

**Effizienz ist wichtig**

# Druckluft-Kompressoren

Die wichtigsten Fakten zur Auswahl und zum Einsatz von Druckluft-Kompressoren

**Die sechs wichtigsten Punkte zur Systemoptimierung**

- Überprüfung Druckluftanwendung, evtl. Ersatz durch effizientere Systeme
- Druckluftbedarf überprüfen: auf nötige Druckstufe begrenzen. 1 bar tieferer Netzdruck ergibt 10% Elektrizitätseinsparung
- Bessere Druckluftanwendungsgeräte einsetzen
- Tageszeitliche Verfügbarkeit minimieren, Teilnetze nachts und an Wochenenden abschalten
- Systematische Reduktion der Leckagen an Leitungen, Armaturen, Ventilen, Anschlüssen und Verbrauchern, regelmässige Kontrolle
- Bedarfsgeregelte effiziente Antriebe und geeignete Kompressoren einsetzen. Einsatz einer übergeordneten Steuerung

**Ziel und Zielpublikum**

Das Topmotors Merkblatt Nr. 26 beschäftigt sich mit dem Thema effiziente Druckluftanlagen. Es vermittelt allen technisch Interessierten, also Anwendern, Planern, Installateuren, Energieberatern, etc., Informationen rund um effiziente Druckluftherzeugung und Druckluftanwendung bei der Planung von Neuanlagen sowie Tipps und Know-how bei der Optimierung von bestehenden Anlagen.

**Energieverbrauch von Druckluftsystemen**

Kompressoren brauchen in der Schweiz circa 1,1 Mrd. kWh pro Jahr elektrische Energie, das entspricht 2% des gesamten Endverbrauchs (Quelle: BFE-Studie 2004 «Elektrizitätsbedarf für Druckluft in der Schweiz»). Sie gehören, neben den Pumpen und Ventilatoren, zusammen mit den mit Kompressoren betriebenen Kälteanlagen, zu den grössten Verbrauchern in der Industrie (siehe Abbildung 1). Mit 3 bis 10 Rp. pro m<sup>3</sup> ist Druckluft eine teure Energie.

Bei Anlagen mit wenigen Betriebsstunden machen die Stromkosten nur etwa 20% der Betriebskosten aus, bei

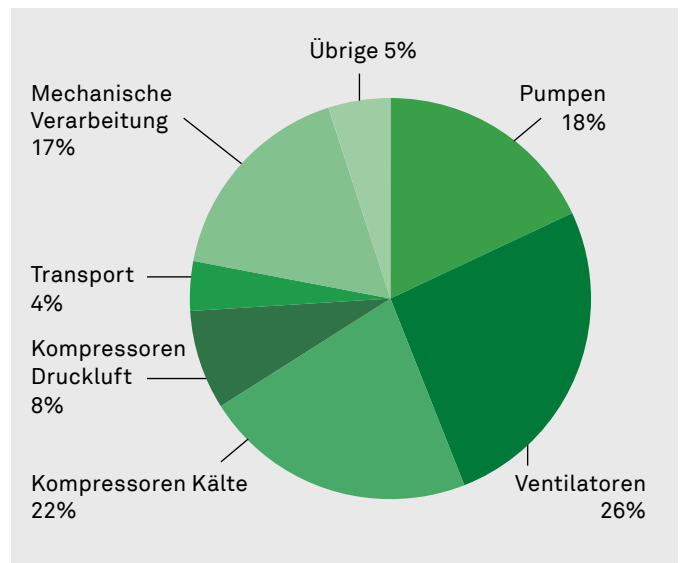


Abbildung 1: Anteile des Strombedarfs von elektrischen Motoren nach ihrer Anwendung. (Quelle: Easy, 2012)

Anlagen, welche rund um die Uhr laufen, können es bis zu 80 % sein. Richtig dimensionierte und anwendungsorientiert geregelte Druckluftanlagen erfüllen alle Anforderungen des täglichen Betriebs bei minimalem elektrischem Energieverbrauch und ermöglichen somit einen möglichst kostengünstigen Einsatz der Anlage. Gerade bei langen Betriebszeiten machen sich energetische Optimierungen deutlich bemerkbar. Alle Einsparungen summieren sich, sodass auch aufwendigere Umbauten oder detaillierte Analysen bei kurzen respektive guten Payback-Zeiten möglich sind.

## **Aufgaben der Beteiligten**

Die Auslegung einer optimalen Druckluftversorgung benötigt das Zusammenspiel mehrerer Fachleute. Es muss vorab das benötigte Volumen, der nötige Netzdruck wie auch die geforderte Druckluftqualität möglichst genau definiert werden. Im Anschluss erstellt ein Planungsbüro oder Kompressorlieferant ein Konzept, das diese Vorgaben möglichst sinnvoll und wirtschaftlich erfüllt. Nach der Umsetzung sind interne Mitarbeiter gefordert, welche die Anlage verstehen und den Betrieb bei Bedarf kontinuierlich nachjustieren können. So kann z. B. das Aktivieren des Wochenend-Modus an einem produktionsfreien Feiertag ohne viel Aufwand Energie sparen.

Es gilt, die Anlage für alle auftretenden Anforderungen genau auszulegen und vorab die Betriebszustände zu simulieren. Dabei sind Überdimensionierungen grundsätzlich zu vermeiden, um einen optimalen Betriebspunkt zu gewährleisten.

# Grundlagen

## Wo und wie werden Druckluftsysteme sinnvoll eingesetzt?

Man unterscheidet zwischen Ventilator (bis zu 0,1 bar Überdruck), Gebläse (bis zu 3 bar Überdruck) und Verdichter (ab 3 bar Überdruck).

Für die Anwendung wird Luft mit Verdichtern (Kompressoren) auf einen höheren Druck gebracht und entsprechend der Anwendung unterschiedlich behandelt. Der Energieaufwand für den Kompressionsvorgang ist beträchtlich, da durch die Verdichtung der Luft und die Reibung in den Kompressoren unvermeidbar grosse Mengen an Wärmeenergie entstehen, die oft nicht genutzt werden. Druckluft ist neben Elektrizität ein wichtiger Sekundärenergieträger in der Industrie und im verarbeitenden Gewerbe. Mit Druckluft werden viele Geräte, Maschinen und Anlagen betrieben, z. B. Druckluftzylinder zum Bewegen und Pressen, Druckluftventile in Rohrleitungen, Druckluftmotoren (Explosionsschutz), Druckluftwerkzeuge, Spülluft zum Schutz vor Verschmutzung, Blasdüsen zum Reinigen, Trocknen und Kühlen, Injektoren für Materialtransport, zur Erzeugung von Vakuum und zum Aufblasen.

In einem idealen Druckluftsystem liefert der Kompressor für eine Anwendung genau den erforderlichen Druck und die benötigte Luftmenge, die übrige Zeit ist er abgeschaltet. Im realen Druckluftsystem sind

aber viele Anwendungen an einem Verteilnetz angeschlossen und der Kompressor ist auf den maximal erforderlichen Druck von vielleicht nur einer einzigen Anwendung eingestellt. Zusätzlich entweicht an vielen Maschinen Druckluft aus Leckagen, auch wenn sie nicht in Betrieb sind, da der Kompressor während der Arbeitszeit oder oft sogar dauernd eingeschaltet ist. Abbildung 2 zeigt die einfachste Form eines Druckluftsystems anhand eines Spielzeugs. Sie zeigt einen handbetätigten Kolben als Verdichter und einen pneumatischen Zylinder als Anwendung. Wird über den Kolben Luft komprimiert, fährt der Zylinder aus.



Abbildung 2: Links ist die Druckluftpumpe (Verdichter), rechts ist der Druckluftzylinder (Anwendung). (Foto: Rolf Gloor)

## Definitionen

Eine Druckluftanlage (Abbildung 3) besteht aus

- einem elektrischen Motor als Antrieb
- einem Verdichter, der Aussenluft ansaugt und verdichtet
- einem Speicher
- einem Verteilnetz
- Anwendungsgeräten, welche die komprimierte Luft energetisch nutzen und dann drucklos wieder in die Atmosphäre entlassen.

Unter Kompressor versteht man also eine Kombination von Motor, Verdichter und Kühler.

Eine Druckluftanlage komprimiert Luft auf ein kleineres Volumen und erzeugt somit einen Druck. Als Mass für den Überdruck wird die Einheit «bar» verwendet. Ein Kompressor mit 7 bar hat also einen Ausgangsdruck, welcher um 7 bar grösser als der Atmosphärendruck ist (etwa 1 bar absolut, je nach Wetter und Höhe). Gegenüber dem Vakuum ist der Druck also etwa 8 bar (absolut) oder 800 kPa (Kilo-Pascal).

Die Liefermenge bezieht sich auf das vom Verdichter angesaugte Luftvolumen. Es werden die Grössen l/s (Liter pro Sekunde), l/min (Liter pro Minute) und m<sup>3</sup>/min (Kubikmeter pro Minute) sowie m<sup>3</sup>/h (Kubikmeter pro

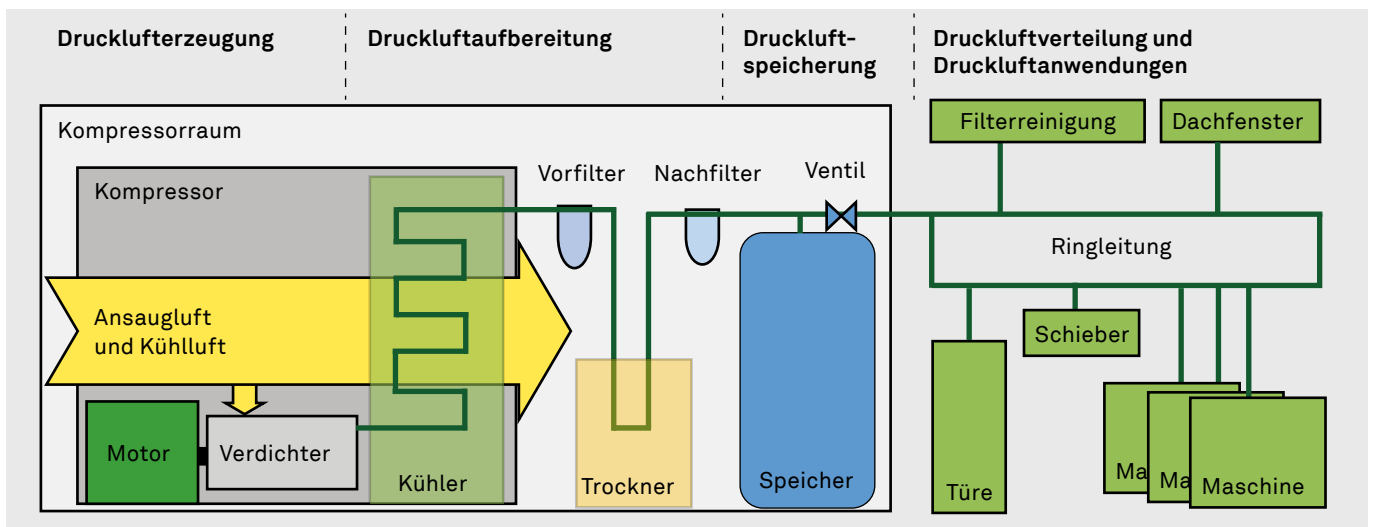


Abbildung 3: Komponenten einer Druckluftanlage (Quelle: Rolf Gloor).

Druck absolut		Überdruck	Beschreibung, Bemerkungen
Pa	bar	bar	
0	0	-1,00	Perfektes Vakuum
2000	0,02	-0,98	Unterdruck von Vakuumpumpen
15000	0,15	-0,85	Unterdruck von Drucklufterjektoren
50000	0,50	-0,50	Unterdruck eines Sauggebläses
75000	0,75	-0,25	Unterdruck eines Staubsaugers
89120	0,89	0	Luftdruck auf 1000 m über Meer
100000	1,00	0	Luftdruck auf 100 m über Meer
101325	1,01	0	Luftdruck auf Meereshöhe (1 atm)
101000	1,01	0,01	Überdruck eines Ventilators
Im Merkblatt behandelt	150000	1,5	Überdruck eines Gebläses
	200000	2	Überdruck eines Drehkolbengebläses (Roots-Gebläse)
	250000	2,5	Überdruck eines Schraubengebläses
	500000	5	Grenze zwischen Niederdruck und Normaldruck
	730000	7,3	Normdruck für Druckluftwerkzeuge (bei Vollast)
	1700000	17	Üblicher zulässiger Maximaldruck für Komponenten
	3700000	37	Fertigblasdruck Herstellung PET-Flaschen
30100000	301	300	Atemluftflaschen, Tauchflaschen
200100000	2001	2000	Hochdruckanwendungen in der Verfahrenstechnik

Tabelle 1: Übersicht verschiedener Druckbereiche (Unterdruck, Atmosphärendruck, Niederdruck, Normaldruck und Hochdruck. (Überdruckwerte bezogen auf 1 bar Absolutdruck, ausser bei Beispielen mit Luftdruck)

Stunde) verwendet. In der Druckluftbranche verwendet man alle 4 Grössen, es gibt keine einheitliche Bezeichnung. Für die Leistungsangaben von Druckluftkompressoren gelten die Bedingungen der Norm ISO 1217: ein Umgebungsdruck von 1 bar, eine Temperatur (Luft und Kühlwasser) von 20 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 0 %.

Bei der Leistungsangabe des Kompressors bezieht man sich auf die elektrische Nennleistung des Antriebsmotors. Das Leistungsvermögen der Druckluft ist bezogen auf eine ideale isothermische Verdichtung:

$$P = \dot{V}_1 p_1 \ln(p_2/p_1)$$

**Beispiel:** Für eine Liefermenge  $\dot{V}_1 = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , einem Umgebungsdruck  $p_1 = 100 \text{ kPa}$  (1 bar) und einem Ausgangsdruck von  $p_2 = 900 \text{ kPa}$  (9 bar, 8 bar Überdruck) hat die Druckluft eine pneumatische Leistung von  $P = 22 \text{ kW}$ . Wenn der Antriebsmotors des Kompressors dafür 37 kW elektrische Leistung aufnimmt, dann liegt der Wirkungsgrad des Kompressors bei 59 % ( $22 \text{ kW}/37 \text{ kW} = 0,59$ ).

Angesaugte Luftmenge $V_n$				Kompressorleistung kW
l/s	l/min	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /h	
1	60	0,06	3,6	0,4
2	120	0,12	7,2	0,7
5	300	0,3	18	1,7
10	600	0,6	36	3,5
20	1200	1,2	72	7
50	3000	3	180	17
100	6000	6	360	35
200	12000	12	720	70
500	30000	30	1800	175
1000	60000	60	3600	350

**Tabelle 2: Luftmenge in den 4 gängigen Einheiten, Kompressorleistung für 7 bar Überdruck und 60% Wirkungsgrad (bezogen auf isotherme Verdichtung)**

## Alternative Systeme: Hydraulik, direkter Servoantrieb, Linearmotor

Druckluftmotoren und Druckluftzylinder sind deutlich günstiger in der Anschaffung als energieeffizientere Alternativen. Sie sind oft leichter, robuster (Schmutz, Feuchtigkeit), sicherer (Stromschlag, Ölleck, Explosionsschutz) und sie werden durch die expandierende Druckluft gekühlt. Für pneumatische Antriebe mit vielen Betriebsstunden sind direkte elektrisch betriebene Antriebe durch den deutlich besseren Wirkungsgrad über die Lebensdauer eine deutlich günstigere Alternative (Tabelle 3).

Anwendung	Maximale Wirkungsgrade*		
	Druckluft	Hydraulik	Elektro**
Hochtourige Spindel (ca. 20000 U/min)	40 %	–	80 %
Handwerkzeug (ca. 2000 U/min)	15 %	40 %	80 %
Rührwerk (ca. 200 U/min)	10 %	50 %	80 %
Hubzylinder einfach wirkend	40 %	–	80 %
Hubzylinder doppelt wirkend	30 %	50 %	80 %
Rüttler	20 %	40 %	70 %
Vakuumbereitstellung	5 %	–	40 %

\*) Gesamtwirkungsgrad (abgegebene mechanische Leistung, bezogen auf die elektrische Eingangsleistung)  
\*\*) Servo- oder Linearmotor

**Tabelle 3: Maximal möglicher Wirkungsgrad von Anwendungen**

## Wo entstehen im Kompressor Verluste?

Bei der Komprimierung erwärmt sich die Luft. Weitere Wärmeverluste fallen im Kompressor durch den Antriebsmotor und durch Reibung im Kompressor an. Ein grosser Teil dieser Wärme steht als nutzbare Abwärme bis zu 80 °C zur Verfügung (Abwärmenutzung). Ein weiterer Teil der eingesetzten Energie geht durch interne Leakageverluste verloren, welche mit steigendem Druck proportional zunehmen. Ein guter Druckluftkompressor hat einen Wirkungsgrad von 60 %. In einem Druckluftkompressor wird mit der vom Motor eingebrachten mechanischen Arbeit die angesaugte Luft verdichtet. Der Energieinhalt (Enthalpie) der Luft erhöht sich dabei durch die Kompression verursachte Erwärmung der Luft. Die heisse Luft wird im Kompressor wieder bis zur Umgebungstemperatur abgekühlt, so dass der Energieinhalt der Luft (Produkt aus Volumen und Druck) wieder gleich gross wie beim Eintritt ist. Die im Kompressor entstehende Abwärme entspricht somit der aufgenommen elektrischen Leistung, wovon etwa 70 % – 80 % auf einem nutzbaren Temperaturniveau von 60 °C bis 80 °C anfallen.

Das Leistungsvermögen der komprimierten Luft, die Druckluftenergie, wird mit dem physikalischen Begriff Exergie beschrieben. Die Exergie entspricht der Verdichterarbeit bei der isothermen Verdichtung. Bei der Expansion kühlt sich die Luft ab.

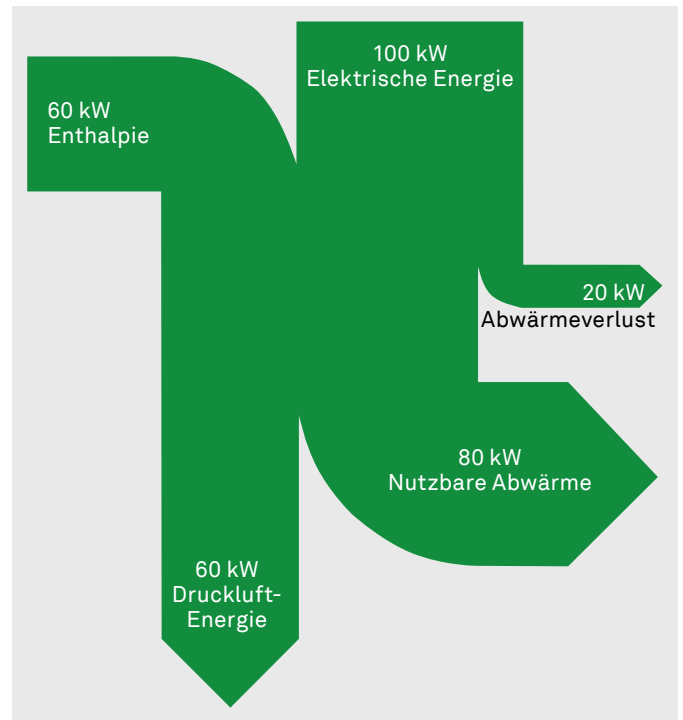
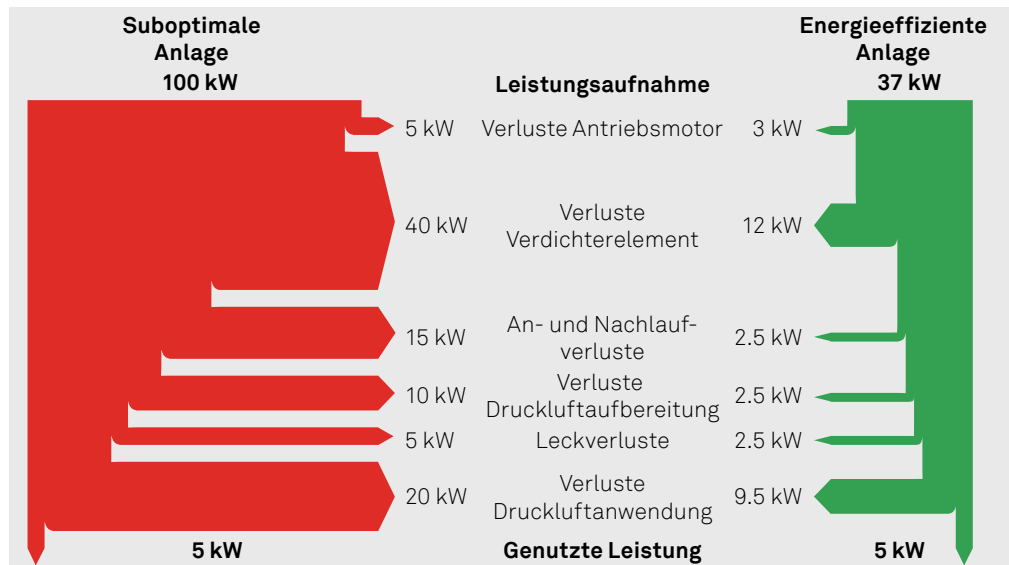


Abbildung 4: Energiefluss Druckluftkompressor. (Quelle: Rolf Gloor)

## Wo entstehen im Druckluftsystem Verluste?

Je nach Anlage sind die Verlustanteile der verschiedenen Druckluftkomponenten etwas anders verteilt. Eine typische Aufteilung zeigt die Abbildung 5.



**Abbildung 5:** Ausgehend von einer erforderlichen Leistung von 5 kW aus einer Druckluftanlage werden die zwei Beispiele gemäss Tabelle 4 verglichen: suboptimale Anlage (rot, links) und energieeffiziente Anlage (grün, rechts). (Quelle: Rolf Gloor)

Genutzte Leistung	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mechanische Wellenleistung für Rührwerke, Werkzeuge, etc.</li> <li>■ Hubarbeit von Pneumatikzylinder für Automaten und Ventile</li> <li>■ Blasarbeit zur Reinigung von Filtern, Teilen und Anlagen</li> </ul>	
<b>Anlagenteil</b>	<b>Suboptimale Anlage</b>	<b>Energieeffiziente Anlage</b>
Druckluftanwendung (hier ohne die Möglichkeiten der Substitution durch elektrisch betriebene Komponenten)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Druckluftmotoren mit 20 % Wirkungsgrad</li> <li>■ Doppeltwirkende Druckluftzylinder (Rückstellung auch mit Druckluft)</li> <li>■ Lange Abblasimpulse</li> <li>■ Festeingestelltes Intervall für Abblasimpulse</li> <li>■ Blasdüse mit grosser Öffnung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Druckluftmotoren mit 33 % Wirkungsgrad</li> <li>■ Einfachwirkende Druckluftzylinder (Rückstellung mit Federkraft)</li> <li>■ Kurze Abblasimpulse</li> <li>■ Abblasimpulse nach Überschreiten Differenzdruck</li> <li>■ Injektordüsen</li> </ul>
Leckverluste	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Undichte Verschraubungen und Kupplungen</li> <li>■ Unbenutzte Handventile an den Maschinen</li> <li>■ Kondensatablassventile mit fest eingestelltem Intervall oder verklebten Schwimmern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Dichte Verschraubungen und Kupplungen (regelmässige Kontrolle mit Lecksuchgerät)</li> <li>■ Automatische Hauptventile an Maschinen</li> <li>■ Elektronische Kondensatablassventile mit Niveaumessung</li> </ul>
Druckluftaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Zu viele zu kleine Filter, ungenügende Wartung (Ersatz nach Problemen im Netz)</li> <li>■ Adsorptionstrockner mit festeingestelltem Intervall für Regeneration (Luftverlust 20 % – 30 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Für die erforderliche Druckluftqualität ausreichende Anzahl und Grösse der Filter, regelmässige Wartung</li> <li>■ Kältetrockner und für Labor kleiner Adsorptionstrockner mit Feuchteregelung</li> </ul>
An- und Nachlaufverluste	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Betrieb von zwei 70-kW-Kompressoren und 300 Liter Speicher (kurze Laufzeiten)</li> <li>■ Druckband 7 bar zu 8 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Betrieb mit zwei 25-kW-Kompressoren (einer mit FU) und 6000-Liter-Speicher</li> <li>■ Druckband 6,5 bar zu 7 bar</li> <li>■ Übergeordnete Steuerung</li> </ul>
Druckluftkompressor	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ineffiziente Kompressoren mit 50 % Wirkungsgrad (isotherm)</li> <li>■ Keine Wartung (Ansaugfilter, etc.), warmer und staubiger Kompressorraum</li> <li>■ Abwärme wird unzureichend abgeführt (Wärmestau)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Effiziente Kompressoren mit 60 % Wirkungsgrad (isotherm)</li> <li>■ Jährliche Wartung</li> <li>■ Kühler und sauberer Kompressorraum</li> <li>■ Abwärmennutzung für Brauchwarmwasser</li> </ul>
Antriebsmotor	Ineffizienter Motoren mit Riemenantrieb	IE3- oder IE4-Direktantrieb, evtl. mit Frequenzumrichter

**Tabelle 4:** Erklärungen zur Abbildung 5.

## Energieeffizienz

Ein energieeffizientes Druckluftsystem weist einen tiefen Netzdruck (5 bar Überdruck) auf. Anwendungen, welche über einige hundert Stunden im Jahr viel Druckluft benötigen, sind wenn möglich durch energieeffiziente Alternativen zu ersetzen (elektrische Servoantriebe, Linearmotoren, hydraulische Anlagen, etc.). Maschinen oder Stränge mit kaum vermeidbaren Leckstellen sollten bei Nichtgebrauch mit einem automatischen Ventil vom Netz getrennt werden. Die Kompressoranlage läuft im Idealfall während der meisten Zeit im optimalen Betriebsbereich und der Energieverbrauch wird laufend überwacht.

## Effiziente Kompressionssysteme

Den effizienten Kompressor gibt es nicht. Es gilt das gesamte Druckluftsystem inklusive der Aufbereitung der Druckluft sowie einer möglichen Abwärmenutzung zu betrachten. Die Hersteller von Kompressoren arbeiten laufend an möglichen Effizienzsteigerungen ihrer Produkte, um sich auf dem Markt zu behaupten. Ein effizienter Kompressor ergibt jedoch noch kein effizientes Druckluftsystem. Hinzu kommt, dass sich der Druckluftverbrauch über den Wochenschnitt ständig verändert. Simulationen eines gemessenen Verbrauchsprofils können dabei helfen, eine effiziente Variante zu ermitteln.

Hersteller von Kompressoren bieten Broschüren mit Grundlagewissen im Bereich Drucklufttechnik an, in welchen die einzelnen Kompressoren- und Aufbereitungsarten erläutert werden. Dieses Merkblatt geht nur kurz auf die Grundlage der einzelnen Komponenten ein und widmet sich dafür ausführlicher der Systemoptimierung.

## Kompressionsprinzipien

Ein volumetrischer Kompressor (z. B. Kolbenkompressor) schliesst ein Volumen ein und erhöht den Druck durch Verkleinerung dieses Volumens. Volumetrisch verdichtende Kompressoren sind in der Industrie am häufigsten anzutreffen.

Bei einem dynamischen Kompressor (z. B. Turbokompressor) wird die Luft durch ein Laufrad (Turbine) stark beschleunigt. Die kinetische Energie der Luft wird anschliessend in Druckenergie verwandelt, indem die Luft abgebremst und so komprimiert wird. Bis anhin wurden dynamische Kompressoren nur für grosse Druckluftmengen mit Motorenleistungen über 400 kW gebaut. Einige Hersteller versuchen heute auch kleinere Kompressoren mit einer Leistung unter 100 kW auf den Markt zu bringen. Im Vergleich zu volumetrischen Kompressoren sind die Wartungskosten tiefer, jedoch haben die Ansaugbedingungen in der Druckluftzentrale einen höheren Einfluss auf die Energieeffizienz.

### Kolbenkompressor

Der Kolbenkompressor ist der älteste und insbesondere für kleinere Anwendungen (Gewerbebetriebe) am häufigsten eingesetzte Kompressortyp. Er ist einfach- oder doppelt wirkend, ölgeschmiert oder ölfrei und mit verschiedener Zylinderanzahl in unterschiedlichen Anordnungen erhältlich (siehe Abbildung 6). Mit Ausnahme von sehr kleinen Kompressoren mit vertikalen Zylindern ist die V-Anordnung bei Kolbenkompressoren die gebräuchlichste Bauart.

Kolbenkompressoren gibt es auch für Industrieapplikationen. Zudem sind sie insbesondere zur Verdichtung von hohen Drücken > 20 bar und Spezialgasen geeignet.

Verdichtertyp	Druckbereich [bar]	Leistungsaufnahme [kW]	Wirkungsgrad [isotherm]	Bemerkungen
Kolbenkompressor 2-stufig	4 – 500	0,1 – 30	60 %	Kein Dauerbetrieb
Schraubenkompressor ölfrei	4 – 16	5 – 500	50 %	
Schraubenkompressor	4 – 16	5 – 500	60 %	
Turbokompressor	3 – 8	30 – 1000	80 %	
Scrollverdichter	4 – 8	1 – 5	50 %	
Schraubengebläse	0,3 – 1,5	10 – 1000	70 %	
Drehkolben (Roots)	0,1 – 1	0,1 – 1000	60 %	
Gebälse	0,1 – 0,2	0,1 – 1000	80 %	

Tabelle 5: Verdichtervergleich.





zwischen der Ein- und Austrittsseite begrenzt. Aus diesem Grunde weisen ölfrei verdichtende Schraubenkompressoren meist mehrere Verdichtungsstufen auf. Neben den genannten Bauformen sind noch vor allem der Scroll-, Drehzahl-, und Turboverdichter erhältlich. Da nur eine kleine Anzahl derartiger Kompressoren in Betrieb ist, wird hier nicht näher darauf eingegangen.

## Luftaufbereitung (kühlen, filtern, trocknen, etc.)

Ohne Aufbereitung erhält man keine definierte Druckluftqualität, denn der Kompressor wirkt wie ein grosser Staubsauger. Die Verunreinigungen in der Umgebungsluft werden vom Kompressor mit angesogen und in konzentrierter Form ins Druckluftnetz abgegeben, unabhängig davon, ob es eine ölgekühlte oder trockenlaufende Maschine ist.

Druckluft kann nur in seltenen Fällen direkt nach dem Kompressor ohne weitere Aufbereitung verwendet werden. Der Anteil an Partikeln, Feuchtigkeit und Öl sind in den anfallenden Mengen in der Regel zu hoch für Verbrauchergeräte. Der Ausfall einer Aufbereitungskompo-

nente hat somit auch immer einen negativen Einfluss auf die Funktionalität und Lebensdauer der Verbrauchergeräte. Wie rein die Druckluft sein muss, wird in erster Linie vom Verbraucher bestimmt. Es kann durchaus sein, dass in grossen Druckluftsystemen einzelne Verbraucher vorhanden sind, welche eine höhere Druckluftqualität erfordern als der Rest im System. Zum Beispiel können Anlagen mit Verbrauchern (Ventile, Zylinder), welche sich im Freien befinden und im Winter einfrieren können, zeitweise Druckluft mit weniger Feuchtigkeit benötigen. Oft macht es in solchen Fällen Sinn, die Druckluft dezentral auf die geforderte Qualität aufzubereiten. Das ist jedoch individuell abhängig vom Anteil und der Position dieser Verbraucher im Druckluftsystem.

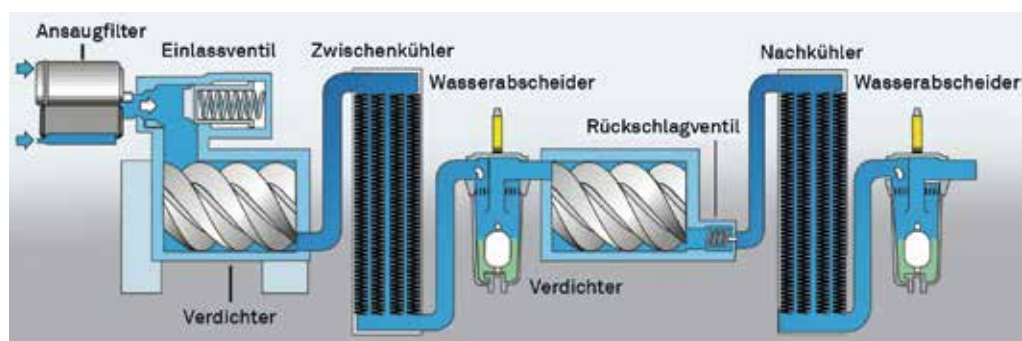


Abbildung 8: Trockenlaufender Schraubenkompressor (Quelle: Atlas Copco)

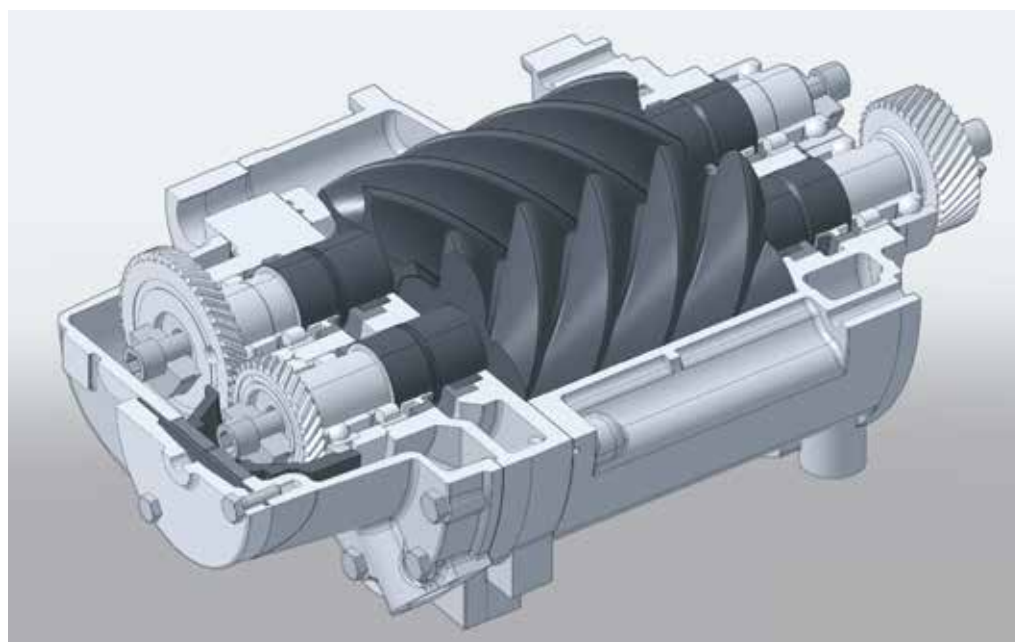


Abbildung 9: Ölfreier Schraubenkompressor mit Synchrongetriebe (Quelle: Atlas Copco)

## Trocknen der Druckluft

Atmosphärische Luft enthält meistens bei höheren Temperaturen mehr und bei niedrigen Temperaturen weniger Wasserdampf. Wird diese Luft verdichtet, steigt die Wasserdampfkonzentration weiter an. Ein Kompressor (siehe Abbildung 10) mit einem Volumenstrom von 200 l/s saugt in 8 Stunden zusammen mit der Luft insgesamt 80 Liter Wasserdampf an und drückt diese in das Druckluftnetz (Ansaugbedingungen: 20 °C, 80 % relative Feuchtigkeit). Mittels Filter kann keine Feuchtigkeit entfernt werden, da Wasserdampf als Gas in der Luft enthalten ist und Filtern nur Festkörper bzw. Tropfen erfassen können. Die Auswahl des Drucklufttrockners richtet sich nach dem geforderten Drucktaupunkt. Grundsätzlich gilt: Je niedriger der geforderte Drucktaupunkt, desto höher die Anschaffungs- und Betriebskosten des Trockners. Prinzipiell existieren vier verschiedene Methoden, um Feuchtigkeit aus der Druckluft zu entfernen: Kühlung, Überverdichtung, Adsorption und Absorption.

In rund 80 % aller Anwendungsfälle reichen Kältetrockner für die Druckluftaufbereitung aus. Ihr Einsatz ist grundsätzlich auch zu empfehlen, da damit teure Unterhaltskosten am Rohrleitungsnetz und an den Druckluftverbrauchern gespart werden können. Beim Erzeugen eines Drucktaupunkts zwischen 3 °C und 7 °C sparen Kältetrockner mit Energiesparregelungen oder mit Kältespeicher gegenüber solchen mit Heissgas-Bypass-System 50 % bis 70 % Energie ein. Selbst wenn niedrigere Drucktaupunkte gefordert werden, kann bei der Anschaffung teurerer Geräte Druckluft effizient bis auf – 70 °C getrocknet werden. Ein Beispiel ist die Kombinationen aus Kälte- und Adsorptionstrockner, welcher den Energiebedarf gegenüber herkömmlichen Adsorptionstrocknern um etwa zwei Drittel senkt.

## Filtern der Druckluft

Mit Staub-, Grob- und Feinfilter werden Feststoffe, Staub und Aerosole aus der Druckluft ausgeschieden. Sind die Partikel grösser als die vorhandenen Öffnungen im Filtermedium, werden diese durch die Siebwirkung festgehalten. Dies trifft gewöhnlich nur auf Partikel grösser als 100 µm zu. Der Filterwirkungsgrad kann durch ein feineres und dichteres Filtermedium erhöht werden. Partikel zwischen 10 µm und 100 µm werden durch ihre Massenträgheit entfernt. Während der Luftstrom um die Fasern herumfließt, treffen die Teilchen auf die Fasern und haften auf deren Oberfläche. Je schneller das Gas fließt, desto besser funktioniert dieser Effekt. Sehr kleine Partikel (< 0,1 µm) bewegen sich auf Grund von Kollisionen mit Luftmolekülen mehr oder weniger zufällig. Früher oder später treffen sie aber auf eine Faser und bleiben dort haften. Dieser Vorgang wird durch eine niedrige Strömungsgeschwindigkeit und eine hohe Faseranzahl unterstützt. Die Filterwirkung setzt sich aus der Qualität der erwähnten Vorgänge zusammen. Im Grunde stellt jeder Filter einen Kompromiss dar, da kein Filter für alle Teilchengrößen denselben Wirkungsgrad erreichen kann. Besonders der unterschiedliche Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit verhindert einen gleich hohen Wirkungsgrad für alle Teilchengrößen. In der Praxis stellt sich heraus, dass Teilchen mit einem Durchmesser von 0,3 µm die am schwierigsten zu entfernenden Partikel sind. Der Wirkungsgrad eines Filters wird immer für eine bestimmte Partikelgröße angegeben. Oft wird ein Filterwirkungsgrad von mehr als 95 % erreicht. Dies bedeutet aber, dass 5 % der Partikel den Filter noch passieren. Ausserdem kann ein Filter, der einen hohen Wirkungsgrad von 95 % für eine Teilchengröße von 10 µm aufweist, immer noch Teilchen mit einem Durchmesser von 30 µm bis 100 µm passieren lassen. Öl- und Wassertropfen verhalten sich wie feste Partikel und werden von den Filtern erfasst. Diese Tropfen verbinden

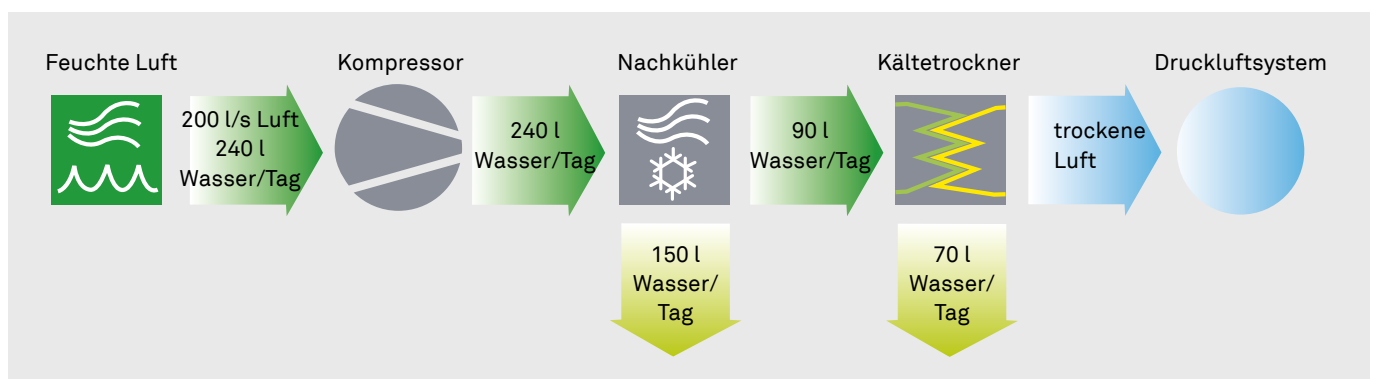


Abbildung 10: Wasser in der Druckluft. (Quelle: Atlas Copco)

sich im Filtermedium, laufen nach unten und tropfen auf den Boden des Filtergehäuses. Befindet sich jedoch Wasser oder Öl in Dampfform in der Luft, passieren diese Dämpfe den Filter. Zum Abscheiden von Öldämpfen werden besondere Filtermaterialien, wie zum Beispiel Aktivkohle, benötigt.

Jeder Filter erzeugt einen Druckverlust. Dieser Druckverlust ist ein zusätzlicher Energieverlust in der Druckluft. Sehr feine Filter mit einem dichten Filtermedium verursachen einen höheren Druckverlust und füllen sich schneller mit Partikeln. Dies führt zu kürzeren Standzeiten und höheren Betriebskosten.

Effiziente Druckluftaufbereitung heisst: nicht reiner als vom Prozess gefordert aufbereiten. Jede Aufbereitungskomponente erzeugt einen Druckabfall und trägt somit zu einer schlechteren Energiebilanz bei. Zudem erhöhen sich auch die Investitions- und Unterhaltskosten.

Zu beachten ist, dass der Filter genügend gross ausgelegt ist, um eine nützliche Standzeit aufzuweisen, aber auch nicht überdimensioniert, da sonst die Filterleistung unterhalb 20%-Auslastung stark abnimmt. Üblicherweise ist auf dem Filtergehäuse ein Differenzdruckmanometer montiert, mit dem eine anstehende Wartung detektiert werden kann.

Der Aktivkohlefilter mit festgepresster Aktivkohle oder der Aktivkohleadsorber mit loser Aktivkohle beseitigen bei hohen Qualitätsanforderungen den Öldampfanteil an die Druckluft.

#### **Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau**

Eine grobe Übersicht über typische Druckluftqualitäten für bestimmte Anwendungen und weitere Informationen findet sich im VDMA-Einheitsblatt 15390.

# Auslegung des Druckluftsystems (Neuanlagen)

**Ganzheitliche Betrachtung:** Wenn Druckluft als Ganzes und von der Anwendung her ins Visier genommen wird, wird eine nachhaltige Steigerung der Druckluffeffizienz erzielt.

## Bedarf richtig erörtern

Ein allgemeingültiges Konzept für eine «richtige» Druckluftversorgung gibt es nicht, jede Druckluftanlage sollte unter Berücksichtigung der individuellen Anforderungen und Umgebungsbedingungen optimiert werden. Hierfür sind folgende Punkte vorgängig zu klären, um die Basis für die Auslegung einer neuen Druckluftanlage zu schaffen.

### Netzdruck

Mit dem Ziel, die Anlage mit einem möglichst geringen Druck zu betreiben, ist der Bedarfsdruck aller Verbraucher zu prüfen. Wird als Beispiel ein hoher Druck nur für ein geringer Anteil des Gesamtbedarfs an Druckluft benötigt, gilt es Alternativlösungen zu suchen, um einen möglichst tiefen Netzdruck zu erreichen.

### Bedarfsvolumen

Optimal steht eine Messung während mindestens einer Woche inklusive Wochenende zur Verfügung, die den typischen Bedarf an Druckluft dokumentiert. Anhand dieser Messung kann der Bedarf während der Arbeitsschicht, in der Nacht und am Wochenende erfasst werden. Ist die Voraussetzung einer Messung, respektive einer bereits bestehenden Anlage nicht gegeben, gilt es, die Verbraucher aufzulisten und zu addieren, unter Berücksichtigung des Ausnutzungsgrades und der Gleichzeitigkeit.

### Druckluft-Qualität definieren

Nur so viel wie nötig, ist hier der Grundsatz, denn Druckluftaufbereitung kostet! Der Einsatz von Druckluft wird immer vielfältiger. Auch können Produktionsgüter in direkten Kontakt mit Druckluft kommen. Die Druckluftqualität richtet sich nach der Anwendung, in der die Druckluft eingesetzt wird. Ein Druckluftwerkzeug an einer Werkbank braucht nicht die hohe Druckluftqualität wie z.B. ein Verpackungsvorgang in der Lebensmittelindustrie. Je nach Anforderung ist die Qualität der Druckluft für Feststoffe, Wasser und Öl nach ISO 8573-1(2010) (Abbildung 11) zu definieren.

Feststoffe/Staub			
Klasse	max. Partikelzahl je m <sup>3</sup> * einer Partikelgröße d in µm		
	0,1 ≤ d ≤ 0,5	0,5 ≤ d ≤ 1,0	1,0 ≤ d ≤ 5,0
0	individuelle Festlegungen nach Rücksprache		
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100
3	nicht definiert	≤ 90.000	≤ 1.000
4	nicht definiert	nicht definiert	≤ 10.000
5	nicht definiert	nicht definiert	≤ 100.000
Klasse	Partikel Konzentration C <sub>p</sub> in mg/m <sup>3</sup> *		
6	0 < C <sub>p</sub> ≤ 5		
7	5 < C <sub>p</sub> ≤ 10		
X	C <sub>p</sub> > 10		

Wasser	
Klasse	Drucktaupunkt, in °C
0	individuelle Festlegungen nach Rücksprache
1	≤ -70 °C
2	≤ -40 °C
3	≤ -20 °C
4	≤ +3 °C
5	≤ +7 °C
6	≤ +10 °C
Klasse	Konzentration flüssiger Wasseranteil C <sub>w</sub> in g/m <sup>3</sup> *
7	C <sub>w</sub> ≤ 0,5
8	0,5 < C <sub>w</sub> ≤ 5
9	5 < C <sub>w</sub> ≤ 10
X	C <sub>w</sub> > 10

Öl	
Klasse	Gesamtöl-Konzentration (flüssig, aerosol + gasförmig), in mg/m <sup>3</sup> *
0	individuelle Festlegungen nach Rücksprache
1	≤ 0,01
2	≤ 0,1
3	≤ 1,0
4	≤ 5,0
X	> 5,0

\*) bei Referenzbedingungen 20 °C, 1 bar(a), 0% Luftfeuchte

Abbildung 11: Druckluft-Qualitätsklassen nach ISO 8573-1(2010)



Die Aufbereitung der Luft kann zentral, dezentral oder auch kombiniert erfolgen. Mit einer zentralen Aufbereitung und einer nachgeschalteten alten und verschmutzten Druckluftverrohrung kann eine hohe Qualität nicht gewährleistet werden. In diesen Fällen ist eine zentrale Wasserabscheidung und eine dezentrale Filtration notwendig.

#### **Ölgeschmierte oder trockenlaufende Kompressoren**

Die Art des Verdichtersystems ergibt sich durch den benötigten Netzdruck und das Bedarfsvolumen. Hingegen ist die Entscheidung für ein ölgekühlten oder trockenlaufenden Kompressor eine Managemententscheid, da mit beiden Arten die gleiche Druckluftqualität erreicht werden kann. Vor allem in Industrien mit hohen Qualitäts- und Sicherheitsansprüchen (Nahrungsmittel, etc.) ist es oft ein Grundsatzentscheid, kein Öl in der ganzen Prozesskette zu verwenden.

#### **Redundanz**

Bei den meisten Druckluftanwendungen ist ein Versorgungsausfall mit hohen Kosten verbunden, weshalb die Druckluftherzeugung oft redundant aufgebaut ist. Dies gilt auch für die Druckluftaufbereitung, die bei einer Störung oder bei einem Serviceeinsatz die Qualität ununterbrochen gewährleisten muss.

#### **Zukunft**

Eine Anlage genau auf den heutigen Bedarf auszuliegen, ist langfristig nicht richtig. Eine Anlage muss flexibel sein, damit sie wechselnden Bedingungen gerecht werden kann. Deshalb ist zu überlegen, wie sich die Zukunft tendenziell entwickelt, um dies in der Planung einer neuen Anlage zu berücksichtigen. Dies kann neben einem Mehrbedarf durchaus eine zukünftige Minimierung der Anlage sein, die es ebenfalls zu beachten gilt.

#### **Platzverhältnisse**

Erfahrungsgemäss ist Platz teuer und steht daher nur begrenzt zur Verfügung, umso mehr gilt es verschiedene mögliche Varianten zu prüfen und zu definieren. Insbesondere gilt es, die Positionierung im Gesamtsystem (Druckverlust), Zu- und Abluftmöglichkeiten, Luft- oder Wasserkühlung und die Möglichkeit für Abwärmennutzung zu beachten.

#### **Kühlsystem**

Luftgekühlte Anlagen sind am kostengünstigsten. Werden jedoch Anlagen in einem Keller installiert, bei welchem grosse Zu- und Abluftinstallationen nicht möglich sind und die Platzverhältnisse oder die Grösse der Maschine keine Luftkühlung zulassen, hat die Wasserkühlung ihren Vorteil.

#### **Wärmerückgewinnung**

Da beinahe die ganze aufgenommene elektrische Energie wieder in Form von Wärme abgegriffen werden kann, ist eine Abwärmennutzung in jedem Fall zu prüfen. Vor allem für Anlagen mit hoher Auslastung kann sich die Investition schnell lohnen.

#### **Druckluftherzeugung**

Für die Druckluftherzeugung, fluidgekühlt oder trockenlaufend, werden hauptsächlich Schraubenkompressoren mit fixer Liefermenge (Stern-Dreieck-Schaltung) oder variabler Liefermenge (frequenzgeregelt) installiert. Für die Auswahl müssen nun alle oben erwähnten Bedingungen berücksichtigt werden. Je nach Fall kann ein, zwei oder mehrere Kompressoren die Lösung sein. Folgende Punkte gilt es für eine effiziente Druckluftversorgung zu beachten:

#### **Liefermenge**

Als Liefermenge wird die von einem Kompressor in das angeschlossene Druckluftnetz geförderte Luftmenge bezeichnet. Sie wird zurückgerechnet auf den Ansaugzustand des Kompressors. Die Messung ist für die Vergleichbarkeit verschiedener Hersteller in der Norm ISO 1217, Anhang C dokumentiert.

## Spezifische Leistung

Das Verhältnis zwischen der zugeführten elektrischen Aufnahmeleistung und der abgegebenen Luftmenge bei entsprechendem Betriebsdruck heisst spezifische Leistung (Abbildung 12).

$$P_{\text{spez}} = \frac{\text{elektrische Aufnahmeleistung}}{\text{Liefermenge}}$$

## Auswahl effizienter Antriebsmotoren

Je nach erforderlicher Drehzahl des Kompressors können Asynchronmotoren mit unterschiedlichen Polzahlen eingesetzt werden.

Nominale Synchrondrehzahl (Umdrehungen pro Minute):

- 2 Pole mit 3 000 U/min
- 4 Pole mit 1 500 U/min
- 6 Pole mit 1 000 U/min
- 8 Pole mit 750 U/min

Die Effizienzklassen der Motoren mit 0,12 kW bis 1 000 kW richten sich nach der IEC-Norm 60034-30-1 (Abbildung 13). Bei kleinen Leistungen bis 10 kW sind die Effizienzgewinne von IE4 im Vergleich zu IE1 prozentual sehr hoch. Bei grösseren Leistungen von 100 kW

bis 1000 kW sind die prozentualen Verbesserungen zwar gering, die Verminderung der Verluste in kW aber sehr bedeutend. Seit 2015 sind in der Schweiz nur noch Elektromotoren mit einer Effizienzklasse von IE3 (oder IE2 mit FU) oder IE4 zugelassen. Die höchsten Wirkungsgrade können mit elektronisch kommutierten Permanentmagnet- oder Reluktanzmotoren erreicht werden.

**Achtung:** Motoren einer höheren Effizienzklasse (IE3) haben vielfach weniger Schlupf als ältere, ineffiziente Motoren (IE1). Dadurch ergibt sich eine um 1 % bis 5 % höhere Nenndrehzahl. Somit ergibt sich eine um 3 % bis 15 % höhere Wellenleistung des Kompressors (die elektrisch aufgenommene Leistung steigt bei Drehzahlveränderungen mit der 3. Potenz!). Dieser bei einem Motorenaustausch nicht beabsichtigte Effekt führt in geschlossenen Systemen dazu, dass der gewünschte Effizienzgewinn durch eine unnötige Leistungserhöhung wegen des vergrösserten Förderstroms zunichte gemacht wird. Durch die erhöhte Wellenleistung kann sich die Stromaufnahme des an sich effizienteren Motors vergrössern. Dies führt in Einzelfällen dazu, dass die Dimensionierung der Elektroinstallation überprüft werden muss.

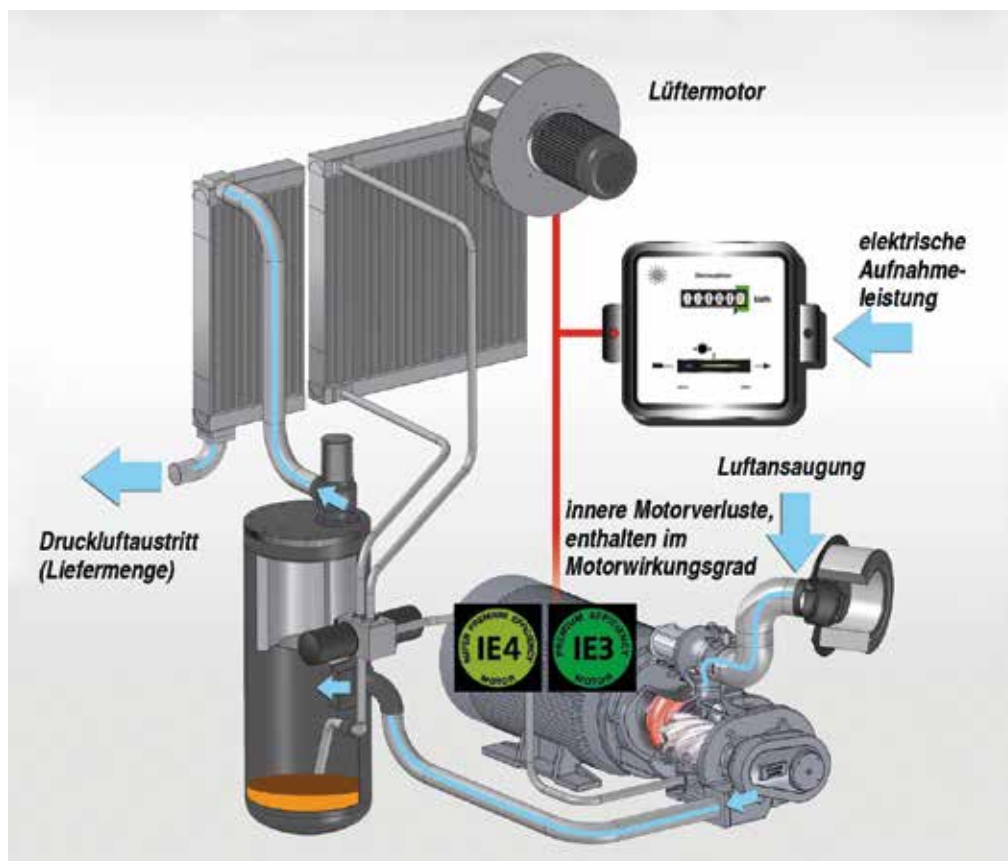


Abbildung 12: Aufbau eines Schraubenkompressors – Ermittlung der spezifischen Leistung. (Quelle: Kaeser Kompressoren)

## Frequenzumrichter

Der Einsatz von Frequenzumrichtern (FU) gilt heutzutage als Universallösung für energieeffiziente Anlagen. Berücksichtigt man die Verluste des FU und dessen Auswirkung auf den Motorenwirkungsgrad (3 % bis 5 % der Aufnahmeleistung), stimmt dies nicht in jedem Fall. Der Einsatz eines FU-Kompressors ist bei folgenden Situationen sinnvoll:

- starke Verbrauchsschwankungen
- geringes Netzvolumen
- gegenüber einem Kompressor mit fixer Drehzahl kann Leerlaufzeit eingespart werden

Oftmals werden fixe Maschinen für die Grundlast und FU-Anlagen mit ihrem Regelbereich, der nicht unterschritten werden sollte, für die Spitzenlast eingesetzt.

## Kompressorsteuerung

Neben dem Regeln und Steuern des Kompressors erkennt die Steuerung auch Störungen und kann diese, wie auch die Wartungsinformationen, anzeigen. Eine moderne Steuerung hat verschiedene wählbare Regelungsmodi, die je nach Bedarf gewählt werden können, je nachdem wie der Kompressor eingesetzt wird. Die Anbindung an ein übergeordnetes Managementsystem oder an ein Leitsystem ist ebenfalls eine Option. Kleinere Anlagen haben oft aus Preisgründen nur begrenzte Möglichkeiten der Anbindung.

## Kondensat ableiten

Das Kondensat wird durch Ableiter mit intelligenter Niveausteuern aus dem unter Druck stehenden System abgeführt. Im Gegensatz zu alten mechanischen und störungsanfälligen Ableitern mit Schwimmern, sind heutzutage Störungen wegen Verschmutzung oder mechanischem Verschleiss ausgeschlossen. Zusätzlich reduzieren exakt berechnete und angepasste Ventilöffnungszeiten die Druckluftverluste. Weitere Vorteile sind die automatische Selbstüberwachung und die mögliche Signalübertragung an eine zentrale Leittechnik.

## Verteilernetz und Druckspeicher

- Das Netz richtig dimensionieren (Durchmesser)
- Rohrleitungen energiesparend verlegen
- Geeignetes Rohrleitungsmaterial verwenden
- Geeignete Verbindungstechnik verwenden (geschweisst, geflanscht etc.)
- Auslegung des Druckluftspeichers in Abhängigkeit von Netz, Kompressors und Bedarf.

**Faustregel:**  $\frac{1}{3}$  der Spitzenlast des Kompressors (ohne FU), Beispiel: Kompressor 6 m<sup>3</sup>/h → 2 m<sup>3</sup> Druckluftbehälter)

- Evtl. Einsatz zusätzlicher Druckluftspeicher bei grossen Druckluftverbrauchern um Bedarfsspitzen zu überbrücken.

## Übergeordnete Steuerung

Die Koordination des Kompressorbetriebs ist eine anspruchsvolle Aufgabe. So müssen maschinenübergreifende Steuerungen nicht nur in der Lage sein, Kompressoren verschiedener Bauarten und Grössen zum richtigen Zeitpunkt einzusetzen, sie müssen auch die

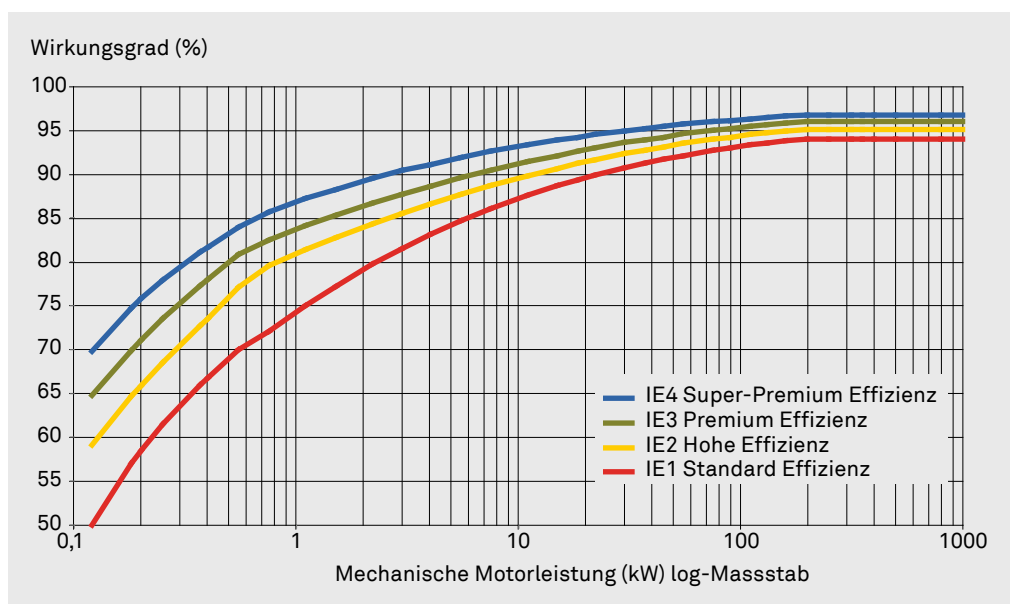


Abbildung 13: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Motorleistung von 4-poligen Elektromotoren der Effizienzklassen nach IEC 60034-30-1.



Anlagen wartungstechnisch überwachen, Betriebszeiten der Kompressoren angleichen und Fehlfunktionen erfassen, um die Servicekosten einer Druckluftstation zu senken und die Betriebssicherheit zu erhöhen (Abbildung 14).

- Effizientes Betreiben einer Druckluftversorgung mit mehr als einem Kompressor
- Steuerung und Regelung der Kompressorstation
- Überwachung (Störung)
- Gesamteffizienz der Druckluftherzeugung (permanente Überwachung)
- Datenspeicher (Bedarfsaufzeichnung)
- Anbindung an Leitsystem
- Energiemanagement ISO 50001
- Zentrales Element für Industrie 4.0

Abbildung 14 zeigt 4 verschiedene Regelmethoden. Mehrere Kompressoren werden von der übergeordneten Steuerung so gesteuert, dass der geforderte Druck(-bereich) immer zur Verfügung steht. Dazu werden je nach aktuellem Verbrauch ein oder mehrere Kompressoren aktiviert, die den jeweiligen Bedarf am besten erfüllen.

Die «Regelung mit Bedarfsdruck» bietet das derzeitige regeltechnische Optimum. Bei dieser Variante werden keine minimalen und maximalen Druckgrenzen mehr vorgegeben, sondern nur der niedrigst mögliche Betriebsdruck, der nicht unterschritten werden darf. Eine übergeordnete Regelung kann unter Berücksichtigung aller möglichen Verluste (verursacht durch Druckerhöhung, Anfahr-, Reaktions- und Leerlaufzeiten) das mögliche Optimum bei Schaltung und Anwahl der Kompressoren bestimmen. Auf Grund der Kennt-

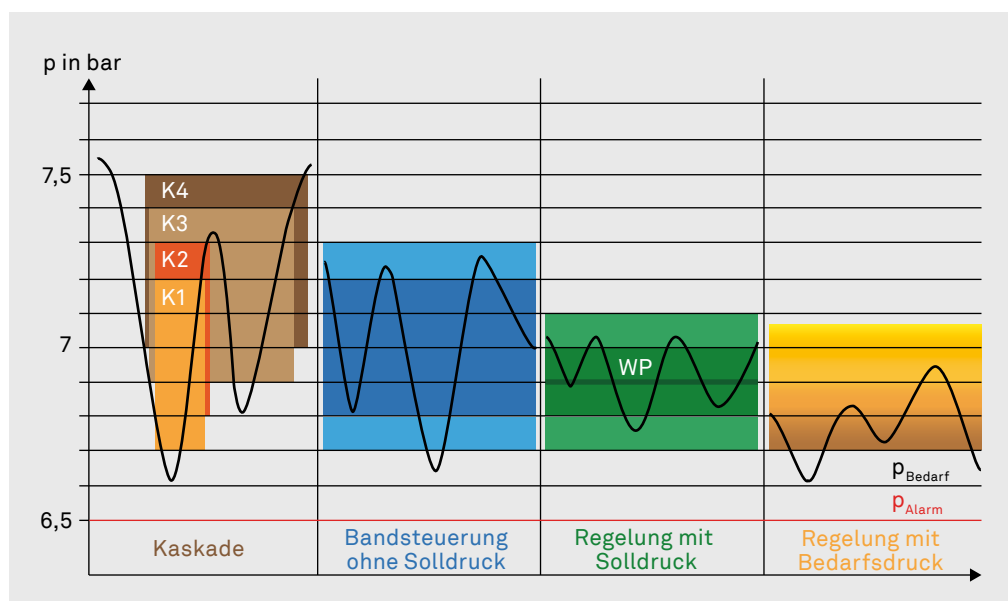
nis der einzelnen Reaktionszeiten ist die Steuerung in der Lage zu verhindern, dass der minimal mögliche Bedarfsdruck unterschritten wird und Druckschwankungen im Netz zu minimieren. Zudem ermöglicht die Steuerung, den gewünschten Netzdruck auf einfache Art und Weise einzustellen. Somit kann (falls möglich) der Netzdruck ohne viel Aufwand reduziert und der Energieverbrauch gegebenenfalls noch weiter gesenkt werden.

## Abwärmenutzung

### Raumheizung

Die wirtschaftlichste Art der Wärmerückgewinnung ist die Ausnutzung der Verdichterwärme für die Raumheizung. Voraussetzung hierfür ist ein luftgekühlter Kompressor, über den die Kühlluft gezielt geführt wird. Wirtschaftlich ist diese Art der Wärmerückgewinnung deshalb, weil alle Wärme, auch die abgestrahlte Wärme im Kompressor, ausgenutzt wird. Die erwärmte Kühlluft muss über ein Kanalsystem weitergeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass möglichst kurze Wege eingehalten werden. Denn erstens bedeuten lange Wege Druckverluste im Kanal, die wiederum nur durch einen Zusatzventilator zu kompensieren sind und zweitens treten bei langer Verweilzeit der Kühlluft im Kanal Wärmeverluste auf.

Zu beachten ist, dass bei der Amortisationszeit der Wärmerückgewinnung durch Raumheizung natürlich nur die Wintermonate herangezogen werden können. Im Sommer wird die Abwärme nach aussen geführt.



**Abbildung 14: Verschiedene Varianten übergeordneter Kompressorregelungen. (Quelle: Kaeser Kompressoren)**

## Heizungswassererwärmung

Bei Schraubenkompressoren mit Öleinspritzung führt das Öl ca. 70 % – 80 % der zugeführten elektrischen Energie in Form von Wärme ab. Diese Energie kann zurückgewonnen werden. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Schraubenkompressor luft- oder wassergekühlt ist. Zur Wärmerückgewinnung wird das Öl über einen Wärmeaustauscher geführt, der Heizungswasser um 50 K bis zu 85 °C erwärmen kann.

Zu beachten ist hierbei, dass natürlich nur dann Heizungswasser erwärmt wird, wenn der Kompressor im Lastbetrieb arbeitet. Da nicht immer Lastbetrieb ansteht und somit auch nicht immer warmes Wasser abgegeben wird, kann die Heizungswassererwärmung durch Wärmerückgewinnung nur zur Unterstützung des Heizungskreislaufs dienen.

## Ausschreibung

Als Grundlage für die Erstellung einer Ausschreibung dienen die im Abschnitt «Bedarf richtig erörtern» auf Seite 13 geklärten Bedingungen (Netzdruck, Liefermengenprofil, Qualität, Redundanz, Kühlsystem, Platzverhältnisse und Angabe zur Abwärmenutzung), die auf wenigen Seiten zusammengefasst werden. Die Anforderungen müssen klar und vor allem auch mit der notwendigen Abgrenzungen formuliert sein, damit die einzelnen Angebote vergleichbar sind. Neben den technischen Bedingungen ist ein kurzer allgemeiner Bericht vorteilhaft, in welchem beschrieben ist, was der Zweck des Vorhabens ist und für was die Druckluft benötigt wird. Zusammen mit den allgemeinen Lieferbedingungen können dann die Unterlagen an die Unternehmer abgegeben werden. Eine detailliertere Fassung

der Ausschreibung wie z. B. Anzahl der Kompressoren, Nennleistung, Anzahl Maschinen mit Frequenzumrichter oder sogar ein fertiges Schema der Druckluftversorgung ist in der Regel nicht notwendig. Im Gegenteil, es schränkt die Unternehmungen ein, eine ganzheitlich betrachtete, energieeffiziente Anlage anbieten zu können. Umso wichtiger ist es, klare Abnahmebedingungen zu definieren. Dies kann zum Beispiel eine Leistungsmessung im Werk sein, eine Qualitätsmessung vor Ort bei Inbetriebnahme der Anlage oder auch eine dauerhafte Überwachung des Drucktaupunkts mit Alarmausgang sein. Ohne eine vorgängige Abmachung sind nachträgliche qualifizierte Messungen nach Vorschriften nur mit grossem Aufwand realisierbar und sollten daher vor Bestellung mit dem Hersteller geklärt sein. Abbildung 15 zeigt die Kostenverteilung eines optimierten Systems mit luftgekühlter Druckluftstation (Laufzeit: 5 Jahre, Strompreis: 8 Cent/kWh, Zinssatz: 6 %, 7 bar Betriebsüberdruck, Druckluftqualität gemäss ISO 8573-1: Restöl Klasse 1, Reststaub Klasse 1, Restwasser Klasse 4). Das Beispiel zeigt: Auch unter optimalen Bedingungen macht der Energieverbrauch mit rund 70 % den Löwenanteil der Druckluftgesamtkosten aus. Deshalb lohnt es sich aus finanzieller Sicht, in energieeffiziente Systeme zu investieren. Dies ist bei der Bewertung von verschiedenen Angeboten zu berücksichtigen, da sonst die Gefahr besteht, dass der Hersteller Lösungen anbietet, die nicht optimal auf den tatsächlichen Bedarf abgestimmt sind.

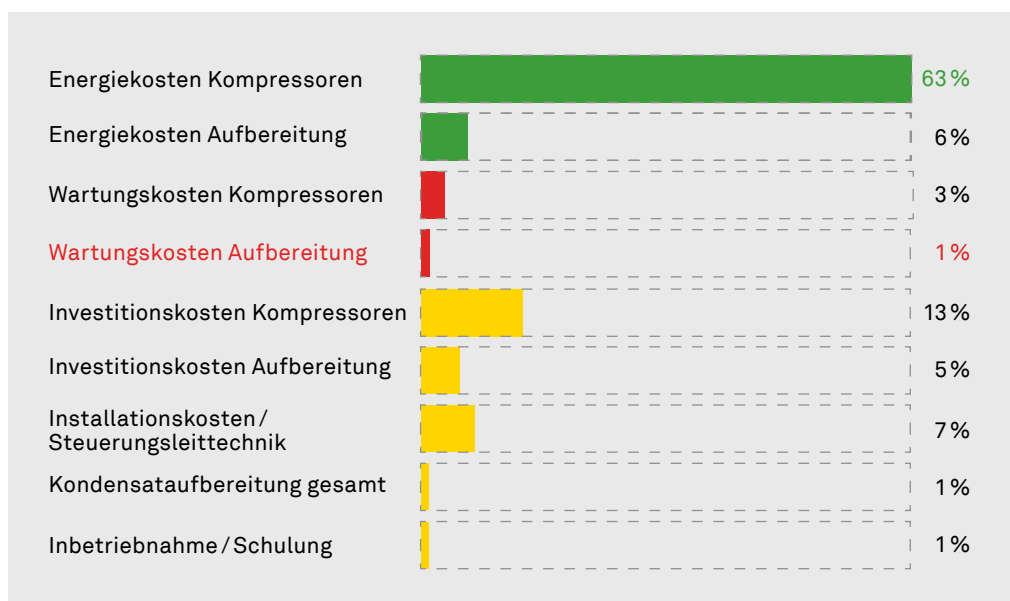


Abbildung 15: Kostenstruktur eines optimierten Druckluftsystems. (Quelle: Kaeser Kompressoren)

# Optimierung bestehender Druckluftsysteme (Altanlagen)

## Beobachtungen und Messungen vor Ort

Folgende Daten sollen für eine aussagekräftige Analyse gemessen werden:

■ **Last- /Leerlauf, Strom oder Leistungsaufnahme der Kompressoren.** Dadurch kann ein Lastprofil erstellt werden, welches das Zusammenspiel und die Betriebszustände der Kompressoren zeigt. Es zeigt das Last- und Leerlaufverhältnis und, bei frequenzgesteuerten Kompressoren, die Betriebszeit im optimalen Regelbereich. Falls finanziell und installationsbedingt möglich, kann zusätzlich nach jedem Kompressor der Volumenstrom gemessen werden, was eine Aussage über den Wirkungsgrad des Kompressors erlaubt.

■ **Netzdruck vor und nach der Druckluftaufbereitung sowie an einer kritischen Stelle im Druckluftnetz.**

Damit zeigt sich, ob die Dimensionierung der Komponenten stimmt und ob die Druckeinstellungen korrekt sind.

■ **Der Volumenstrom am Austritt der Druckluftzentrale zeigt, wie viel Druckluft vom Prozess benötigt wird.** Idealerweise werden auch noch einzelne Teilstränge (z.B. in unterschiedlichen Hallen) mitgemessen, so kann man auch eine Aussage machen, wo wieviel Druckluft verbraucht wird und wo bei der Optimierung am einfachsten Einsparungen realisierbar sind.

■ **Idealerweise werden diese Messstellen gleich als Dauermessungen installiert.** Die Wirkung von Optimierungsmassnahmen lässt sich so einwandfrei belegen.

Die Druckluftzentrale bildet in sich ein abgeschlossenes System, welches eine bestimmte Druckluftmenge auf einem entsprechenden Betriebsdruck mit definierter Druckluftqualität liefern muss. Somit gibt es bei der Analyse und der späteren Optimierung nur wenige Schnittstellen und der Lieferant kann sich die notwendigen Informationen leicht beschaffen. Umfassende Analysen erfordern vom Betreiber, gemeinsam mit dem Betriebsfachmann, das gesamte Druckluftsystem inklusive der Prozesse zu analysieren und mögliche Optimierungsmassnahmen zu prüfen. Neben dem Betreiber müssen gerade in grösseren Betrieben zusätzlich Verantwortliche aus der Produktion beigezogen werden.

ISO 11011 steht in Zusammenhang mit ISO 50001. ISO 50001 ist eine Norm für Energiemanagementsysteme (EMS); ISO 11011 ist jedoch eine neue, weltweit gültige

Norm für Energie-Audits zu Druckluftinstallationen. Vor ISO 11011 konnte jedermann Energieuntersuchungen, Luftprüfungen und die Datenprotokollierung hinsichtlich des Druckluftverbrauchs vornehmen. Ohne eine anerkannte Norm waren die Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen gross. Nun wurde der Energie-Audit-Prozess standardisiert; mit Leitlinien, die sich nicht nur auf die Beurteilung von Druckluftlecks konzentrieren, sondern die auch Kompetenzen und Methoden des Prüfers einbeziehen.

Die Ziele dieser Norm sind verbesserte Messungen und die Ermittlung von Verbesserungspotenzialen. Im Mittelpunkt steht die gesamte Druckluftinstallation, einschliesslich Lieferung, Verteilung und Bedarf.

## Vermeidung von Leckagen

Für keinen Prozess wird in der Schweiz mehr Druckluft verbraucht als für Leckagen. Leckagen entstehen, vermehren und vergrössern sich in Druckluftsystemen über die Jahre. Aber selbst auf neuen Anlagen trifft man auf Leckagen, z. B. durch undichte Verschraubungen. Leckagen zu reparieren erfordert eine gewisse Hartnäckigkeit. Der Prozess der Leckagenreduktion sollte fest im Betrieb verankert werden. Oft ist es schwierig, die Leckagen zu reduzieren, da ein grosser Teil davon in den Maschinen mit Druckluftverbrauch wirksam ist.

## Angepasste Kompressor-/Motorleistung

Wie gross sollen Kompressoren dimensioniert werden? Handelt es sich um ein bestehendes Druckluftsystem, ist die Frage einfach zu beantworten: Mit einer Simulation lässt sich die wirtschaftlichste Variante ausarbeiten. In der Regel bewähren sich Konzepte mit 2 bis 4 Kompressoren in Kombination mit einer übergeordneten Steuerung am besten. Wie geht man bei einem Neubau vor? Siehe: «Anlagen-Neubeschaffung» von EnergieSchweiz. Ist der zukünftige Druckluftverbrauch schwierig einzuschätzen, hat sich eine flexible Lösung mit eher klein dimensionierten Kompressoren als geeignet erwiesen. Denn oft wird mit übertriebener Sicherheit geplant. Das hat zur Folge, dass der geplante Druckluftbedarf über dem tatsächlichen Verbrauch liegt. Werden in diesem Fall die Kompressoren nach dem geplanten Verbrauch beschafft, so sind die Investitions-, Wartungs- und Energiekosten höher als erforderlich.



## Regelung nach Bedarf: FU

Bei grossen Bedarfsschwankungen ist der Einsatz eines oder mehrerer drehzahl geregelter Kompressoren zu prüfen. Kompressoren welche mit einem Frequenzumrichter mit Asynchronmotoren oder Inverter mit Permanentmagnetmotor ausgestattet sind, können die Drehzahl des Verdichterelements und somit die erzeugte Druckluftmenge variieren. So lässt sich eine variable Druckluftmenge zwischen 15 % und 100 % erzeugen. Ein Kompressor mit variabler Drehzahl ist dann effizient eingesetzt, wenn er mehrheitlich zwischen 30 % und 80 % der Nennleistung betrieben wird. Läuft der Kompressor mehrheitlich im unteren Drehzahlbereich (z.B. in der Nacht und am Wochenende), so sind andere Lösungen effizienter. Wird der Kompressor zusammen mit anderen Kompressoren mit fester Drehzahl im Verbund betrieben, so ist darauf zu achten, dass der drehzahl geregelte Kompressor grösser ist als jener mit fester Drehzahl, um Regellücken zu vermeiden.

## Effiziente Komponenten: Motor und Kompressor

Sollen ältere Kompressoren aufgrund ihres Zustands noch nicht ersetzt werden, lohnt sich je nach Leistung und Betriebsdauer eine Investition in einen neuen Elektromotor sowie ein neues Verdichterelement. Diese Massnahme muss gut durchdacht sein, denn diese Komponenten machen noch keinen neuen Kompressor. Alte Kompressoren besitzen im Vergleich zu neuen Aggregaten grössere interne Strömungswiderstände in Luftansaugfiltern, Ansaugklappen, Separatoren, Kühlern und Wasserabscheidern. Generell lässt sich eine solche Massnahme prüfen, wenn folgende Kriterien erfüllt sind: Der Kompressor passt aufgrund der Liefermenge und dem Druckniveau noch zum aktuellen Verbrauchsprofil, er leistet mehr als 4000 Betriebsstunden pro Jahr, hat eine Motorenleistung von mindestens 50 kW und ist jünger als 15 Jahre.

# Beispiele aus der Praxis

## Drei statt fünf Kompressoren

Es wird eine Verbrauchsanalyse in einer Druckluftzentrale durchgeführt und der Lieferant bietet daraufhin neue Kompressoren mit einer Effizienzsteigerung an. Das Projekt wird umgesetzt und die versprochene Effizienzsteigerung realisiert. Als Nachteil erwies sich, dass nach einem der neuen Kompressoren noch ein beinahe 20 Jahre alter Kältetrockner installiert war. Der Ersatz mit einem neuen Gerät hätte gleich mit der Installation des neuen Kompressors gemacht werden können und somit die nachträglichen Installationskosten reduziert. Zudem musste der Verantwortliche für den Betrieb einen neuen Antrag an die Geschäftsleitung stellen. Durch die Energieeinsparung des neuen Kältetrockners war die Payback-Frist kleiner als 2 Jahre.

Für die Filterreinigung laufen in der Druckluftzentrale jeweils alle 5 Kompressoren während einer kurzen Zeit. Zudem fällt der Netzdruck in dieser Zeit um rund 1,5 bar. Das wiederholt sich drei Mal pro Stunde. Damit alle Verbraucher auch beim Reinigungsprozess problemlos laufen, ist der Netzdruck 1.5 bar höher als erforderlich. Das erzeugt eine rund 10 % höhere Energieaufnahme beim Verdichten der Druckluft und einen rund 18 % höheren Druckluftverbrauch bei den unregelmässigen Verbrauchern.

**Optimierungsmassnahme:** Vor den Reinigungsprozess wird ein grosses Behältervolumen von 24 m<sup>3</sup> installiert. Der Zulauf zu den Behältern wird im Querschnitt reduziert, somit kann nur eine kleine Druckluftmenge nachströmen. Diese reicht jedoch aus, um das Behältervolumen in der Zeit zwischen den Reinigungsprozessen wieder auf den Betriebsdruck zu füllen. Optimierung: Reduktion der gesamten verbrauchten Druckluftmenge durch einen tieferen Netzdruck, Reduktion der Energie zum Erzeugen der Druckluft, es werden nur noch maximal drei statt fünf Kompressoren benötigt.

## Koordination durch den Betrieb

Auf einer Verpackungsmaschine können die Verpackungen bei zu tiefem Netzdruck nicht richtig geschnitten werden. Laut Hersteller ist ein Betriebsdruck von 7,0 bar erforderlich, die benötigte Druckluftmenge während des Schneidvorgangs konnte nicht beziffert werden. Das gesamte Druckluftnetz läuft jedoch auf 8,5 bar, damit die Verpackungen sauber geschnitten werden können. Vor der Verpackungsmaschine ist ein Druckreduzierventil installiert, das zu klein dimensioniert schien und bis zum Anschlag aufgedreht war. Leider gab es hier keine Veränderung im Vorher-Nachher: die Empfehlung das Druckreduzierventil zu entfernen und einen grösseren Leitungsquerschnitt zu installieren wurde nicht umgesetzt. Die Energieeinsparung wurden auf 30 000 kWh/a geschätzt, die Optimierungsmassnahme wäre in weniger als einem Jahr bezahlt gewesen.

Dieses Beispiel soll aufzeigen, dass Optimierungen am Druckluftsystem immer den Willen aller beteiligten Personen erfordern. Aus diesem Grund ist es ratsam, dass die Koordination von Optimierungsprojekten im Bereich Druckluft einer Person im Betrieb unterstellt ist, welche die Weisungen über die betroffenen Bereiche auch durchsetzen kann.



# Weiterführende Infos

## Begriffe und Einheiten

Grösse	Einheit	Bezeichnung
P	W	Mechanische Leistung
$\dot{V}_1$	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom Ansaugseite (Index 1), Liefermenge
p <sub>1</sub>	Pa	Absolutdruck Ansaugseite (Index 1), Umgebungsdruck etwa 100 000 Pa
p <sub>2</sub>	Pa	Absolutdruck Druckseite (Index 1), 7 bar Überdruck = 800 000 Pa
ln		Natürlicher Logarithmus

### Editorischer Vermerk

Das Merkblatt Druckluft wurde von Impact Energy im Rahmen des Umsetzungsprogrammes für effiziente Antriebssysteme Topmotors erstellt. Es wurde von Conrad U. Brunner (Impact Energy), Rolf Gloor (Gloor Engineering), Tai Moser (Atlas Copco/CS Instruments), Jakob Spillmann (KAESER Kompressoren AG) und Rolf Tieben (Impact Energy) erarbeitet. Lektorat und graphische Umsetzung: Faktor Journalisten AG

## Normen, Gesetze und Quellen

### Normen

- ISO 1217:2009 Displacement compressors – Acceptance tests
- ISO 8573-1:2010 Compressed air – Part 1: Contaminants and purity classes
- ISO 11011:2013 Compressed air – Energy efficiency – Assessment
  - sets requirements for conducting and reporting the results of a compressed air system assessment that considers the entire system, from energy inputs to the work performed as the result of these inputs.
  - considers compressed air systems as three functional subsystems: supply which includes the conversion of primary energy resource to compressed air energy; transmission which includes movement of compressed air energy from where it is generated to where it is used; demand which includes the total of all compressed air consumers, including productive end-use applications and various forms of compressed air waste.

- sets requirements for analysing the data from the assessment, reporting and documentation of assessment findings, and identification of an estimate of energy saving resulting from the assessment process.

- identifies the roles and responsibilities of those involved in the assessment activity.

- IEC 60034-30-1:2014-12 Drehende elektrische Maschinen – Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code)

- ISO 50001:2011 – Energy Management System

- VDMA 15390:2004-03 Druckluftreinheit

### Gesetze

- Europa Ecodesign: Lot 31, Working Document September 2014 (VHK)

### Quellen

- Drucklufthandbuch Atlas Copco, 8. Edition, 2014

- Kaeser Kompressoren-Handbuch, 2015

- Fachgerechte Druckluft-Analyse: mittlere und grosse Anlagen, Leistungs-Nachweis für den Druckluft-Anbieter, Herausgeber EnergieSchweiz

- Anlagen-Neubeschaffung: Ihr Entscheidungswegweiser zur kosteneffizienten Druckluftanlage, Herausgeber EnergieSchweiz

- Investieren Sie vorausschauend in die Druckluft. Planer-Check für den Neubau, Herausgeber EnergieSchweiz

- Lösen sich auch in Ihrem Betrieb Tausende von Franken in Luft auf? Optimierungs-Dossier für den Betreiber, Herausgeber EnergieSchweiz