

7.3 Auslegung (Dimensioning)

7.3.1	Erforderlicher Netzdruck (Working pressure)	3
7.3.2	Ausschaltdruck des Kompressors (cut-off pressure)	3
7.3.3	Mind. Volumenstrom des Kompressors (Min. volumetric flow rate)	3
7.3.4	Kompressor Stillstandzeit (Compressor off time)	3
7.3.5	Kompressor Laufzeit (Compressor run time)	4
7.3.6	Anzahl Motorschaltspiele (Switching frequency)	4
7.3.7	Kondensatanfall (Condensate load)	4
7.3.8	In der Luft enthaltene Wassermenge (Amount of water in the atmospheric air)	4
7.3.9	Kondensatausfall nach der Verdichtung (Condensation precipitation during compression)	5
7.3.10	Kondensatausfall im Kälte-Drucklufttrockner (Condensation precipitation during refrigeration)	5
7.3.11	Anfallende Kondensatmenge im Kondensataufbereiter (Condensate load)	6
7.3.12	Druckluftbehälter (Compressed air receiver) Behältervolumen (Required receiver volume)	6 6
7.3.13	Zulässige Motorschaltspiele von Kompressoren (Allowed cycle)	7
7.3.14	Armaturen am Druckluftbehälter (Fittings on the compressed air receiver)	9
7.3.15	Dimensionierung des Druckluftnetzes (Air-net sizing) Druckabfall (Pressure drop)	10 10
7.3.16	Strömungsgeschwindigkeit (Air velocity) Haupt- und Verteilleitungen (Main- and distribution line) Anschlussleitungen (Connecting line)	11 11 11
7.3.17	Druckverlust durch Rohrreibung (Pressure loss in pipes)	11
7.3.18	Druckverlust durch Einzelwiderstände (Pressure loss in fittings)	12
7.3.19	Druckverlust im Druckluftnetz (Pressure loss in the pipe system)	14
7.3.20	Näherungsformeln zur Ermittlung des Rohrdurchmessers (Approximation formula)	14

Dieses Kapitel wurde erstellt unter Mitwirkung von:

Ernst Dunkel, dipl. Energieberater
Dipl. Heizungs- und
Sanitärtechniker TS / VSHL, Thun

Tabellenverzeichnis

Tab.: 1 Zulässige Schaltspiele zc	7
Tab.: 2 Druckluftbehälter p _{max} 1.1 MPa.....	9
Tab.: 3 Richtwerte: Druckabfall im Rohrleitungssystem	10
Tab.: 4 Richtwerte: Druckabfall in der Druckluftanlage mit einem Arbeitsdruck > 0.5 MPaü	10
Tab.: 5 Richtwerte für ML und DL bei 0.6 MPaü bis max. 100 m Länge	11
Tab.: 6 Richtwerte für CL bei 0.6 MPaü bis max. 10 m Länge	11
Tab.: 7 Verlustbeiwerte von Einzelwiderständen.....	13
Tab.: 8 Koeffizienten der Näherungsgleichung (E. Dunkel).....	14

7.3.1 Erforderlicher Netzdruck (Working pressure)

Nebst dem Druckabfall in der Druckluftanlage ist die Schaltdifferenz des Kompressors (Δp_C) zu berücksichtigen. Dieser beträgt für Schraubenkompressoren 0.05 bis 0.1 MPa und für Kolbenkompressoren $p_{\max} \cdot 0.8$.

7.3.2 Ausschaltdruck des Kompressors (cut-off pressure)

$$p_{\max} = p_{\min} + \Delta p_C$$

p_{\max} = Ausschaltdruck Kompressor in MPa
 p_{\min} = Einschaltdruck Kompressor in MPa
 Δp_C = Schaltdifferenz Kompressor in MPa
 Schraubenkompressor 0.05 – 0.1 MPa
 Kolbenkompressor $p_{\max} \cdot 0.02 \approx 0.2$ MPa)

7.3.3 Mind. Volumenstrom des Kompressors (Min. volumetric flow rate)

Der mind. Volumenstrom (Liefermenge) eines Kompressors rechnet sich wie folgt:

$$q_{v,C,\min} = q_{v,r} \cdot f_C$$

$q_{v,C,\min}$ = Mind. Volumenstrom Kompressors in l / s
 $q_{v,r}$ = Erforderlicher Volumenstrom Druckluftanlage in l / s
 f_C = Einschaltfaktor
 Schraubenkompressor = 1.0
 Kolbenkompressor = 1.66

Die optimale Einschaltdauer eines Kolbenkompressors liegt bei 60 % und diejenige eines Schraubenkompressors bei 100 %.

7.3.4 Kompressor Stillstandzeit (Compressor off time)

$$t_{C,\text{off}} = \frac{V_{AR} \cdot (p_{\max} - p_{\min})}{q_{v,r}}$$

$t_{C,\text{off}}$ = Stillstandzeit Kompressor in s
 V_{AR} = Volumen Druckluftbehälter in l
 p_{\max} = Ausschaltdruck des Kompressors in MPa
 p_{\min} = Einschaltdruck des Kompressors in MPa
 $q_{v,r}$ = Erforderlicher Volumenstrom Druckluftanlage in l / s

7.3.5 Kompressor Laufzeit (Compressor run time)

$$t_{C,on} = \frac{V_{AR} \cdot (p_{max} - p_{min})}{q_{v,C} - q_{v,r}}$$

$t_{C,on}$	= Laufzeit Kompressor in s
V_{AR}	= Volumen Druckluftbehälter in l
p_{max}	= Ausschaltdruck des Kompressors in MPa
p_{min}	= Einschaltdruck des Kompressors in MPa
$q_{v,C}$	= Volumenstrom Kompressor in l / s
$q_{v,r}$	= Erforderlicher Volumenstrom Druckluftanlage in l / s

7.3.6 Anzahl Motorschaltspiele (Switching frequency)

Aus der Kompressorlauf- und stillstandszeit wird die Anzahl Motorschaltspiele berechnet und mit den zulässigen Motorschaltspiele (siehe Tab. ...) verglichen.

$$Z_C = \frac{3600}{t_{C,on} - t_{C,off}}$$

Z_C	= Motorschaltspiele in h ⁻¹
$t_{C,on}$	= Laufzeit Kompressor in s
$t_{C,off}$	= Stillstandszeit Kompressor in s
3600	= Umrechnung s in h

Wenn der erforderliche Volumenstrom der Druckluftanlage nicht genau bekannt ist, kann bei der Ermittlung der Motorschaltspiele 50 % des Kompressors Volumenstrom angenommen werden, d.h., die Lauf- und Stillstandszeiten sind gleich lang.

7.3.7 Kondensatanfall (Condensate Load)

Bei der Druckluffterzeugung fällt im Druckluft-Kompressor und im Druckluft-Kältetrockner regelmässig verschmutztes, ölhaltiges oder ölfreies, aggressives Kondensat an. Das Druckluftkondensat muss daher vor dem Einleiten in die Abwasserleitung umweltgerecht aufbereitet werden. In einem Kondensataufbereiter wird das Öl-Wasser voneinander getrennt.

7.3.8 In der Luft enthaltene Wassermenge (Amount of water in the atmospheric air)

$$q_{m,A} = q_{v,A} \cdot f_{max1} \cdot \varphi_1$$

$q_{m,A}$	= In der Luft enthaltene Wassermenge g / h
$q_{v,A}$	= Vom Kompressor angesaugte Luft in m ³ / h
θ_{DP1}	= Taupunkt Temperatur der angesaugten Luft in °C (z.B. 30 °C)
f_{max1}	= Maximale Feuchte in der angesaugten Luft in g / m ³ (z.B. bei 30 °C = 30.078 g / m ³)
φ_1	= Relative Feuchte der angesaugten Luft (z.B. 80 % bzw. 0.80)

7.3.9 Kondensatausfall nach der Verdichtung (Condensation precipitation during compression)

$$q_{m,C} = q_{m,A} - \left(\frac{q_{v,A}}{p_C} \cdot f_{\max 2} \cdot \varphi_2 \right)$$

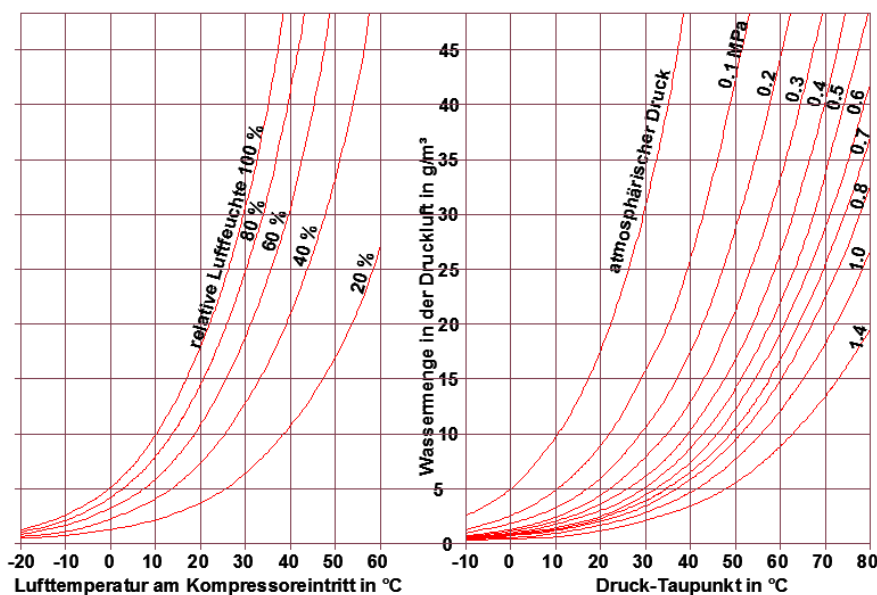
- $q_{m,C}$ = Kondensatausfall nach der Verdichtung in g / h
 $q_{m,A}$ = In der Luft enthaltene Wassermenge g / h
 $q_{v,A}$ = Vom Kompressor angesaugte Luft in m³ / h
 p_C = Verdichtungsenddruck in MPa_a
 θ_{DP2} = Taupunkt Temperatur der abgekühlten verdichteten Luft in °C (z.B. 40 °C)
 $f_{\max 2}$ = Maximale Feuchte in der angesaugten Luft in g / m³ (z.B. bei 40 °C = 50.672 g / m³)
 φ_2 = Relative Feuchte der angesaugten Luft = 100 % bzw. 1.0

7.3.10 Kondensatausfall im Kälte-Drucklufttrockner (Condensation precipitation during refrigeration)

$$q_{m,D} = \frac{q_{v,A}}{p_C} \cdot (f_{\max 2} - f_{\max 3})$$

- $q_{m,D}$ = Kondensatausfall im Kälte-Drucklufttrockner in g / h
 $q_{v,A}$ = Vom Kompressor angesaugte Luft in m³ / h
 p_C = Verdichtungsenddruck in MPa_a
 θ_{DP2} = Taupunkt Temperatur der abgekühlten verdichteten Luft in °C (z.B. 40 °C)
 $f_{\max 2}$ = Maximale Feuchte in der angesaugten Luft in g / m³ (z.B. bei 40 °C = 50.672 g / m³)
 θ_{DP3} = Drucktaupunkt im Kältetrockner in °C (z.B. 3 °C)
 $f_{\max 3}$ = Maximale Feuchte der Luft im Kältetrockner in g / m³ (z.B. bei 3 °C = 5.953 g / m³)

Abb. 1 Anfallende Kondensatmenge



7.3.11 Anfallende Kondensatmenge im Kondensataufbereiter (Condensate Load)

$$q_{m,CS} = q_{m,C} + q_{m,D}$$

$q_{m,CS}$ = Anfallende Kondensatmenge im Kondensataufbereiter in g / h
 $q_{m,C}$ = Kondensatausfall nach der Verdichtung in g / h
 $q_{m,D}$ = Kondensatausfall im Kälte-Drucklufttrockner in g / h

7.3.12 Druckluftbehälter (Compressed air receiver)

Druckluftbehälter mit einem Konzessionsdruck (PC) grösser als 0.2 MPa und dem Produkt aus Druck und Inhalt (**bar x Liter**) grösser als **3'000** sind meldepflichtig. Der Betrieb muss der Schweizerischen Unfallversicherungsanstalt (SUVA) die Druckgeräte vor Inbetriebnahme sowie jede wesentliche Änderung eines Druckgerätes schriftlich melden. Das Meldeformular «Inbetriebnahme eines Druckgerätes» ist bei der Suva erhältlich (Bestellnummer 88223.d oder www.suva.ch/DGVV).

Der Inspektionsintervall beträgt **8 Jahre**, wobei die erste Inspektion 2 Jahre nach der Meldung erfolgt.

Behältervolumen (Required receiver volume)

Zentraler Druckluftbehälter (Central air receiver)

Ein zentraler Druckluftbehälter dient dazu, das Regelverhalten des Kompressors zu stabilisieren bzw. die Schalthäufigkeit zu minimieren und kurzfristige Verbrauchsspitzen abzudecken sowie Druckschwankungen im Druckluftnetz zu kompensieren. Ein zu grosser Behälter hat keinen negativen Einfluss, anders als ein zu knapp bemessener!

Bei der Bestimmung des Druckluftbehälters mit mehreren Kompressoren wird nur mit dem Kompressor mit dem grössten Volumenstrom $q_{v,c}$ gerechnet.

Das Behältervolumen berechnet sich wie folgt:

$$V_{AR} = \frac{q_{v,c} \cdot 360 \cdot \left[\frac{q_{v,r}}{q_{v,c}} - \left(\frac{q_{v,r}}{q_{v,c}} \right)^2 \right] \cdot p_{amb} \cdot T_0}{z \cdot (p_{max} - p_{min}) \cdot T_1} = \frac{q_{v,c} \cdot 360 \cdot (\alpha - \alpha^2) \cdot p_{amb} \cdot T_0}{z \cdot \Delta p_C \cdot T_1} = \frac{q_{v,c} \cdot 360 \cdot f \cdot p_{amb} \cdot T_0}{z \cdot \Delta p_C \cdot T_1}$$

- V_{AR} = Volumen Druckluftbehälter in l
- $q_{v,c}$ = Volumenstrom Kompressor in l / s
- $q_{v,r}$ = Erforderlicher Volumenstrom in l / s
- α = Auslastung = $q_{v,r} / q_{v,c}$
- f = Auslastungsfaktor = $\alpha - \alpha^2 = 0.25$ (worst case)
- z_C = Zulässige Motorschaltspiele in h^{-1}
- 360 = Umrechnungsfaktor in s·MPa / h
- p_{max} = Ausschaltdruck des Kompressors in MPa
- p_{min} = Einschaltdruck des Kompressors in MPa
- Δp_C = Druckdifferenz Ein / Aus in MPa
für Schraubenkompressoren 0.05 bis 0.1 MPa und für Kolbenkompressoren ca. 0.2 MPa
- p_{amb} = Ansaugdruck des Kompressors in MPa
- T_0 = Drucklufttemperatur im Behälter z.B. 313 K bzw. 10 K höher als T_1
- T_1 = Maximale Ansauglufttemperatur am Kompressor = 303 K (30 °C)

Faustformel (Rules of thumb)

Kolbenkompressoren $V_{AR} = q_{v,c} \cdot 30$

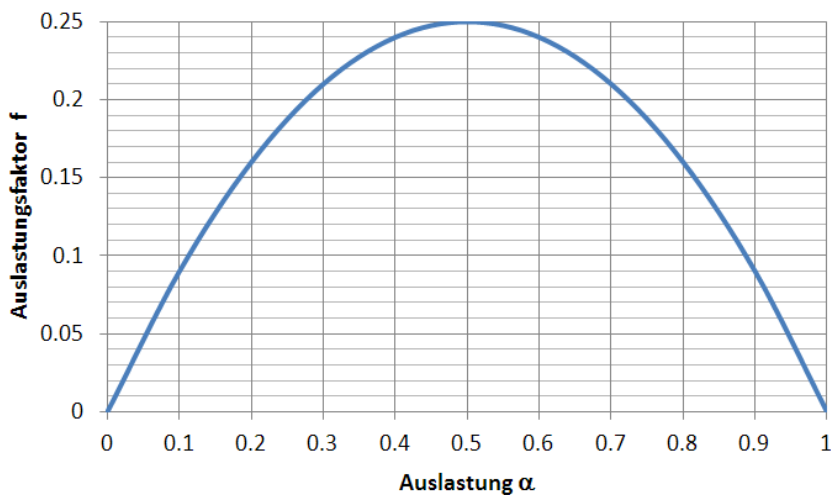
Schraubenkompressoren $V_{AR} = q_{v,c} \cdot 20$

7.3.13 Zulässige Motorschaltspiele von Kompressoren (Allowed cycle)

Tab.: 1 Zulässige Schaltspiele z_c

Motor Leistung P in kW	Zulässige Schaltspiele z_c in h^{-1}
4 – 7.5	30
11 – 22	25
30 – 55	20
65 – 90	15
110 – 160	10
200 – 250	5

Abb. 2 Auslastungsfaktor f



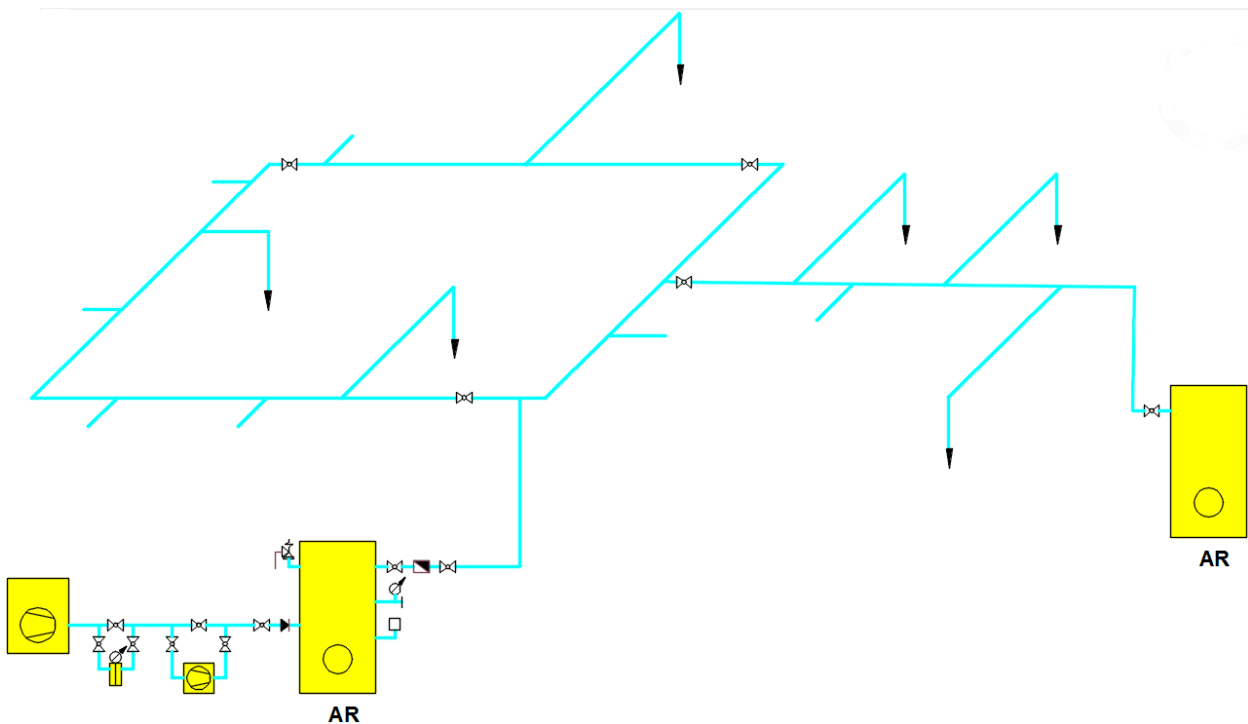
Dezentraler Druckluftbehälter (Decentralised air receiver)

Mittels einem dezentralen Druckluftbehälter werden kurzfristige Verbrauchsspitzen abgedeckt sowie Druckschwankungen im Druckluftnetz verhindert. Der Speicher bzw. Druckluftbehälter wird in unmittelbarer Nähe der Grossverbraucher installiert.

$$V_{AR} = \frac{q_v \cdot t}{\Delta p_{max}}$$

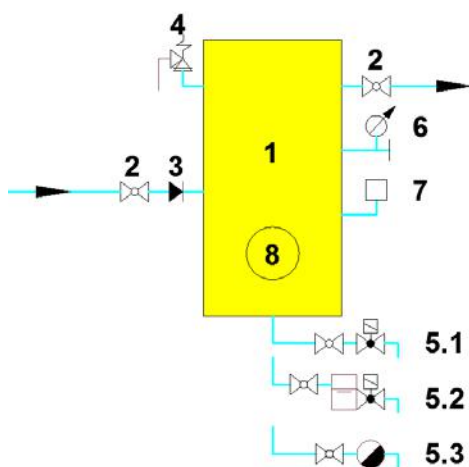
- V_{AR} = Volumen Druckluftbehälter in l
 q_v = Spitzenvolumenstrom in l / s
 t = Zeitdauer des Spitzenvolumenstroms in s
 Δp_{max} = Zulässiger Druckabfall während des Spitzenvolumenbedarf in MPa

Abb. 3 Anlage mit dezentralem Druckluftbehälter



7.3.14 Armaturen am Druckluftbehälter (Fittings on the compressed air receiver)

Abb. 4 Armaturen am Druckluftbehälter



Legende:

- 1 = Druckluftbehälter
- 2 = Kugelhahn
- 3 = Rückflussverhinderer
- 4 = Sicherheitsventil
- 5 = Kondensatabscheider
 - 5.1 = zeitgesteuerter Kondensatablass
 - 5.2 = elektronischer Kondensatableiter
 - 5.3 = mechanischer Kondensatabscheider
- 6 = Manometer mit Kontrollflansch
- 7 = Druckschalter
- 8 = Kontrollöffnung

Sicherheitsventil (Pressure relief valve)

Das Sicherheitsventil ist so zu bestimmen, dass der max. Volumenstrom aller angeschlossenen Kompressoren abgelastet werden kann, ohne dass der Druck im Druckluftbehälter nicht weiter ansteigt. Die Ablaseleitung ist so zu verlegen, dass durch das Abblasen keine Personen gefährdet werden und kein unzulässiger Gegendruck entstehen kann.

$$p_{SV} = p_{max} \cdot 1.1$$

p_{SV} = Öffnungsdruck des Sicherheitsventils in MPa
 p_{max} = Ausschaltdruck des Kompressors in MPa

Druckschwankungen dürfen nicht grösser als 20 % des maximalen Betriebsdruck betragen (z.B. $p_{max,C} = 1 \text{ MPa}$ → $\Delta p_{max} = 1 \text{ MPa} \cdot 0.2 = 0.2 \text{ MPa}$). Bei grösseren Druckschwankungen kann es zu Ermüdungsbrüchen in den Schweissnähten kommen. Um dies zu verhindern, müssen in diesem Fall die Behälter für schwelende Belastung ausgelegt werden.

Tab.: 2 Druckluftbehälter p_{max} 1.1 MPa

Behältervolumen $V_{AR} \leq 270 \text{ l}$ nicht prüfpflichtig bei p_{max} 1.1 MPa	Behältervolumen $V_{AR} \geq 270 \text{ l}$ prüfpflichtig bei p_{max} 1.1 MPa
18	350
30	500
50	750
80	1000
150	1500
250	2000
	3000
	5000

7.3.15 Dimensionierung des Druckluftnetzes (Air-Net sizing)

Druckabfall (Pressure drop)

Der Druckverlust bzw. Druckabfall im Druckluftnetz soll möglichst klein gehalten werden. Im Allgemeinen rechnet man mit einem Druckabfall von **1 bis 2 %** vom Betriebsüberdruck. Für Druckluftnetze mit einem Druck von 0.6 bis 0.9 MPa sollte ein Druckabfall von **100 hPa** zwischen dem Druckluftbehälter und weitentferntesten Geräteanschluss nicht überschritten werden. Nicht enthalten in diesem Wert ist der Druckabfall in den Wartungseinheiten, Steckkupplungen und Anschlussschläuchen.

Tab.: 3 Richtwerte: Druckabfall im Rohrleitungssystem

Bezeichnung	Druckabfall in hPa	Druckabfall in %
Hauptleitungen (ML)	≤ 30	0.5
Verteilleitungen (DL)	≤ 30	0.5
Anschlussleitungen (CL)	≤ 40	0.5
Total Druckabfall im Rohrleitungssystem	≤ 100	1.5

Ringleitungen werden in der Regel nach dem gesamten Druckluftbedarf und der halben Ringleitungslänge ausgelegt.

Der gesamte Druckabfall in der Druckluftanlage inkl. Trockner, Filter, Wartungseinheiten, Steckkupplungen und Anschlussschläuchen sollte bei einem Arbeitsdruck > 0.5 MPa **1'100 hPa** nicht überschreiten.

Tab.: 4 Richtwerte: Druckabfall in der Druckluftanlage mit einem Arbeitsdruck > 0.5 MPa_i

Bezeichnung	Druckabfall in hPa
Druckabfall im Rohrleitungssystem	≤ 100
Drucklufttrockner	≤ 200
Filter	≤ 300
Geräteanschlusszubehör	≤ 500
Total Druckabfall in der Druckluftanlage = p_{min}	≤ 1100

7.3.16 Strömungsgeschwindigkeit (Air velocity)

Haupt- und Verteilungen (Main- and distribution line)

Es empfiehlt sich das Druckluftnetz zu überdimensionieren, d.h., die Rohrdurchmesser der Hauptleitungen (ML) und Verteilungen (DL) grosszügig und nicht unter DN 25 zu wählen. Die Strömungsgeschwindigkeit sollte im Bereich von 5 bis max. 10 m / s gewählt werden.

Tab.: 5 Richtwerte für ML und DL bei 0.6 MPa_ü bis max. 100 m Länge

DN	qv in l / s
25	10
32	20
40	30
50	50
65	100
80	150
100	300
125	500
150	800

Anschlussleitungen (Connecting line)

In den Anschlussleitungen (CL) sollte eine Strömungsgeschwindigkeit von 15 m / s nicht überschritten werden.

Tab.: 6 Richtwerte für CL bei 0.6 MPa_ü bis max. 10 m Länge

DN	qv in l / s
15	6.5
20	14
25	27

7.3.17 Druckverlust durch Rohrreibung (Pressure loss in pipes)

$$\Delta p_p = R \cdot L$$

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

- Δp_p = Druckverlust in der Rohrleitung in Pa
- R = Längenspezifischer Druckverlust in Pa / m
- L = Rohrlänge in m
- λ = Rohrreibungskoeffizient
- v = Strömungsgeschwindigkeit in m / s
- ρ = Dichte des Mediums kg / m³
- d = Innendurchmesser der Rohrleitung in m

7.3.18 Druckverlust durch Einzelwiderstände (Pressure loss in fittings)

$$Z = \sum \xi \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \sum \xi \cdot p_{\text{dyn}}$$













- Z = Druckverluste durch Einzelwiderstände in Pa
- $\sum \xi$ = Summe der Widerstandsbeiwerte (Zeta-Werte)
- p_{dyn} = dynamischer Druck in Pa
- ρ = Dichte des Mediums in kg / m³
- v = Strömungsgeschwindigkeit in m / s


Anstelle der Zeta-Werte kann auch mit der gleichwertigen Rohrlänge des Formstückes gerechnet werden. Diese gibt an, wie lang ein gerades Rohre wäre, welches den gleichen Druckverlust aufweist wie das Formstück.

$$Z = \sum L_G \cdot R$$

- Z = Druckverluste durch Einzelwiderstände in Pa
- $\sum L_G$ = Summe der gleichwertigen Rohrlängen in m
- R = R-Wert in Pa / m

Tab.: 7 Verlustbeiwerte von Einzelwiderständen

Nr.	Symbol	Bezeichnung	ξ-Wert	Gleichwertige Rohrlänge in Meter für Gewinderohre									
				DN 15	DN 20	DN 25	DN 32	DN 40	DN 50	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125
0		Schweissnaht, Muffe	0.1	0.04	0.06	0.08	0.12	0.15	0.20	0.28	0.35	0.50	0.63
1		Winkel oder Bogen	0.7	0.3	0.5	0.6	0.8	1	1.4	2	2.5	3.5	4.4
2		3d Bogen	0.35	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1	1.2	1.7	2.2
3.1		T-Stromtrennung	1 0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	0.8	1	1.5	1.9
3.2		2 1.3		0.5	0.8	1.1	1.6	1.9	2.6	3.6	4.5	6.4	8.2
4													
5		T-Gegenlauf bei Stromtrennung	1 1.5	0.6	1	1.2	1.8	2.2	3	4.2	5.3	7.4	9.4
6		T-Gegenlauf bei Stromvereinigung	1 3	1.2	1.9	2.5	3.6	4.4	6	8.4	10.5	14.8	18.8
7		Überbogen, Etagebogen	0.7	0.3	0.5	0.6	0.8	1	1.4	2	2.5	3.5	4.4
8		Reduktion	1 0.4	0.2	0.3	0.3	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	2	2.5
9													
10		Verteiler-/Speicher-Austritt	0.5	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.4	1.8	2.5	3.1
11		Sammler-/Speicher-Eintritt	1	0.4	0.6	0.8	1.2	1.5	2	2.8	3.5	4.9	6.3
12		Kugelhahn -DN25 -125	0.5 0.3	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	1	0.8	1	1.5	1.9
13													
14													
15													
16		Rückflussverhinderer -DN20 -50 -125	8 4 2.5	3.2	5	3.4	4.8	5.9	8	7	8.8	12.3	15.7
17													



Die Einzelwiderstandswerte der T-Stücke sind stets in der Teilstrecke **S** und nicht in der gemeinsamen Strecke **G** zu berücksichtigen. In der gemeinsamen Strecke **G** ist der Widerstand = 0.
Bei Reduktionen wird der Widerstand dem kleineren Durchmesser zugeordnet.

Der anteilige Druckverlust durch Einzelwiderstände Z in einem Druckluftnetz kann geschätzt werden, je nach Anlagesituation kann ein Zuschlag von 40 bis 60 % auf die Rohrleitungslänge angesetzt werden.

Die hier dargestellten Zeta-Werte resp. äquivalenten Rohrlängen entsprechen Richtwerten. Für genaue Berechnungen sind die spezifischen Werte des Rohrherstellers zu verwenden.

7.3.19 Druckverlust im Druckluftnetz (Pressure loss in the pipe system)

Der Druckverlust im Druckluftnetz setzt sich zusammen aus dem Druckverlust in den Rohren und in den Formstücken.

$$\Delta p = \Sigma(R \cdot L) + \Sigma Z$$

$$\Delta p = \Sigma(R \cdot L) \cdot f$$

- Δp = gesamter Druckverlust in Pa
- R = Längenspezifischer Druckverlust in Pa / m
- L = Rohrlänge in m
- Z = Druckverluste durch Einzelwiderstände in Pa
- f = Formstückzuschlag = 1.4 ... 1.6

7.3.20 Näherungsformeln zur Ermittlung des Rohrdurchmessers (Approximation formula)

Der Druckverlust in einer Druckluftleitung kann mit folgender Näherungsgleichung bestimmt werden:

$$R = \frac{c_0 \cdot q_V^{c_1}}{D_i^{c_2} \cdot p_C}$$

- R = Längenspezifischer Druckverlust in hPa / m
- $C_{0,1,2}$ = Koeffizienten der Näherungsgleichung
- q_V = Volumenstrom in l / s
- D_i = Rohrinne Durchmesser in mm
- p_C = Netzdruck in MPa

Tab.: 8 Koeffizienten der Näherungsgleichung (E. Dunkel)

Rohrwerkstoff	C_0	C_1	C_2
Verzinkte Stahlrohre	64'000	1.89	5.081
Kupfer, Edelstahl und Kunststoffrohre	24'500	1.75	4.814

$$D_i = \left(\frac{c_0 \cdot q_V^{c_1} \cdot L \cdot f}{\Delta p \cdot p_C} \right)^{\frac{1}{c_2}}$$

- D_i = Rohrinne Durchmesser in mm
- $C_{0,1,2}$ = Koeffizienten der Näherungsgleichung
- q_V = Volumenstrom in l / s
- p_C = Netzdruck in MPa
- Δp = Druckverlust im Druckluftnetz in hPa
- L = Rohrlänge in m
- f = Formstückzuschlag = 1.4 ... 1.6

Druckverlusttabelle für Stahlrohre nach EN 10255 (2440) ab DN 65 EN 10255

Druckluft 0.6 MPa_i

$\theta = 20\text{ °C}$

$\rho = 8.333\text{ kg / m}^3$

$U = 2.197\text{E-}06\text{ m}^2 / \text{s}$

$k = 0.15\text{ mm}$

DN	15		20		25		32		40		50		65	
OD	21.3		26.9		33.7		42.4		48.3		60.3		76.1	
S	2.65		2.65		3.25		3.25		3.25		3.65		2.9	
ID	16		21.6		27.2		35.9		41.8		53		70.3	
R	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v
Pa / m	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s
10	1.2	0.93	2.7	1.15	5.1	1.35	10.7	1.63	16.0	1.81	30.2	2.12	64.1	2.56
20	1.7	1.34	3.9	1.66	7.3	1.94	15.3	2.35	23.0	2.60	43.3	3.04	91.6	3.66
30	2.2	1.66	4.8	2.05	9.0	2.40	18.9	2.89	28.3	3.20	53.3	3.74	113	4.50
40	2.5	1.93	5.6	2.38	10.4	2.79	21.9	3.36	32.9	3.71	61.7	4.34	131	5.21
50	2.8	2.17	6.3	2.67	11.7	3.13	24.6	3.76	36.8	4.16	69.2	4.86	146	5.84
60	3.1	2.39	6.9	2.94	12.9	3.43	27.0	4.13	40.4	4.57	75.9	5.34	160	6.41
70	3.4	2.59	7.5	3.18	13.9	3.72	29.2	4.47	43.7	4.94	82.1	5.77	174	6.93
80	3.6	2.77	8.0	3.41	14.9	3.98	31.2	4.79	46.8	5.29	87.9	6.18	186	7.42
90	3.8	2.95	8.6	3.62	15.8	4.23	33.2	5.08	49.7	5.62	93.3	6.56	197	7.87
100	4.0	3.11	9.0	3.82	16.7	4.46	35.0	5.36	52.5	5.93	98.5	6.92	208	8.31
110	4.2	3.27	9.5	4.01	17.5	4.68	36.8	5.63	55.1	6.22	103	7.26	218	8.72
120	4.4	3.42	9.9	4.19	18.3	4.90	38.4	5.88	57.6	6.50	108	7.59	228	9.11
130	4.6	3.56	10.3	4.37	19.1	5.10	40.0	6.13	59.9	6.77	112	7.91	237	9.48
140	4.8	3.70	10.7	4.54	19.8	5.30	41.6	6.36	62.2	7.03	117	8.21	246	9.85
150	5.0	3.83	11.1	4.70	20.6	5.49	43.0	6.59	64.5	7.28	121	8.50	255	10.20
160	5.1	3.96	11.5	4.86	21.2	5.67	44.5	6.81	66.6	7.53	125	8.78	264	10.53
170	5.3	4.09	11.8	5.01	21.9	5.85	45.9	7.02	68.7	7.76	129	9.06	272	10.86
180	5.5	4.21	12.2	5.16	22.6	6.02	47.2	7.23	70.7	7.99	133	9.32	280	11.18
190	5.6	4.33	12.5	5.30	23.2	6.19	48.5	7.43	72.7	8.21	136	9.58	288	11.49
200	5.8	4.44	12.9	5.44	23.8	6.35	49.8	7.63	74.6	8.43	140	9.83	295	11.79
210	5.9	4.55	13.2	5.58	24.4	6.51	51.0	7.82	76.4	8.64	143	10.08	303	12.08
220	6.0	4.66	13.5	5.71	25.0	6.67	52.3	8.01	78.3	8.84	147	10.32	310	12.37
230	6.2	4.77	13.8	5.85	25.6	6.82	53.5	8.19	80.0	9.04	150	10.55	317	12.65
240	6.3	4.88	14.1	5.97	26.1	6.97	54.6	8.37	81.8	9.24	153	10.78	324	12.93
250	6.5	4.98	14.4	6.10	26.7	7.11	55.8	8.54	83.5	9.43	157	11.00	330	13.20
260	6.6	5.08	14.7	6.22	27.2	7.26	56.9	8.71	85.2	9.62	160	11.22	337	13.46
270	6.7	5.18	15.0	6.34	27.7	7.40	58.0	8.88	86.8	9.81	163	11.44	343	13.72
280	6.8	5.28	15.3	6.46	28.2	7.53	59.1	9.05	88.4	9.99	166	11.65	350	13.97
290	7.0	5.37	15.5	6.58	28.7	7.67	60.1	9.21	90.0	10.17	169	11.86	356	14.22
300	7.1	5.46	15.8	6.69	29.2	7.80	61.1	9.37	91.6	10.35	172	12.07	362	14.47
310	7.2	5.56	16.1	6.80	29.7	7.93	62.2	9.52	93.1	10.52	175	12.27	368	14.71
320	7.3	5.65	16.3	6.91	30.2	8.06	63.2	9.68	94.6	10.69	177	12.47	374	14.94
330	7.4	5.74	16.6	7.02	30.7	8.19	64.2	9.83	96.1	10.86	180	12.66	380	15.18
340	7.6	5.82	16.9	7.13	31.2	8.31	65.1	9.98	97.5	11.02	183	12.85	386	15.41
350	7.7	5.91	17.1	7.24	31.6	8.44	66.1	10.13	99.0	11.18	186	13.04	391	15.63
360	7.8	6.00	17.3	7.34	32.1	8.56	67.1	10.27	100	11.34	188	13.23	397	15.86
370	7.9	6.08	17.6	7.44	32.5	8.68	68.1	10.41	102	11.50	191	13.41	402	16.08
380	8.0	6.16	17.8	7.54	33.0	8.79	68.9	10.56	103	11.66	193	13.59	408	16.29
390	8.1	6.25	18.1	7.64	33.4	8.91	69.8	10.70	105	11.81	196	13.77	413	16.51
400	8.2	6.33	18.3	7.74	33.8	9.03	70.7	10.83	106	11.96	198	13.95	419	16.72
420	8.4	6.48	18.8	7.94	34.7	9.25	72.5	11.10	109	12.26	203	14.30	429	17.14
440	8.6	6.64	19.2	8.13	35.5	9.47	74.2	11.37	111	12.55	208	14.64	439	17.54
460	8.8	6.79	19.6	8.31	36.3	9.69	75.9	11.63	114	12.84	213	14.97	449	17.94
480	9.0	6.94	20.1	8.49	37.1	9.90	77.5	11.88	116	13.12	218	15.29	459	18.33
500	9.2	7.09	20.5	8.67	37.9	10.10	79.2	12.12	118	13.39	222	15.61	468	18.71
520	9.4	7.23	20.9	8.84	38.6	10.31	80.7	12.37	121	13.66	227	15.92	478	19.08
540	9.6	7.37	21.3	9.01	39.4	10.50	82.3	12.60	123	13.92	231	16.23	487	19.45
560	9.7	7.50	21.7	9.18	40.1	10.70	83.8	12.84	125	14.17	235	16.53	496	19.80
580	9.9	7.64	22.1	9.35	40.8	10.89	85.3	13.07	128	14.43	239	16.82	505	20.16

Druckverlusttabelle für Stahlrohre nach EN 10255 (2440) ab DN 65 EN 10255

Druckluft 0.6 MPa_i

$\theta = 20\text{ °C}$

$\rho = 8.333\text{ kg / m}^3$

$U = 2.197\text{E-}06\text{ m}^2 / \text{s}$

$k = 0.15\text{ mm}$

DN	15		20		25		32		40		50		65	
OD	21.3		26.9		33.7		42.4		48.3		60.3		76.1	
S	2.65		2.65		3.25		3.25		3.25		3.65		2.9	
ID	16		21.6		27.2		35.9		41.8		53		70.3	
R	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v
Pa / m	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s
600	10.1	7.77	22.5	9.51	41.5	11.08	86.8	13.29	130	14.68	243	17.11	513	20.50
620	10.2	7.90	22.8	9.67	42.2	11.26	88.2	13.51	132	14.92	247	17.39	522	20.84
640	10.4	8.03	23.2	9.82	42.9	11.45	89.6	13.73	134	15.16	251	17.67	530	21.18
660	10.6	8.16	23.6	9.98	43.6	11.62	91.0	13.95	136	15.40	255	17.95	538	21.51
680	10.7	8.28	23.9	10.13	44.2	11.80	92.4	14.16	138	15.63	259	18.22	547	21.83
700	10.9	8.40	24.3	10.28	44.9	11.98	93.8	14.37	140	15.86	263	18.49	555	22.16
720	11.1	8.52	24.6	10.43	45.5	12.15	95.1	14.57	142	16.09	267	18.75	563	22.47
740	11.2	8.64	25.0	10.57	46.2	12.32	96.5	14.77	144	16.31	271	19.01	570	22.78
760	11.4	8.76	25.3	10.71	46.8	12.48	97.8	14.97	146	16.53	274	19.27	578	23.09
780	11.5	8.88	25.7	10.86	47.4	12.65	99.0	15.17	148	16.75	278	19.52	586	23.39
800	11.7	8.99	26.0	11.00	48.0	12.81	100	15.37	150	16.96	281	19.77	593	23.69
820	11.8	9.10	26.3	11.13	48.6	12.97	102	15.56	152	17.18	285	20.02	601	23.99
840	12.0	9.22	26.6	11.27	49.2	13.13	103	15.75	154	17.39	288	20.27	608	24.28
860	12.1	9.33	27.0	11.40	49.8	13.29	104	15.94	156	17.59	292	20.51	615	24.57
880	12.2	9.44	27.3	11.54	50.4	13.44	105	16.12	158	17.80	295	20.75	622	24.85
900	12.4	9.54	27.6	11.67	50.9	13.59	106	16.31	159	18.00	299	20.98	629	25.14
920	12.5	9.65	27.9	11.80	51.5	13.75	108	16.49	161	18.20	302	21.21	636	25.42
940	12.6	9.76	28.2	11.93	52.1	13.90	109	16.67	163	18.40	305	21.44	643	25.69
960	12.8	9.86	28.5	12.06	52.6	14.04	110	16.84	165	18.59	308	21.67	650	25.97
980	12.9	9.96	28.8	12.18	53.2	14.19	111	17.02	166	18.79	312	21.90	657	26.24
1000	13.1	10.07	29.1	12.31	53.7	14.34	112	17.19	168	18.98	315	22.12	663	26.50
1020	13.2	10.17	29.4	12.43	54.3	14.48	113	17.37	170	19.17	318	22.34	670	26.77
1040	13.3	10.27	29.7	12.55	54.8	14.62	114	17.54	171	19.36	321	22.56	677	27.03
1060	13.4	10.37	30.0	12.67	55.3	14.76	116	17.70	173	19.54	324	22.78	683	27.29
1080	13.6	10.46	30.2	12.79	55.8	14.90	117	17.87	175	19.73	327	22.99	690	27.55
1100	13.7	10.56	30.5	12.91	56.4	15.04	118	18.04	176	19.91	330	23.21	696	27.80
1120	13.8	10.66	30.8	13.03	56.9	15.18	119	18.20	178	20.09	333	23.42	702	28.05
1140	13.9	10.75	31.1	13.15	57.4	15.31	120	18.37	179	20.27	336	23.63	709	28.31
1160	14.1	10.85	31.3	13.26	57.9	15.45	121	18.53	181	20.45	339	23.83	715	28.55
1180	14.2	10.94	31.6	13.38	58.4	15.58	122	18.69	183	20.63	342	24.04	721	28.80
1200	14.3	11.04	31.9	13.49	58.9	15.71	123	18.85	184	20.80	345	24.24	727	29.04
1220	14.4	11.13	32.2	13.60	59.4	15.85	124	19.00	186	20.98	348	24.45	733	29.29
1240	14.6	11.22	32.4	13.72	59.9	15.98	125	19.16	187	21.15	351	24.65	739	29.53
1260	14.7	11.31	32.7	13.83	60.4	16.11	126	19.31	189	21.32	354	24.85	745	29.76
1280	14.8	11.40	32.9	13.94	60.8	16.23	127	19.47	190	21.49	356	25.04	751	30.00
1300	14.9	11.49	33.2	14.05	61.3	16.36	128	19.62	192	21.66	359	25.24	757	30.23
1320	15.0	11.58	33.5	14.16	61.8	16.49	129	19.77	193	21.82	362	25.43	763	30.47
1340	15.1	11.67	33.7	14.26	62.3	16.61	130	19.92	195	21.99	365	25.63	768	30.70
1360	15.2	11.76	34.0	14.37	62.7	16.74	131	20.07	196	22.15	367	25.82	774	30.93
1380	15.4	11.84	34.2	14.48	63.2	16.86	132	20.22	198	22.32	370	26.01	780	31.15
1400	15.5	11.93	34.5	14.58	63.6	16.98	133	20.36	199	22.48	373	26.20	786	31.38
1420	15.6	12.02	34.7	14.69	64.1	17.10	134	20.51	200	22.64	375	26.38	791	31.60
1440	15.7	12.10	35.0	14.79	64.5	17.22	135	20.65	202	22.80	378	26.57	797	31.83
1460	15.8	12.19	35.2	14.89	65.0	17.34	136	20.80	203	22.96	381	26.75	802	32.05
1480	15.9	12.27	35.4	15.00	65.4	17.46	137	20.94	205	23.11	383	26.94	808	32.27
1500	16.0	12.35	35.7	15.10	65.9	17.58	138	21.08	206	23.27	386	27.12	813	32.49
1520	16.1	12.44	35.9	15.20	66.3	17.70	139	21.22	207	23.43	388	27.30	819	32.70
1540	16.2	12.52	36.2	15.30	66.8	17.82	139	21.36	209	23.58	391	27.48	824	32.92

Druckverlusttabelle für XPress Edelstahl

Druckluft 0.6 MPa_i

θ = 20 °C

ρ = 8.333 kg / m³

U = 2.197E-06 m² / s

k = 0.0015 mm

DN	12		15		20		25		32		40		50	
OD	15		18		22		28		35		42		54	
s	1		1		1.2		1.2		1.5		1.5		1.5	
ID	13		16		19.6		25.6		32		39		5.1	
R	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v
Pa / m	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s
10	0.8	0.92	1.4	1.08	2.4	1.25	5.0	1.51	9.2	1.77	15.7	2.03	32.3	2.45
20	1.2	1.38	2.1	1.61	3.6	1.86	7.4	2.24	13.6	2.62	23.1	3.00	47.5	3.61
30	1.5	1.74	2.6	2.02	4.6	2.34	9.4	2.82	17.1	3.29	29.0	3.77	59.6	4.52
40	1.8	2.06	3.1	2.39	5.4	2.75	11.0	3.32	20.1	3.87	34.1	4.43	69.9	5.30
50	2.0	2.34	3.5	2.71	6.1	3.12	12.5	3.76	22.7	4.38	38.6	5.01	79.1	6.00
60	2.2	2.59	3.9	3.00	6.7	3.46	13.8	4.17	25.2	4.85	42.7	5.55	87.4	6.64
70	2.4	2.83	4.3	3.28	7.4	3.78	15.1	4.54	27.4	5.29	46.6	6.04	95.2	7.23
80	2.6	3.05	4.6	3.54	7.9	4.07	16.2	4.89	29.5	5.70	50.1	6.51	103	7.78
90	2.8	3.26	4.9	3.78	8.5	4.35	17.4	5.23	31.5	6.08	53.5	6.95	109	8.30
100	3.0	3.47	5.2	4.01	9.0	4.62	18.4	5.54	33.4	6.45	56.7	7.36	116	8.80
110	3.1	3.66	5.5	4.23	9.5	4.87	19.4	5.85	35.3	6.80	59.8	7.76	122	9.27
120	3.3	3.84	5.8	4.44	10.0	5.11	20.4	6.14	37.0	7.14	62.7	8.14	128	9.73
130	3.4	4.02	6.0	4.65	10.4	5.35	21.3	6.42	38.7	7.46	65.6	8.51	134	10.16
140	3.6	4.19	6.3	4.85	10.8	5.58	22.2	6.69	40.3	7.77	68.3	8.87	139	10.59
150	3.7	4.36	6.5	5.04	11.3	5.79	23.1	6.95	41.9	8.07	71.0	9.21	145	10.99
160	3.9	4.52	6.8	5.22	11.7	6.01	23.9	7.20	43.4	8.37	73.5	9.55	150	11.39
170	4.0	4.68	7.0	5.41	12.1	6.21	24.7	7.45	44.9	8.65	76.0	9.87	155	11.78
180	4.1	4.83	7.2	5.58	12.5	6.42	25.5	7.69	46.3	8.93	78.5	10.19	160	12.15
190	4.3	4.98	7.5	5.75	12.9	6.61	26.3	7.92	47.7	9.20	80.8	10.49	165	12.52
200	4.4	5.13	7.7	5.92	13.2	6.80	27.1	8.15	49.1	9.47	83.2	10.79	170	12.87
210	4.5	5.27	7.9	6.09	13.6	6.99	27.8	8.38	50.4	9.72	85.4	11.09	174	13.22
220	4.6	5.41	8.1	6.25	14.0	7.18	28.5	8.60	51.8	9.98	87.6	11.37	179	13.56
230	4.7	5.55	8.3	6.40	14.3	7.36	29.2	8.81	53.0	10.23	89.8	11.66	183	13.89
240	4.9	5.68	8.5	6.56	14.7	7.53	29.9	9.02	54.3	10.47	91.9	11.93	187	14.22
250	5.0	5.81	8.7	6.71	15.0	7.71	30.6	9.23	55.5	10.71	94.0	12.20	192	14.54
260	5.1	5.94	8.9	6.86	15.3	7.88	31.3	9.43	56.7	10.94	96.0	12.47	196	14.86
270	5.2	6.07	9.1	7.00	15.7	8.04	32.0	9.63	57.9	11.17	98.1	12.73	200	15.17
280	5.3	6.20	9.3	7.15	16.0	8.21	32.6	9.82	59.1	11.40	100	12.98	204	15.47
290	5.4	6.32	9.5	7.29	16.3	8.37	33.2	10.02	60.3	11.62	102	13.24	208	15.77
300	5.5	6.44	9.6	7.43	16.6	8.53	33.9	10.21	61.4	11.84	104	13.48	212	16.06
310	5.6	6.56	9.8	7.57	16.9	8.68	34.5	10.39	62.5	12.05	106	13.73	215	16.35
320	5.7	6.68	10.0	7.70	17.2	8.84	35.1	10.58	63.6	12.26	108	13.97	219	16.64
330	5.8	6.79	10.2	7.83	17.5	8.99	35.7	10.76	64.7	12.47	109	14.21	223	16.92
340	5.9	6.91	10.3	7.97	17.8	9.14	36.3	10.94	65.8	12.68	111	14.44	227	17.20
350	6.0	7.02	10.5	8.10	18.1	9.29	36.9	11.11	66.8	12.88	113	14.67	230	17.47
360	6.1	7.13	10.7	8.22	18.4	9.44	37.5	11.29	67.9	13.08	115	14.90	234	17.74
370	6.2	7.24	10.8	8.35	18.6	9.58	38.0	11.46	68.9	13.28	117	15.13	237	18.01
380	6.3	7.35	11.0	8.47	18.9	9.72	38.6	11.63	69.9	13.48	118	15.35	241	18.27
390	6.4	7.46	11.1	8.60	19.2	9.86	39.2	11.80	70.9	13.67	120	15.57	244	18.53
400	6.5	7.57	11.3	8.72	19.5	10.00	39.7	11.96	71.9	13.86	122	15.78	248	18.79
420	6.7	7.78	11.6	8.96	20.0	10.28	40.8	12.29	73.9	14.24	125	16.21	254	19.29
440	6.8	7.98	11.9	9.20	20.5	10.55	41.8	12.61	75.8	14.61	128	16.63	261	19.79
460	7.0	8.18	12.2	9.43	21.0	10.81	42.9	12.92	77.6	14.97	131	17.04	267	20.27
480	7.2	8.38	12.5	9.65	21.5	11.07	43.9	13.22	79.5	15.32	134	17.44	273	20.75
500	7.3	8.57	12.8	9.87	22.0	11.32	44.9	13.52	81.3	15.67	137	17.83	279	21.21
520	7.5	8.76	13.1	10.09	22.5	11.57	45.9	13.82	83.0	16.01	140	18.21	285	21.67
540	7.7	8.95	13.4	10.30	23.0	11.81	46.8	14.11	84.8	16.34	143	18.59	291	22.12
560	7.8	9.13	13.6	10.51	23.4	12.05	47.8	14.39	86.5	16.67	146	18.97	297	22.56
580	8.0	9.31	13.9	10.72	23.9	12.29	48.7	14.67	88.1	16.99	149	19.33	303	22.99

Druckverlusttabelle für XPress Edelstahl

Druckluft 0.6 MPa_i

θ = 20 °C

ρ = 8.333 kg / m³

U = 2.197E-06 m² / s

k = 0.0015 mm

DN	12		15		20		25		32		40		50	
OD	15		18		22		28		35		42		54	
s	1		1		1.2		1.2		1.5		1.5		1.5	
ID	13		16		19.6		25.6		32		39		5.1	
R	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v	q _{v,n}	v
Pa / m	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s	l / s	m / s
600	8.1	9.49	14.2	10.92	24.4	12.52	49.6	14.95	89.8	17.31	152	19.69	309	21.42
620	8.3	9.66	14.4	11.12	24.8	12.75	50.5	15.22	91.4	17.62	154	20.05	314	23.84
640	8.4	9.83	14.7	11.32	25.2	12.97	51.4	15.49	93.0	17.93	157	20.40	319	24.25
660	8.6	10.00	14.9	11.52	25.7	13.19	52.3	15.75	94.6	18.24	160	20.74	325	24.66
680	8.7	10.17	15.2	11.71	26.1	13.41	53.2	16.01	96.1	18.54	162	21.08	330	25.06
700	8.8	10.34	15.4	11.90	26.5	13.63	54.0	16.27	97.7	18.83	165	21.42	335	25.46
720	9.0	10.50	15.7	12.08	26.9	13.84	54.8	16.52	99.2	19.12	168	21.75	341	25.85
740	9.1	10.66	15.9	12.27	27.3	14.05	55.7	16.77	101	19.41	170	22.07	346	26.23
760	9.3	10.82	16.1	12.45	27.7	14.26	56.5	17.02	102	19.69	173	22.39	351	26.61
780	9.4	10.98	16.4	12.63	28.1	14.47	57.3	17.26	104	19.98	175	22.71	356	26.99
800	9.5	11.13	16.6	12.81	28.5	14.67	58.1	17.50	105	20.25	177	23.03	360	27.36
820	9.7	11.29	16.8	12.98	28.9	14.87	58.9	17.74	106	20.53	180	23.34	365	27.73
840	9.8	11.44	17.1	13.16	29.3	15.07	59.7	17.98	108	20.80	182	23.64	370	28.09
860	9.9	11.59	17.3	13.33	29.7	15.26	60.4	18.21	109	21.07	185	23.95	375	28.45
880	10.0	11.74	17.5	13.50	30.1	15.46	61.2	18.44	111	21.33	187	24.25	380	28.81
900	10.2	11.89	17.7	13.67	30.5	15.65	62.0	18.67	112	21.60	189	24.55	384	29.16
920	10.3	12.03	17.9	13.84	30.8	15.84	62.7	18.89	113	21.85	191	24.84	389	29.51
940	10.4	12.18	18.2	14.00	31.2	16.03	63.5	19.12	115	22.11	194	25.13	393	29.85
960	10.5	12.32	18.4	14.16	31.6	16.22	64.2	19.34	116	22.37	196	25.42	398	30.19
980	10.7	12.46	18.6	14.33	31.9	16.40	64.9	19.56	117	22.62	198	25.71	402	30.53
1000	10.8	12.60	18.8	14.49	32.3	16.58	65.6	19.77	119	22.87	200	25.99	407	30.86
1020	10.9	12.74	19.0	14.65	32.6	16.76	66.4	19.99	120	23.12	202	26.27	411	31.19
1040	11.0	12.88	19.2	14.80	33.0	16.94	67.1	20.20	121	23.36	205	26.55	415	31.52
1060	11.1	13.01	19.4	14.96	33.3	17.12	67.8	20.41	122	23.61	207	26.82	420	31.85
1080	11.3	13.15	19.6	15.12	33.7	17.30	68.5	20.62	124	23.85	209	27.10	424	32.17
1100	11.4	13.28	19.8	15.27	34.0	17.47	69.1	20.83	125	24.08	211	27.37	428	32.49
1120	11.5	13.42	20.0	15.42	34.3	17.65	69.8	21.03	126	24.32	213	27.63	432	32.81
1140	11.6	13.55	20.2	15.57	34.7	17.82	70.5	21.24	127	24.56	215	27.90	436	33.12
1160	11.7	13.68	20.4	15.72	35.0	17.99	71.2	21.44	129	24.79	217	28.16	440	33.43
1180	11.8	13.81	20.6	15.87	35.3	18.16	71.8	21.64	130	25.02	219	28.42	445	33.74
1200	11.9	13.94	20.8	16.02	35.7	18.33	72.5	21.84	131	25.25	221	28.68	449	34.05
1220	12.0	14.07	21.0	16.16	36.0	18.49	73.2	22.04	132	25.48	223	28.94	453	34.35
1240	12.1	14.19	21.1	16.31	36.3	18.66	73.8	22.23	133	25.70	225	29.20	457	34.65
1260	12.3	14.32	21.3	16.45	36.6	18.82	74.5	22.43	134	25.93	227	29.45	461	34.95
1280	12.4	14.44	21.5	16.60	36.9	18.99	75.1	22.62	136	26.15	229	29.70	464	35.25
1300	12.5	14.57	21.7	16.74	37.3	19.15	75.7	22.81	137	26.37	231	29.95	468	35.55
1320	12.6	14.69	21.9	16.88	37.6	19.31	76.4	23.00	138	26.59	233	30.20	472	35.84
1340	12.7	14.81	22.1	17.02	37.9	19.47	77.0	23.19	139	26.81	235	30.45	476	36.13
1360	12.8	14.94	22.3	17.16	38.2	19.63	77.6	23.38	140	27.02	236	30.69	480	36.42
1380	12.9	15.06	22.4	17.30	38.5	19.78	78.2	23.57	141	27.24	238	30.93	484	36.71
1400	13.0	15.18	22.6	17.43	38.8	19.94	78.9	23.75	142	27.45	240	31.18	487	36.99
1420	13.1	15.30	22.8	17.57	39.1	20.10	79.5	23.94	143	27.66	242	31.42	491	37.27
1440	13.2	15.41	23.0	17.71	39.4	20.25	80.1	24.12	145	27.87	244	31.65	495	37.56
1460	13.3	15.53	23.1	17.84	39.7	20.40	80.7	24.30	146	28.08	246	31.89	498	37.83
1480	13.4	15.65	23.3	17.98	40.0	20.56	81.3	24.48	147	28.29	248	32.13	502	38.11
1500	13.5	15.77	23.5	18.11	40.3	20.71	81.9	24.66	148	28.50	249	32.36	506	38.39
1520	13.6	15.88	23.7	18.24	40.6	20.86	82.5	24.84	149	28.70	251	32.59	509	38.66
1540	13.7	16.00	23.8	18.37	40.9	21.01	83.0	25.02	150	28.91	253	32.82	513	38.93