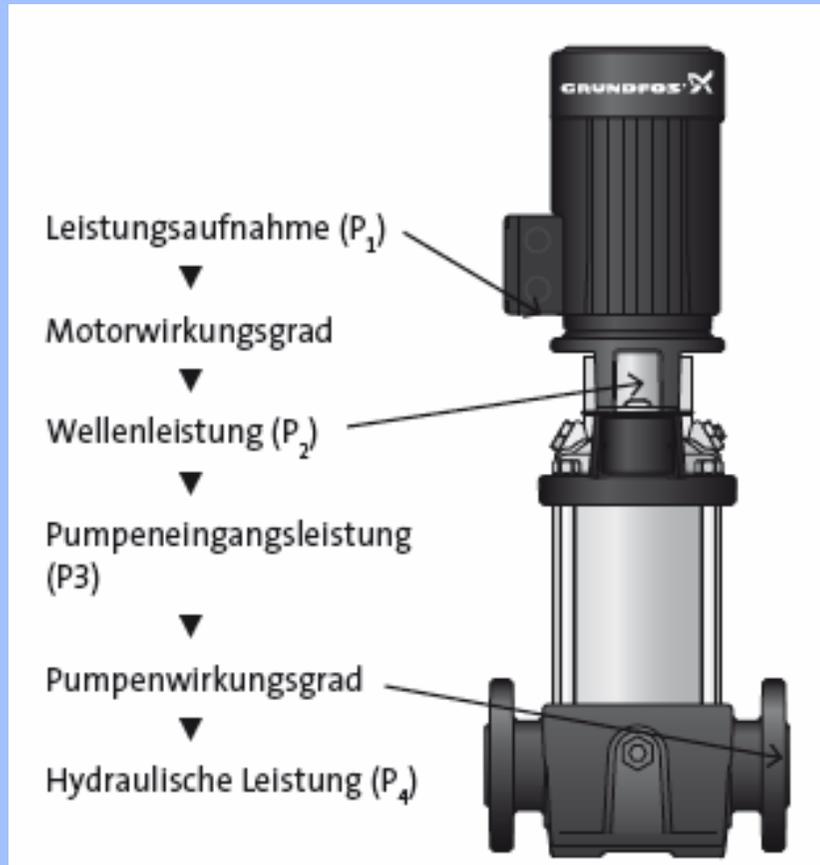
$$Q = \text{Förderstrom in } \left[\frac{l}{h}; \frac{l}{s}; \frac{m^3}{s}; \frac{m^3}{h} \dots \right]$$

$$H = \text{Förderhöhe in } [m]$$



Grundlagen zur Hydraulik – Pumpen

Wirkungsgrad

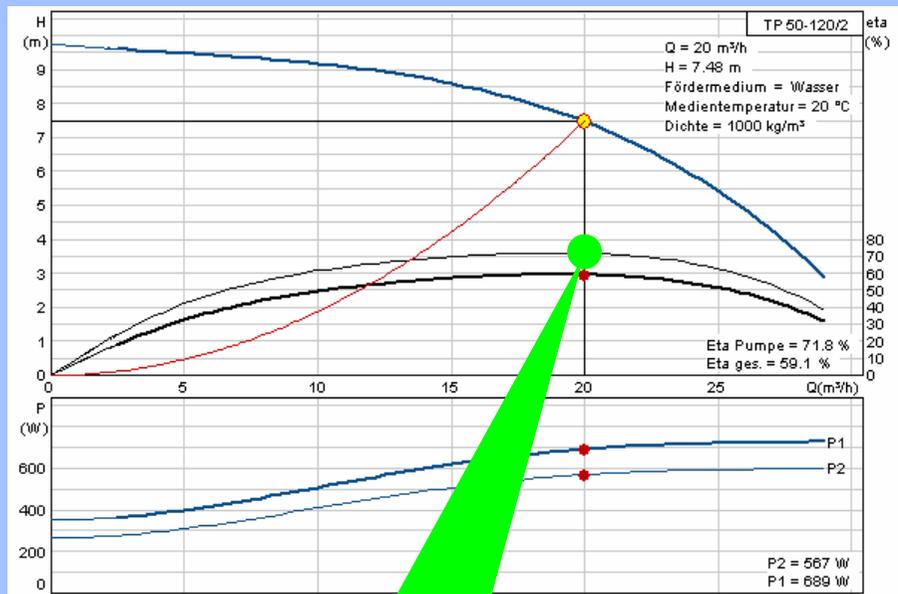


$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

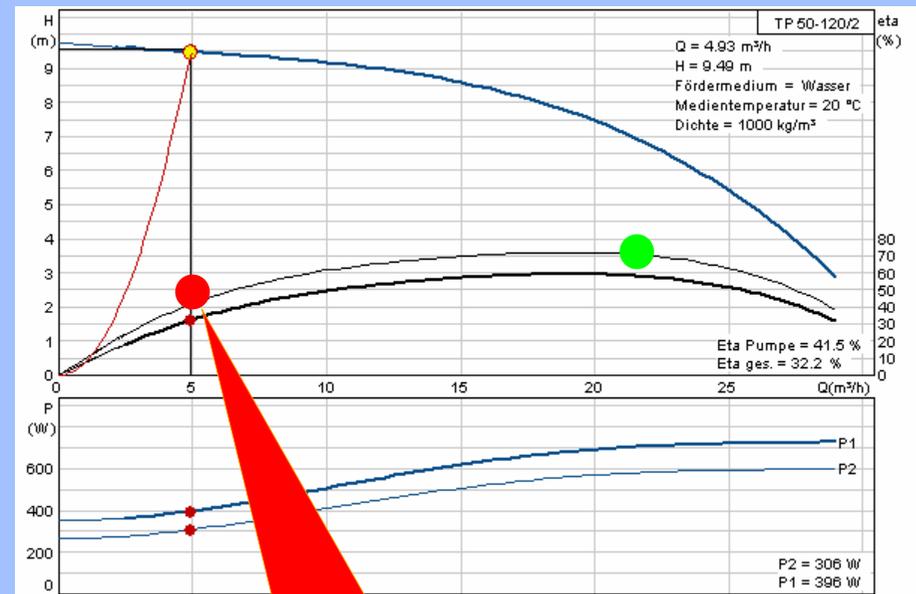
Grundlagen zur Hydraulik – Pumpen

Wirkungsgrad – Kennfeld

Betrieb der Pumpe möglichst „in der Nähe“ des Wirkungsgrad-Bestpunktes !



Pumpen-Wirkungsgrad
am Wirkungsgrad-
Bestpunkt:
71,8 %



Pumpenwirkungsgrad am
Betriebspunkt
41,5 %

Grundlagen zur Hydraulik – Energetische Optimierung

Für die Anlagenkennlinie gilt:

Förderstrom

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

80% Drehzahl heißt 80% Förderstrom,
50% Drehzahl heißt 50% Förderstrom.

Förderhöhe

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2$$

64% Förderhöhe,
25% Förderhöhe.

Leistungsaufnahme

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^3$$

und nur 51 % Leistungsaufnahme,
bzw. 12,5% Leistungsaufnahme.

⇒ Nutzung der Einsparpotentiale setzt variable Fördermengen voraus!

Affinitätsgesetze aus der Ähnlichkeitsmechanik:

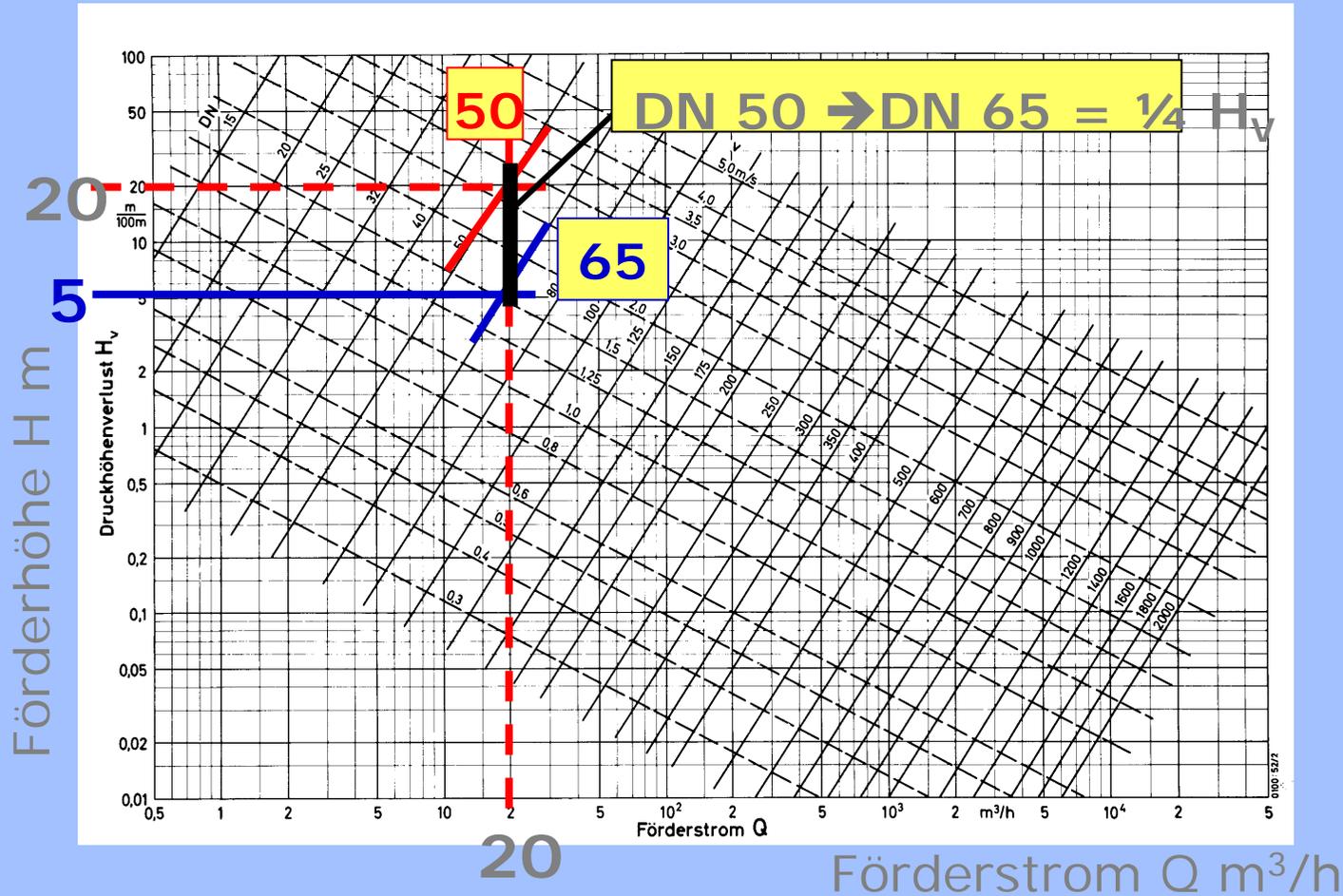
🏠 Lineare Zunahme/Abnahme des Förderstroms bei linear ansteigender/fallender Drehzahl

🏠 Quadratische Zunahme/Abnahme der Förderhöhe bei linear ansteigender/fallender Drehzahl

🏠 Kubische Zunahme/Abnahme der Leistungsaufnahme bei linear ansteigender/fallender Drehzahl

Grundlagen zur Hydraulik – Energetische Optimierung

$$H \sim c^2 ; c = \frac{Q}{A} ; A = \frac{d^2 \times \pi}{4} \Rightarrow H \sim d^4$$



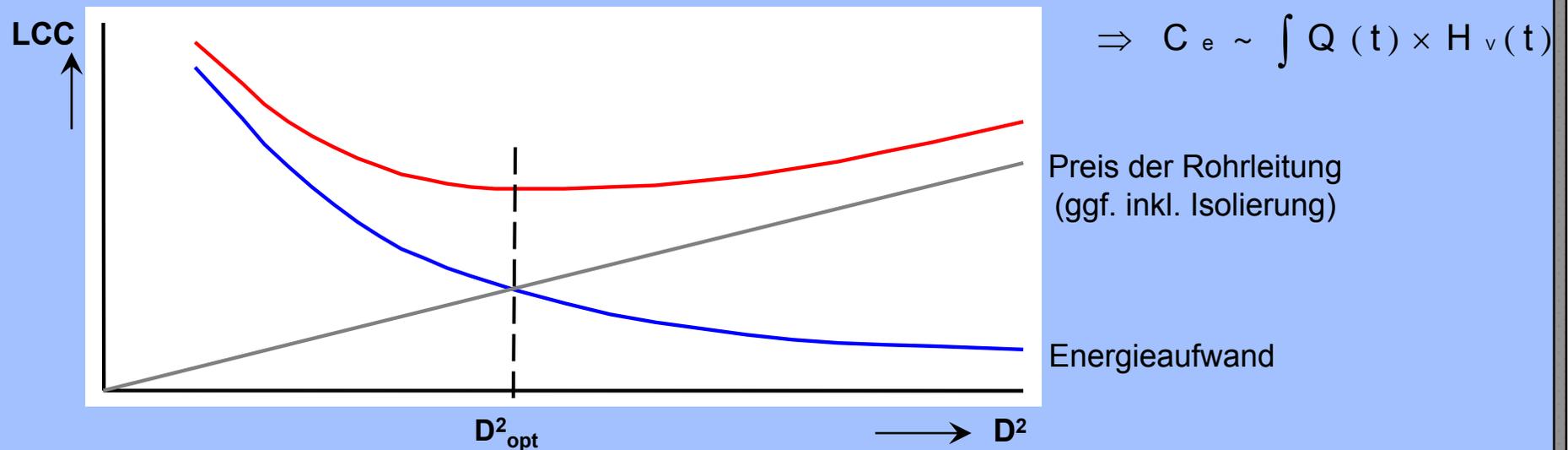
Grundlagen zur Hydraulik – Kostenoptimierung

Dimensionierung von Rohrleitungen:

üblich: Richtwerte der Fließgeschwindigkeit als Ausgangsgröße zur Festlegung von D

besser: Kostenoptimierung von Investitions- und Energiekosten

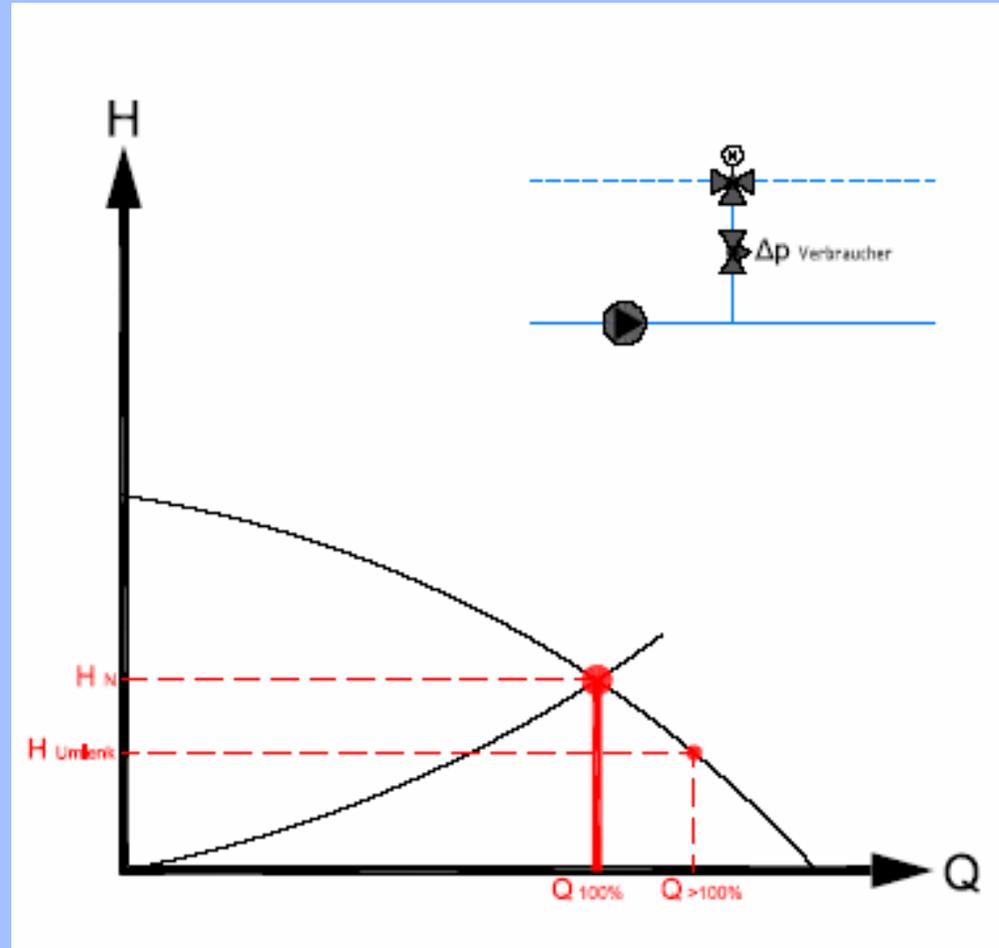
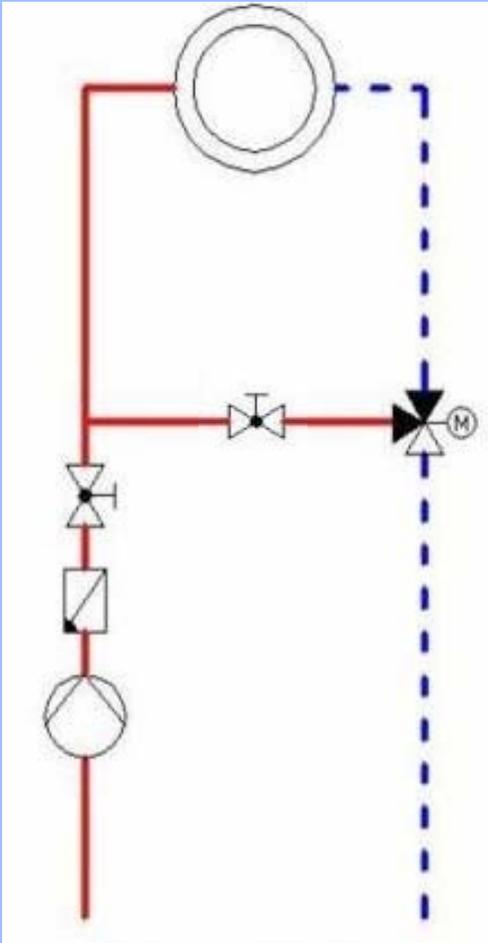
- Investitionskosten für Rohre gemäß $C_{i,Rohr} = k \cdot D^2$
- Energiekosten (C_e) über Verlustbeiwerte der Einzelkomponenten



Bildnachweis: KSB

Grundlagen zur Hydraulik – Standardschaltungen

Umlenkschaltung

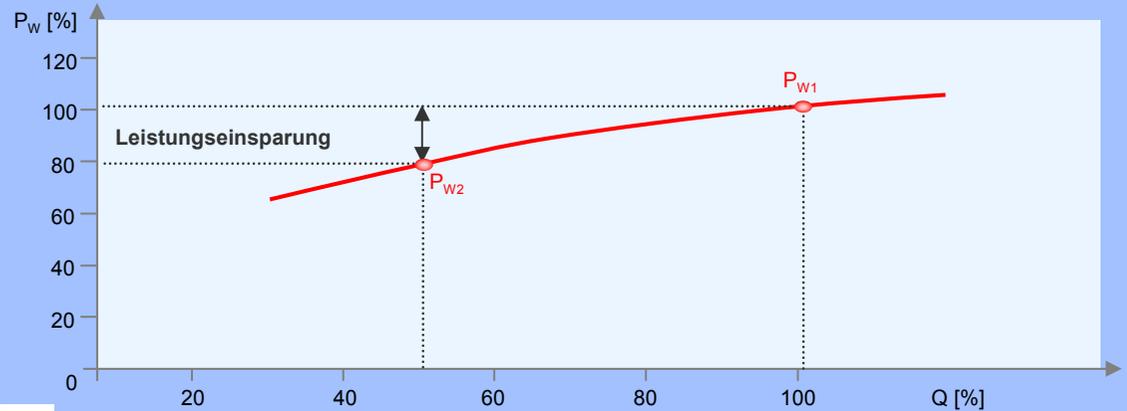
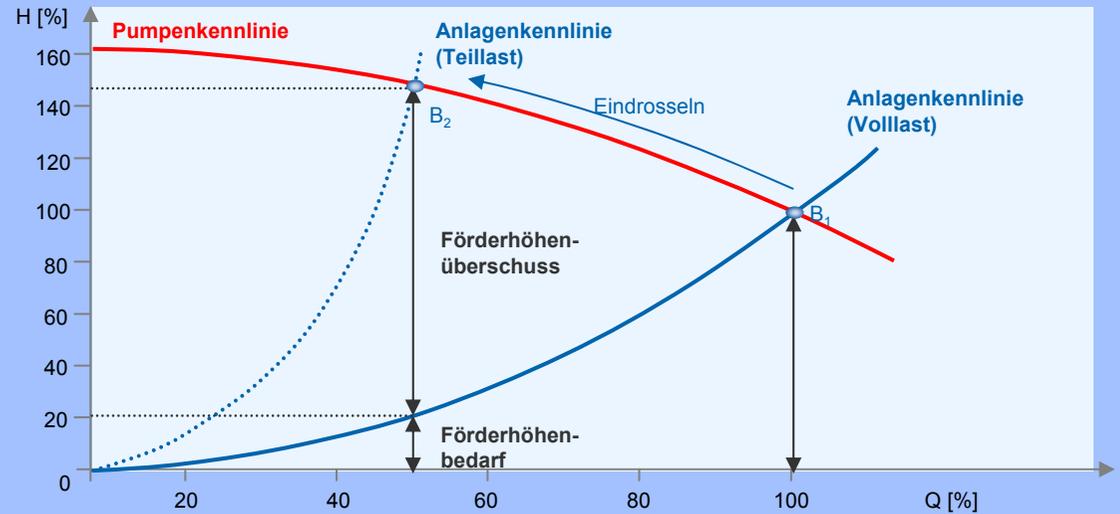
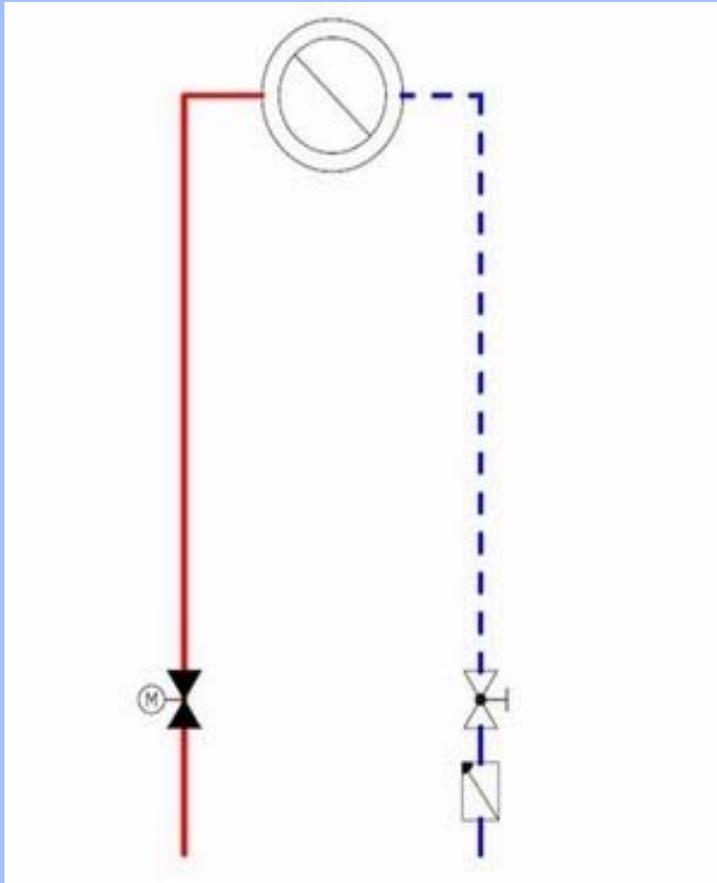


Energieeinsparung



Grundlagen zur Hydraulik – Standardschaltungen

Drosselschaltung



Energieeinsparung

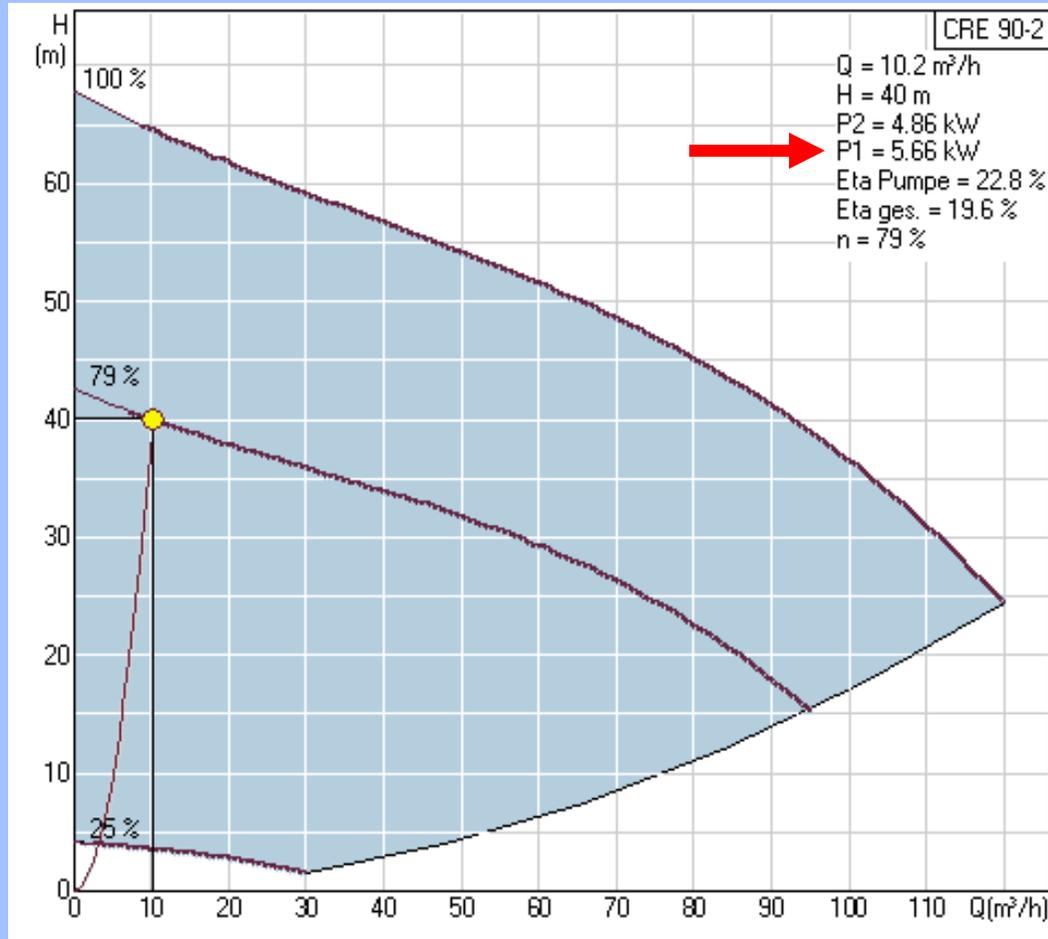


Bildnachweis: KSB



Grundlagen zur Hydraulik – Drehzahlregelung

Konstantdruckregelung



Leistungsanpassung P₁: 5.0 kW bis 15 kW

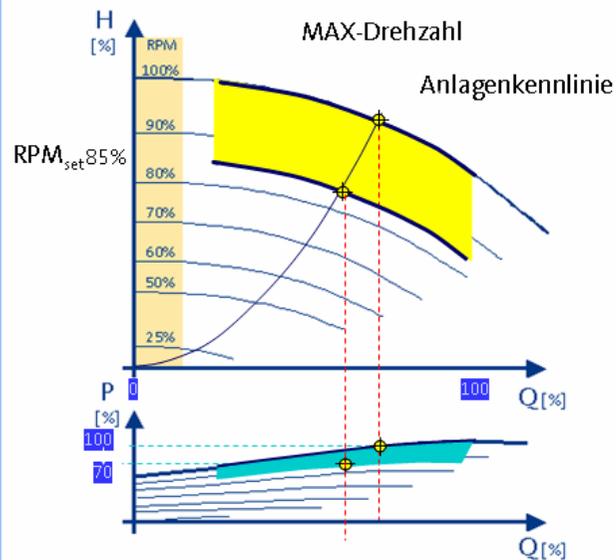


Bildnachweis: Grundfos

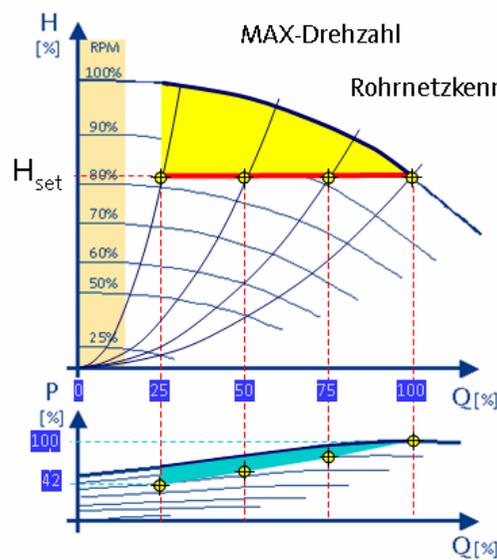


Grundlagen zur Hydraulik – Drehzahlregelung

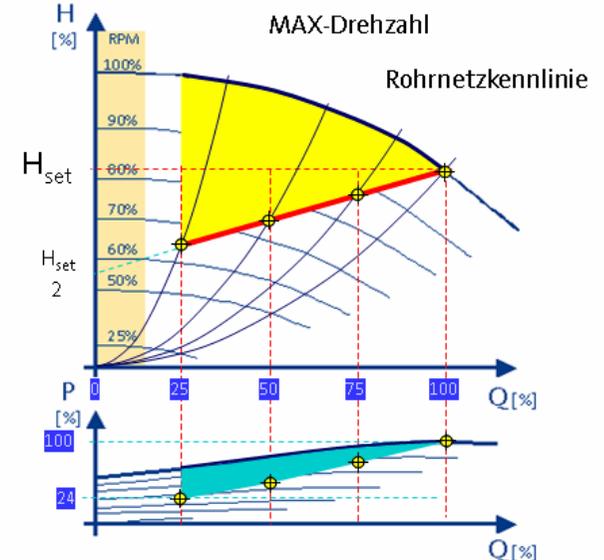
Konstantkennlinie



Konstantdruckregelung



Proportionaldruckregelung

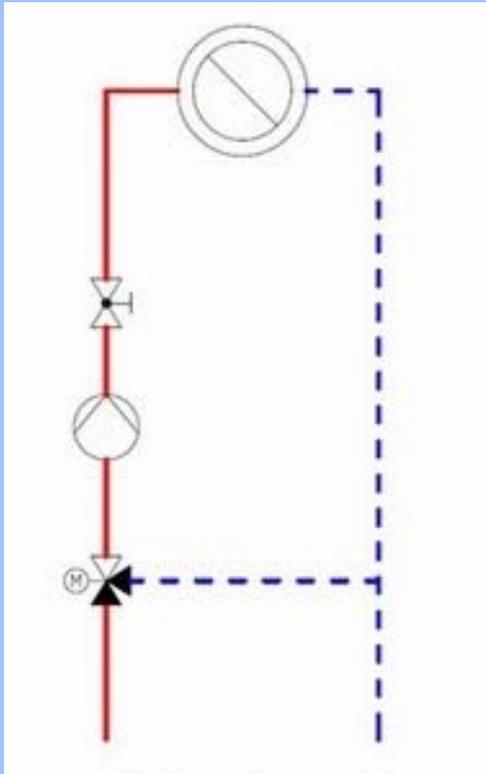


Energieeinsparung



Grundlagen zur Hydraulik – Standardschaltungen

Beimischschaltung

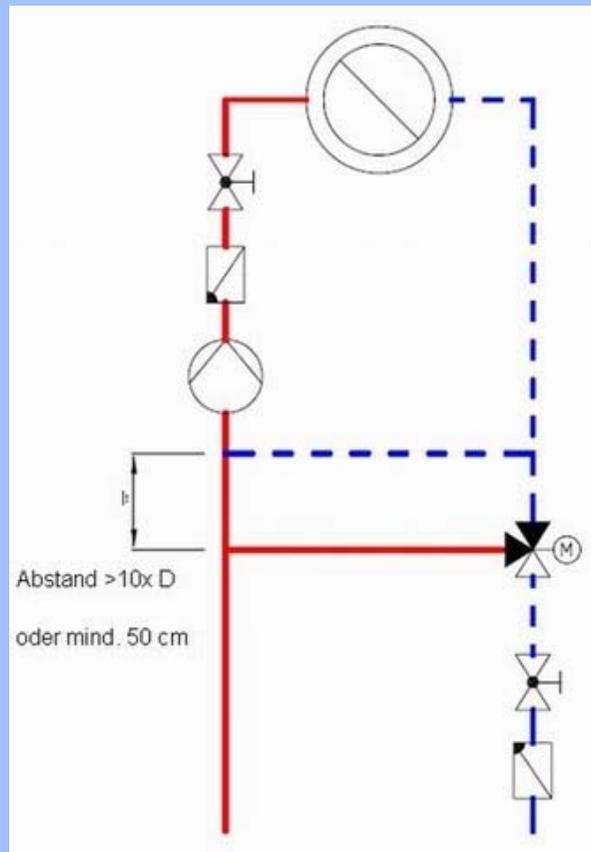


Merkmale:

- 🏠 konstanter Volumenstrom sekundär
- 🏠 keine Rücklaufanhebung
- 🏠 variabler Primärwasserstrom 😊
- 🏠 kein Vordruck erforderlich (druckloser Verteiler)

Grundlagen zur Hydraulik – Standardschaltungen

Einspritzschaltung mit 3-Wege-Ventil



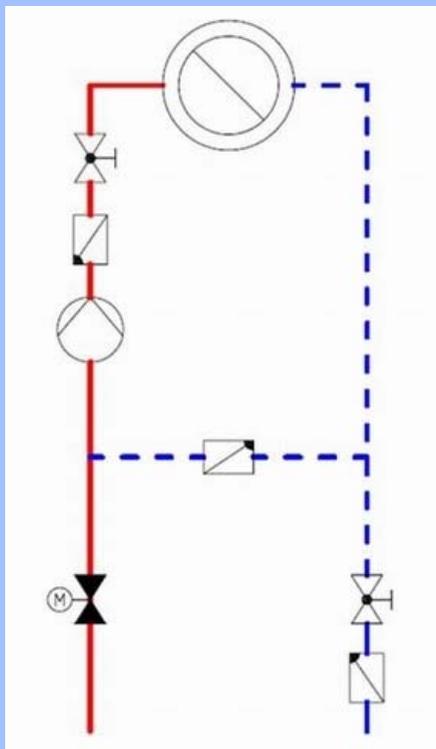
Merkmale:

- 🏠 konstanter Durchfluss im Primär- und Sekundärkreis
- 🏠 Rücklauftemperaturenanhebung
- 🏠 geeignet zur Temperaturmischung
- 🏠 kurze Reaktionszeit
- 🏠 konstantlaufende Hauptpumpe erforderlich (druckbehafteter Verteiler)



Grundlagen zur Hydraulik – Standardschaltungen

Ablaufschaltung oder Einspritzschaltung mit 2-Wege-Ventil

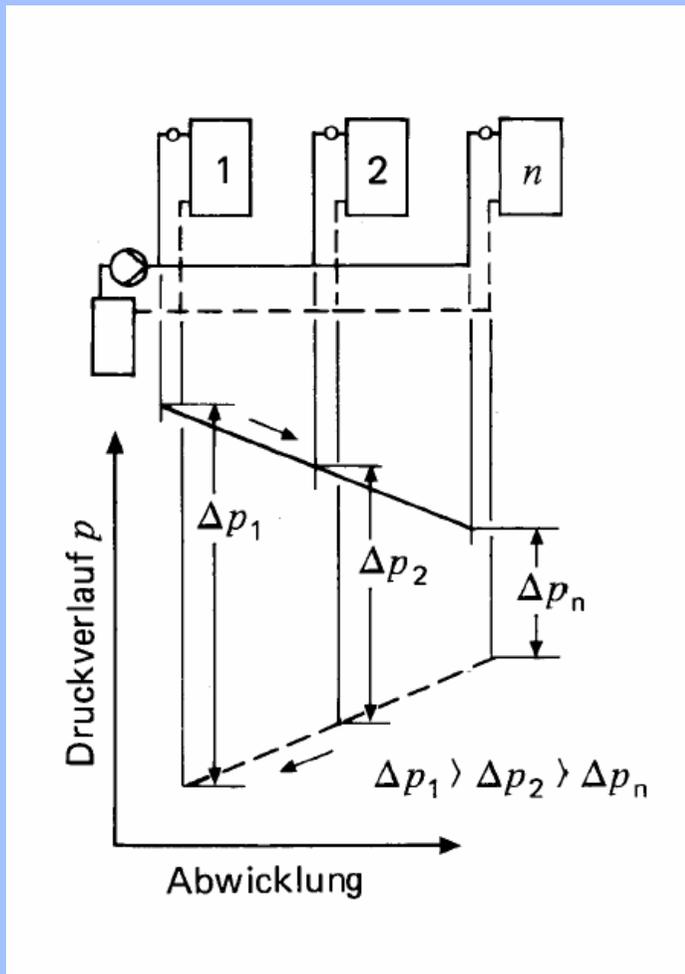


Merkmale:

- 🏠 variable Wassermenge primärseitig
- 🏠 geeignet für variable und konstante Wassermenge sekundärseitig
- 🏠 unterschiedliche Temperaturen primär- und sekundärseitig möglich
- 🏠 Hauptpumpe erforderlich (druckbehafteter Verteiler)

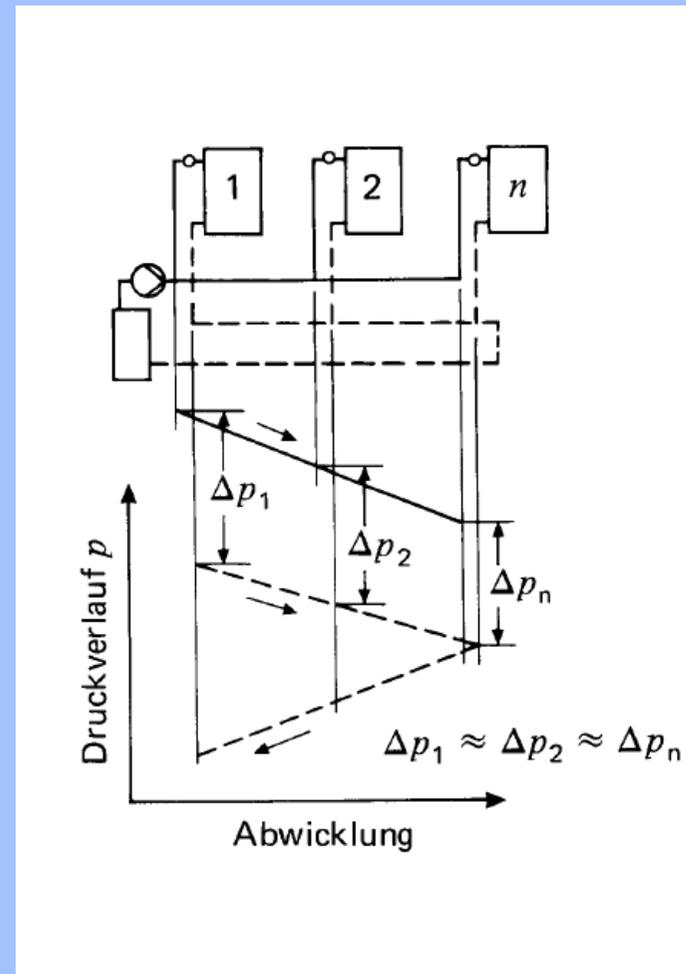


Grundlagen zur Hydraulik – Abgleich



Druckverlauf Zweirohranlage

Bildnachweis: Recknagel



Druckverlauf bei der Tichelmannschen Rohrverlegung

Grundlagen zur Hydraulik – Abgleich

Statischer Strangabgleich

Voreinstellbares Thermostatventil



Bildnachweis: Danfoss

Strangregulierventil



Bildnachweis: Oventrop

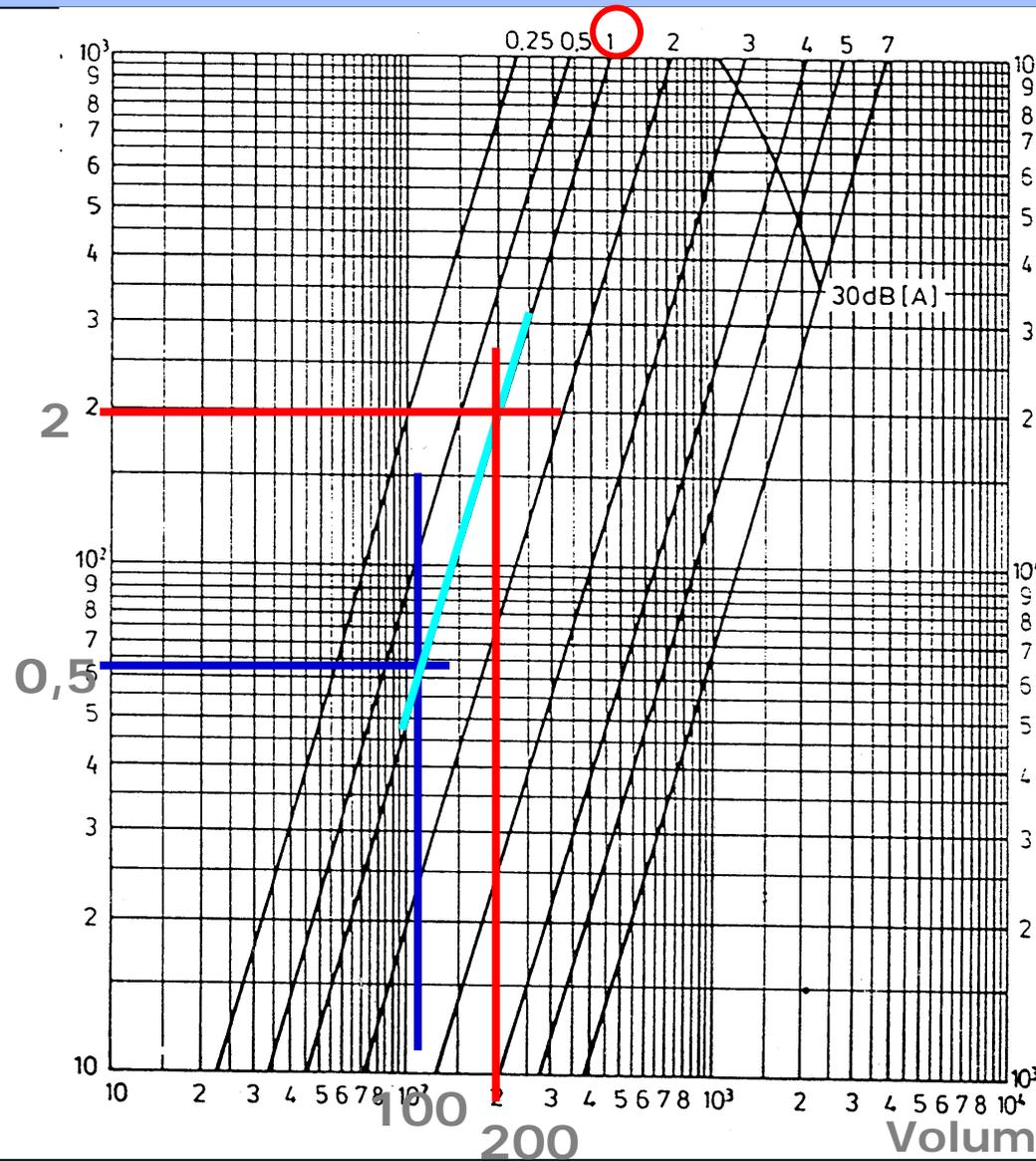
$$kv = \frac{m}{\sqrt{dp}}$$

- statischer Abgleich für Auslegungsfall, im Teillastbetrieb wirkungslos
- max. Druckdifferenz beachten (Geräusche)
- kaum zusätzlicher Druckverlust

Grundlagen zur Hydraulik – Abgleich

$$\frac{Q}{Q_N} = \left(\frac{H}{H_N} \right)^2$$

Druckverlust Δp [mbar]



Statischer Abgleich
im Teillastbetrieb



Grundlagen zur Hydraulik – Abgleich

Dynamischer Abgleich:

Bei Anlagen mit unterschiedlichen Verbrauchern bzw. großen Rohrnetzen sollte der dynamische Abgleich gewählt werden



Bildnachweis: IKZ-Haustechnik

- Abgleich begrenzt Differenzdruck an den Verbrauchern
⇒ keine Geräuschbildung
- Einmalige Einstellung, Umbauten erfordern keine Nachregulierung
- Höhere Differenzdrücke erforderlich (große Unterschiede bei den marktverfügbaren Ventilen)!



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**