

Betriebsverhalten von Sicherheitsventilen mit konstantem Fremdgedruck

Author: Dipl.-Ing. (FH) Arne Gastberg, Albert Richter ARI-Armaturen GmbH & Co. KG

Bei der Auswahl federbelasteter Sicherheitsventile spielt insbesondere die Kenntnis und Berücksichtigung der individuellen Einsatzbedingungen eine wesentliche Rolle für die zuverlässige Funktion. Hierbei steht im Zuge der Ressourcenoptimierung eine sichere Arbeitsweise der Anlagenkomponenten auch unter Ausnutzung bis hin zu physikalischen Grenzen immer stärker im Fokus des Anlagenbetreibers.

Bei der Auslegung eines Sicherheitsventils muss neben den üblichen Parametern zur Dimensionierung auch die Existenz eines Gegendruckes beachtet werden. In dem vorliegenden Bericht soll dabei die Funktion eines Sicherheitsventils dargestellt werden, wenn ein konstanter Fremdgedruck in der Abblaseleitung vorhanden ist und damit gegen die Öffnungsrichtung des Sicherheitsventils wirkt.

Einleitung

Das federbelastete Sicherheitsventil ist das Ventil, welches automatisch ohne Unterstützung durch eine andere Energie als die des jeweiligen Mediums eine Menge des Mediums ausfließen lässt, so dass die Überschreitung eines vorbestimmten Drucks verhindert wird. Es wird so ausgelegt, dass es schließt und weiteres Austreten des Mediums verhindert, nachdem wieder normale Arbeitsbedingungen hergestellt sind. [2, S. 4] Dadurch hat es als letzte Sicherung in der technischen Anlage eine besondere Aufgabe, die absolut störungsfrei erfüllt werden muss.

Wesentlich für die Funktion sind die sorgfältige Auslegung des Anlagenplaners und die fachgerechte Ausführung der gesamten Anlageninstallation. Im Sicherheitsventil selber ist es wichtig, dass die Feder(n) und der Kegel (Abschlusskörper) bei ihrer Arbeit (Hub) nicht gestört werden. Sollte dieser Zustand eintreten und der erforderliche Hub eingeschränkt, behindert oder blockiert sein, könnte dies zu einem verzögerten Ansprechen, Flattern, geringerer Leistung oder generell einer Funktion außerhalb der nach den Regelwerken zulässigen Grenzen geben. Die Sicherheit der Gesamtanlage wäre in diesem Fall nicht mehr gewährleistet.

Sicherheitsventile, welche nach den europäischen oder amerikanischen Regelwerken zugelassen sind, unterliegen einer strengen Normierung und Bauteilüberwachung. Die von der Firma ARI-Armaturen hergestellten Sicherheitsventile sind unter anderem nach DIN EN ISO 4126 [5] und ASME VIII Div. 1 [7] zugelassen.

Hintergrund

Die Kräftebilanz eines federbelasteten Sicherheitsventils lässt sich unter Berücksichtigung der Gleichung [8, S. G28]

$$p = \frac{F}{A} \tag{1}$$

vereinfacht ausdrücken als

$$F_{Druck} < F_{Federkraft} \quad \text{Sicherheitsventil geschlossen} \tag{2}$$

$$F_{Druck} > F_{Federkraft} \quad \text{Sicherheitsventil öffnet/offen} \tag{3}$$

Dies bedeutet, wenn der Druck (und damit die Kraft unter dem Kegel) im Druckbehälter größer wird als die Kraft welche den Kegel auf den Sitz (Düse) drückt, öffnet das Ventil. Hierbei unterscheidet man im Wesentlichen zwei verschiedene Arten von Ansprechen: schlagartig (schnelles Öffnen) oder nahezu stetig (aber nicht unbedingt lineares Öffnen). [2, S. 4]

Während das Betriebsverhalten von federbelasteten Sicherheitsventilen mit einem sich aufbauenden Eigengegendruck schon im Rahmen von [1] ausführlich untersucht worden ist, soll es bei den folgenden Untersuchungen um das Betriebsverhalten bei vorgegebenem konstantem Fremdgedruck und einer Einstellung nach Kalt-Einstelldruck (CDTP, Cold-Differential-Test-Pressure) gehen.

Abbildung 1

Hierbei sind im Wesentlichen zwei Fragestellungen zu beantworten, die den Planer und Anlagenbetreiber interessieren:

- a) Welchen Einfluss hat die Existenz von konstantem Fremdgedruck auf die Auslegung eines federbelasteten Sicherheitsventils?
- b) Wie wirkt sich ein vorhandener konstanter Fremdgedruck auf die Funktion (Öffnungsdruckdifferenz, Schließdruckdifferenz), Leistung und Dichtheit des Sicherheitsventils aus beziehungsweise inwieweit beeinflusst eine Einstellung nach Kalt-Einstelldruck die Funktionscharakteristik des Sicherheitsventils?

Bei der Definition des Gegendrucks unterscheidet man bei Sicherheitsventilen zwischen Eigengegendruck (amerikanisch: Built-up back pressure) und Fremdgedruck (Superimposed back pressure). Das Vorliegen eines Gegendruckes setzt dabei u. U. die Verwendung eines Metall-Faltenbalges voraus (siehe Kapitel 2.4).

Eigengegendruck

Überdruck in der Abblaseleitung des Sicherheitsventils, der sich beim Abblasen (Öffnen) aufbaut, er tritt demzufolge variabel auf.

Fremdgedruck

Überdruck, der bereits vor dem Abblasen des Sicherheitsventils in der Abblaseleitung vorherrscht. Er kann konstant oder variabel auftreten.

Die Gleichungen (2) und (3) verändern sich bei Existenz eines Fremdgedruckes wie folgt (siehe auch Abb. 2):

Abbildung 2

$$F_{Druck} < F_{Federkraft} + F_{Fremdgedruck} \quad \text{Sicherheitsventil geschlossen} \quad (4)$$

$$F_{Druck} > F_{Federkraft} + F_{Fremdgedruck} \quad \text{Sicherheitsventil offen} \quad (5)$$

Beim geschlossenen Sicherheitsventil wirkt der Fremdgedruck damit zusätzlich in Schließrichtung auf den Kegel gegen den Behälterdruck.

$$F_{Ansprechdruck} = F_{Federvorspannung} + F_{Fremdgedruck} \quad (6)$$

Das bedeutet, bei der Einstellung der Druckfeder muss diese zusätzliche Kraft berücksichtigt und die Druckfeder dementsprechend schwächer vorgespannt werden. [6, S. 17] Da das Sicherheitsventil sonst bei einem zu hohen Druck, nämlich bei der Summe nach Gleichung (6), ansprechen würde.

Einstellung nach CDTP

Das in Kapitel 2.2 beschriebene Vorgehen ist üblich bei der Auslegung und Einstellung von amerikanischen Sicherheitsventilen nach API/ASME [6, S. 25] und wird als „Einstellung nach CDTP“ bezeichnet.

$$CDTP = F_{\text{Federvorspannung}} - F_{\text{Fremdgedruck}} \tag{7}$$

Im europäischen Regelwerk DIN EN ISO 4126 [2, S. 5] erfolgt der Hinweis, dass der Kalt-Einstelldruck gegebenenfalls Korrekturen für Gegendruck und Temperatur beinhalten kann. Aber wie wirkt sich dieses Vorgehen auf das Betriebsverhalten des Sicherheitsventils aus? Hierzu wurden umfangreiche Messungen auf dem Leistungsprüfstand (Luft) der Albert Richter ARI-Armaturen GmbH & Co. KG gemacht (vgl. Kapitel 6).

Hinweis: Die Korrektur des Einstelldruckes, wenn im Betriebszustand des Sicherheitsventils eine Temperatur deutlich über der Raumtemperatur beim Einstellen herrscht, welche ebenfalls über CDTP vorgenommen wird, ist nicht Gegenstand dieses Berichts.

Gegendruckkompensation durch einen eingebauten Metall-Faltenbalg

Der Gegendruck kann durch den Einbau eines Metall-Faltenbalges kompensiert werden (vgl. Abb. 3). Für eine optimale Funktion, sollte der mittlere Faltenbalg-Durchmesser möglichst gleich dem mittleren Sitzdurchmesser des Sicherheitsventils sein. Bei der Existenz eines variablen Fremdgedruckes ist generell ein Faltenbalg erforderlich, da aufgrund der Variabilität von $F_{\text{Fremdgedruck}}$ sich der Ansprechdruck ständig verändern würde.

Abbildung 3

Kenngößen

Zur Bewertung des Betriebsverhaltens ist die Verwendung der Kenngößen aus den bekannten Normen [2, 3] unerlässlich. Wesentlich ist dabei das Gegendruckverhältnis mit dem sich die Unterscheidung treffen lässt, ob ein kritischer oder unterkritischer Betriebszustand vorliegt.

$$\text{Gegendruckverhältnis [\%]} = \frac{\text{Gegendruck abs.}}{\text{Ansprechdruck abs.}} = \frac{p_b}{p_0} \tag{8}$$

$$\frac{p_b}{p_0} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Kritische Strömung} \tag{9}$$

$$\frac{p_b}{p_0} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Unterkritische Strömung} \tag{10}$$

Unter Annahme eines konstanten Isentropenexponenten k kennzeichnet der Term

$$\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{11}$$

den Umschlagspunkt zwischen kritischem und unterkritischem Betriebszustand. Kritischer

Betriebszustand bedeutet, dass ein weiteres Absinken des Druckes hinter dem Ventilsitz keine weitere Zunahme des Massenstromes zur Folge hat. [3, S. 7] Bei der Berechnung des theoretischen Massenstromes führt dies dazu, dass bei unterkritischem Strömungszustand der Term

$$q_m = 0,2883 * C * \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} \tag{12}$$

mit dem Korrekturfaktor K_b multipliziert werden muss.

$$q_m = 0,2883 * C * K_b * \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} \tag{13}$$

Nach [3, S. 8 und 23] lässt sich K_b berechnen oder ablesen und hat auch direkten Einfluss auf die Ermittlung der Ausflussziffer K_d (bzw. K_{dr}). [3, S. 7ff]

$$K_d = \frac{\sum_i^n \left(\frac{q_{im}}{q_m}\right)}{n} \tag{14}$$

$$K_{dr} \leq 0,9 * K_d \tag{15}$$

In Abb. 4 kann man einen Auszug aus dem Bauteilprüfblatt des VdTÜV für das Ventil Nr. 1 in Kapitel 5.1 sehen.

Abbildung 4

Bei der Berechnung des Massenstromes ist zu beachten, dass bei unterkritischem Strömungszustand der Term

$$\dot{Q}_m = 0,2883 * A * K_{dr} * C * \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} \tag{16}$$

mit dem Korrekturfaktor K_b multipliziert werden muss. Der daraus hergeleitete engste Strömungsquerschnitt A des Sicherheitsventils

$$A = \frac{\dot{Q}_m}{0,2883 * C * K_{dr} * \sqrt{\frac{p_0}{v_0}}} \tag{17}$$

muss dementsprechend bei vorliegender unterkritischer Strömung mit dem Faktor K_b im Nenner erweitert werden.

$$A = \frac{\dot{Q}_m}{0,2883 * C * K_{dr} * K_b * \sqrt{\frac{p_0}{v_0}}} \tag{18}$$

Leistungsprüfstand der Albert Richter ARI-Armaturen GmbH & Co. KG

Abbildung 5 und 6

Der Leistungsprüfstand (Luft) der Albert Richter ARI-Armaturen GmbH & Co. KG bietet u.a. folgende Leistungsdaten:

- Druckluft-Speicher: 6 [m³]; 100 [bar]
- Ruhedruck-Behälter: 1,5 [m³]; [100 bar]
- Verfügbares Norm-Luftvolumen: ca. 600 [Nm³]
- Max. transienter Norm-Volumenstrom: ca. 100.000 [Nm³/h]
- Gegendruck-Behälter: 4 [m³]; 10,5 [bar]

Für die in Kapitel 6 dargestellten Messungen wurden folgende Messwerte automatisch erfasst:

- Druck p_0 (Ansprechdruck) [bar-ü]
- Gegendruck p_b [bar-ü]
- Hub [mm]

Folgende Werte wurden nachfolgend aus dem Messschrieb manuell ausgelesen:

- Schließdruck p_s [bar-ü]
- Schließdruckdifferenz [%]
- Öffnungsdruck p_c [bar-ü]
- Öffnungsdruckdifferenz [%]
- Hub (Ist) [mm]

Messungen

Verwendete Sicherheitsventile

- 1) Sicherheitsventil nach DIN EN ISO 4126, Baureihe 901 (Vollhub), PN 16
DN 25/40, $d_0=22,5$ mm, Nennhub: 5,2 mm
- 2) Sicherheitsventil nach DIN EN ISO 4126, Baureihe 901 (Vollhub), PN 16
DN 32/50, $d_0=29,0$ mm, Nennhub: 6,7 mm
- 3) Sicherheitsventil nach ASME Section VIII-Div. 1, Baureihe 970, ANSI 150 x 150,
1" x 2", Nennhub: 3,0 mm
- 4) Sicherheitsventil nach ASME Section VIII-Div. 1, Baureihe 970, ANSI 150 x 150,
1.5" x 3", Nennhub: 6,6 mm

Messparameter

Jedes der vier Sicherheitsventile wurde jeweils auf die folgenden Ansprechdrücke eingestellt:

Ansprechdruck [bar-ü]	3	5	9	12
-----------------------	---	---	---	----

Anschließend wurde in der Abblaseleitung ein konstanter Druck vorgegeben. Dieser wurde vor jeder Messung prozentual auf folgende Werte erhöht:

Konstanter Fremdgedruck [%]	0	10	20	30	50	70
-----------------------------	---	----	----	----	----	----

Nach Gleichung (6) ergeben sich dann für z. B. 5 [bar-ü] folgende Gesamt-Ansprechdrücke:

Gesamt-Ansprechdruck [bar-ü]	5,0	5,5	6,0	6,5	7,5	8,5
------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Durchführung

Es wurde folgender Ablauf festgelegt:

Das Sicherheitsventil wurde auf den genannten Ansprechdruck eingestellt (Definition: Initial Audible). Anschließend wurde der konstante Fremdgedruck jeweils nach Kapitel 5.2 prozentual erhöht und die Messwerte wie in Kapitel 4 erläutert erfasst. Zur Reduzierung des Rüstaufwandes wurde auf eine Nachstellung des Ventils (Spannschraube) und damit die CDTP-Korrektur verzichtet. Zusätzlich wurde

durch den Einsatz eines automatischen Regelventils in der Abblaseleitung der Fremdgedruck auf den eingestellten Wert nahezu konstant gehalten. Der Einfluss des sich aufbauenden Eigengegendruckes war vernachlässigbar gering, vgl. Abb. 6.

Abbildung 7

Die Ergebnisse in Kapitel 6 sind nach Gleichung (6) aufgetragen, der Ansprechdruck sollte der Summe aus $F_{\text{Federkraft}} + F_{\text{Fremdgedruck}}$ (Gesamt-Ansprechdruck) wie in Kapitel 5.2 erläutert entsprechen.

Es wurden pro Einstellung jeweils drei Messungen gemacht, der jeweilige Mittelwert ist Grundlage für die Abbildungen in Kapitel 6.

Ergebnisse

Exemplarisch wird hier ein Auszug der Messungen mit dem Sicherheitsventil 1 aus Kapitel 5.1 dargestellt.

Konstanter Fremdgedruck ohne Metall-Faltenbalg

Abbildung 8

Abbildung 9

Konstanter Fremdgedruck mit Metall-Faltenbalg

Abbildung 10

Abbildung 11

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Messungen, auszugsweise dargestellt am Ventil 1 nach Kapitel 5.1 der BR901 DN 25/40, mit einem Anfangsansprechdruck von 5 [bar-ü], lassen folgendes Erkennen:

Das Sicherheitsventil spricht innerhalb der erlaubten Grenzen und damit trotz des vorhandenen konstanten Fremdgedruckes und einer Einstellung nach (6) korrekt an, die generelle Funktionscharakteristik beim Ansprechen wird nicht negativ beeinflusst. Das Ventil erreicht trotz des konstanten Fremdgedruckes seinen vollen Hub.

Bei der Ausführung ohne Metall-Faltenbalg erhöht sich die Öffnungsdruckdifferenz linear zum Gegendruckverhältnis (Abb. 9), liegt jedoch im vorgeschriebenen Bereich, mit Metall-Faltenbalg liegt sie nahezu konstant trotz steigendem Gegendruckverhältnis (Abb. 11).

Ein konstanter Fremdgedruck und eine daraus resultierende Einstellung nach (7) beeinflusst das Arbeitsverhalten des Sicherheitsventils insbesondere dahingehend, dass sich die Schließdruckdifferenz verändert (sie verringert sich linear zum Gegendruckverhältnis (Abb. 11)). Dies bedeutet, es besteht die Gefahr, dass das Sicherheitsventil bei zunehmendem Gegendruckverhältnis oder einem höherem Ansprechdruck nach dem Ansprechen nicht mehr zuverlässig schließt (setzt) und eine bleibende, „schleichende“ Leckage aufweist.

Bei der Auslegung und Dimensionierung von Sicherheitsventilen mit konstantem Fremdgedruck sind darum immer der konkrete Einsatzfall und die Betriebsbedingungen zu berücksichtigen. Hierzu ist der jeweilige Hersteller zu kontaktieren um insbesondere die Einsatzgrenzen und die sich verändernden Betriebsparameter bei der Auswahl und Auslegung berücksichtigen zu können.

Nomenklatura

p	Druck	[bar]
p_0	Ansprechdruck	[bar]
F	Kraft	[N]
A	Fläche	[mm ²]
F_{Druck}	Kraft durch Druck im Druckbehälter	[N]
$F_{\text{Federkraft}}$	Kraft durch Druckfeder	[N]
F_{Druck}	Kraft durch Druck im Druckbehälter	[N]
$F_{\text{Fremdgedruck}}$	Kraft durch Behälterdruck	[N]
CDTP	Cold-Differential-Test-Pressure	[bar]
v_0	Spez. Volumen bei Abblasedruck und Temperatur	[m ³ /kg]
κ	Isentropenexponent	[-]
C	Funktion des Isentropenexponenten	[-]
q_m	Theoretischer Ausflussmassenstrom	[kg/(h·mm ²)]
q'_m	Tatsächlicher Ausflussmassenstrom	[kg/(h·mm ²)]
K_d	Ausflussziffer	[-]
K_{dr}	Reduzierte Ausflussziffer	[-]

Quellenverzeichnis

- [1] E. Stork; Gegendruckbeaufschlagte Sicherheitsventile
Technische Überwachung; Bd. 47 (2006) Nr. 7/8 Juli/August; Springer VDI Verlag
- [2] DIN EN ISO 4126-1 : 12.2013
- [3] DIN EN ISO 4126-7 : 12.2013
- [4] AD 2000 Merkblatt, korrigierte Fassung, 07.2013
- [5] VdTÜV-Bauteilprüfblatt, Sicherheitsventil 663, 12.2014
- [6] API 520 PT1-Sizing and Selection, 07.2014
- [7] <http://www.nationalboard.org>
- [8] Tabellenbuch für Metalltechnik; 12. Auflage; Verlag Handwerk und Technik – Hamburg, 2007

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen Albert Richter ARI-Armaturen GmbH & Co. KG

Abbildungen

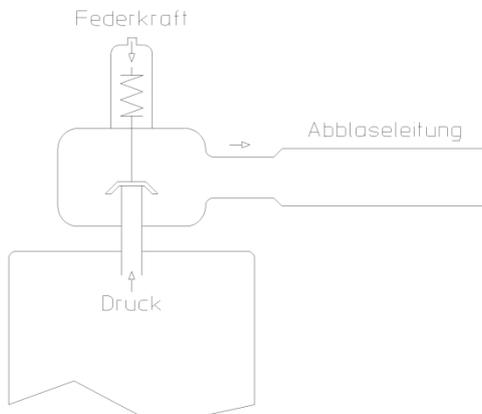


Abb. 1: Sicherheitsventil (geschlossen) mit Druckbehälter und Abblaseleitung

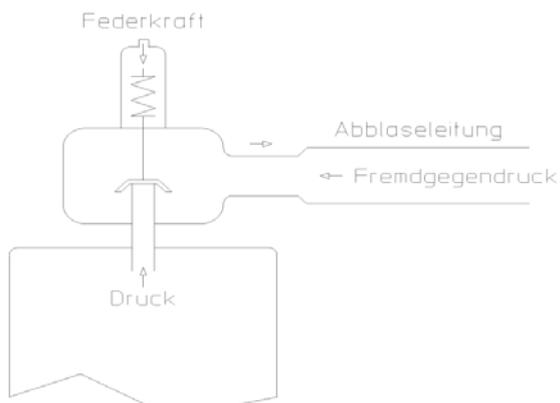


Abb. 2: Sicherheitsventil (geschlossen) ohne Metall-Faltenbalg mit Druckbehälter und Fremdgedruck in der Abblaseleitung

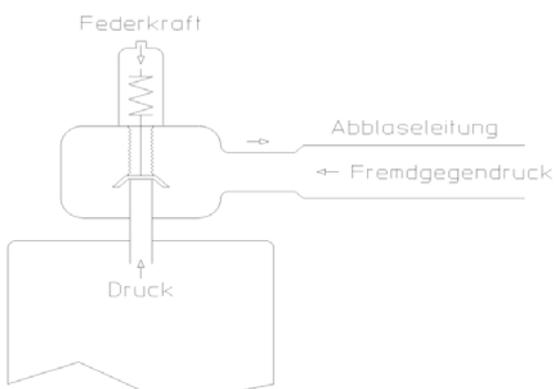


Abb. 3: Sicherheitsventil (geschlossen) mit Metall-Faltenbalg mit Druckbehälter und Fremdgedruck in der Abblaseleitung

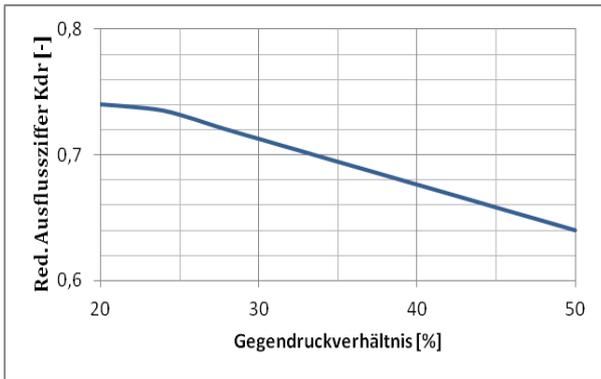


Abb. 4: Auszug aus dem Bauteilprüfblatt VdTÜV SV 663 – DN 25/40 – $h/d_0 = 0,23$



Abb. 5 und 6: Leistungsprüfstand (Luft) der Albert Richter ARI-Armaturen GmbH & Co. KG

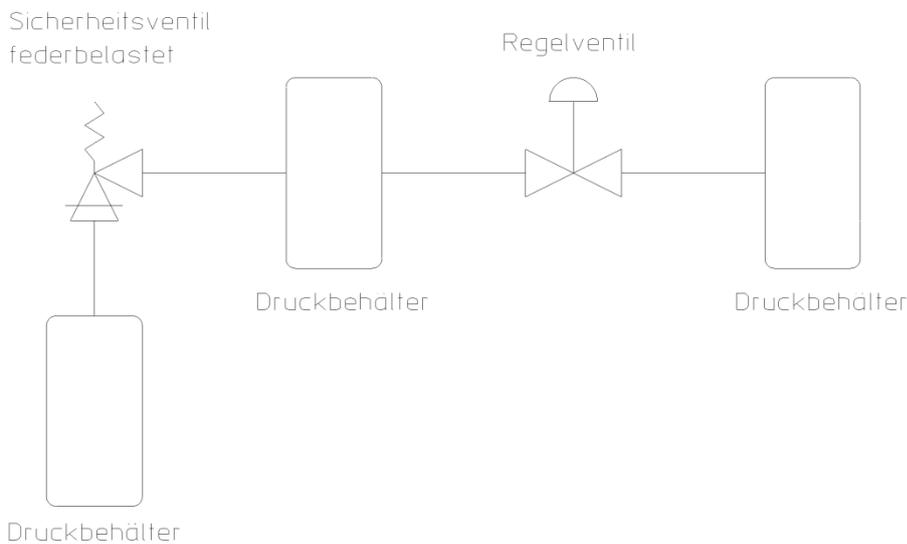


Abb. 7: Anlagenschema

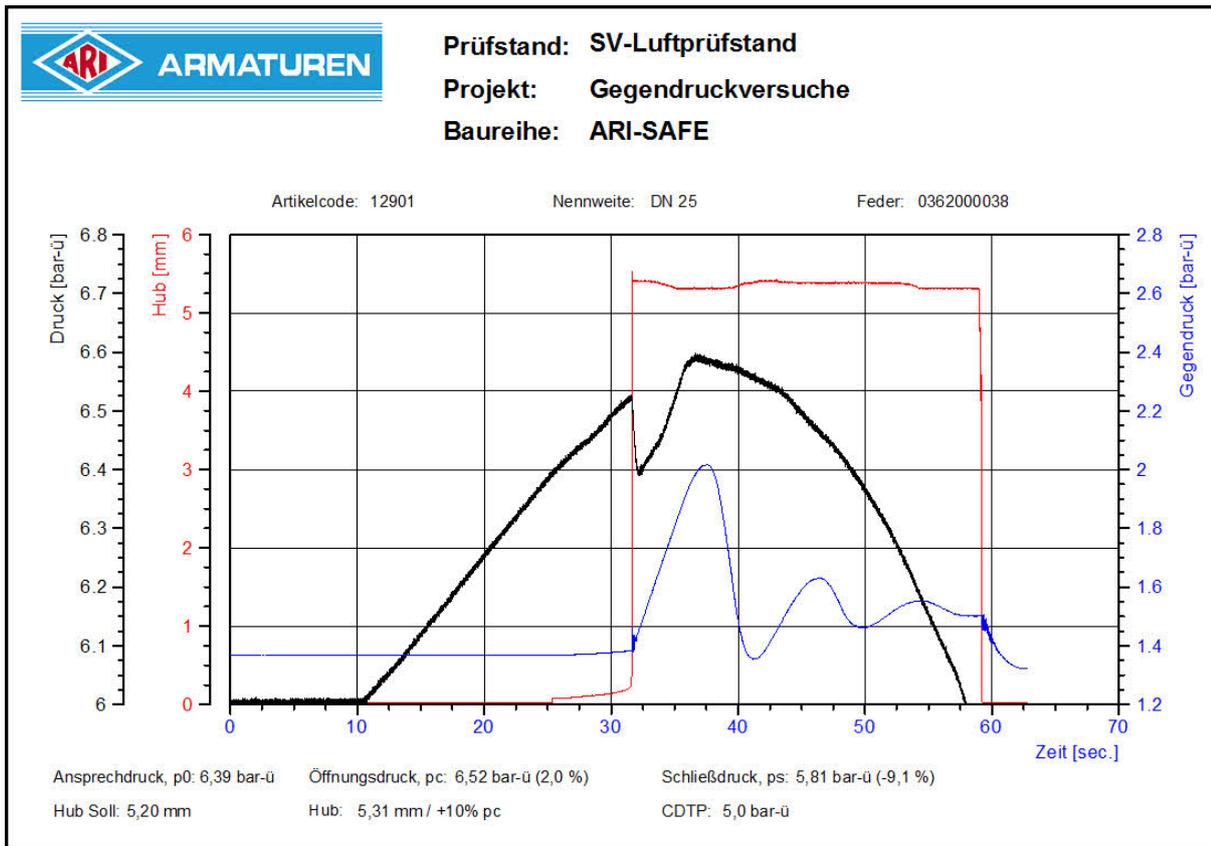


Abb. 8: Messschrieb BR901 - DN 25/40 – CDTP: 5 bar-ü – Fremdgedruck: 30 [%]

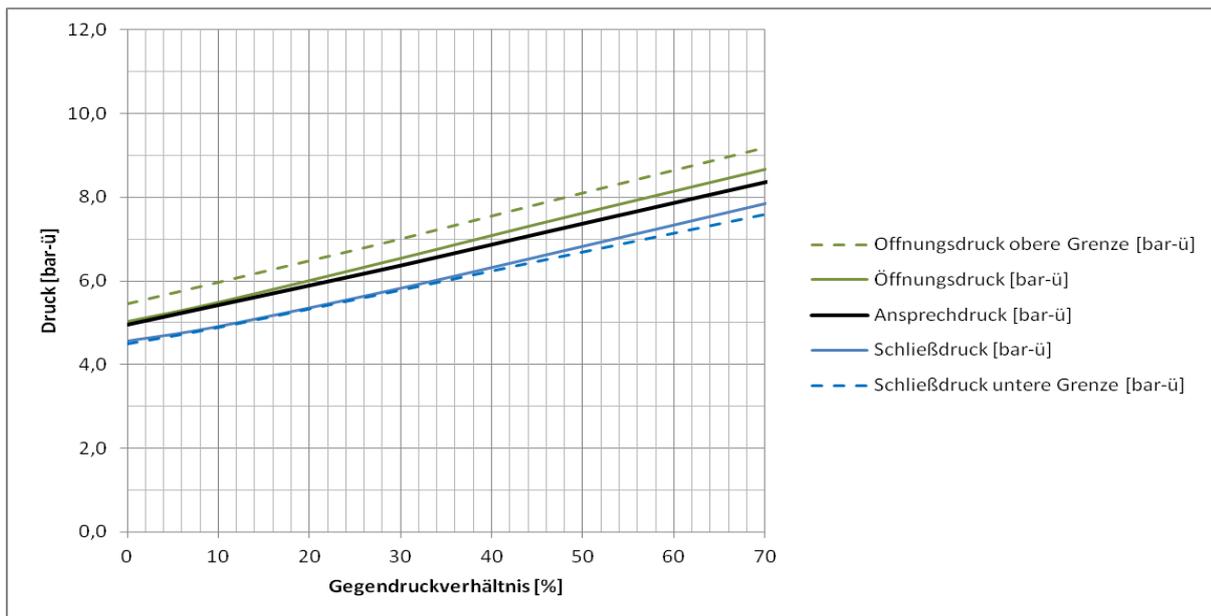


Abb. 9: Ergebnisse BR901 - DN 25/40 – Anfangsansprechdruck 5 bar-ü - ohne Metall-Faltenbalg

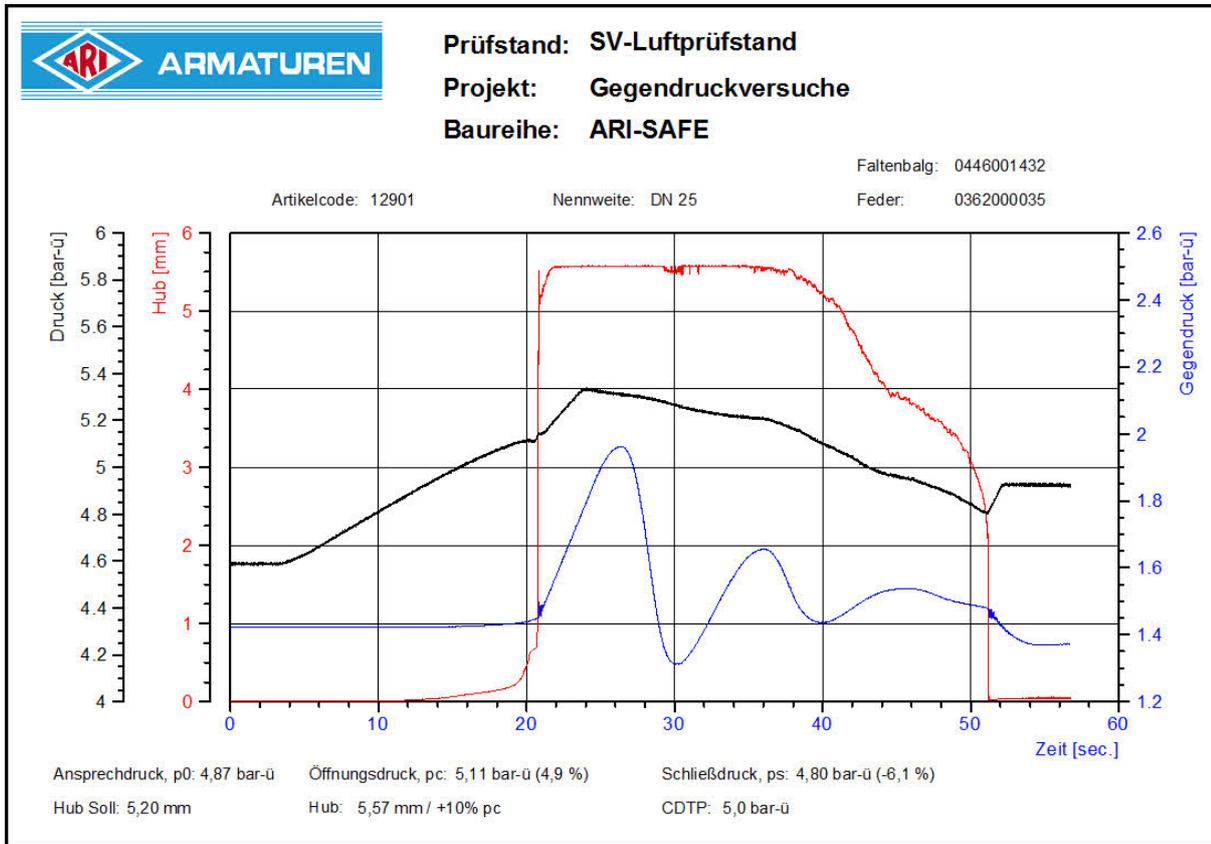


Abb. 10: Messschrieb BR901 mit Metallfaltenbalg - DN 25/40 - CDTP: 5 [bar-ü] - Fremdgedruck 30 [%]

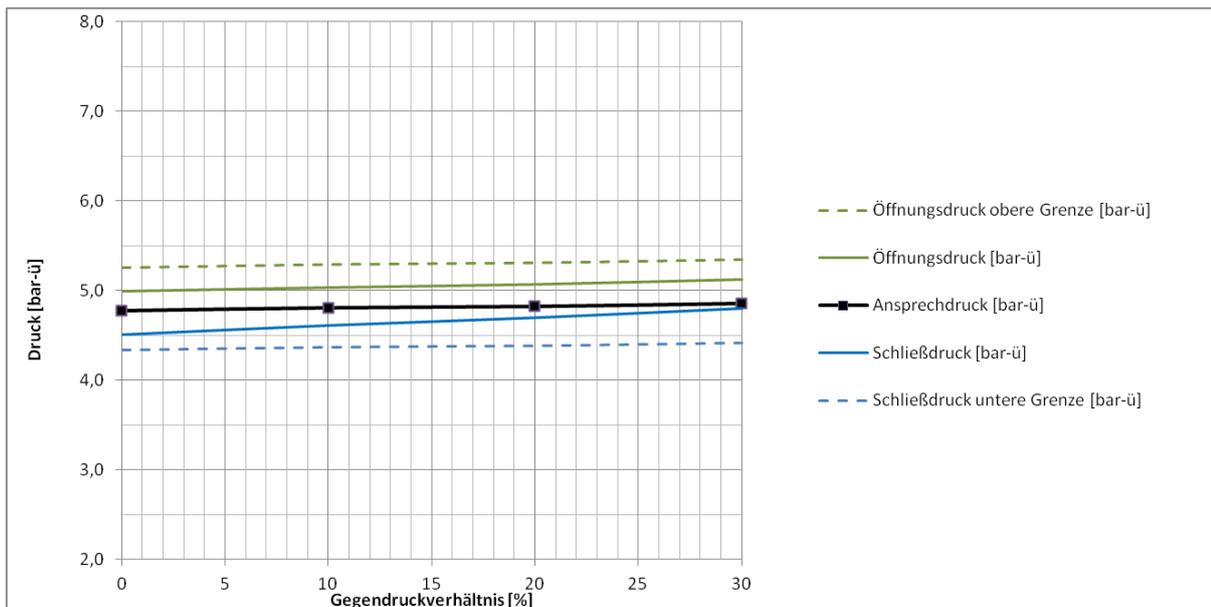


Abb. 11: Ergebnisse BR901 - DN 25/40 - Anfangsansprechdruck 5 [bar-ü] - mit Metall-Faltenbalg