

Stellventilauslegung für Gase mit hohen Differenzdrücken

Design of control valves for gases with high differential pressures

Bei der Auslegung von Ventilen für hohe Differenzdrücke kommt es häufig zur Überdimensionierung der Stellgeräte, da wichtige Stoffeigenschaften nicht bekannt sind und näherungsweise typische Werte idealer Gase angenommen werden.

Besonders der Isentropenexponent κ (kappa) und der Ventilkoeffizient xT können enormen Einfluss auf den benötigten Durchflusskoeffizienten K_v haben. Durch den Einsatz von CONVAL® 5.0 zur Auslegung mit integrierter thermodynamischer Stoffdatenberechnung und Ventildatenbank werden solche Fehler nahezu ausgeschlossen.

The fact that fluid properties are unknown and typical values for ideal gases are assumed by way of approximation frequently results in the overdimensioning of actuation systems for high differential pressure systems.

The isotropic exponent κ and valve factor xT can, in particular, have an enormous influence on the coefficient of flow K_v needed. The use of CONVAL® 5.0 software for design with integrated thermodynamic physical data computation and a valve data-base virtually eliminates such errors.



Andreas Vogt

Geschäftsführer, F.I.R.S.T. Gesellschaft für technische Softwareanwendungen mbH, Wermelskirchen; Tel. 02196-88778-29, E-Mail: a.vogt@firstgmbh.de

Das Auslegungsszenario

In unserem Beispiel nehmen wir Ethylen bei einer Temperatur von 40 °C, einem Vordruck von 160 bar(a) und einem Nachdruck von 10 bar(a) bei einem maximalen Durchfluss von 150 000 kg/h bzw. einem Normvolumendurchfluss von 118 950 m³/h. Ohne Unterstützung durch die integrierte Stoffdatenberechnung würde man ein für ideale Gase übliches kappa von ca. 1,7 wählen, das für Hubventile zu einem berechneten K_v Wert von ca. 32 m³/h führt (**Bild 1a**). CONVAL® zeigt zusätzlich als Durchflussbedingung „Choked flow“ an – es tritt Durchflussbegrenzung auf, da das maximal mögliche Δp überschritten ist. In der Praxis bedeutet dies, dass selbst bei weiterer Absenkung des Nachdruckes keine weitere Erhöhung des Durchflusses erfolgt.

Bedingt durch das hohe Δp wird die Wahl wahrscheinlich auf einen K_{vs} von 40 bis 60 mit Ventiltinnenweite um DN 80 bzw. DN 100 fallen, um die Strömungsgeschwindigkeit bzw. die Machzahl zu begrenzen. Weitere Maßnahmen zum Schutz des Stellgerätes gegen mechanische Zerstörung (z. B. Nachdruckanhebung mit Lochscheiben, Silencer etc.) müssen getroffen werden.

Auslegung mit korrektem Kappa

Nutzt man jedoch die in CONVAL® verfügbare thermodynamische Stoffdatenberechnung für Ethylen, erhält man (bei gleich gebliebener Dichte ρ) einen um ca. 30 % geringeren benötigten K_v , der dann aber schon 60 % unter dem gewählten K_{vs} liegt. Die Ursache für den kleineren K_v liegt im Einfluss des Isentropenexponenten, der hier von CONVAL® mit ca. 6,1 berechnet wurde. Die Durchflussbedingungen sind nun „unterkritisch“ – es tritt keine Durchflussbegrenzung auf, da Δp kleiner dem kritischen Δp_{crit} ist (**Bild 1b**).

Nun könnte man zunächst vermuten, κ (kappa) wäre falsch berechnet worden, da κ (kappa) üblicherweise laut Definition

$$\kappa = -\frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s$$

ist und sich für ideale Gase ($p v = RT$) dann $\kappa = c_p / c_v$ ergibt.

Dies führt in der Regel zu κ -Werten zwischen 1,2 und 1,8, wie sie dann in der Praxis auch angenommen werden. Ethylen verhält sich jedoch bei diesen Drücken wie ein reales Gas und somit gilt hier ein anderer Ansatz.

Wegen der Definition der Schallgeschwindigkeit gemäß

$$w = v \left[- \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s \right]^{0,5}$$

lässt sich κ des realen Stoffes folgendermaßen berechnen:

$$\kappa = \frac{\rho w^2}{p}$$

Thermodynamische Berechnung von Stoffeigenschaften wie kappa

Die in CONVAL® verwendeten thermodynamischen Zustandsgleichungen [1] gehen diesen Weg und ermitteln alle Stoffeigenschaften mit einer Genauigkeit zwischen 0,01 % und 0,1 % und liefern damit die ideale Voraussetzung zur korrekten Ventilauslegung.

In welchen Bereichen der Einfluss von κ wichtig wird, zeigt CONVAL® z. B. bei der druck- und temperaturabhängigen Darstellung von κ in **Bild 2**.

Man erkennt, dass sich Ethylen je nach Temperatur noch bei Drücken um 120 bar(a) annähernd wie ein ideales Gas verhält, κ dann aber schnell in gänzlich andere Größenordnungen steigt und

das kritische Δp – also die Druckdifferenz, ab der die Durchflussbegrenzung eintritt – stark beeinflusst.

Nun ist diese Methode der thermodynamischen Stoffdatenberechnung nicht auf κ beschränkt. Alle zur Ventilauslegung notwendigen Stoffeigenschaften wie Dichte ρ , Viskosität η bzw. ν , Schallgeschwindigkeit c_f , Isentropenexponent κ etc. werden von CONVAL® hochgenau ermittelt, und zwar für derzeit 34 industriell relevante Medien wie Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxyd, Propylen, Ethylen, Wasser, Erdgas (AGA-8 in variabler Zusammensetzung) bis hin zu diversen Kältemitteln wie z. B. Frigen R134a oder R143a. Eine vollständige und aktuelle Liste findet sich im Internet unter www.conval.de.

Darüber hinaus werden auch weitere verfahrenstechnisch relevante Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Enthalpie und Entropie und auch die Verdampfungsenthalpie berechnet (Bild 3).

Die kritische Druckdifferenz und κ

Um die Zusammenhänge mit κ noch ein wenig klarer zu machen, betrachten wir das kritische Δp . $\Delta p_{x(cr)}$ ist der praktisch maximal mögliche Differenzdruck am Ventil. Untersucht man die Definition des kritischen Δp , wird auch schnell klar, warum κ einen so starken Einfluss hat.

$\Delta p_{x(cr)} = p_1 \cdot x(cr)$, wobei

$$x(cr) = 1 - \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} Fg^2$$

und

$$Fg^2 = 0,442 \cdot xT \frac{\kappa}{1,4(0,31 + 0,122\kappa)^2}$$

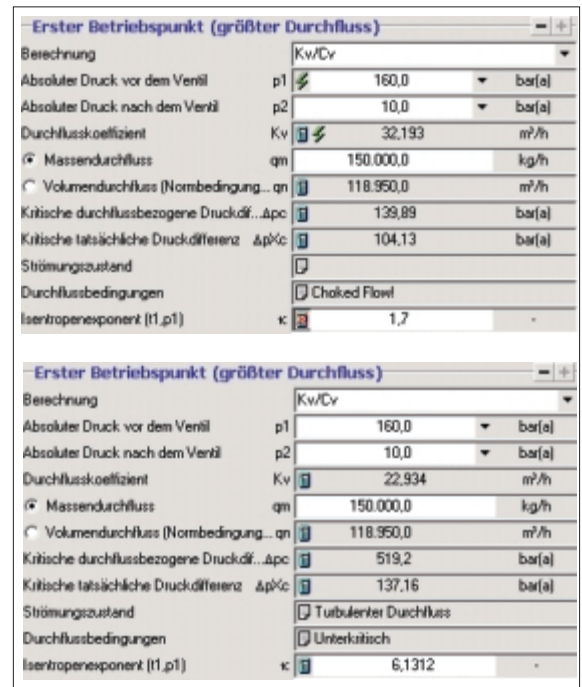
Die kritische Druckdifferenz und der xT Faktor

Ein weiterer Einflussfaktor auf das kritische $\Delta p_{x(cr)}$ wird noch durch die Definition von Fg^2 offen gelegt, nämlich der Ventiltfaktor xT , der bauartbedingt stark variieren kann. Stellt man einmal den benötigten K_v in Abhängigkeit von der Ventiltbauart und deren typischen xT Werte sowie von κ dar, ergibt sich eine Darstellung wie in Bild 4.

Hier wir nun sofort deutlich, wie wichtig es ist, auch den xT Faktor, der bauart- und damit herstellerabhängig ist, möglichst genau zu kennen. Für Regel- und Sicherheitsventile für technische Gase in der Nähe oder oberhalb des

Bild 1:
 K_v -Berechnung:
 a) mit κ eines idealen Gases,
 b) mit κ eines realen Gases (thermodynamische Zustandsgleichungen)

Fig. 1:
 Calculation of K_v :
 a) with κ of an ideal gas,
 b) with κ of a real gas (thermodynamic equation of state)



thermodynamischen kritischen Punktes ergeben sich aus Bild 4 Erkenntnisse von sicherheitsrelevanter Bedeutung!

▷ Hubventile werden nach traditioneller Methode (choked flow) besonders bei höheren Differenzdrücken bis zu 50 % zu groß ausgelegt.

▷ Ventile mit hoher Durchflussleistung wie Dreharmaturen können über 200 % überdimensioniert sein.

Eine optimierte Auslegung mit CONVAL® erfolgt daher mit den kleineren K_{vs} -Werten und kann die durch Überdimensionierung verloren gegangene Re-

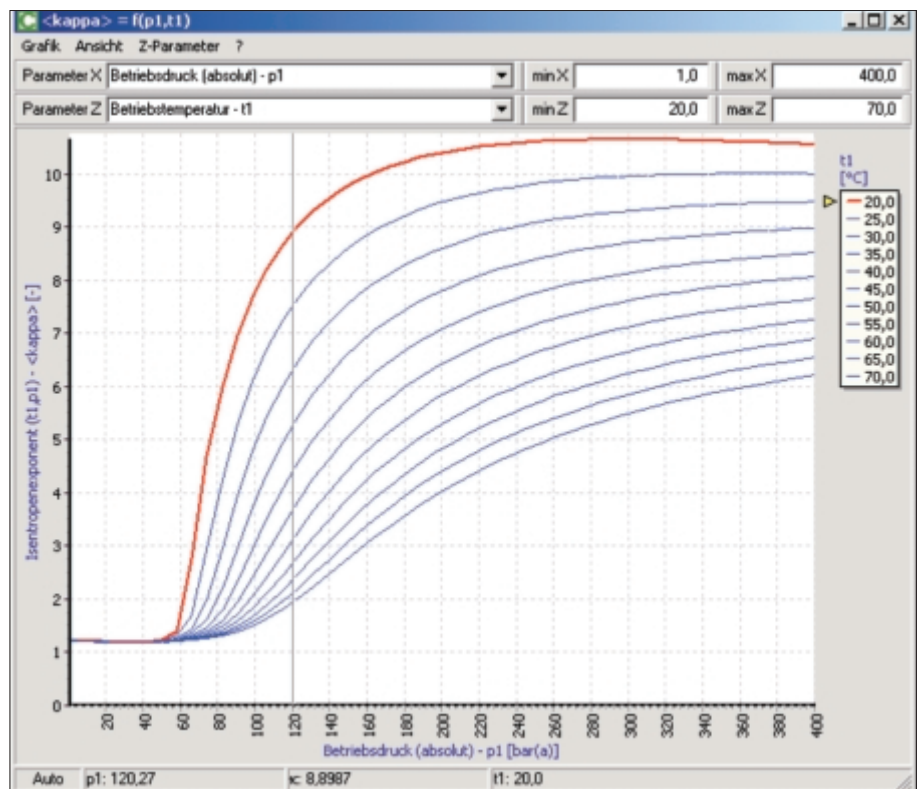


Bild 2: Abhängigkeit von κ für Ethylen vom Druck bei verschiedenen Temperaturen
Fig. 2: κ as a function of pressure at a range of temperatures, for ethylene

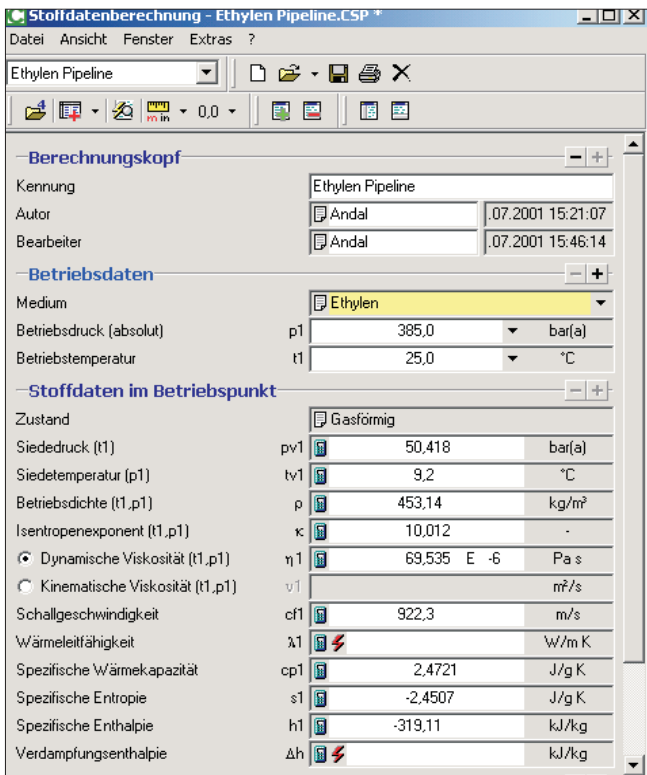


Bild 3: Stoffdatenberechnung von Ethylen mit CONVAL® 5.0

Fig. 3: Calculation of physical data for ethylene using CONVAL® 5.0

gelqualität wieder herstellen sowie Kosten sparen.

xT Auswahl über Herstellerdatenbanken

Auch an dieser Stelle greift CONVAL® durch die Integration von Herstellerda-

ten, die unter anderem auch den xT Faktor beinhalten, dem Anwender unter die Arme. Wie in **Bild 5** zu erkennen ist, bietet CONVAL® für eine wachsende Liste an Stellgeräteherstellern baureihenspezifische Kennwerte in einer Datenbank an. Faktoren wie xT sind dort ausla-

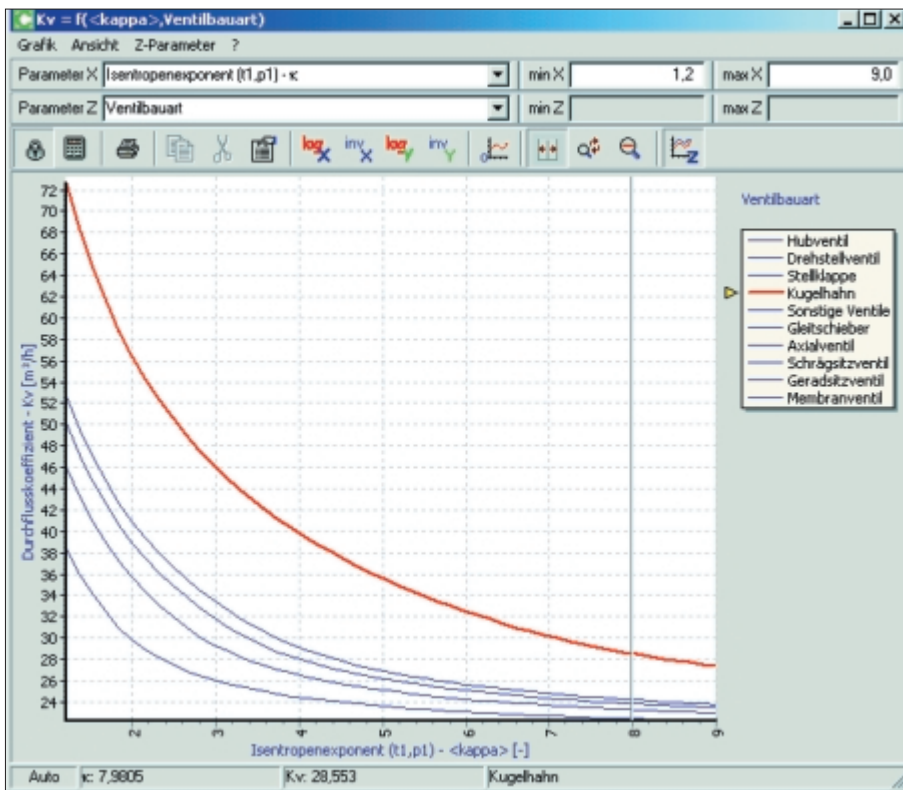


Bild 4: Abhängigkeit des Kv Werts von Kappa für verschiedene Ventilbauarten

Fig. 4: Kv value as a function of kappa for a range of valve types

stungsabhängig als Funktionen, die aus den Messwerten der Hersteller ermittelt wurden, hinterlegt.

Kaum regelbare Betriebskennlinie [2]

Bei dem ähnlichen Auslegungsfall eines Regelventils für eine ethylenführende Ferngasleitung zeigen sich weitere Phänomene, wenn der Unstetigkeit des Isentropenexponenten keine Maßnahmen entgegenzusetzen sind. Die Berechnung erfolgt diesmal mit zwei gegebenen Betriebspunkten in der Nähe des kritischen Punktes von Ethylen (**Bild 6**).

Der extrem unterschiedliche Isentropenexponent κ zwischen den beiden Punkten (1,3 im ersten Punkt und 10,3 im zweiten Punkt) lässt mit Bezug auf die voranstehenden Erläuterungen schon vermuten, dass sich über den Regelbereich des Ventils problematische Zustände ergeben.

Um das Verhalten des Ventils über den gesamten Regelbereich beurteilen zu können, erlaubt CONVAL® eine grafische Darstellung aller Betriebskennlinien (**Bild 7**).

Jede der vier Darstellungen birgt aufschlussreiche Details.

Der Quadrant „Durchflusskennlinien“ (unten rechts) aber verdeutlicht ein regelungstechnisches Problem, das nur durch die Berechnung der Betriebskennlinie mit CONVAL® erkannt werden kann. Die Verstärkung der Betriebskennlinie, also der Faktor, der die Umsetzung einer Hubänderung in eine Mengenänderung bestimmt, ist um den ersten Arbeitspunkt beinahe = 0. Das heißt es müssen sehr große Hubänderungen vorgenommen werden, um eine Mengenänderung zu erreichen. Schon bei 20 % weniger Hub schnell die Verstärkung auf das Hundertfache hoch. Es ist kaum anzunehmen, dass unter diesen Bedingungen eine stabile Regelung erreicht wird.

Der Grund für dieses Verhalten liegt im Abfallen von kappa oberhalb von 60 % Hub, was einer stetigen Durchflusserrhöhung durch beginnende „choked flow“-Effekte entgegenwirkt. Im Quadranten „Ventilfaktoren“ lässt sich erkennen, dass bei ca. 75 % Hub bis zu vollen Öffnung „Durchflussbegrenzung“ auftreten würde und durch Anwendung eines kleineren $\Delta p_{crit} = f_k \cdot p_1$ vermieden wird. Im Quadranten „Anlagenkennlinien“ und „Druckkennlinien“ sehen wir, dass die Verlustleistung mit steigendem kappa dramatisch abfällt, dagegen der Schallpegel nicht wie erwartet absinkt. Die Ursache liegt bei näherer Betrachtung in einem starken Anstieg der Betriebsdichte auf bis zu 10fach höhere

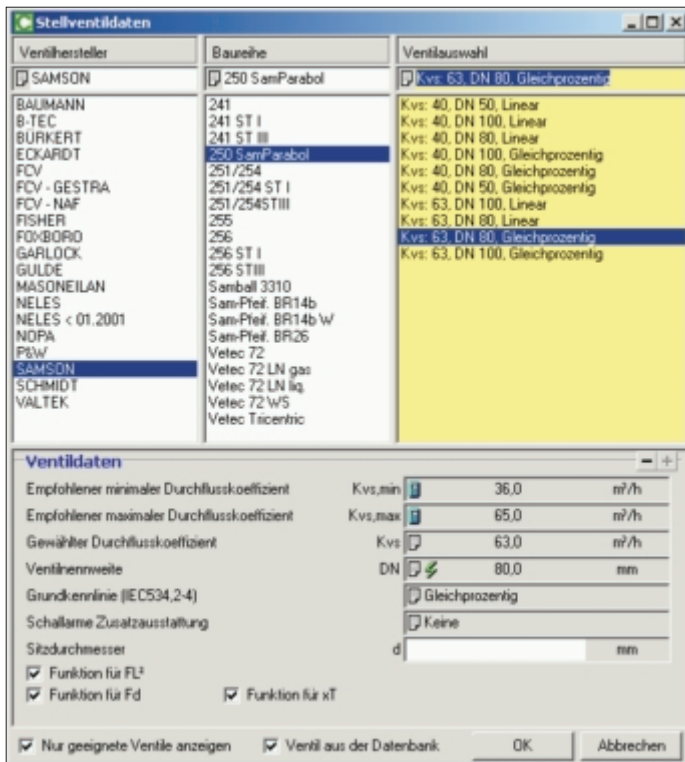


Bild 5: Geräteauswahl in CONVAL

Fig. 5: Device selection using CONVAL®

auch bauart- und herstellerabhängigen Faktoren der auszuliegenden Stellgeräte für eine praxisorientierte und realitätsnahe Berechnung sind.

Da diese Daten häufig schwierig zu beschaffen sind, falsche Annahmen aber schnell zu Überdimensionierung von 30 bis 60 % führen kann (in Extremfällen sogar noch mehr), unterstützt CONVAL® solche Anforderungen mit integrierten Datenbanken und Berechnungsmodulen auf aktuellstem Stand.

Auch dann noch sind regelungstechnische Phänomene zu beachten, die durch den Einsatz von CONVAL® einfach und schnell zu erkennen sind. Dabei kann CONVAL natürlich sofort die Auswirkungen eventuell getroffener Maßnahmen visualisieren und ist damit ein ideales Werkzeug zur Optimierung der Stellventilauslegung.

Literatur

- [1] Wagner, W.; Smukala, J; Span, R.: Eine neue Fundamentalgleichung für das fluide Zustandsgebiet von Ethylen für Temperaturen von der Schmelzlinie bis 450 K und Drücke bis 300 Mpa. Fortschrittsberichte VDI, ISBN 3-18-361603-3
- [2] Fallbeispiel von H. Siemers, SAMSON AG

Werte im Teillastgebiet. Dass eine zehnfache Dichte und kappa-Werte über 2 auch praktische Auswirkungen auf den zu erwartenden Schalldruckpegel haben, darf angenommen werden.

Zusammenfassung

Anhand dieser Beispiele wird deutlich, wie wichtig die Kenntnis von Stoffeigenschaften des zu regelnden Mediums wie

	Größter Durchfluss	Mittlerer Durchfluss
t1	10,0	9,5
p1	51,0	77,0
p2	10,0	10,0
Kv	6,0109	0,42758
qm	10.000,0	2.000,0
qn	7.929,7	1.585,9
Δpc	37,435	494,78
cl1	204,84	471,3
γ1	18,243 E -6	45,281 E -6
γ2		126,43 E -9
ε	1,3687	10,332
pv1	50,4	50,4
ρ1	166,35	358,15
ρ2	12,807	12,835
LpAa	109,0	98,3
h/h100	82,328	14,762
Fd	0,46	0,46
FF	0,822	0,908
xT	0,751	0,871

Bild 6: Betriebspunkte einer Fernleitung

Fig. 6: Working points for a long-distance pipeline

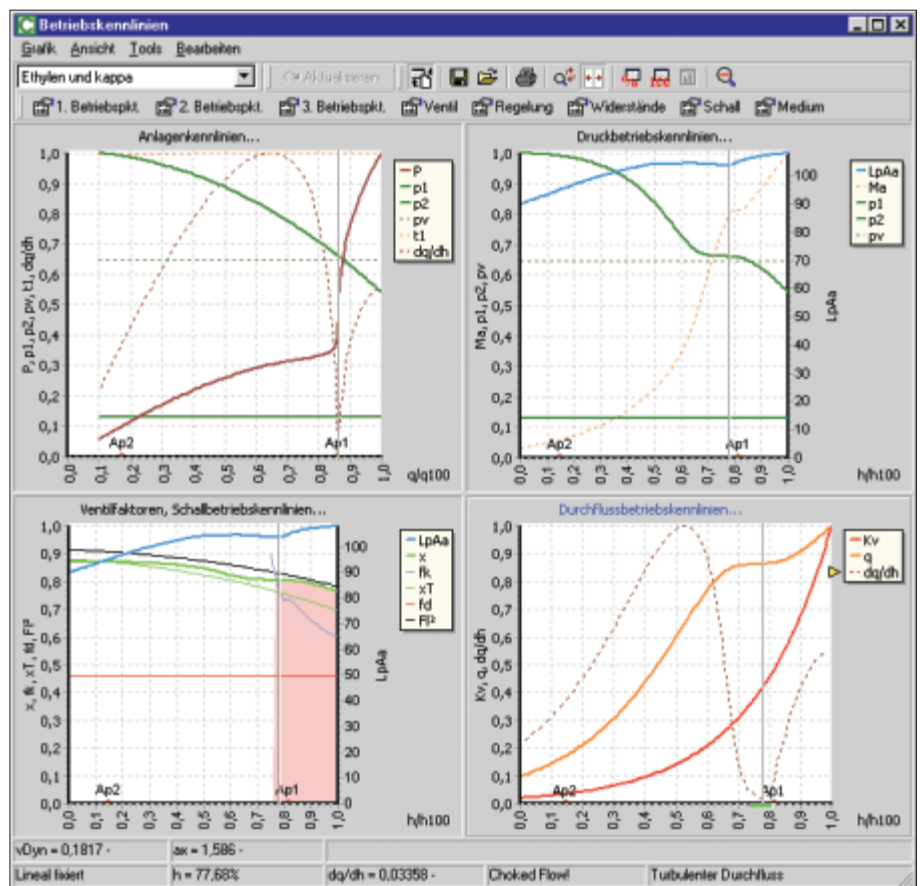


Bild 7: Kennliniendarstellung des Ventils im Anlagensystem

Fig. 7: Characteristics curve for the valve in the system