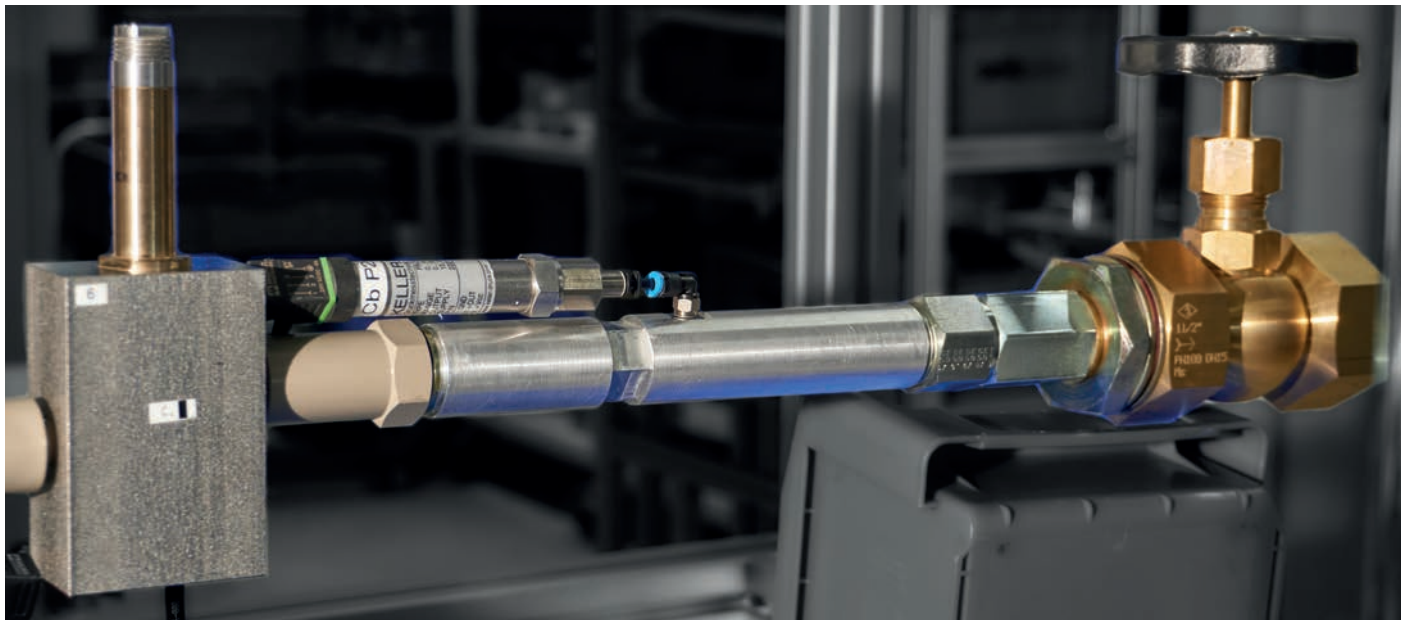


# C, b-MASSENSTROM-MODELL FÜR GASE IM HOCHDRUCKBEREICH – TEIL 1



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, etwa für Wasserstofftankstellen (Bilder 01 und 02).

## 1. $K_v$ -WERT – EIN HISTORISCHER RÜCKBLICK

Im Jahr 1957 machte Früh /1/ die deutschsprachige Fachwelt zum ersten Mal mit einem Durchflusswert, dem  $K_v$ -Wert, bekannt, der eng an den amerikanischen „ $C_v$ -factor“ angelehnt ist. Dieser wurde von der Mason-Neilan Regulator Company in den 1940iger Jahren eingeführt und erstmals verwendet /2/. Per Definition beschreibt der Durchflusskoeffizient  $C_v$  die Anzahl der US-Gallonen<sup>1</sup> pro Minute Wasser bei  $T = 60^\circ\text{F}$ , die durch eine gegebene Durchflussdrossel bei einem Druckabfall von einem PSI<sup>2</sup> strömen. Der Vorschlag von Früh /1/ den Begriff  $K_v$ -Wert im deutschen Sprachraum einzuführen, hat wohl in der Fachwelt für Verwirrung gesorgt, denn es war die Rede von einem „Koeffizienten“, der üblicherweise keine Masseinheit besitzt (die Abkürzung „ $K_v$ “ bezieht sich auf die Anfangsbuchstaben der Wörter Ventil und Koeffizient), wie Wiedmann /3/, später erklärte.

## 2. $K_v$ -WERT FÜR INKOMPRESSIBLE FLUIDE (FLÜSSIGKEITEN)

Der  $K_v$ -Wert ist ein spezifischer Durchfluss bei einem Druckunterschied von einem bar. Mit dem gemessenen Volumenstrom  $Q$ , der statischen Druckdifferenz von  $\Delta p_w = 1$  bar, dem gemessenen statischen Differenzdruck über dem Ventil  $\Delta p$  in bar, der Dichte des Mediums  $\rho$ , sowie der Dichte für Wasser  $\rho_w$  bei  $15^\circ\text{C}$ , erhält man nach /4/ den  $K_v$ -Wert, gültig für turbulente Strömung, Gl. (1).

$$K_v = Q \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_w}{\Delta p} \cdot \frac{\rho}{\rho_w}} \quad \text{in} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (1)$$

<sup>1</sup> 1 US liquid gallon = 3.78541 Liter

<sup>2</sup> 1 Pound per square inch (PSI) = 0.0689476 bar

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

### 3. $K_v$ -WERT FÜR KOMPRESSIBLE FLUIDE (GASE)

Beim  $K_v$ -Wert für Gase muss berücksichtigt werden, dass Gase kompressibel sind. Ausserdem gibt es eine physikalisch gegebene Begrenzung vom Durchfluss durch die Schallgeschwindigkeit im engsten Querschnitt, die nicht überschritten werden kann. Daher unterscheidet man bei einer Gasströmung einen unterkritischen Bereich (Geschwindigkeit < Schallgeschwindigkeit) und einen überkritischen Bereich (Geschwindigkeit = Schallgeschwindigkeit) im engsten Querschnitt. Zur Kennzeichnung dieses Überganges wird der Parameter  $b$  verwendet, der als kritisches Druckverhältnis  $b$  bezeichnet wird.

Die Gleichungen für den  $K_v$ -Wert für Gase werden unter Verwendung der allgemeinen Zustandsgleichung für Gase, der DIN 1343 /5/ sowie der allgemeinen Durchflussgleichung berechnet, vgl. /6/.

$$K_v = \frac{\dot{Q}_N \cdot \sqrt{T_1}}{\sqrt{p_2 \cdot \Delta p}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_N \cdot \Delta p_w \cdot p_N}{\rho_w \cdot T_N}}$$

für  $b \leq \frac{p_2}{p_1} \leq 1$  (unterkritisch) (2)

$$K_v = \frac{2 \cdot \dot{Q}_n \cdot \sqrt{T_1}}{p_1} \cdot \sqrt{\frac{\rho_N \cdot \Delta p_w \cdot p_N}{\rho_w \cdot T_N}}$$

für  $0 \leq \frac{p_2}{p_1} \leq b$  (überkritisch) (3)

Mit den Gleichungen (2) und (3) werden „ideale“  $K_v$ -Werte angegeben, da die nur schwer fassbaren Einflüsse der Energiedissipation und Strahleinschnürungen, wie sie in der Praxis auftreten, vernachlässigt wurden, /6/. Es kommen weitere Einschränkungen hinzu, indem das kritische Druckverhältnis auf den Wert  $b = 0.5$  festgelegt wurde, was in den meisten Fällen nicht der Realität entspricht.

Die Werte für das kritische Druckverhältnis in Ventilen können im Bereich von  $b = 0.2 \dots 0.7$  liegen. Ventile mit grossen Druckverlusten (Umlenkungen usw.) haben eher kleinere Werte, hingegen strömungsgünstigere, Diffusor-ähnliche Geometrien, weisen Werte  $b > 0.5$  auf.

Es kann festgestellt werden, dass es deutlich mehr Nachteile bei der Verwendung von  $K_v$ -Werten für Luft gibt, da ein zweiter Parameter fehlt und daher sollten  $K_v$ -Werte bei der Auswahl von Ventilen für Gase nicht verwendet werden. Es empfiehlt sich die Verwendung eines Modells, welches die Besonderheiten der Gasströmungen berücksichtigt.

### 4. C, B-MODELL FÜR KOMPRESSIBLE FLUIDE (GASE)

Das Massenstrom-Modell für Luft ist nach ISO 6358, siehe /7/ Anhang C, oder /8/ Gl. (E.5) und (E.6) mit den Standardbedingungen

$$\rho_0 = 1.185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ und } T_0 = 293.15 \text{ K}$$

mit Gl. (4) und (5) vollständig definiert, /9/.

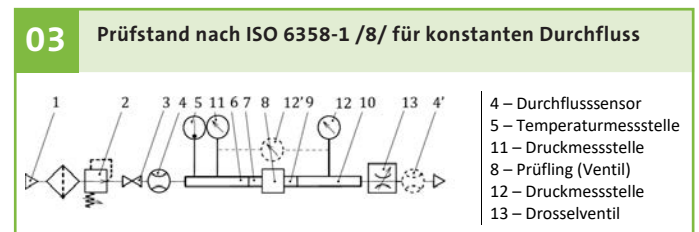
$$\dot{m} = p_1 \cdot C \cdot \rho_0 \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$$

für  $0 \leq \frac{p_2}{p_1} \leq b$  überkritisch (4)

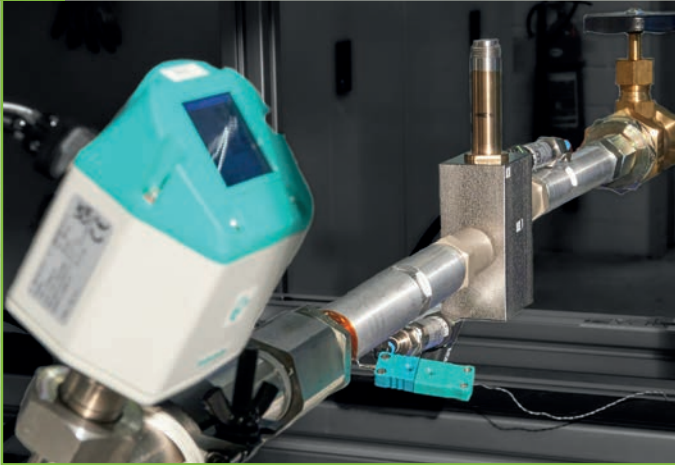
$$\dot{m} = p_1 \cdot C \cdot \rho_0 \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{p_2 - b}{1 - b} \right)^2}$$

für  $b \leq \frac{p_2}{p_1} \leq 1$  unterkritisch (5)

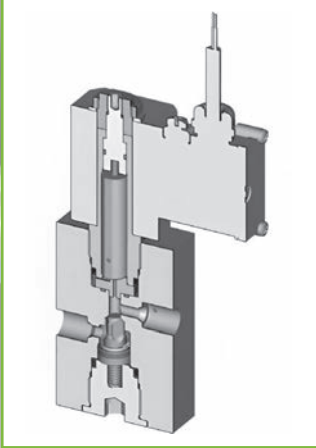
Dieses Modell enthält zwei Parameter, den Leitwert  $C$  im überkritischen Strömungsbereich und das kritische Druckverhältnis  $b$ , siehe Gl. (4) und (5). Der kritische Leitwert  $C$  beinhaltet das Maximum der Strömungsfunktion  $\psi_{max}$  sowie die Querschnittsfläche  $A_2$  und die strömungsmindernden Effekte (Reibung, Wandreibung, Stromeinschnürung, Verengungen, Umlenkungen, Geschwindigkeitsverluste), siehe Gl. (6) und (8), siehe Abschnitt 5. Mit dem Verhältnis  $(T_0/T_1)^{0.5}$  wurde das Massenstrom-Modell unabhängig von der Temperatur formuliert, bei dem der Leitwert  $C$  gemessen wurde. Der Leitwert  $C$ , der bei einer Temperatur  $T_1$  er-



04 Messaufbau C, b – Prüfstand mit H2-Ventil DN6 – 1000bar



05 Querschnitt H2-Ventil DN6 – 1000bar



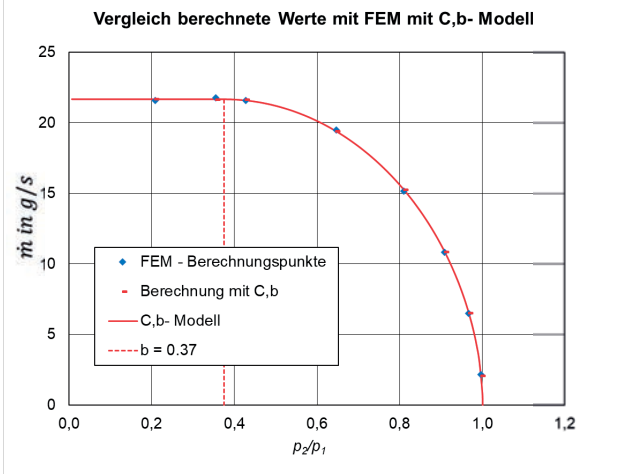
mittelt wurde, wird daher mit der Temperatur  $T_0$  als Bezugsgröße in Beziehung gesetzt, um den Massenfluss bei jeder Temperatur  $T_1$  berechnen zu können. Die Gleichungen (4) und (5) sind nur für ein ideales Gas gültig. Sie lassen sich jedoch auf reale Gase erweitern mit Hilfe der Simulation.

Im folgendem wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der C, b-Werte für ein Wasserstoff-Ventil anhand einer Finite-Elemente Berechnung mit ANSYS CFX Version 2022 R2 gezeigt. Zunächst wird die Simulation mit Luft analog zur Messung an einem Prüfstand durchgeführt, **Bilder 03 - 05**.

06 Ergebnisse der FEM-Simulation mit Luft als ideales Gas

$$C = 2.63E-8 \text{ m}^4 \cdot \text{s} / \text{kg}$$

$$b = 0.37$$



07 Ergebnisse der Messungen mit Luft im Vergleich zur FEM-Simulation

$$C = 2.63E-8 \text{ m}^4 \cdot \text{s} / \text{kg}$$

$$b = 0.49 \text{ (Messwerte) und } b = 0.37 \text{ (FEM-Simulation)}$$

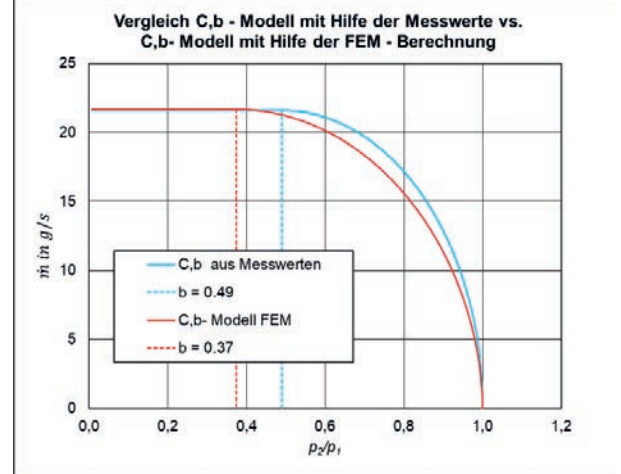


Tabelle 01: Zur Berechnung der C, b-Werte mit Hilfe der FEM-Analyse mit Luft nach ISO 6358-1 /8/

Einlass [bar]	Auslass [bar]	Messstelle 11 $p_1$ [bar]	Messstelle 12 $p_2$ [bar]	$\dot{m}$ [g/s]	$p_2/p_1$ [-]	$T_1$ [K]	$C$ [ $\text{m}^4 \cdot \text{s} / \text{kg}$ ]	$C_e$ [ $\text{m}^4 \cdot \text{s} / \text{kg}$ ]	$C_e/C$ [-]
6.96	1.43	6.957	1.45	21.6	0.208	293	2.620E-08		
6.96	2.46	6.951	2.47	21.8	0.355	293	2.646E-08		
6.96	2.96	6.950	2.97	21.6	0.427	293	2.622E-08		
6.96		6.952	4.49	19.5	0.646	293		2.366E-08	0.9001
6.96		6.955	5.63	15.2	0.810	293		1.840E-08	0.6997
6.96		6.958	6.32	10.8	0.908	293		1.314E-08	0.4996
6.96		6.959	6.73	6.5	0.967	293		7.880E-09	0.2997
6.96		6.960	6.93	2.2	0.996	293		2.626E-09	0.0999



Der Einlassdruck wird auf einem Wert von  $p = 6.96$  bar (abs.) konstant gehalten. Es werden acht Ergebnisse einer FEM-Berechnung benötigt zur Ermittlung der Parameter  $C$  und  $b$ , (**Tabelle 01**).

In **Bild 06 und 07** sind die Kennlinien als durchgezogenen Linien dargestellt. Es ist ersichtlich, dass es nur geringe Unterschiede gibt zwischen Simulation und Messung am Prüfstand in Bezug auf den Leitwert  $C$  und damit auf den Massenstrom. Beim kriti-

## „KV-WERTE SOLLTEN BEI DER AUSWAHL VON VENTILEN FÜR GASE NICHT VERWENDET WERDEN

schen Druckverhältnis sind jedoch Unterschiede zu erwarten. Sie sind darauf zurückzuführen, dass es sich beim kritischen Druckverhältnis  $b$  in Realität um einen Übergangsbereich handelt. Bei der messtechnischen Erfassung vergrößert sich der Unsicherheitsfaktor, wenn der Druckabfall geringer wird, da hier die Messunsicherheit bei der Druck- und Volumenstrommessung zunimmt. Von Haack /6/ wurde aufgezeigt, dass bei der messtechnischen Ermittlung vom kritischen Druckverhältnis  $b$  Abweichungen bis zu  $\Delta b = \pm 0.1$  auftreten können.

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

**Bilder:** Bild 01: scharfsimm86 – stock.adobe.com; sonstige: Eugen Seitz AG

www.seitzhydrogen.ch

### Formelzeichen

$A$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche
$b$	[-]	Kritisches Druckverhältnis
$C$	[m <sup>4</sup> ·s/kg], [NI/s·bar]	Leitwert im überkritischen Bereich nach ISO 6358
$C_e$	[m <sup>4</sup> ·s/kg], [NI/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 <sup>3</sup> /h]	Durchflusskoeffizient ( $K_v$ -Wert)
$k$	[-]	Isentropenexponent des Fluids
$\dot{m}$	[g/s], [kg/s], [kg/h]	Massenstrom
$p$	[Pa], [bar]	Druck
$\Delta p$	[Pa], [bar]	Differenzdruck
$R$	[J/kg·K]	Gaskonstante
$T$	[K], [°C]	Temperatur
$w$	[m/s]	Geschwindigkeit
$\psi$	[-]	Ausflussfunktion für Gase
$Q$	[m <sup>3</sup> /h]	Volumendurchfluss
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$a$	[-]	Strahlkontraktionszahl
$\varphi$	[-]	Geschwindigkeitsziffer

### Literaturhinweise:

- /1/ Früh, K. F.: *Berechnung des Durchflusses in Regelventilen mit Hilfe des „Ku- Koeffizienten“*. - In: *Regelungstechnik*, München 5. Jahrgang (1957) - S. 307 bis 310
- /2/ *Masonellan Control Valve Sizing Handbook*. Bulletin OZ1000 7/00. <https://dokumen.tips/documents/masonellan-control-valve-sizing-handbook-supplement-to-masonellan-control.html?page=3>
- /3/ Wiedmann, P.: *Über das Durchflussvermögen pneumatischen Komponenten*. - In: *Ölhydraulik 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 Kenngrößen 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., Pasięka, 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/ Kretschmar, 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](http://www.thermofluidprop.com)
- /16/ Kretschmar, 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/>

### Indizes

0	Standardbedingungen für Luft nach ISO 6358: $T_0 = 293.15$ K; $p_0 = 1$ bar; $\rho_0 = 1.185 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ; $R = 288 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ; relative Feuchte 65%
1	Zustand vor dem Drosselement
2	Zustand nach dem Drosselement
abs.	Absolut(druck)
*	Überkritische Strömungsbedingungen ( $w = w_{\text{Schall}}$ bei $p_2/p_1 \leq b$ )
max	Maximalwert
L	Luft
N	Normzustand nach DIN 1343 ( $p = 760$ Torr = 1.01325 bar; $T = 273.15$ K)
$H_2$	Gasförmiger Wasserstoff (Normalwasserstoff im Einphasengebiet)
w	Wasser
v	Verlust (Druckverlust)
i	Iterationsschritt
ideal	ideal – als ideales Gas berechnet
krit	kritisch
real	real – als reales Gas berechnet
Schall	Schallgeschwindigkeit