

11.5 Betriebskennlinie

Das Ventil mit einer bestimmten Öffnungskennlinie wird in ein Rohrleitungssystem eingebaut. Damit hängt der Druckabfall am Ventil nicht mehr alleine vom Hub H ab, sondern wird sich mit dem Durchsatz ändern. Der Druckabfall im Rohrnetz ist also ein Anteil vom Druckgefälle, welches z. B. die Pumpe in der Anlage zur Verfügung stellt. Das Rohrnetz hat eine Rückwirkung auf die Kennlinie des Ventils. Die Kennlinie des Ventils im eingebauten Zustand nennt man Betriebskennlinie.

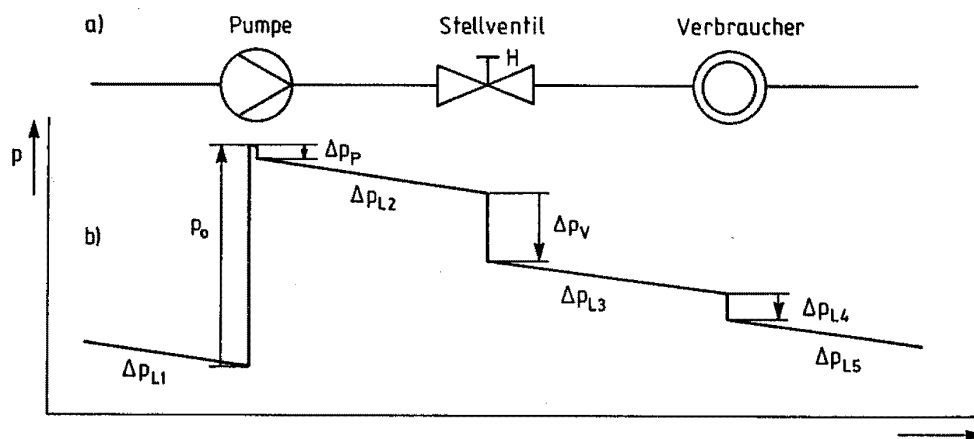


Bild 11-18 Druckverlauf einer hydraulischen Schaltung ; a) hydraulische Schaltung, b) Druckverlauf

Nur wenn bei allen Hubstellungen ein unveränderter Druckabfall Δp_V vorhanden ist, oder anders ausgedrückt, wenn der Druckabfall in dem Leitungssystem selbst bei größtem Durchfluss vernachlässigbar ist, wird die Öffnungskennlinie der Betriebskennlinie entsprechen. Dies wird nur der Fall sein bei kurzen Leitungen mit großem Durchmesser. In allen anderen Fällen wird sich der am Stellventil gemessene Druckabfall Δp_V mit dem Hub H und damit auch mit dem Durchsatz ändern.

Der Druckabfall Δp_V wird durch physikalische Gegebenheiten festgelegt, insbesondere durch den Druckverlust der Rohrleitungen. In Bild 11-18 soll an einer einfachen hydraulischen Schaltung verdeutlicht werden, welche Druckanteile in einer Anlage auftreten können.

Man fasst alle Druckverluste in den Leitungen und in den Verbrauchern zu einem gemeinsamen Druckabfall im Netz Δp_L zusammen. Bild 11-19 gibt den Druckverlauf für einen Betriebszustand (konstanter Volumenstrom) wieder. Je nach Durchsatz durch die Anlage verändert sich der Druckverlauf. Je weiter das Ventil geöffnet wird, desto mehr nimmt der Volumenstrom zu und damit auch der Druckabfall Δp_L im Netz.

$$\Delta p_L \sim \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad \text{oder} \quad \Delta p_L \sim \dot{V}^2$$

Gleiches gilt für den Druckverlust der Pumpe. Da der maximale Pumpendruck p_0 konstant ist, bleibt für den Druckabfall am Ventil Δp_V mit zunehmendem Volumenstrom immer weniger übrig:

$$\Delta p_{\text{ges}} = p_0 = \Delta p_L + \Delta p_V + \Delta p_P$$

Dieser Zusammenhang ist in Bild 11-19 am Beispiel der Netz- und Pumpenkennlinie einer hydraulischen Schaltung dargestellt. Bei voll geöffnetem Ventil ist der kleinste Druckabfall am Ventil Δp_V vorhanden. Für die Betriebskennlinie ist es von Bedeutung, wie groß der Druckabfall Δp_{V100} bei voll geöffnetem Ventil bezogen auf den Druckabfall am geschlossenen Ventil ist.

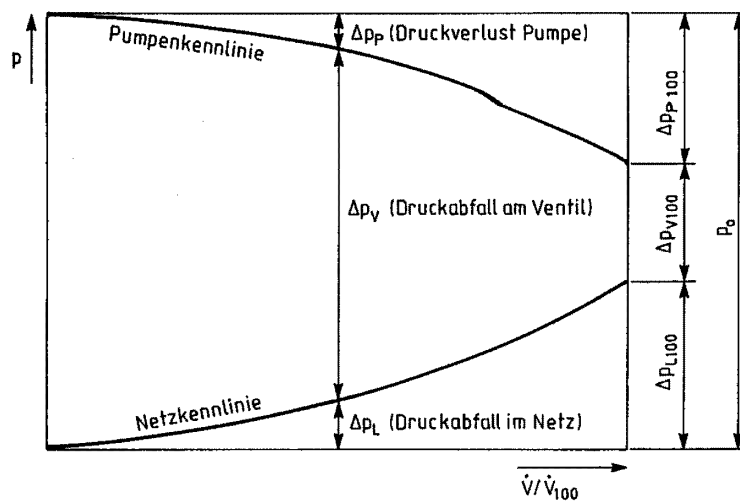


Bild 11-19 Netz- und Pumpenkennlinie einer hydraulischen Schaltung

Δp_{V0} (hier = maximaler Pumpendruck p_0) ist. Dieses Verhältnis nennt man Ventilautorität

$$R_V = \frac{\Delta p_{V100}}{\Delta p_{\text{ges}}} = \frac{\Delta p_{V100}}{p_0}$$

Dieser Wert ist für die Auswahl der Betriebskennlinie von großer Bedeutung. Unter Beachtung der quadratischen Abhängigkeit des Volumenstroms vom Druckabfall in den Rohrleitungen

$$\frac{\Delta p_L}{\Delta p_{L100}} = \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}} \right)^2$$

ergibt sich die Gleichung der Betriebskennlinie:

$$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}} = \frac{\dot{V}}{\sqrt{1 + R_V \left[\left(\frac{k_{VS}}{k_V} \right)^2 - 1 \right]}}$$

Dabei ist für den jeweiligen Hub H der Ausdruck k_V/k_{VS} aus der Grundform der Ventilkennlinie zu entnehmen. Die folgenden Bilder zeigen die Betriebskennlinien für verschiedene Ventilautoritäten, d. h. für unterschiedliche Netze für ein gleichprozentiges Ventil (Bild 11-20a) und für ein lineares Ventil (Bild 11-20b).

Wenn das Stellventil verstellt wird, sollte sich die Regelgröße immer proportional verändern. Jetzt hat aber nicht nur das Ventil, sondern auch Leitung, Pumpe ... Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Ventilstellung und Regelgröße (Betriebskennlinie). Wird in der Praxis ein Ventil gewünscht, das im eingebauten Zustand eine möglichst lineare Betriebskennlinie zeigt, so entnehmen wir dem Bild 11-20, dass bei kleiner Ventilautorität P_V ein gleichprozentiges Ventil, bei großem P_V ein lineares Ventil sinnvoll ist.

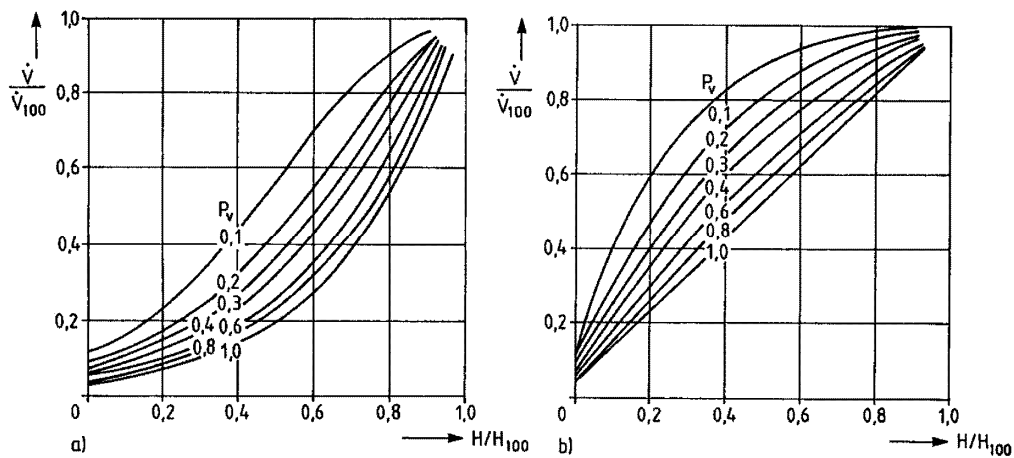


Bild 11-20 Normierte Betriebskennlinien; a) gleichprozentiges Ventil, b) lineares Ventil

P_V	Ventilautorität	S_{th}	Theoretisches Stellverhältnis	\dot{V}	Durchfluss
\dot{V}_{100}	Nenndurchfluss	H	Hub	H_{100}	Nennhub
				$P_V = 1$	Öffnungskennlinie

Als Auslegungsregel gilt:

$$P_V \begin{cases} > 0,3 \rightarrow \text{lineares Ventil} \\ \leq 0,3 \rightarrow \text{gleichprozentiges Ventil} \end{cases}$$

■ Übungsaufgabe 11.3 Ventilkennlinie (Betriebskennlinie)

Für die Aufnahme der Betriebskennlinien wird wieder die Anlage zur Durchflussregelung nach Bild 11-13 verwendet. Während einer Versuchsreihe wird jetzt jedoch das Handventil (3) nicht mehr verstellt. Dadurch ergeben sich Betriebskennlinien mit variablem Druckverlust am Ventil

$$\Delta p_V = f(H).$$

Es werden drei Versuchsreihen mit verschiedenen Ventilautoritäten P_V aufgenommen. Mit der Anpassung von Handventil (3) können drei unterschiedliche hydraulische Schaltungen simuliert werden, ohne dass die Anlage mechanisch umgebaut werden muss.

- a) Zeichnen Sie den Wirkungsplan des Stellventils, eingebaut in das hydraulische System. Berechnen und zeichnen Sie mit Hilfe der Ventilkennzeichnung Beispiel 11-1 des gleichprozentigen Stellventils (1) die Drosselkennlinie für $H = 40, 60, 80 \%$.

Für das Stellventil im eingebauten Zustand werden drei verschiedene Wirkungskennlinien dargestellt:

- Netzkennlinie $\Delta p_L = f(\dot{V})$
- Drosselkennlinie $\dot{V} = f(\Delta p_V)$, $H = \text{konstant}$
- Öffnungskennlinie $\dot{V} = f(H)$, $\Delta p_V = \text{konstant}$

Aus der Ventilkennzeichnung $k_{VS} 2,2 - \text{gl } 25 - 22$ und mit Hilfe von

$$\frac{k_V}{k_{VS}} = \left(\frac{1}{S_{th}} \right)^{\left(1 - \frac{H}{H_{100}} \right)} = \left(\frac{1}{25} \right)^{(1-0,4)} = 0,145$$

$$k_V = k_{VS} \cdot 0,145 = 2,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,145 = 0,319 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

ergeben sich die k_V -Werte:

H	%	40	60	80
k_V	m^3/h	0,319	0,607	1,156

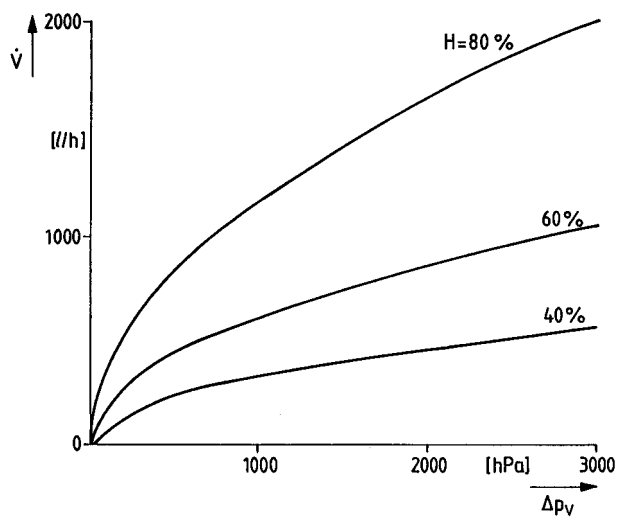
Mit Hilfe von

$$\dot{V} \left[\frac{\text{l}}{\text{h}} \right] = 100 \cdot k_V \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_V \left[\frac{\text{hPa}}{1000 \text{ hPa}} \right]}{1000 \text{ hPa}}} = 319 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \sqrt{\frac{250}{1000}} = 160 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

lassen sich diese k_V -Werte in Volumenströme bei anderen Drücken umrechnen. Es ergeben sich die Zahlenwerte der Tabelle 11-4, die in Bild 11-21 auch grafisch dargestellt sind.

Tabelle 11-4 Durchflusswerte für die Drosselkennlinie

$\frac{\Delta p_V}{\text{hPa}}$	$H / \%$		
	40	60	80
	$\dot{V} / \frac{1}{\text{h}}$		
250	160	304	578
500	226	429	817
750	276	526	967
1000	319	607	1156
1500	391	743	1416
2000	451	858	1635
2500	504	960	1828
3000	553	1051	2002

**Bild 11-21**
Drosselkennlinie des Ventils
 $k_V 2,2 - \text{gl } 25 - 22$

Öffnungskennlinie und Drosselkennlinie sind nur ein Teil der Schaltung durch die Betriebskennlinien bestimmt werden. In Bild 11-22 ist der Wirkschaltplan eines gleichprozentigen Ventils, zusammengesetzt aus den Einzelwirkungen gezeichnet.

Netzkennlinie $\Delta p_L = f(\dot{V})$

Drosselkennlinie $\dot{V} = f(\Delta p_V)$

Öffnungskennlinie $\dot{V} = f(H)$.

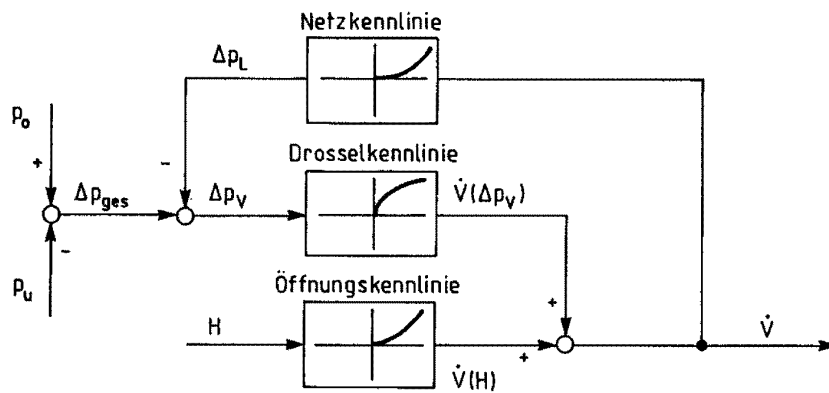


Bild 11-22 Wirkschaltplan eines gleichprozentigen Ventils, eingebaut in ein Rohrnetz

Die Netzkenlinie wird ermittelt, indem man von der zur Verfügung stehenden Druckdifferenz $\Delta p_{\text{ges}} = p_0 - p_U$ den Druckabfall am Ventil Δp_V abzieht. Es werden also für alle gemessenen Betriebspunkte die Druckdifferenzen auf die Geräte aufgeteilt. Der Druckabfall im Rohrnetz wird umso dominanter, je länger die Rohrleitungen sind und je geringer deren Querschnitt.

b) Bei der Aufnahme der Betriebskennlinie wurden die folgenden Werte gemessen:

Tabelle 11-5 Messwerte der Betriebskennlinie

H	Messreihe 1		Messreihe 2		Messreihe 3	
	\dot{V}	Δp_V	\dot{V}	Δp_V	\dot{V}	Δp_V
mm	1/h	hPa	1/h	hPa	1/h	hPa
2	210	3000	208	2950	206	2900
4	288	2950	286	2900	284	2850
6	393	2900	390	2850	372	2600
8	539	2850	534	2800	484	2300
10	736	2800	709	2600	606	1900
12	997	2700	900	2200	718	1400
14	1298	2400	1109	1750	838	1000
16	1635	2000	1266	1200	895	600
18	1953	1500	1427	800	944	350
20	2087	900	1476	450	984	200

Zeichnen Sie mit Hilfe dieser Messwerte die Betriebskennlinien. Tragen Sie in das gleiche Diagramm die Öffnungskennlinie für den Vordruck $p_0 = 3000 \text{ hPa}$ bei einem Umgebungsdruck $p_U = 0 \text{ hPa}$ ein.

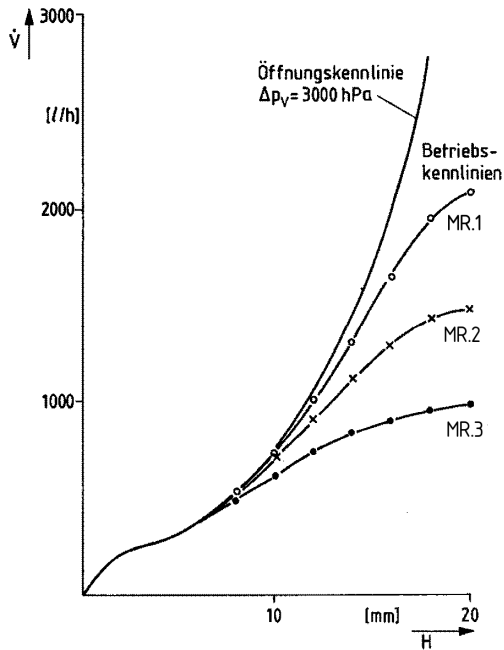


Bild 11-23
Betriebskennlinie nach Messwerten für verschiedene Rohrnetze

Die Tabellenwerte sind in Bild 11-23 als Betriebskennlinien für die Messreihen 1 bis 3 eingetragen. Gleichzeitig wird die Öffnungskennlinie, berechnet aus der Grundform der k_V -Kennlinie, umgerechnet auf $\Delta p_V = 3000 \text{ hPa}$ eingetragen.

Tabelle 11-6 Berechnete Öffnungskennlinie des linearen Ventils.

H	mm	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
\dot{V}_{3000}	l/h	210	291	400	553	762	1051	1451	2002	2763	3811

Für kleine Öffnungen H verhalten sich die Betriebskennlinien wie die Öffnungskennlinie bei maximaler Druckdifferenz.

$$\Delta p_{\text{ges}} = p_0 - p_U = 3000 \text{ hPa}$$

Je nach Widerstand Δp_L in den Rohrleitungen weichen die Betriebskennlinien von der Öffnungskennlinie mit zunehmendem Hub ab, der Volumenstrom \dot{V} nimmt zu.

Wegen $\Delta p_L \sim \dot{V}$ nimmt der Druckverlust am Ventil Δp_V bei konstanter Gesamtdruckdifferenz Δp_{ges} immer mehr ab (Bild 11-24), je größer der Volumenstrom wird.

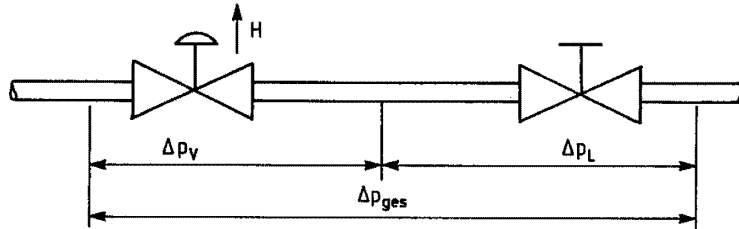


Bild 11-24 Schematische Darstellung des Druckabfalls $\Delta p_{ges} = \Delta p_V + \Delta p_L$

c) Zeichnen Sie die bezogene Betriebskennlinie für verschiedene Ventilautoritäten

Die Ventilautorität berechnet sich nach:
$$P_V = \frac{\Delta p_{V100}}{\Delta p_{ges}} = \frac{900}{3000} = 0,3$$

Die Ventilautorität der Öffnungskennlinie ist immer $P_V = 1$. Die Volumenströme werden auf den größten Volumenstrom einer Messreihe bezogen:

$$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}} \cdot 100\% = \frac{210}{2087} \cdot 100\% = 10,1\%$$

Damit ergeben sich die Tabellenwerte in Tab 11-7.

Tabelle 11-7 Relative Durchflüsse bezogen auf den maximalen Durchfluss für verschiedene Ventilautoritäten P_V . (MR = Messreihe, ÖK = Öffnungskennlinie)

$\frac{H}{H_{100}}$	$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}}$	$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}}$	$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}}$	$\frac{\dot{V}}{\dot{V}_{100}}$
%	%	%	%	%
P_V	1	0,3	0,15	0,07
10	5,5	10,1	14,1	20,9
20	7,6	13,8	19,4	28,9
30	10,5	18,8	26,4	37,8
40	14,5	25,8	36,2	49,2
50	20,0	25,3	48,0	61,6
60	27,6	47,8	61,0	73,0
70	38,1	62,2	75,1	85,2
80	52,5	78,3	85,8	91,0
90	72,5	93,6	96,7	95,9
100	100	100	100	100
	ÖK-3000	MR-1	MR-2	MR-3

Die Diagonale in Bild 11-25 ist die wünschenswerte Betriebskennlinie. Diese Idealform wird zwischen $P_V = 0,3$ bis $P_V = 0,07$ gut angenähert. Dies führt zu dem Auslegungskriterium $P_V < 0,3$ für gleichprozentige Ventile.

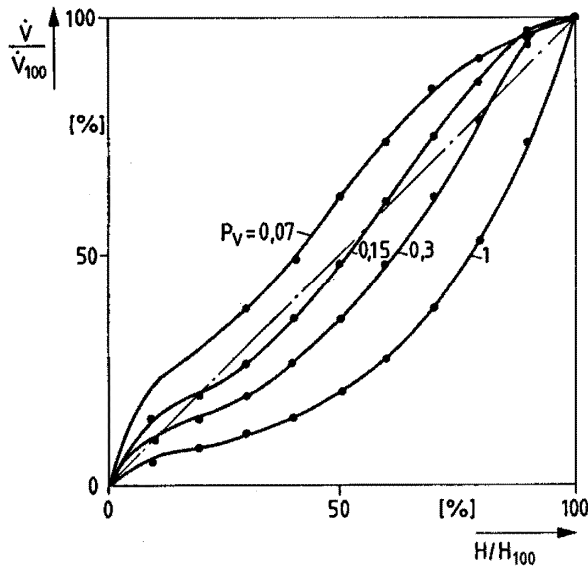


Bild 11-25

Bezogene Betriebskennlinie aus Messwerten eines gleichprozentigen Ventils für verschiedene Ventilautoritäten P_V

d) Zeichnen Sie die Netzkennlinie des Rohrleitungssystems aus Messreihe 1

Bei der Netzkennlinie wird der Druckverlust in den Leitungen, Verbrauchern, ... über dem zugehörigen Volumenstrom aufgenommen. Da der Gesamtdruck Δp_{ges} konstant bleibt, wird Δp_L berechnet mit Hilfe der Messwerte:

$$\Delta p_L = \Delta p_{\text{ges}} - \Delta p_V$$

z. B. Messreihe 1, $H = 20$ mm:

$$\Delta p_L = 3000 \text{ hPa} - 900 \text{ hPa} = 2100 \text{ hPa}$$

Daraus ergibt sich das Diagramm Bild 11-26.

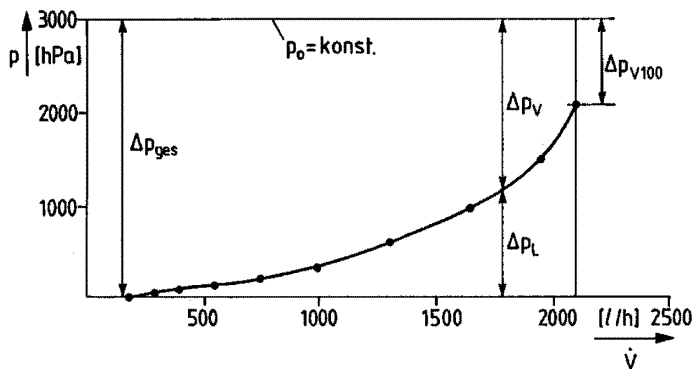


Bild 11-26 Netzkennlinie des Rohrleitungssystems aus Messreihe 1

e) Vergleichen Sie die Proportionalbeiwerte der Öffnungskennlinie bei $\Delta p_V = 3000 \text{ hPa}$ mit denen der Betriebskennlinie aus der ersten Messreihe.

Der Proportionalwert des Ventils wird ermittelt aus der linearisierten Steigung der Kennlinien. Er wird berechnet nach

$$K_P = \frac{x_a}{x_e} = \frac{\Delta \dot{V}}{\Delta H} = \frac{81 \text{ l/h}}{2 \text{ mm}} = 40,5 \frac{\text{l/h}}{\text{mm}}$$

Daraus ergeben sich in Tab. 11-8 die Werte für Messreihe 1 und für die Öffnungskennlinie

$$\Delta p_V = 3000 \text{ hPa.}$$

Wie schon oben beschrieben, zeigt der K_P -Wert eines gleichprozentigen Ventils, aufgetragen über dem Hub H , auch in Bild 11-27 den Verlauf einer e-Funktion. Die Betriebskennlinie zeigt für kleine Hübe einen ähnlichen Verlauf. Für größere Hübe hat die Betriebskennlinie jedoch einen Wendepunkt, was zu einem Maximalwert des K_P -Wertes führt.

Tabelle 11-8 Berechnung der Proportionalwerte für Messreihe 1 (in allen Fällen ist $\Delta H = 2 \text{ mm}$)

H mm	H_m mm	\dot{V}_{3000} l/h	$\Delta \dot{V}$ l/h	K_{P3000} l/h/mm	\dot{V}_{Mr1} l/h	$\Delta \dot{V}_{Mr1}$ l/h	K_{PMr1} l/h/mm
2	–	210	–	–	210	–	–
4	3	291	81	40,5	288	78	38,0
6	5	400	109	54,5	393	105	52,5
8	7	553	153	76,7	539	146	73
10	9	762	209	104,5	736	197	98,5
12	11	1051	285	142,5	997	261	130,5
14	13	1451	400	200	1298	301	150,5
16	15	2002	551	275,5	1635	337	168,5
18	17	2763	761	380,5	1953	318	159
20	19	3811	1048	524,0	2087	134	67

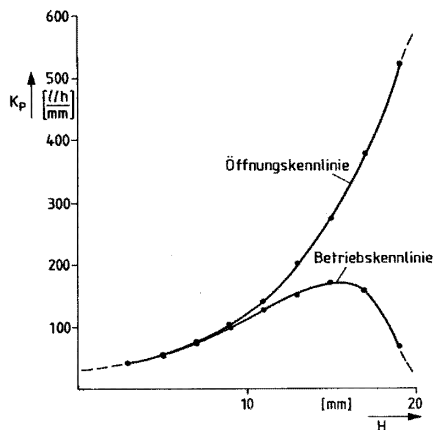


Bild 11-27
Vergleich der Proportionalwerte K_P für die Öffnungskennlinie und die Betriebskennlinie