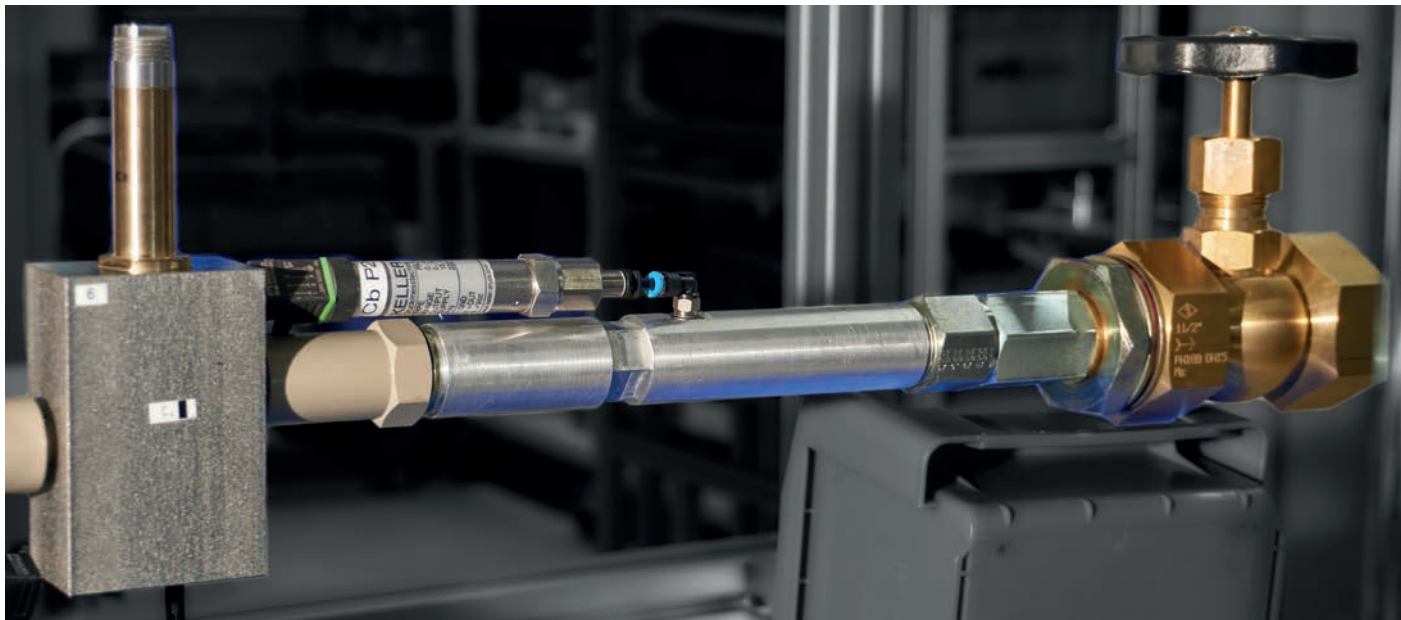


C, b-MASSENSTROM-MODELL FÜR GASE IM HOCHDRUCKBEREICH – TEIL 2



Die Auslegung von Ventilen erfolgt seit langer Zeit mit Hilfe des K_v -Wertes. In diesem Beitrag wird der Weg der Entwicklung aufgezeigt vom K_v -Wert für Wasser und Gase bis hin zum C, b -Modell für Gase, das mit Realgasdaten im Hochdruckbereich für Wasserstoff bereits zum Einsatz kommt. Es wird veranschaulicht, dass das C, b -Modell das geeignetere Modell ist im Vergleich zum K_v -Wert für Gase zur Beschreibung eines Massenstroms durch ein Ventil mit gasförmigem Wasserstoff. C, b -Kennwerte haben sich auch für die Systemsimulation bewährt und eignen sich für die Auslegung kompletter Anlagen, wie z. B. für Wasserstofftankstellen.

Nachdem im ersten Teil des Beitrags in der Ausgabe O+P-Fluidtechnik 07-08/2023 vor allem die Grundlagen beschrieben wurden, widmet sich der zweite Teil des Beitrags in dieser Ausgabe unter anderem der Erweiterung des C, b -Modells für Wasserstoff im Druckbereich bis 1000 bar.

5. ERWEITERUNG DES C, b-MODELLS FÜR DEN HOCHDRUCKBEREICH

Ausgangspunkt war das in der ISO 6358-1 /8/ beschriebene Verfahren zur Ermittlung der Parameter C und b . Im Rahmen einer Arbeit von Ramsperger /10/ wurde das C, b -Modell erfolgreich eingesetzt für Luft und Wasserstoff im Druckbereich bis $p = 300$ bar. Die Erfahrungen wurden in /11/ veröffentlicht und die Arbeit mit diesem Modell wurde seit dieser Zeit stetig weiterentwickelt und komplettiert.

Seit 1989 – erste Veröffentlichung der ISO 6358 /7/ – hat sich in der Pneumatik die Messung und Dokumentation der Kennwerte C und b nach ISO 6358 erfolgreich durchgesetzt. Eine Neuauflage der Norm erfolgte 2013 mit ISO 6358-1 /8/ und eine Erweiterung im Jahr 2019 mit der ISO 6358-2 /12/, welche die „Behälter-Methode“ aufgenommen hat, die im Anwendungsbereich von Ventilen mit großen Nennweiten zum Einsatz kommt. Zudem werden in ISO 6358-3 /13/ Verfahren vorgestellt, mit denen auch andere Widerstände in Rohrleitungen mit Hilfe von C und b messtechnisch erfasst und zur Berechnung von Systemen herangezogen werden können.

Gleichung (6) beschreibt den Massenstrom in klassischer Schreibweise nach /14/, wobei die durch Reibung verursachten Verluste durch die Einschnürung der Strömung mit einem Koeffizienten $\alpha < 1$ und der Einfluss der Geschwindigkeit mit dem Koeffizienten $\varphi < 1$ berücksichtigt werden.

Lucian Pasiaka, Dr. rer. nat., Dipl.-Ing., Senior Design Engineer R&D,
Eugen Seitz AG; Wetzikon (CH)

$$\dot{m} = \alpha \varphi A_2 \psi \sqrt{2 p_1 \varrho_1} \tag{6}$$

Die in Gl. (6) enthaltene Ausflussfunktion ψ wird in Abhängigkeit vom Druckverhältnis im unterkritischen Bereich wie folgt beschrieben, Gl. (7).

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \tag{7}$$

Im überkritischen Strömungsbereich hängt die Ausflussfunktion jedoch nur noch vom Isentropenexponent κ ab, d. h. von den thermodynamischen Eigenschaften des Fluids und vom Druckverhältnis. Diese Funktion erhält man, indem das Maximum der Ausflussfunktion von Gl. (7) berechnet wird, Gl. (8), siehe /11/.

$$\psi_{max} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}} \tag{8}$$

Auch das kritische Druckverhältnis b ist keine Konstante mehr, sondern hängt vom Isentropenexponent ab, Gl. (9), /11/.

$$b = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \tag{9}$$

Der maximale Durchfluss wird nun in den Blick genommen, für den in Gl. (6) an Stelle von ψ , der mit Gl. (8) beschriebene ψ_{max} verwendet werden muss, Gl. (10)

$$\dot{m} = \alpha \varphi A_2 \psi_{max} \sqrt{2 p_1 \varrho_1} \tag{10}$$

Wir können nun einen Massenstrom von Luft in den Massenstrom eines anderen Gases, wie z. B. Wasserstoff überführen. Dazu verwenden wir Gl. (10) als theoretischen Massenstrom (ohne Verluste α, φ) und schreiben ihn für Luft und H₂ als reales Gas

$$\dot{m}_L = A \cdot \sqrt{2 \cdot p_1 \cdot \varrho_{1L}} \cdot \psi_{max, L} \tag{11}$$

$$\dot{m}_{H_2} = A \cdot \sqrt{2 \cdot p_1 \cdot \varrho_{1H_2}} \cdot \psi_{max, H_2} \tag{12}$$

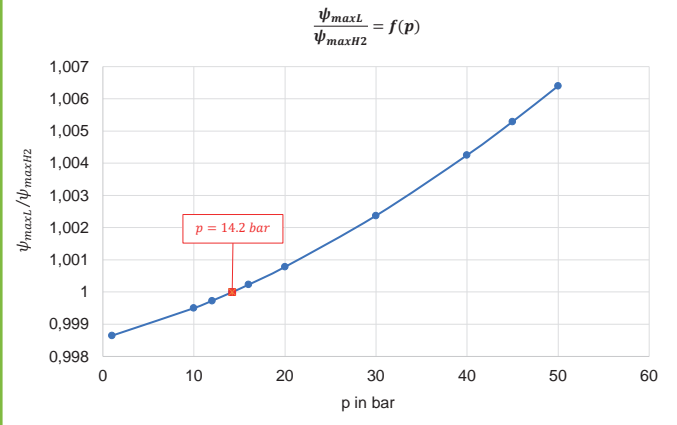
Nun bilden wir das Verhältnis $\dot{m}_L / \dot{m}_{H_2}$

$$\frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{H_2}} = \frac{\sqrt{\varrho_{1L}} \cdot \psi_{max, L}}{\sqrt{\varrho_{1H_2}} \cdot \psi_{max, H_2}} \tag{13}$$

Ein Vergleich von $\frac{\psi_{max, L}}{\psi_{max, H_2}}$

mit Realgasdaten führt zu dem Ergebnis, dass bei einem Druck von $p = 14.2$ bar das Verhältnis 1 wird, siehe **Bild 08**.

08 Verhältnis der maximalen Ausflussfunktion ψ_{max} von Luft und Wasserstoff im Druckbereich bis $p = 50$ bar bei einer Temperatur von $T = 20$ °C mit Daten für trockene Luft und Normalwasserstoff H₂ nach /15/



Der Massenstrom \dot{m}_{H_2} und folglich auch der Leitwert C_{H_2} hängt bei einem Druck $p_1 = 14.2$ bar nur noch vom Wurzel-Verhältnis der beiden Dichten ab, Gl. (14).

$$C_{H_2} = C_L \cdot \sqrt{\frac{\varrho_L}{\varrho_{H_2}}} \quad \text{für } p_1 = 14.2 \text{ bar und } T_1 = 20 \text{ °C} \tag{14}$$

$$\sqrt{\frac{\varrho_L}{\varrho_{H_2}}} = 3.786 \quad \text{für } p_1 = 1 \text{ bar und } T_1 = 20 \text{ °C} \tag{15}$$

In Gl. (15) wurden die Referenzdichten verwendet bei $T_0 = 20$ °C und $p_0 = 1$ bar für Wasserstoff H₂ mit

$$\varrho_{H_2} = 0.08266 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

und für Luft

$$\varrho_L = \varrho_0 = 1.185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

(Luft bei Standardbedingungen $T_0 = 20$ °C, $p_0 = 1$ bar, 65 % rel. Luftfeuchte). Für das Wurzelverhältnis der Dichten nach Gl. (14), ermittelt bei einem Druck von $p_1 = 14.2$ bar und einer Temperatur von $T = 20$ °C für trockene Luft und Wasserstoff H₂, erhält man eine Abweichung gegenüber dem Wert aus Gl. (15) von 0.76 %. Diese Abweichung kann vernachlässigt werden. Im Weiteren wird der Wert von Gl. (15) verwendet. Der Massenstrom Luft im überkritischen Bereich hat bis zu einem Druck von 14.2 bar eine nahezu lineare Druckabhängigkeit und kann leicht ermittelt werden.

BEISPIEL 1

Gegeben ist ein Massenstrom Luft im überkritischen Strömungsbereich bei einem Druck von $p_1 = 14.2$ bar und einer Temperatur von $T_1 = 20$ °C mit

$$\dot{m}_L = 56.12 \text{ g / s} \quad \text{Massenstrom Luft}$$

Gl. (4) nach C umgestellt führt zu Gl. (16). Mit dieser Gleichung kann der kritische Leitwert für Luft bei $p_1 = 14.2$ bar und einer Temperatur von $T_1 = 20^\circ\text{C}$ berechnet werden.

$$C = \frac{\dot{m}}{p_1 \cdot \varrho_0} \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \quad (16)$$

$$C_L = \frac{56.12 \text{ g/s}}{14.2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \cdot 1.185 \text{ kg/m}^3} = 3.335 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^4 \cdot \text{s}}{\text{kg}}$$

Nach Gl. (15) erfolgt nun die Berechnung des kritischen Leitwertes für Wasserstoff mit

$$C_{H_2}(p = 14.2 \text{ bar}) = 3.786 \cdot 3.335 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^4 \cdot \text{s}}{\text{kg}} = 1.2637 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^4 \cdot \text{s}}{\text{kg}}$$

Der kritische Leitwert für Wasserstoff C_{H_2} ist bei $p_1 = 14.2$ bar um den Faktor 3.786 höher als der bei Luft. Jetzt steht die Aufgabe, diesen Leitwert für unterschiedliche Drücke zu ermitteln. Dafür verwenden wir die Zustandsgrößen im engsten Querschnitt, d. h. in dem Zustand, bei dem Schallgeschwindigkeit vorliegt. Diese können mit einer iterativen Berechnung ermittelt werden, siehe Flussdiagramm **Bild 09**. Für den Startpunkt wurde ideales Gas angenommen, sodass zu Beginn eine isentrope Zustandsänderung vor-

liegt, vgl. /11/. Wir verwenden die Stoffdatenbank von Kretzschmar /15/. Bei der Verwendung der Datenbank von NIST /17/ wird der Isentropenexponent k nicht ausgegeben. Dieser Wert von realen Gasen kann mit Hilfe der Gl. (17) berechnet werden, vgl. /16/. Das oft verwendete Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten

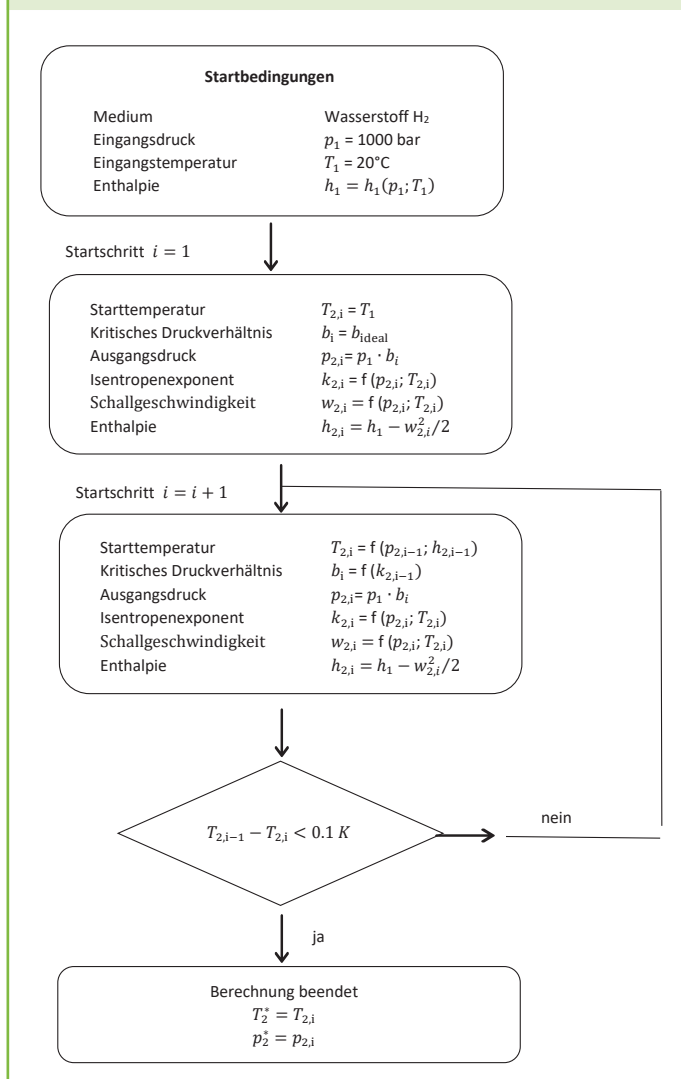
$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$k = \frac{w_{schall}^2}{p \cdot v} \quad (17)$$

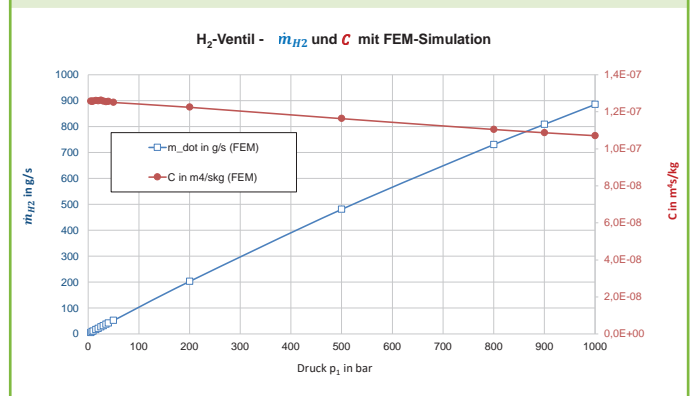
gilt nur für ideale Gase.

Ziel der Iteration ist es, den tatsächlichen Druck p_2^* und die tatsächliche Temperatur T_2^* im engsten Querschnitt zu ermitteln. Beginnend mit dem „idealen“ kritischen Druckverhältnis kann auf iterativem Weg p_2^* berechnet werden. Mit den dazugehörigen Daten des realen Gases lässt sich jeweils für den nächsten Iterationsschritt ein neues kritisches Druckverhältnis berechnen. Im Ergebnis führt diese Methode zu einem niedrigeren Druck im engsten Querschnitt. Mit Hilfe der Enthalpie und dem Druck lässt sich die Temperatur von Wasserstoff als reales Gas ermitteln. Mit Druck und Temperatur ist auch die Dichte von Wasserstoff als reales Gas im engsten Querschnitt bekannt, siehe Flussdiagramm zur iterativen Berechnung in Bild 09. In der Strömungssimulation hat sich gezeigt, dass die örtliche Schallgeschwindigkeit auch nach dem engsten Querschnitt auftreten kann. Die Dichte von Wasserstoff kann nun als reales Gas mit Hilfe der Stoffdatenbank und auch als ideales Gas mit dem Druck p_2^* und Temperatur T_2^* im engsten Querschnitt mit Gl. (18) berechnet werden, **Tabelle 02**.

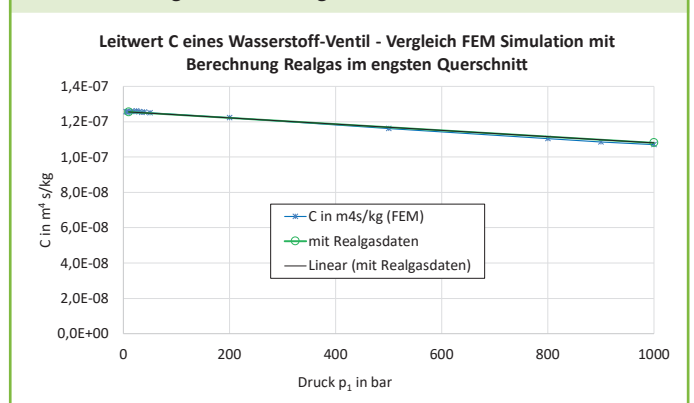
09 Flussdiagramm zur iterativen Berechnung der Zustandsgrößen im engsten Querschnitt



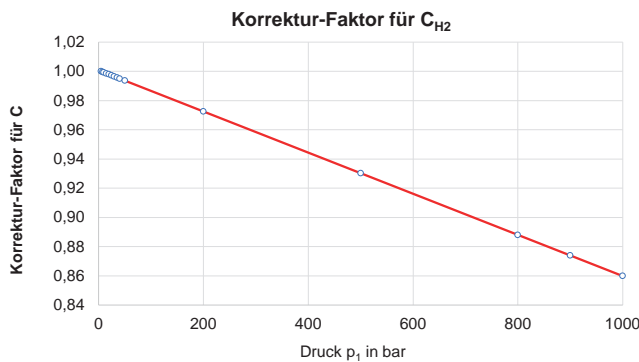
10 Leitwert C_{H_2} und Massenstrom eines H_2 -Ventils bis 1000 bar FEM-Simulation mit ANSYS CFX



11 Leitwert C_{H_2} eines H_2 -Ventils in Abhängigkeit vom Druck p_1 bis 1000 bar. Vergleich von FEM-Simulation und Berechnung mit Realgasdaten im engsten Querschnitt



12 Korrekturfaktor für den Leitwert C_{H_2} im überkritischen Strömungsbereich für Wasserstoff in Abhängigkeit vom Eingangsdruck p_1



$$\rho_2^* = \frac{p_2^*}{R_{H_2} \cdot T_2^*} \quad \text{Dichte im engsten Querschnitt – } H_2 \text{ als ideales Gas} \quad (18)$$

Für Wasserstoff im Hochdruckbereich kann keine lineare Abhängigkeit des Massenstroms vom Druck p_1 vorausgesetzt werden, daher ändert sich der kritische Leitwert C , er nimmt von 5 bar bis 1000 bar um 14.8 % ab, **Bild 10**. Mit den Daten im engsten Querschnitt, Tabelle 02, kann der kritische Leitwert C für $p_1 = 1000$ bar wie folgt ermittelt werden:

$$C_{H_2}(p = 1000 \text{ bar}) = C_{H_2}(p = 14.2 \text{ bar}) \cdot \sqrt{\frac{\rho_{2real}^*}{\rho_{2ideal}^*}}$$

Die Ermittlung des Dichteverhältnisses führt zu einer Korrektur von

$$\sqrt{\frac{\rho_{2real}^*}{\rho_{2ideal}^*}} = 0.86$$

$$C_{H_2}(1000 \text{ bar}) = 1.086782 \cdot 10^{-7} \frac{m^4 \cdot s}{kg}$$

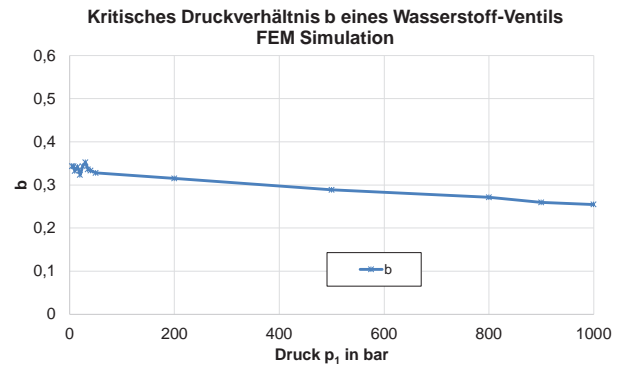
Der Leitwert C_{H_2} im überkritischen Strömungsbereich wurde für ein Wasserstoffventil bei verschiedenen Eingangsdrücken bis zu einem Druck $p_1 = 1000$ bar mit dem Realgas-Materialgesetz von Soave-Redlich-Kwong mit Hilfe von FEM-Simulationen ermittelt, **Bild 10 und 11**.

Die Abweichung zwischen Simulation und Berechnung mit der Wurzel aus dem Dichteverhältnis im engsten Querschnitt beträgt bei 1000 bar 3.2 %, **Bild 11**. Da der Zusammenhang nahezu linear ist, lässt sich mit einem Korrektur-Faktor als Näherung arbeiten, **Bild 12**.

6. DAS KRITISCHE DRUCKVERHÄLTNISS b IM HOCHDRUCKBEREICH

Das kritische Druckverhältnis b wurde im Niederdruckbereich auf experimentellem Weg und mit Hilfe von FEM-Simulationen er-

13 Ermittlung des kritischen Druckverhältnisses b eines H_2 -Ventils mit Hilfe einer FEM-Simulation bis zu einem Druck von $p_1 = 1000$ bar



mittelt, **Bild 06 und 07** (s. Teil 1 in der Ausgabe O+P-Fluidtechnik 07-08/2023). Mit Hilfe der Realgasdaten lässt sich eine Annäherung finden für das kritische Druckverhältnis bei sehr hohem Druck. Dies soll an einem Beispiel erläutert werden.

Das kritische Druckverhältnis b charakterisiert den Übergang vom überkritischen Strömungsbereich in den unterkritischen Bereich. Dieser Parameter des Modells umfasst sowohl die geometrische Gestaltung der Komponente als auch die Eigenschaften des Gases. Aus experimenteller Sicht wird darauf hingewiesen, dass dieser Übergang fließend ist und damit auch fehlerbehaftet. Es sind Abweichungen möglich im Bereich von $\Delta b = \pm 0.1$. Der Einfluss auf die Kennlinie ist jedoch deutlich geringer gegenüber dem Leitwert C . Ein fehlerhafter Leitwert C führt sofort zu einer sichtbaren Änderung der Kennlinie.

Da eine Messung am Ventil bei einem Eingangsdruck von $p_1 = 1000$ bar bisher nicht möglich war, beziehen wir uns auf eine Reihe aussagekräftiger FEM-Simulationen, die bei verschiedenen Eingangsdrücken durchgeführt wurden. Im Ergebnis jeder Simulation wurde bei verschiedenen Drücken p_1 das kritische Druckverhältnis ermittelt, welches in **Bild 13** dargestellt wurde.

Im Eingangsdruckbereich bis $p_1 = 50$ bar kommt es zu geringfügigen Streuungen, die darauf zurückzuführen sind, dass die Strömung in diesem Druckbereich nicht stabil ist. Ab $p_1 = 50$ bar bis 1000 bar ist eine nahezu lineare Abhängigkeit erkennbar. Wie kann dieser Verlauf erklärt werden?

Dazu verwenden wir den kritischen Druckverlauf des „idealen“ b -Wertes, der für Wasserstoff als reales Gas ermittelt werden kann nach Gl. (9), **Bild 14**.

Aus einem Vergleich von **Bild 13** und **14** wird ersichtlich, dass das kritische Druckverhältnis für das reale Gas Wasserstoff ohne Simulation, d. h. ohne Geometrieinfluss, **Bild 14**, einen ähnlichen Verlauf aufweist, wie das mit Hilfe von FEM berechnete kritische Druckverhältnis, **Bild 13**. Die Ergebnisse der FEM-Simulation, **Bild 13**, berücksichtigen sowohl den Geometrieinfluss des Ventils als auch den Einfluss des realen Gases. Eine Näherung bietet sich an, indem der Verlauf des kritischen Druckverhältnisses mit Hilfe eines Korrekturfaktors berücksichtigt wird, **Bild 15**.

Mit dieser Korrektur wird in Abhängigkeit vom Druck p_1 das Verhalten des realen Gases berücksichtigt. Für einen Druck von

Tabelle 02: Zustandsgrößen von H_2 im engsten Querschnitt für $p_1 = 1000$ bar, $R_{H_2} = 4124 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Im engsten Querschnitt	Zustandsgrößen	H_2 Reales Gas /15/	H_2 Ideales Gas mit Gl. (18)
Druck p_2^*	$p_2^* = 442.8 \text{ bar}$	$\rho_2^* = 34.10 \text{ kg} / \text{m}^3$	$\rho_{2ideal}^* = 46.00 \text{ kg} / \text{m}^3$
Temperatur T_2^*	$T_2^* = -39.7 \text{ }^\circ\text{C}$		

Tabelle 03: Zustandsgrößen von H₂ im engsten Querschnitt für p₁ = 500 bar, R_{H2} = 4124 J/kg · K

Im engsten Querschnitt	Zustandsgrößen	H ₂ Reales Gas /15/	H ₂ Ideales Gas mit Gl. (18)
Druck p ₂ [*]	p ₂ [*] = 238.5 bar	ρ ₂ [*] = 20.73 kg / m ³	ρ _{2ideal} [*] = 24.39 kg / m ³
Temperatur T ₂ [*]	T ₂ [*] = -36.1 °C		

p₁ = 1000 bar wird eine maximale Abweichung von 6.7 % ermittelt. Dieser Wert ist akzeptabel, da eine geringfügige Verschiebung des Übergangs zwischen überkritischem und unterkritischem Strömungsbereich einen deutlich geringeren Einfluss auf die Durchflusscharakteristik hat im Vergleich zum kritischen Leitwert C. Wenn genauere Angaben für C und b im Hochdruckbereich erforderlich sind, wird die iterative Ermittlung der Zustandsgrößen im engsten Querschnitt, Bild 09, empfohlen.

BEISPIEL 2

Gegeben:

$$C_L = 5.034 \cdot 10^{-8} \frac{m^4 \cdot s}{kg}$$

und b = 0.294 für Luft bei p₁ = 7.5 bar (abs.) und T = 20 °C.

Gesucht wird der maximale Massenstrom H₂ bei p₁ = 500 bar und T = 20 °C.

Mit Gl. (15) erhält man den C - Wert für Wasserstoff bei 14.2 bar:

$$C_{H_2} = C_L \cdot 3.786 = 1.906 \cdot 10^{-7} \frac{m^4 \cdot s}{kg}$$

Im nächsten Schritt wird die Korrektur für den Druck von 500 bar ermittelt mit Hilfe der Zustandsgrößen im engsten Querschnitt, **Tabelle 03**, nach Flussdiagramm Bild 09.

$$\sqrt{\frac{\rho_{2real}^*}{\rho_{2ideal}^*}} = 0.92$$

oder mit der Näherung, Bild 12, führt dies zu einem Korrekturwert von 0.93

$$C_{H_2}(500bar) = C_{H_2} \cdot 0.93 = 1.7726 \cdot 10^{-7} \frac{m^4 \cdot s}{kg}$$

Für das kritische Druckverhältnis b kann folgende Näherung verwendet werden, Bild 15.

$$b = 0.86 \cdot 0.294 = 0.253$$

Der überkritische Massenstrom ergibt sich nach Gl. (4) zu

$$\dot{m}_{H_2} = 732.6 \frac{g}{s}$$

wobei die Temperaturkorrektur entfällt und für die Dichte

$$\rho_{H_2} = 0.08266 \frac{kg}{m^3}$$

verwendet wurde. Für unterkritische Strömungsverhältnisse erhält man mit Gl. (5), in Abhängigkeit vom jeweiligen Druckverhältnis p₂/p₁, den entsprechenden Massenstrom.

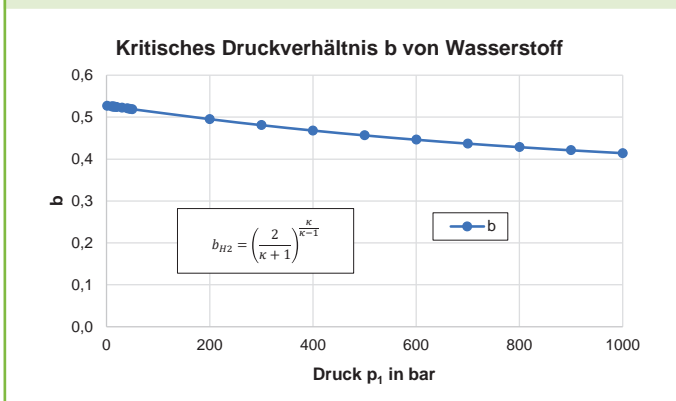
7. VERGLEICH C, B- MODELL UND K_v-WERT

Das C, b-Modell hat den Vorteil, dass es die gewünschte Massenstrom-Kennlinie eines Ventils in Abhängigkeit vom Druckverhältnis im gesamten Arbeitsbereich abbilden kann. Diese Kenntnis vom Massenstrom ist insbesondere für Wasserstoff-Applikationen, wie z. B. bei der Auslegung von Wasserstoff-Tankstellen von grösster Wichtigkeit. Für eine erste Abschätzung können die Korrekturwerte, Bild 12 und Bild 15 verwendet werden. Ein K_v-Wert bietet diesen Vorteil nicht. Zudem führt dieser zu einem Volumenstrom, der dann mit der Dichte in einen Massenstrom umgerechnet werden muss. Die Berechnung eines Massenstroms mit Hilfe des K_v-Wertes kann bis zu einer Abweichung von 20 % gegenüber dem C, b-Modell führen.

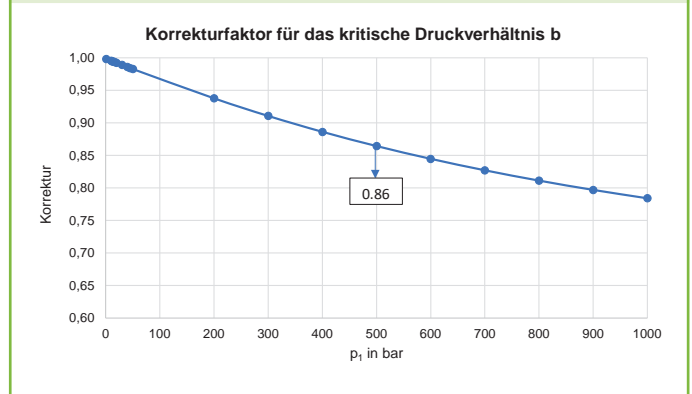
Tabelle 04: Vor- und Nachteile beider Modell-Ansätze in der Gegenüberstellung

Nachteile / Vorteile	k _v - Wert	C, b-Modell
Durchfluss Luft	Beschreibt einen Volumendurchfluss, der anschließend in einen Massenstrom umgerechnet werden muss; ein Volumenstrom, der mit k _v berechnet wird, ist auch vom Vordruck abhängig	Beschreibt einen Massenstrom, ohne den "Umweg" über einen Volumenstrom; der C und b-Wert ist im Niederdruckbereich unabhängig vom Vordruck
Kennlinie Luft	Das kritische Druckverhältnis, meist als konstant angenommen mit b = 0.5, schränkt die Gültigkeit stark ein	Gültig für alle möglichen Ventil-Bauformen; b wird experimentell (oder mit FEM-Simulation) im Niederdruckbereich ermittelt
Übertragbarkeit auf Gase im Niederdruck	VDI/VDE 2173 /4/ möglich, jedoch umständlich	Einfach handhabbar
Übertragbarkeit in den Hochdruckbereich	Mit Gleichungen nach /4/ nur punktuell möglich	Mit Realgasdaten für den ganzen Kennlinienbereich
Druckabfall über dem Ventil	Nach VDI/VDE 2173 /4/ nicht möglich, da Kennlinien über das Verhältnis vom Ventilhub dargestellt werden	Einfache Ermittlung aus der Kennlinie Δp = p ₁ (1 - p ₂ /p ₁)

14 Kritisches Druckverhältnis b auf Basis der Realgaseigenschaften von Wasserstoff ohne Geometrieinfluss



15 Korrekturfaktor für das kritische Druckverhältnis b für H_2 im Druckbereich bis 1000 bar



8. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde der Weg aufgezeigt vom K_v -Wert bis hin zum C, b-Modell für Gase im Hochdruckbereich.

In **Tabelle 04** sollen einige Vor- und Nachteile beider Modellansätze gegenübergestellt werden.

AUSBLICK

Die Ergebnisse vom Massenstrom von gasförmigem Wasserstoff durch Ventile bis zu einem Druck von 1000 bar wurden ausschliesslich mit Hilfe von FEM-Simulationen mit ANSYS CFX ermittelt. In Zukunft sind auf diesem Gebiet weitere Entwicklungsarbeiten zu erwarten. Daher sollten experimentelle Daten im Hochdruckbereich diese hier vorgelegten Ergebnisse komplettieren.

Bilder: Eugen Seitz AG

www.seitzhydrogen.ch

Literaturhinweise:

- /1/ Früh, K. F.: Berechnung des Durchflusses in Regelventilen mit Hilfe des „ K_v - Koeffizienten“. - In: Regelungstechnik, München 5. Jahrgang (1957) - S. 307 bis 310
- /2/ Masoneilan Control Valve Sizing Handbook. Bulletin OZ1000 7/00. <https://dokumen.tips/documents/masoneilan-control-valve-sizing-handbook-supplement-to-masoneilan-control.html?page=3>
- /3/ Wiedmann, P.: Über das Durchflussvermögen pneumatischen Komponenten. - In: Ölhdraulik und Pneumatik, Mainz 23 (1979) 2. - S. 105 - 110.
- /4/ VDI/VDE-Richtlinien 2173, August 2022
- /5/ DIN 1343 - Januar 1990 - Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen. Begriffe und Werte.
- /6/ Haack, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Aussagefähigkeit strömungstechnischer Kenngrösse an ausgewählten Strukturen pneumatischer Steuerventile. Dissertation 1991, Universität Erfurt, mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät
- /7/ ISO 6358 - 1989-10-01 Pneumatic fluid Power - Components using compressible fluids - Determination of flow characteristics
- /8/ ISO 6358-1 Pneumatic fluid power - Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids - Part 1: General rules and test methods for steady state flow. First Edition 2013-05-15
- /9/ Murrenhoff, H.: Grundlagen der Fluidtechnik, Teil 2: Pneumatik, 2. Aufl. Shaker-Verlag, Aachen, 2006
- /10/ Ramsperger, M.: Entwurf einer aktiven Ventil-Regler-Einheit für den Betrieb mit gasförmigem Wasserstoff bis 87,5 MPa zum Einsatz in Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der TU Ilmenau, im Jahr 2014. In: Berichte aus dem Maschinenbau, Shaker Verlag Aachen 2014.
- /11/ Ramsperger M., Pasieka, L.: Zur Anwendbarkeit des Massenstrom-Modells nach ISO 6358 mit den Kennwerten Leitwert C und kritisches Druckverhältnis b für Gase im Hochdruckbereich bis 300 bar. In: Forschung im Ingenieurwesen, 2014, DOI 10.1007/s10010-014-0177-7
- /12/ ISO 6358-2 Pneumatic fluid power - Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids - Part 2: Alternative test method - Second Edition 2019-08

/13/ ISO 6358-3 Pneumatic fluid power - Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids - Part 3: Method for calculating steady-state flow-rate characteristics of Systems - First Edition 2014-10-01

/14/ Bohl, Willi: Technische Strömungslehre. - 12., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage; Würzburg: Vogel Verlag 2001; ISBN 3-8023-1740-8, (Kamprath-Reihe), Seite 321

/15/ Kretzschmar, H.-J.; Kunick, M.; Herrmann, S.: Property Calculation Libraries for Thermodynamic and Transport Properties of Working Fluids in Power Engineering. KCE-ThermoFluidProperties, Dresden (2023), available at www.thermofluidprop.com

/16/ Kretzschmar, H.-J.; Kraft, I.: Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 2016, 5., aktualisierte Auflage, Seite 37

/17/ Isobaric properties for hydrogen - NIST <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

Formelzeichen

A	[m ²]	Querschnittsfläche
b	[-]	Kritisches Druckverhältnis
C	[m ⁴ ·s/kg], [Nl/s·bar]	Leitwert im überkritischen Bereich nach ISO 6358
C _e	[m ⁴ ·s/kg], [Nl/s·bar]	Leitwert durch eine Komponente (Ventil, Drossel, etc.)
C _v	[Gallone (US)/Minute]	Amerikanischer C _v -Factor
c _p	[kJ/kg·K]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c _v	[kJ/kg·K]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
h	[kJ/kg]	Spezifische Enthalpie
K _v	[m ³ /h]	Durchflusskoeffizient (K _v -Wert)
k	[-]	Isentropenexponent des Fluids
\dot{m}	[g/s], [kg/s], [kg/h]	Massenstrom
p	[Pa], [bar]	Druck
Δp	[Pa], [bar]	Differenzdruck
R	[J/kg·K]	Gaskonstante
T	[K], [°C]	Temperatur
v	[m ³ /kg]	Spezifisches Volumen
w	[m/s]	Geschwindigkeit
ψ	[-]	Ausflussfunktion für Gase
Q	[m ³ /h]	Volumendurchfluss
ρ	[kg/m ³]	Dichte
α	[-]	Strahlkontraktionszahl
φ	[-]	Geschwindigkeitsziffer