

Drucklufttechnik

Grundlagen und Tipps

www.kaeser.com

Inhalt

Grundlagen

Kapitel 1 Grundbegriffe der Drucklufterzeugung 4

Kapitel 2 Druckluft wirtschaftlich aufbereiten 6

Kapitel 3 Warum eigentlich Drucklufttrocknung? 10

Kapitel 4 Kondensat automatisch ableiten 12

Kapitel 5 Kondensat kostengünstig und sicher aufbereiten 14

Kapitel 6 Effiziente Kompressorensteuerung 16

Kapitel 7 Optimale verbrauchsorientierte Abstimmung von Kompressoren 20

Kapitel 8 Energie einsparen mit Wärmerückgewinnung 22

Kapitel 9 Druckluftnetz-Neuplanung 24

Kapitel 10 Druckluftnetz-Sanierung 26

Kapitel 11 Druckluft-Bedarfsanalyse (ADA) – Ermitteln der Ist-Situation 28

Kapitel 12 Ermitteln des wirtschaftlichsten Konzepts 32

Kapitel 13 Die Druckluftstation effizient kühlen 34

Kapitel 14 Zuverlässigkeit und Kostenoptimierung langfristig erhalten 36

Praxis-Tipps

Tipp 1 Mit optimalem Druck sparen 42

Tipp 2 Richtiger Druck am Luftanschluss 44

Tipp 3 Druckluft effizent verteilen 46

Tipp 4 Rohrleitungen in der Druckluftstation 48

Tipp 5 Kompressoren richtig aufstellen 50

Tipp 6 Druckluftstationen belüften 51

Tipp 7 Druckluftstationen entlüften 52

Anhang

Anhang Fragebögen 56

Notizen 62

Vorwort



Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Thomas Kaeser



Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Tina-Maria Vlantoussi-Kaeser

Liebe Leserin, lieber Leser,

schon vor mehr als zweitausend Jahren hat der berühmte griechische Philosoph Sokrates es so auf den Punkt gebracht: „Es gibt nur ein einziges Gut für den Menschen: das Wissen, und nur ein einziges Übel: die Unwissenheit“.

Diese Weisheit aus dem Munde eines der geistigen Urväter des Abendlandes gilt heute mehr denn je, da nichts beständiger zu sein scheint als der Wandel. Das wachsende Ausmaß und Tempo der Veränderungen im Zuge des technischen Wandels und der wirtschaftlichen Globalisierung erfordern neue Antworten und neue Lösungsstrategien.

Mehr als bisher sind Herausforderungen als Chancen für noch größeren Erfolg in der Zukunft anzunehmen und zu nutzen. Fortschreitende Vernetzung und Komplexität sind dabei, Wissen zum bedeutendsten Rohstoff der Zukunft zu machen. Es wächst exponentiell und ist daher für den Einzelnen nur noch mit hohem Engagement in Bildung und stetiger Weiterbildung zu erschließen.

So genügt es auch in der Drucklufttechnik längst nicht mehr zu wissen, wie sich leistungsfähige Kompressoren bauen, fachgerecht installieren und betreiben lassen.

Wer den Energieträger Druckluft zeitgemäß, das heißt möglichst effizient nutzen will, muss vielmehr das Druckluftsystem als Ganzes betrachten. Darüber hinaus muss er um die vielfältigen Wechselbeziehungen und -wirkungen innerhalb dieses Systems sowie um seine Einbindung in die betriebliche Umgebung wissen.

KAESER KOMPRESSOREN setzt sich deshalb verstärkt für die Weiterbildung seiner Kunden ein. Das geschieht auf vielfältige Weise. So sind qualifizierte und praxiserfahrene Fachleute aus dem Haus KAESER das ganze Jahr über auf allen Kontinenten unterwegs, um auf Kongressen, Vortragsveranstaltungen und Seminaren über effiziente Drucklufterzeugung und -nutzung zu referieren. Hinzu kommen zahlreiche Fachveröffentlichungen in den verschiedensten Medien.

In dem vorliegenden Heft finden Sie eine Zusammenfassung dieses umfangreichen Expertenwissens. Es bietet Ihnen neben einer fundierten, leicht lesbaren Einführung in das Fachgebiet Drucklufttechnik auch eine Reihe praxisorientierter Tipps für Anlagenbetreiber und Druckluftanwender. Dabei wird erkennbar, dass nicht selten schon kleinere Veränderungen am System „Druckluft“ zu deutlich spürbaren Verbesserungen der Effizienz und der Verfügbarkeit dieses Energieträgers führen können.



Kapitel 1

Grundbegriffe der Drucklufterzeugung

Mit der Druckluft ist es wie auch sonst im Leben: Der Teufel steckt oft im Detail, und kleine Ursachen rufen nicht selten große Wirkungen hervor – positiv wie negativ. Auch ist manches bei näherer Betrachtung anders, als es auf den ersten Blick scheint. So kann Druckluft unter ungünstigen Bedingungen teuer, unter den richtigen Rahmenbedingungen hingegen sehr wirtschaftlich sein. Im ersten Kapitel geht es um die Klärung von Begriffen der Drucklufttechnik und darum, was Sie hierbei beachten sollten.

1. Volumenstrom
Der Volumenstrom, auch Liefermenge eines Kompressors genannt, ist die entspannte Luftmenge, die der Kompressor komprimiert in das Druckluftleitungsnetz schickt. Die Norm **ISO 1217, Anhang C** legt das korrekte Messen dieses Volumenstroms fest. Zum Messen der Liefermenge der Kompressoranlage geht man gemäß **Abb. 1** vor: Zunächst ist am Lufteintritt der Gesamtanlage Temperatur, atmosphärischer Luftdruck und Luftfeuchte zu messen. Dem folgt bei konstant gehaltenen Betriebsbedingungen die Messung des möglichst auf den Maximalwert eingestellten Betriebsdrucks, der Drucklufttemperatur und des geförderten Luftvolumens am Druckluftaustritt der Kompressoranlage. Schließlich wird das am Druckluftaustritt gemessene Volumen V_2 mit Hilfe der Gasgleichung **(siehe Formel)** auf die Ansaugbedingungen zurückgerechnet.

$$V1 = \frac{V_2 \times P_2 \times T_1}{[p_1 - (p_D \times F_{rel})] \times T_2}$$

Das Resultat dieser Berechnung ist die Liefermenge der Kompressoranlage. Sie ist nicht zu verwechseln mit dem Volumenstrom des Kompressorblocks (Blockliefermenge).

Bitte beachten Sie:
ISO 1217 allein gibt nur die Blockliefermenge wieder.

2. Motorabgabeleistung
Unter der Motorabgabeleistung versteht man die Leistung, die der Antriebsmotor des Kompressors mechanisch an der Motorwelle abgibt. Der Optimalwert der Motorabgabeleistung ist der Punkt, bei dem ohne extreme Motorüberlastung das optimale Ausschöpfen des elektrischen Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors cos φ erreicht wird. Er liegt im Bereich der Motornennleistung, auch als Bemessungsleistung bezeichnet. Diese ist auf dem Typenschild des Elektromotors eingetragen.
Achtung! **Weicht die Motorabgabeleistung zu weit von der Motornennleistung ab, arbeitet der Kompressor unwirtschaftlich und / oder mit erhöhtem Verschleiß.**

3. Elektrische Aufnahmeleistung
Die elektrische Aufnahmeleistung ist die Leistung, die der Antriebsmotor des Kompressors bei einer bestimmten mechanischen Belastung der Motorwelle (Motorabgabeleistung) dem Netz entnimmt. Sie ist um die Motorverluste höher als die Motorabgabeleistung. Dazu gehören elektrische und mechanische Verluste durch Motorlagerung und -belüftung. Die elektrische Aufnahmeleistung im Nennpunkt lässt sich durch die Formel errechnen:

$$P = U_n \times I_n \times \sqrt{3} \times \cos \varphi_n$$

U_n, **I_n**, und **cos φ_n** stehen auf dem Typenschild des Elektromotors.

4. Spezifische Leistung
Das Verhältnis zwischen der zugeführten elektrischen Aufnahmeleistung und der abgegebenen Luftmenge bei entsprechendem Betriebsdruck heißt spezifische Leistung **(Abb. 2)**. Die einem Kompressor zugeführte elektrische Aufnahmeleistung ist die Summe der elektrischen Aufnahmeleistungen aller Antriebe im Kompressor wie z. B. Hauptmotor, Lüftermotor, Ölpumpenmotor, Stillstandsheizung usw.

Wird die spezifische Leistung zur Wirtschaftlichkeitsberechnung benötigt, sollte sie auf die gesamte Kompressoranlage bei maximalem Betriebsdruck bezogen werden.
Dazu ist der Wert der elektrischen Gesamtaufnahmeleistung bei Maximaldruck durch den Wert des Anlagenvolumenstroms bei Maximaldruck zu dividieren:

$$P_{spez} = \frac{\text{elektr. Aufnahmeleistung}}{\text{Volumenstrom}}$$

5. IE – die neue Formel für energiesparenden Antrieb
1997 begann in den USA mit dem Energy Policy Act (EPACT) die Energieeffizienz-Klassifizierung von Drehstrom-Asynchronmotoren. Später wurde auch in Europa eine Effizienzklassifizierung eingeführt. Seit 2010 gilt für E-Motoren der internationale IEC-Standard. Klassifizierungen und gesetzliche Vorgaben hatten zur Folge, dass sich die Energieeffizienz der E-Motoren in den Premiumklassen deutlich verbesserte. Die effizienteren Motoren bieten wesentliche Vorteile:

a) Niedrigere Betriebstemperaturen
Interne Wirkungsgradverluste (Reibung, Erwärmung) können bei kleineren Motoren bis zu 20 % der Leistungsaufnahme ausmachen, bei Motoren ab 160 kW 4 bis 5 %. IE3/IE4-Motoren kommen mit deutlich geringerer Erwärmung und damit weniger Verlusten aus **(Abb. 3)**:
Hat ein konventioneller Motor bei normaler Auslastung eine Betriebstemperaturerhöhung von ca. 80 K bei einer Temperaturreserve von 20 K gegenüber Isolationsklasse F, betragen unter gleichen Bedingungen bei einem IE3-Motor die Temperaturerhöhung nur ca. 65 K und die Temperaturreserve 40 K.

b) Längere Lebensdauer
Niedrigere Betriebstemperaturen bedeuten geringere thermische Belastung des Motors, der Lager und des Klemmkastens. Daraus ergibt sich als weiterer Vorteil eine längere Lebensdauer.

c) 6 % mehr Druckluft mit weniger Energie
Weniger Wärmeverluste führen zu erhöhter Wirtschaftlichkeit. So konnte KAESER mit genauer Abstimmung der Kompressoren auf die effizienteren Motoren Volumenströme um bis zu 6 % erhöhen und spezifische Leistungen um bis zu 5 % verbessern. Das heißt: höhere Förderleistung, kürzere Kompressorlaufzeiten und weniger Energieaufwand pro erzeugtem Kubikmeter Druckluft.



Abb. 1: Volumenstrommessung nach ISO 1217, Anhang C

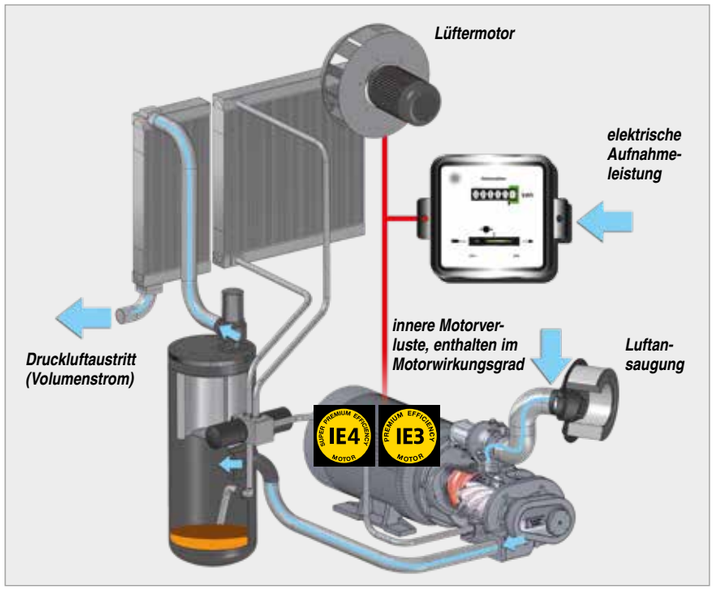


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau eines Schraubenkompressors, Ermitteln der spezifischen Leistung

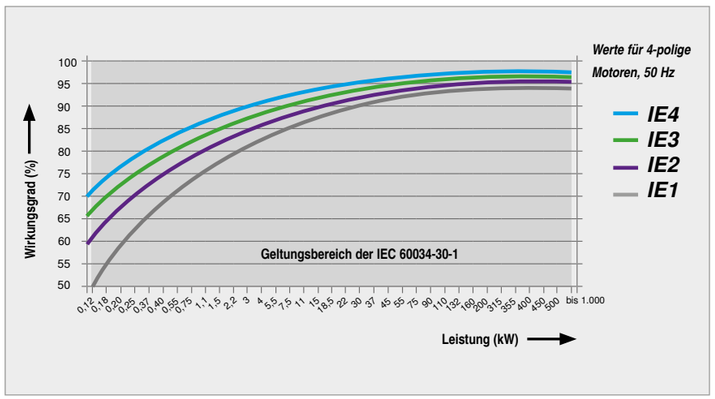


Abb. 3: Der IEC-Standard – die Effizienz-Klassifizierung für Elektromotoren.
Seit Juli 2021 ist in der EU für Dreiphasenmotoren in der Leistungsklasse 0,75 bis 1000 kW und einer relativen Einschaltdauer ab 80 % aufwärts die Energieeffizienzklasse IE3 einzuhalten, ab Juli 2023 ab 75 bis 200 kW die Energieeffizienzklasse IE4. Die nächste Wirkungsgradklasse IE5 ist im Detail noch nicht definiert und für die künftige Ausgabe dieser Norm vorgesehen.

Kapitel 2

Druckluft wirtschaftlich aufbereiten

Bei der Frage, mit welchem Kompressorsystem sich ölfreie Druckluft am besten erzeugen lässt, steht heute – unabhängig von Aussagen einzelner Hersteller – fest: Hochwertige, ölfreie Druckluftqualität ist sowohl mit ölfrei (trocken) verdichtenden als auch mit öl- oder fluidgekühlten Kompressoren erreichbar. Bei der Systemauswahl sollte daher die Wirtschaftlichkeit den Ausschlag geben.

1. Was heißt „ölfreie Druckluft“?
Nach ISO-Standard 8573-1 kann Druckluft dann als ölfrei bezeichnet werden, wenn ihr Ölgehalt (einschließlich Öldampf) unter 0,01 mg/m³ liegt. Das sind etwa vier Hundertstel dessen, was in atmosphärischer Luft enthalten ist.
Diese Menge ist so gering, dass sie sich kaum noch nachweisen lässt. Wie aber steht es um die Qualität der Kompressoransaugluft?

Sie hängt stark von den Umgebungsbedingungen ab. Schon in normal belasteten Zonen kann der Kohlenwasserstoffgehalt durch industrie- und verkehrsbedingte Emissionen zwischen 4 und 14 mg/m³ Luft betragen.
In Industriegebieten, wo Öle als Schmier-, Kühl- und Prozessmedium eingesetzt werden, kann allein der Mineralölgehalt weit über 10 mg/m³ liegen.

Hinzu kommen weitere Verunreinigungen wie etwa Kohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid, Ruß, Metalle und Staub.

2. Warum Aufbereitung?
Jeder Kompressor wirkt wie ein großer Staubsauger, der Verunreinigungen aufnimmt, mit Verdichtung der Luft konzentriert und bei fehlender Aufbereitung an das Druckluftnetz weitergibt.

a) „Ölfreie“ Kompressoren
Dies gilt besonders für trocken verdichtende Kompressoren. Wegen der unter 1. genannten Belastungen ist es nicht möglich, mit einem Kompressor, der nur über einen 3-Mikron-Staubfilter verfügt, ölfreie Druckluft zu erzeugen. Trocken verdichtende Kompressoren haben außer diesen Staubfiltern keine weiteren Aufbereitungskomponenten.

b) Fluid- bzw. ölgekühlte Kompressoren
Im Gegensatz dazu werden bei öl- und fluidgekühlten Kompressoren aggressive Stoffe im Kühlfluid (Öl) neutralisiert und Feststoffe teilweise aus der Druckluft herausgewaschen.

3. Ohne Aufbereitung keine definierte Druckluftqualität
Trotz des höheren Reinheitsgrades der erzeugten Druckluft gilt aber auch hier: Ohne Aufbereitung geht es nicht. Mit trockener oder ölgekühlter Verdichtung allein lässt sich unter üblichen Ansaugbedingungen und den da auftretenden Luftverunreinigungen keine definierte ölfreie Druckluftqualität gemäß ISO 8573-1 erreichen. Wie wirtschaftlich die Drucklufterzeugung ist, hängt vom Druck- und Volumenstrombereich ab und davon wiederum der erforderliche Kompressortyp. Grundlage jeder anwendungsgerechten Druckluftaufbereitung ist eine ausreichende Trocknung. Meist ist die energiesparende Kältetrocknung das wirtschaftlichste Verfahren **(siehe dazu auch Kapitel 3, S. 10).**

4. Aufbereitung mit dem KAESER-Reinstluftsystem
Moderne fluid- oder ölgekühlte Schraubenkompressoren haben einen um bis zu 10 % höheren Wirkungsgrad als trocken verdichtende. Das von KAESER für fluid- oder ölgekühlte und für trocken verdichtende Kompressoren entwickelte Reinstluftsystem ermöglicht weitere Kosteneinsparungen um bis zu 30 %.
Der damit erreichbare Restölgehalt liegt unter 0,003 mg/m³, also weit unter dem für Qualitätsklasse 1 (bezüglich Restölgehalt) von der ISO-Norm festgelegten Grenzwert. Das System umfasst alle Aufbereitungskomponenten zum Erzeugen der erforderlichen Druckluftqualität. Je nach Anwendung kommen Kälte- oder Adsorptionstrockner (siehe auch Kapitel 3, S. 11) und verschiedene Filterkombinationen zum Einsatz. So lassen sich von trockener über partikelfreie bis hin zu technisch ölfreier und steriler Druckluft alle, gemäß ISO-Standard festgelegten Druckluft-Qualitätsklassen, zuverlässig und kostengünstig erzeugen, siehe Abbildung Schema auf den nachfolgenden beiden Seiten.



Abb. 1: Druckluftkältetrockner in einer Druckluftstation

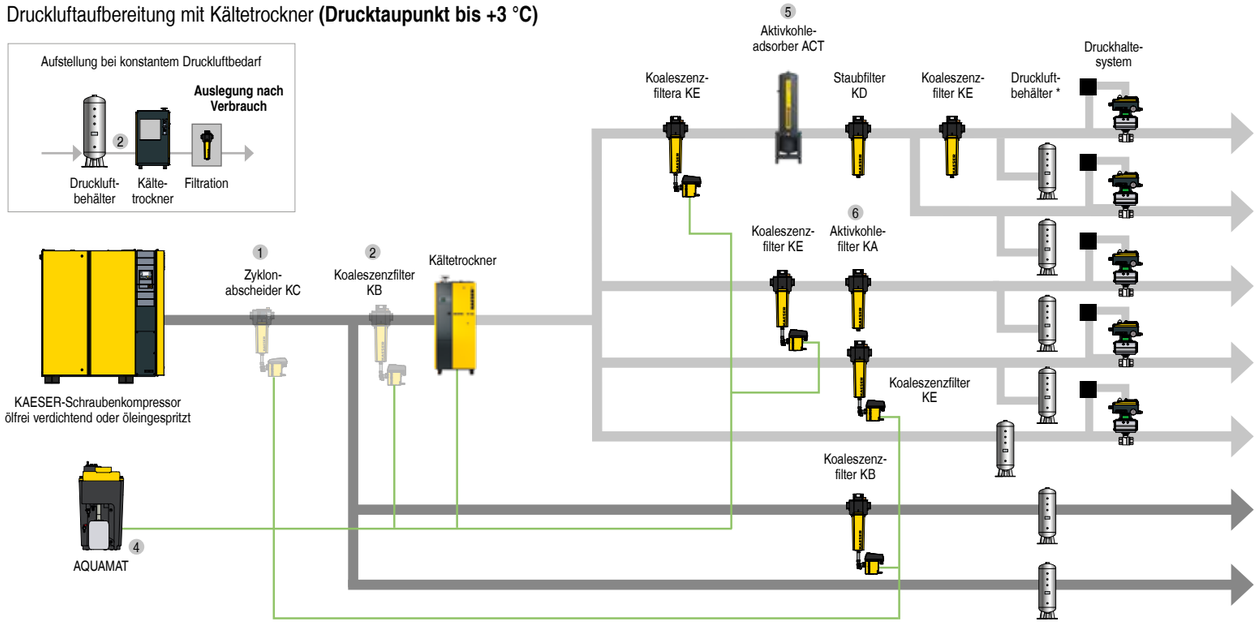


Abb. 2: Installationsbeispiel für Druckluftaufbereitung mit Kältetrockner, Koaleszensfilter und Aktivkohlefilter sowie Druckhaltesystem

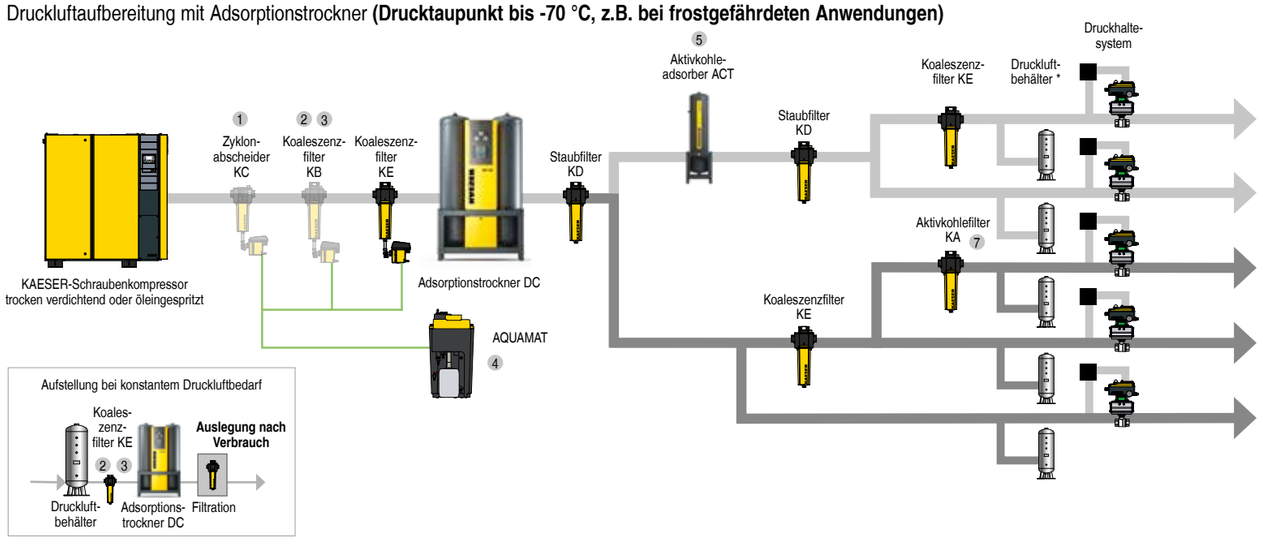
Druckluft wirtschaftlich aufbereiten

Auf dem Schema lässt sich auf einen Blick ausgehend von der Anwendung die jeweils richtige Gerätekombination ermitteln. Wählen Sie je nach Bedarf/Anwendung den gewünschten Aufbereitungsgrad. Anwendungsbeispiele: Auswahl Druckluftreinheitsklassen nach ISO 8573-1 (2010)

Druckluftaufbereitung mit Kältetrockner **(Drucktaupunkt bis +3 °C)**



Druckluftaufbereitung mit Adsorptionstrockner **(Drucktaupunkt bis -70 °C, z.B. bei frostgefährdeten Anwendungen)**



1 Bei integriertem Zyklonabscheider im Kompressor entfällt der KC.
2 Bei Fremdkompressoren / verschmutzter und stark korrodierter Rohrleitung wird die Filterstufe KB vorgeschaltet.
3 Bei kritischen Anwendungen, die hohe Druckluft-Reinheit erfordern wird die Filterstufe KB vorgeschaltet.
4 Bei ölfrei verdichtenden Schraubenkompressoren muss das Kondensat bauseits entsorgt werden.
5 Standzeit ca. 12.000 h
6 Standzeit ca. 500 h
7 Standzeit ca. 1.000 h

Erreichbare Druckluft-Reinheitsklassen

Partikel	Wasser	Öl	Branche/Anwendung
1	4	1	Reinstluft- und Reinraumtechnik, Molkerei, Brauerei Nahrungs- und Genussmittelherstellung
2	4	1	besonders saubere Förderluft, Chemieanlagen
1	4	1	Webmaschinen, Fotolabor, Pharmaindustrie
1	4	2	Farbspritzen, Pulverbeschichten, Verpacken, Steuer- und Instrumentenluft
4	4	3	allgemeine Werksluft, Sandstrahlen mit Güteanforderung
4	7-X	3	Kugelstrahlen
4-6	7-X	3-4	Förderluft für Abwassersysteme

Erreichbare Druckluft-Reinheitsklassen

Partikel	Wasser	Öl	Branche/Anwendung
1	1-3	1	Reinstluft- und Reinraumtechnik, Pharmaindustrie, Nahrungs- und Genussmittelherstellung
2	1-3	1	Lackieranlagen
1	1-3	1	Prozessluft, Pharmaindustrie
1	1-3	2	Fotolabor
2	1-3	2	Besonders trockene Förderluft, Farbspritzen, Feinstdruckregler

* Bei hohen Anforderungen an die Druckluftqualität sollte der Druckluftbehälter, um das Mitreißen von Ablagerungen zu vermeiden, stets in einer Stichleitung nach der Aufbereitung installiert werden.

Druckluft-Reinheitsklassen nach ISO 8573-1 (2010):

Partikel

Klasse	max. Partikelzahl je m³ einer Partikelgröße d in µm *)		
	0,1 < d ≤ 0,5	0,5 < d ≤ 1,0	1,0 < d ≤ 5,0
0	z. B. für Reinstluft- und Reinraumtechnik nach Rücksprache mit KAESER möglich		
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_p in mg/m³ *)
6	$0 < C_p \leq 5$
7	$5 < C_p \leq 10$
X	$C_p > 10$

Wasser

Klasse	Drucktaupunkt, in °C
0	z. B. für Reinstluft- und Reinraumtechnik nach Rücksprache mit KAESER möglich
1	≤ – 70 °C
2	≤ – 40 °C
3	≤ – 20 °C
4	≤ + 3 °C
5	≤ + 7 °C
6	≤ + 10 °C

Klasse	Konzentration flüssiger Wasseranteil C_W in g/m³ *)
7	$C_W \leq 0{,}5$
8	$0{,}5 < C_W \leq 5$
9	$5 < C_W \leq 10$
X	$C_W > 10$

Öl

Klasse	Gesamtöl-Konzentration (flüssig, aerosol + gasförmig) [mg/m³] *)
0	z. B. für Reinstluft- und Reinraumtechnik nach Rücksprache mit KAESER möglich
1	≤ 0,01
2	≤ 0,1
3	≤ 1,0
4	≤ 5,0
X	> 5,0

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

Kapitel 3

Warum eigentlich Drucklufttrocknung?

Das Problem liegt in der Luft – und zwar im wahrsten Sinn des Wortes: Wenn sich atmosphärische Luft abkühlt, wie es nach der Verdichtung im Kompressor der Fall ist, kondensiert Wasserdampf aus. So „produziert“ ein Kompressor mit einem Volumenstrom von 5 m³/min (bezogen auf +20 °C Umgebungstemperatur, 70 % relative Feuchte und 1 bar(abs) pro achtstündiger Arbeitsschicht etwa 30 Liter Wasser. Es muss aus dem Druckluftsystem entfernt werden, um Betriebsstörungen und Schäden vorzubeugen. Mithin ist kostengünstige und umweltgerechte Drucklufttrocknung ein wichtiger Bestandteil anwendungsgerechter Aufbereitung.

1. Ein Beispiel aus der Praxis
Saugt ein fluidgekühlter Schraubenkompressor bei 20 °C unter Umgebungsdruck pro Minute 10 m³ Luft mit 60 % relativer Feuchte an, dann enthält diese Luft ca. 100 g Wasserdampf. Wird die Luft im Verdichtungsverhältnis 1:10 auf einen Absolutdruck von 10 bar verdichtet, dann erhält man 1 Betriebskubikmeter pro Minute. Bei einer Temperatur von 80 °C nach der Verdichtung kann die Luft nun 290 g Wasser pro Kubikmeter aufnehmen. Da aber nur ca. 100 g vorhanden sind, ist die Luft mit einer relativen Feuchte von ca. 35 % recht trocken und es entsteht kein Kondensat. Der Nachkühler des Kompressors reduziert die Drucklufttemperatur von 80 auf ca. 30 °C.
Danach kann der Kubikmeter Luft nur noch rund 30 g Wasser aufnehmen: der Wasserüberschuss von ca. 70 g/min kondensiert und wird abgeschieden. Bei einem 8-Stunden-Arbeitstag fallen somit ca. 35 Liter Kondensat an.
Weitere 11,5 Liter pro Tag fallen bei einem nachgeschalteten Kältetrockner an. Darin wird die Druckluft zunächst auf +3 °C abgekühlt und später auf Umgebungstemperatur rückerwärmt. Das führt zu einer Feuchte-Untersättigung von ca. 20 % und damit zu einer besseren, relativ trockenen Druckluftqualität **(Abb. 1)**.

2. Ursache Luftfeuchte
Unsere Umgebungsluft ist mehr oder weniger feucht, denn sie enthält immer auch einen Wasseranteil.
Die Feuchte hängt von der jeweiligen Temperatur ab. So bindet beispielsweise zu 100 % wasserdampfgesättigte Luft bei +25 °C nahezu 23 g Wasser pro Kubikmeter.

3. Kondensatbildung
Kondensat entsteht, wenn das Luftvolumen verringert und zugleich die Lufttemperatur gesenkt wird. Damit verringert sich das Wasseraufnahmevermögen der Luft. Genau dies geschieht nach dem Komprimieren im Verdichterblock und im Nachkühler eines Kompressors.

4. Wichtige Begriffe – kurz erklärt:
a) Absolute Luftfeuchte
Die absolute Luftfeuchte gibt den Wasserdampfgehalt der Luft in g/m³ an.

b) Relative Luftfeuchte (Frel)
Die relative Luftfeuchte gibt den Sättigungsgrad, das heißt das Verhältnis des realen Wasserdampfgehalts zum jeweiligen Sättigungspunkt (100 % F_{rel}) der Luft, an. Dieser hängt von der Temperatur ab: Warme Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte.

c) Atmosphärischer Taupunkt
Der atmosphärische Taupunkt ist die Temperatur, bei der Luft unter atmosphärischem Druck (Umgebungsbedingungen) einen Feuchte-Sättigungsgrad (F_{rel}) von 100 % erreicht.

d) Drucktaupunkt
Drucktaupunkt nennt man die Temperatur, bei der Druckluft unter ihrem Absolutdruck ihren Feuchte-Sättigungspunkt (100 % F_{rel}) erreicht. Für obiges Beispiel heißt das: Die unter einem Druck von 10 bar(abs) stehende Luft hat bei einem Drucktaupunkt von +3 °C eine absolute Luftfeuchte von 6 g pro Betriebskubikmeter. Entspannt man den im Beispiel genannten Betriebskubikmeter von 10 bar(abs) auf atmosphärischen Druck, vergrößert sich sein Volumen wieder um das Zehnfache. Der Wasserdampfanteil von 6 g bleibt unverändert und verteilt sich nun auf das zehnfache Volumen. Damit enthält jeder Kubikmeter entspannter Luft nur noch 0,6 g Wasserdampf. Das entspricht einem atmosphärischen Taupunkt von -24 °C.



Abb. 1: Beim Erzeugen, Speichern und Aufbereiten von Druckluft entsteht Kondensat (Angaben bezogen auf 10 m³/min, 10 barabs, 8 h, 60 % Frel und 20 °C)

5. Wirtschaftliche und umweltgerechte Drucklufttrocknung mit Kälte- oder Adsorptionstrockner?
Die umweltrechtlichen Neuregelungen für Kältemittel ändern nichts daran, dass Adsorptionstrockner weder von der Wirtschaftlichkeit noch von der Umweltbilanz her Alternativen zu Kältetrocknern sind. Diese benötigen nämlich nur 3 % der Energie, die der Kompressor zur Drucklufterzeugung braucht, Adsorptionstrockner dagegen 10 bis 25 % oder mehr. Daher sollten im Normalfall Kältetrockner eingesetzt werden.
Der Einsatz von Adsorptionstrocknern ist nur sinnvoll, wenn extrem trockene Druckluftqualitäten mit Taupunkten bis -20, -40 oder -70 °C erforderlich sind **(Abb. 2)**. Im Verlauf eines Arbeitstages sind Druckluftsysteme oft erheblichen Verbrauchsschwankungen ausgesetzt. Dies gilt zumal für den gesamten Jahresverlauf, wobei hier noch starke Temperaturschwankungen hinzukommen. Deshalb sind Druckluftrockner für die denkbar schlechtesten Bedingungen auszulegen: niedrigsten Druck, höchsten Druckluftverbrauch sowie höchste Umgebungs- und Druckluft-Eintrittstemperatur.
Früher löste man diese Aufgabe mit Trockner-Dauerbetrieb, was vor allem bei Teillastbetrieb zu hoher Energieverschwendung führte. Moderne Kältetrockner mit effizienter Aussetzregelung hingegen passen unter Wahrung einer konstant guten Druckluftqualität ihren Energieverbrauch an wechselnde Bedingungen an **(Abb. 3)**. Sie können so im Jahresdurchschnitt mehr als 50 % Energie einsparen.
Energieeffiziente Technik einzusetzen ist besonders zum Erreichen von Drucktaupunkten im Minusbereich wichtig, denn die hierfür eingesetzten Adsorptionstrockner haben einen sehr hohen Energiebedarf. Mit einem ebenso kostengünstigen wie energieeffizienten Kombinationsverfahren, dem HYBRITEC-System, ist es gelungen, hier den Energieverbrauch deutlich zu reduzieren: Das System besteht aus einem Kältetrockner und einem Adsorptionstrockner. Erst bringt der Kältetrockner die einströmende Druckluft energiesparend auf einen Drucktaupunkt von +3 °C. So vorgetrocknet, gelangt sie dann in den Adsorptionstrockner, der nun deutlich weniger Energie zum weiteren Entfeuchten der Luft auf einen Drucktaupunkt von -40 °C benötigt **(Abb. 4)**.

Trocknungsverfahren	Drucktaupunkt °C	typische spezifische Leistungsaufnahme kW / (m³/min)**)
Kältetrockner	+ 3	0,1
HYBRITEC	**+ 3 / – 40*) – 40**	**0,2 0,3**
warmregenerierender Adsorptionstrockner	**– 40**	**0,5 – 0,6**
kaltregenerierender Adsorptionstrockner	– 20 – 70	1,4 – 1,6

Abb. 2: Je nach erforderlichem Drucktaupunkt bieten sich verschiedene Trocknungsverfahren an
**) DTP -40 °C für ein Drittel der Betriebszeit*
***) bei ISO 7153 Option A*

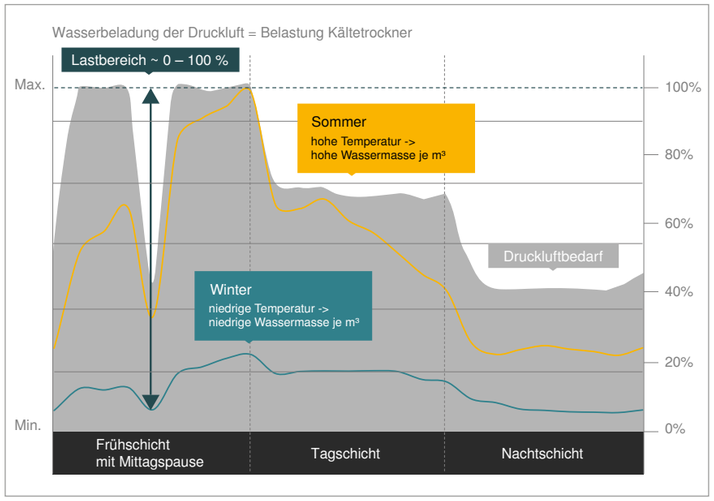


Abb. 3: Energieeinsparpotenziale bei Kältetrocknern mit Aussetzregelung



Abb. 4: Hybritec-System

Kapitel 4

Kondensat automatisch ableiten

Kondensat ist ein unvermeidliches Druckluft-Nebenprodukt. So erzeugt schon ein 30-kW-Kompressor mit einem Volumenstrom von 5 m³/min unter durchschnittlichen Betriebsbedingungen ca. 20 Liter Kondensat pro Schicht. Es muss aus dem Druckluftsystem entfernt werden, um Störungen und Korrosionsschäden zu vermeiden. In diesem Kapitel erfahren Sie, wie Sie das Kondensat richtig ableiten und dabei erheblich Kosten senken können.

1. Kondensatableitung
In jedem Druckluftsystem fällt an bestimmten Stellen mit diversen Verunreinigungen belastetes Kondensat an **(Abb. 1)**. Zuverlässige Kondensatableitung ist unbedingt erforderlich. Sie hat wesentlichen Einfluss auf Druckluftqualität, Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit jeder Druckluftanlage.



Abb. 1: In jedem Druckluftsystem fällt an bestimmten Stellen Kondensat an

a) Kondensatsammel- und -ableitstellen
Zum Sammeln und Ableiten des Kondensats dienen zunächst mechanische Elemente des Druckluftsystems. Dort fallen bereits 70 bis 80 % des gesamten Kondensats an – bei Kompressoren mit guter Nachkühlung.

Zyklonabscheider:
Dieser mechanische Abscheider trennt das Kondensat mit Hilfe der Zentrifugalkraft von der Luft **(Abb. 2a)**.
Um optimal arbeiten zu können, muss er stets einem Drucklufterzeuger zugeordnet sein. Bei größeren Anlagen ist oft bereits ein Abscheidesystem im Kompressor eingebaut **(Abb. 2b)**, hier gibt es aber aufgrund der baulichen Verhältnisse je nach technischer Lösung deutliche Unterschiede in der Abscheiderate.

Zwischenkühler:
Bei zweistufigen Kompressoren mit Zwischenkühlern fällt Kondensat auch am Abscheider des Zwischenkühlers an.

Druckluftbehälter:
Neben seiner Hauptfunktion als Speicher trennt der Druckbehälter mittels Schwerkraft Kondensat von der Luft **(Abb. 1)**, wenn er im „nassen" Leitungsbereich installiert ist. Ausreichend dimensioniert (Kompressorförderleistung/min : 3 = Behälter-Mindestgröße in m³) ist er ebenso effektiv wie ein Zyklonabscheider.
Im Unterschied zu diesem kann er aber in der zentralen Druckluftsammelleitung der Kompressorstation eingesetzt werden, wenn der Lufteintritt unten und der Luftaustritt oben ist. Dank seiner



Abb. 2a: Zyklonabscheider mit Kondensatableiter



Abb. 2b: Integrierter Zyklonabscheider mit Kondensatableiter

großen Wärmeabstrahlfläche kann der Behälter die Druckluft zusätzlich abkühlen und so die Kondensatabscheidung weiter verbessern.

Wassersack in der Druckluftleitung:
Um undefiniertes Strömen des Kondensats zu vermeiden, ist die Druckluftleitung im Feuchtbereich so auszuführen, dass alle Zu- und Abgänge von oben oder von der Seite angeschlossen sind.
Definierte Kondensatabgänge nach unten, sogenannte Wassersäcke, führen Kondensat aus der Hauptleitung ab. Bei einer Luftströmungsgeschwindigkeit von 2 bis 3 m/s und korrekter Auslegung scheidet ein Wassersack **(Abb. 3)** im Feuchtbereich des Druckluftsystems auftretendes Kondensat ebenso effektiv ab wie ein Druckluftbehälter **(Abb. 1)**.

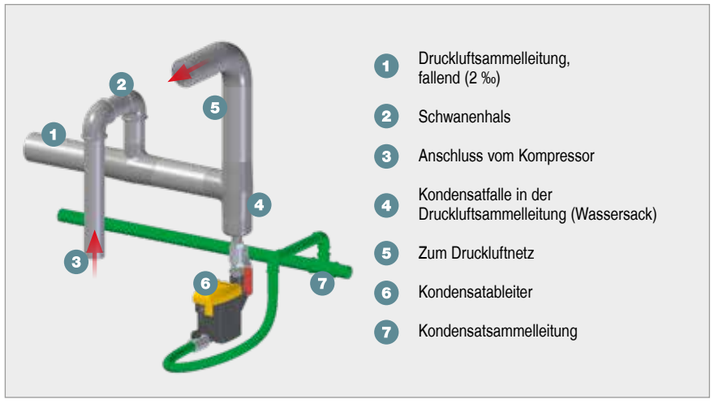


Abb. 3: Wassersack mit Kondensatableiter im Feuchtbereich eines Druckluftsystems

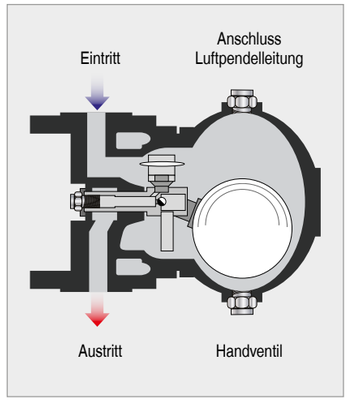


Abb. 4: Schwimmerableiter für Druckluftkondensat

b) Drucklufttrockner
Neben den bereits genannten gibt es weitere Kondensatsammel- und -ableitstellen im Bereich der Drucklufttrocknung.

Kältetrockner:
Beim Abkühlen und dem so bewirkten Trocknen der Druckluft fällt im Kältetrockner weiteres Kondensat an.

Adsorptionstrockner:
Die Abkühlung in der Druckluftleitung lässt schon am Vorfilter des Adsorptionstrockners Kondensat anfallen.
Im Adsorptionstrockner selbst tritt Wasser aufgrund der herrschenden Partialdruckverhältnisse nur als Dampf auf.

c) Dezentrale Abscheider
Ohne zentrale Drucklufttrocknung fallen große Kondensatmengen an den kurz vor den Druckluftverbrauchern installierten Wasserabscheidern an; inklusive enormen Wartungsbedarfs.

2. Ableitersysteme
Derzeit sind im Wesentlichen drei Systeme im Einsatz:

a) Schwimmerableiter
Schwimmerableiter gehören zu den ältesten Ableitersystemen und traten an die Stelle der völlig unwirtschaftlichen und zu unsicheren manuellen Ableitung. Doch auch die Kondensatableitung nach dem Schwimmerprinzip **(Abb. 4)** ist wegen der Verunreinigungen in der Druckluft sehr wartungsintensiv und störanfällig.

b) Magnetventil
Magnetventile mit Zeitsteuerung sind zwar betriebssicherer als Schwimmerableiter, aber sie sind dennoch regelmäßig auf Verunreinigungen zu prüfen. Falsch justierte Ventilöffnungszeiten verursachen zudem Druckluftverluste und damit erhöhten Energieverbrauch.

c) Kondensatableiter mit Niveausteuerung
Heute sind überwiegend Ableiter mit intelligenter Niveausteuerung im Einsatz **(Abb. 5)**. Zu ihrem Vorteil ersetzt ein elektronischer Niveausensor die störungsanfällige Schwimmerfunktion: So sind Störungen wegen Verschmutzung oder mechanischem Verschleiß ausgeschlossen. Außerdem verhindern exakt errechnete und angepasste Ventilöffnungszeiten Druckluftverluste zuverlässig. Weitere Vorteile sind die automatische Selbstüberwachung und die mögliche Signalweitergabe an eine übergeordnete Steuerung bzw. eine zentrale Leittechnik.



Abb. 5: Kondensatableiter mit elektronischer Niveausteuerung (Typ ECO-DRAIN)

d) Richtige Installation
Zwischen Kondensatabscheidesystem und Kondensatableiter sollte stets ein kurzes Leitungsstück mit Kugelhahn eingebaut sein **(Abb. 2a, 2b und 3)**. So lässt sich der Ableiter bei Wartungsarbeiten absperren, und der Betrieb der Druckluftanlage kann störungsfrei weiterlaufen.

Kapitel 5

Kondensat kostengünstig und sicher aufbereiten

Bei dem zwangsläufig entstehenden Kondensat während der Drucklufterzeugung handelt es sich keineswegs nur um kondensierten Wasserdampf. Jeder Kompressor wirkt wie ein überdimensionaler Staubsauger: Er saugt mit kontaminierter Umgebungsluft Verunreinigungen an und gibt diese konzentriert über die noch unaufbereitete Druckluft an das Kondensat weiter.

1. Warum eigentlich Kondensataufbereitung?

Druckluftanwender, die Kondensat einfach in die Kanalisation leiten, riskieren empfindliche Strafen. Der Grund: Das bei der Drucklufterzeugung anfallende Kondensat ist ein brisantes Gemisch. Aufgrund der bestehenden Umweltbelastungen enthält es neben Staubpartikeln auch Kohlenwasserstoffe, Schwefeldioxid, Kupfer, Blei, Eisen und etliches mehr. Maßgebend für die Kondensatentsorgung von Druckluftanlagen in Deutschland ist das Wasserhaushaltsgesetz. Es schreibt vor, dass schadstoffhaltiges Wasser nach den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ (§ 62 WHG) aufbereitet werden muss. Dies betrifft jede Art Druckluftkondensat – auch das aus ölfrei verdichtenden Kompressoren.

Für alle Schadstoffe und den pH-Wert gibt es gesetzliche Grenzwerte. Sie sind je nach Branche und Bundesland unterschiedlich festgelegt. Für Kohlenwasserstoffe z. B. beträgt der höchstzulässige Wert 20 mg/l; der pH-Wertbereich für einleitfähiges Kondensat erstreckt sich von 6 bis 9.



Abb. 1: An allen Kondensat-Sammelstellen des Druckluftsystems muss eine zuverlässige Ableitung vorhanden sein. Dies geschieht am besten durch elektronisch gesteuerte Kondensatableiter.

2. Kondensatbeschaffenheit (Abb. 2)

a) Dispersion

Druckluftkondensat kann verschiedene Beschaffenheiten aufweisen. Dispersionen treten in der Regel bei fluidgekühlten Schraubenkompressoren auf, die mit synthetischen Kühlmitteln wie „Sigma Fluid S460“ betrieben werden.

Dieses Kondensat hat im Normalfall pH-Werte zwischen 6 und 9, kann mithin als pH-neutral angesehen werden. Aus der atmosphärischen Luft eingetragene Verunreinigungen setzen sich bei diesem Kondensat in einer aufschwimmenden, leicht vom Wasser trennbaren Ölschicht fest.

b) Emulsion

Sichtbares Zeichen für das Vorhandensein einer Emulsion ist eine milchige Flüssigkeit, die sich auch nach mehreren Tagen nicht in zwei Phasen trennt. Diese Kondensatbeschaffenheit tritt häufig bei mit herkömmlichen Ölen betriebenen Kolben-, Schrauben- und Vielzellenkompressoren auf. Auch hier sind Schadstoffe in den Ölbestandteilen gebunden. Wegen der starken, stabilen Durchmengung lassen sich Öle und Wasser, aber auch angesaugte Verunreinigungen wie z. B. Staub und Schwermetalle nicht mittels Schwerkraft trennen.

Wenn die vorhandenen Öle Esteranteile aufweisen, kann das Kondensat



Abb. 2: Jeder Kompressor saugt mit der atmosphärischen Luft Wasserdampf und Verunreinigungen an. Das entstehende Druckluftkondensat (Abb. 2 (1)) muss daher von Öl und weiteren Schadstoffen befreit werden (Abb. 2 (2)), bevor es als Reinwasser (Abb. 2 (3)) einleitfähig ist.



Abb. 3: Kondensattrennsystem für Druckluft-Kondensat nach dem Schwerkraftprinzip (Funktionsbild)

außerdem aggressiv sein und muss neutralisiert werden. Das Aufbereiten solcher Kondensate ist nur mit Emulsionsspaltanlagen möglich.

3. Externe Entsorgung

Natürlich ist es möglich, das Kondensat zu sammeln und von Spezialunternehmen entsorgen zu lassen. Allerdings liegen die Entsorgungskosten je nach Kondensatbeschaffenheit bis zu 500 €/m³ und höher. Angesichts der anfallenden Kondensatmengen dürfte somit die betriebliche Aufbereitung meistens rentabel sein. Sie hat den Vorteil, dass von der ursprünglichen Kondensatmenge nur noch etwa 1 % übrigbleiben, die umwelttechnisch zu entsorgen sind.

4. Aufbereitungsverfahren

a) für Dispersionen

Zum Aufbereiten dieser Kondensatart genügt meist ein Dreikammertrenngerät mit zwei Vorabscheidekammern und einer Aktivkohlefilterkammer **(Abb. 3 und 4)**. Der eigentliche Trennvorgang geschieht mittels Schwerkraft. Die auf der Flüssigkeitsoberfläche in der Trennkammer des Geräts aufschwimmende Ölschicht wird in einen Sammelbehälter geleitet und als Altöl entsorgt. Das zurückbleibende Wasser wird anschließend in zwei Stufen filtriert und kann dann in die Kanalisation eingeleitet werden. Gegenüber der Entsorgung durch ein Fachunternehmen lässt sich mit Schwerkrafttrennern eine Kostenersparnis von ca. 95 % erreichen.

Die Geräte werden gegenwärtig bis zu einer Kapazität von 100 m³/min Kompressorvolumenstrom angeboten. Selbstverständlich ist es bei höherem Bedarf möglich, mehrere Geräte parallel zu schalten.



Abb. 4: KAESER Kondensattrennsystem AQUAMAT

b) für Emulsionen

Zum Aufbereiten stabiler Emulsionen werden heute im Wesentlichen zwei Gerätetypen eingesetzt:

Membrantrennsysteme arbeiten nach dem Prinzip der Ultrafiltration mit dem so genannten Cross-Flow-Verfahren. Dabei überströmt vorfiltriertes Kondensat die Membranen. Ein Teil der Flüssigkeit durchdringt diese und verlässt als einleitfähiges Reinwasser das Gerät.

Der zweite Gerätetyp arbeitet mit einem pulverisierten Trennmittel. Dieses kapselt Ölpartikel ein und bildet anschließend gut filtrierbare Makroflocken. Filter mit definierter Porenweite halten diese Flocken zuverlässig zurück. Das abfließende Wasser kann eingeleitet werden.

Kapitel 6

Effiziente Kompressorensteuerung

Nur wenn der Volumenstrom der Kompressoren richtig an einen schwankenden Druckluftbedarf angepasst ist, lassen sich energieaufwendige und damit teure Teillastphasen weitestgehend vermeiden. Die richtige Kompressorsteuerung spielt bei der Energieeffizienz eine Schlüsselrolle.

Weisen Kompressoren einen Auslastungsgrad von weniger als 50 % auf, gilt höchste Energieverschwendungs-Alarmstufe. Viele Betreiber sind sich dessen nicht bewusst, weil ihre Kompressoren nur Betriebsstunden-, aber keine Volllaststundenzähler haben. Gut abgestimmte Steuerungssysteme schaffen Abhilfe: Indem sie den Auslastungsgrad auf 90 % und mehr steigern, können sie eine Energieersparnis von 20 % und mehr bewirken.

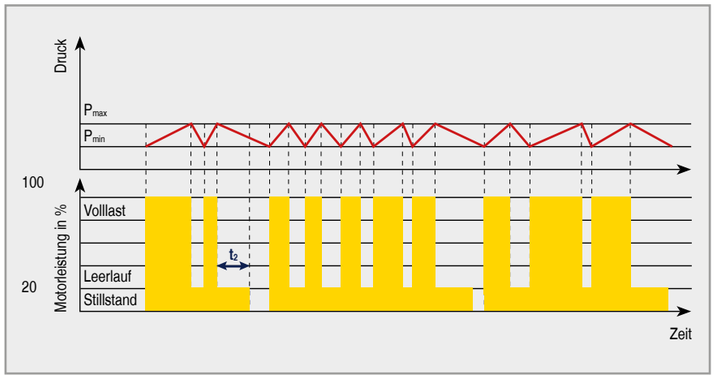


Abb. 1: Volllast-Leerlauf-Aussetzregelung mit fest eingestellten Leerlaufzeiten, sog. Dualregelung

1. Interne Steuerung

a) Volllast/Leerlaufregelung

In den meisten Kompressoren arbeiten Drehstrom-Asynchronmotoren als Antriebsaggregate. Die Schalthäufigkeit dieser Motoren nimmt mit steigender Leistung ab. Sie entspricht nicht der Schalthäufigkeit, die benötigt wird, um Kompressoren mit geringer Schaltdifferenz entsprechend dem tatsächlichen Druckluftverbrauch ein- und auszuschalten. Die Schaltvorgänge im Kompressor entlasten demzufolge nur die druckführenden Bereiche.

Der Motor läuft noch eine Zeit nach **(Abb. 1)**. Die dafür erforderliche Energie ist als Verlust zu betrachten. Der Energiebedarf der so geschalteten Kompressoren liegt während der Leerlaufphase immer noch bei etwa 20 % der Volllastleistung.

Moderne rechneroptimierte Regelsysteme wie Quadroregelung mit automatischer Wahl der optimalen Betriebsart **(Abb. 3)**, Dynamikregelung mit Leerlaufzeiten in Abhängigkeit von der Temperatur des Antriebsmotors **(Abb. 4)** und Varioregelung mit variabel berechneten Leerlaufzeiten **(Abb. 5)** helfen teuren Leerlauf zu vermeiden – bei vollem Motorschutz.

Proportionalregelungen über ansaugseitiges Drosseln sind nicht empfehlenswert, denn damit beansprucht der Kompressor bei 50 % Förderleistung noch 85 % der Energie, die er bei 100 % Förderleistung benötigt.

b) Frequenzumrichtung

Mit Frequenzumrichter drehzahlgeregelte Kompressoren **(Abb. 6)** haben über ihren Regelbereich keinen konstanten Wirkungsgrad. Er verringert sich z. B. im Bereich zwischen 30 und 100 % bei einem 90-kW-Motor von 96 auf 88 %. Hinzu kommen Verluste im Frequenzumrichter und das nichtlineare Leistungsverhalten der Kompressoren. FU-geregelte Kompressoren sollten im Regelbereich von 40 - 80 % gefahren werden: Hier liegt üblicherweise ihre optimale Wirtschaftlichkeit.

Die Komponenten sollten auf 100 % Last ausgelegt sein. Falsch eingesetzt können FU-Systeme somit zu Energiefressern werden, ohne dass es der Betreiber bemerkt. Frequenzumrichtung ist kein Allheilmittel für möglichst energiesparenden Kompressorbetrieb.



Abb. 2: Moderne Steuerungssysteme können bis zu 20 % Energie einsparen.

2. Klassifizieren des Druckluftbedarfs

In der Regel lassen sich Kompressoren je nach Funktion als Grundlast-, Mittellast-, Spitzenlast- oder Standby-Anlage klassifizieren.

a) Grundlast-Bedarf

Unter dem Grundlast-Bedarf versteht man die für die Produktion notwendige Druckluftmenge, die ein Betrieb ständig benötigt.

b) Spitzenlast-Bedarf

Der Spitzenlast-Bedarf ist die zu Verbrauchsspitzenzeiten erforderliche Druckluftmenge. Sie ist aufgrund der Anforderungen verschiedener Verbraucher unterschiedlich groß.

Um die diversen Lastfunktionen so gut wie möglich erfüllen zu können, sollten die Kompressoren mit unterschiedlichen Regelungsarten betrieben werden.

Die internen Steuerungen müssen in der Lage sein, beim Ausfall eines übergeordneten Steuerungssystems den weiteren Kompressorbetrieb und damit die Druckluftversorgung aufrechtzuerhalten.

3. Maschinenübergreifende Steuerung

Moderne maschinenübergreifende Steuerungen mit webbasierter Software können nicht nur den Betrieb der Kompressoren in einer Druckluftstation optimal energieeffizient koordinieren. Sie sind auch in der Lage, Wirtschaftlichkeitsdaten zu erfassen und die Effizienz der Druckluftversorgung zu dokumentieren. Außerdem können sie durch Übertragung der Prozessdaten an den Hersteller als Basis für modernes Anlagenmanagement mit Monitoring, Analyse und vorbeugender Wartung dienen.

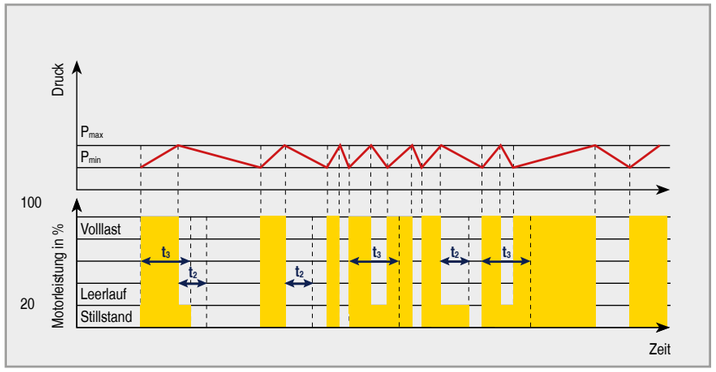


Abb. 3: Volllast-Leeerlauf-Aussetzregelung mit automatischer Wahl der optimalen Betriebsart, sog. Quadroregelung



Abb. 4: Dynamikregelung, basierend auf der Dualregelung, mit Leerlaufzeiten in Abhängigkeit von der Temperatur des Antriebsmotors

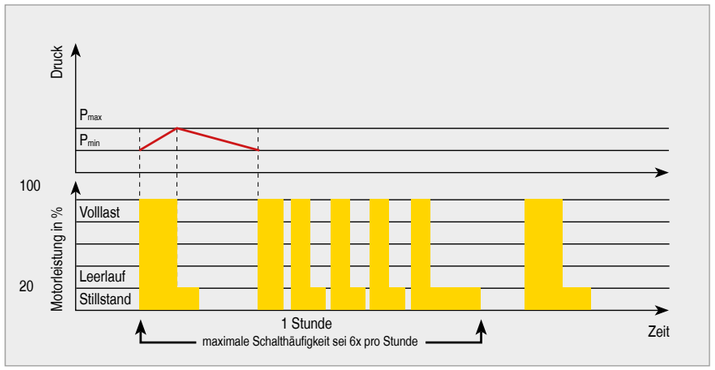


Abb. 5: Varioregelung mit variabel berechneten Leerlaufzeiten

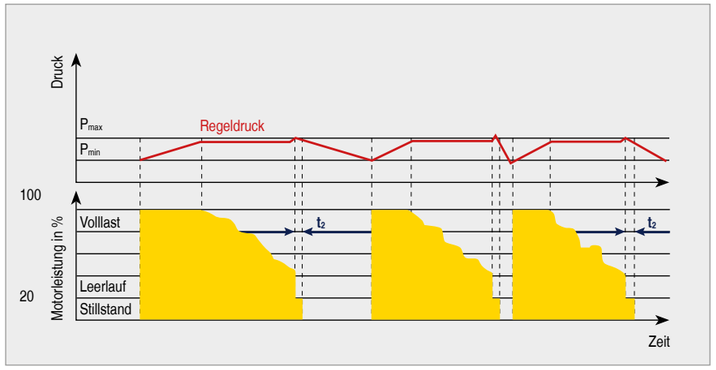


Abb. 6: Kontinuierliche Volumenstromregelung über die Motordrehzahl (Frequenzumrichtung)

Kapitel 6

Effiziente Kompressorensteuerung

a) Anlagen-Splitting
Das Splitting ist die Aufteilung von Kompressoren gleicher oder verschiedener Leistungsgröße und Regelungsart je nach Grund- und Spitzenlast-Druckluftbedarf eines Betriebs **(Abb. 7).**

b) Aufgaben maschinenübergreifender Steuerungen
Die Koordination des Kompressorbetriebs ist eine anspruchsvolle und umfassende Aufgabe. So müssen maschinenübergreifende Steuerungen nicht nur in der Lage sein, Kompressoren verschiedener Bauarten und Größen zum richtigen Zeitpunkt einzusetzen.
Sie müssen auch die Anlagen wartungstechnisch überwachen, Betriebszeiten der Kompressoren angleichen und Fehlfunktionen aufnehmen, um die Servicekosten einer Druckluftstation zu senken und die Betriebssicherheit zu erhöhen.

c) Richtige Abstufung
Eine wichtige Voraussetzung für eine effiziente – das heißt energiesparende – maschinenübergreifende Steuerung ist lückenloses Abstufen der Kompressoren.
Die Summe der Volumenströme der Spitzenlastanlagen muss daher größer sein als die der nächsten zu schaltenden Grundlastanlage. Beim Einsatz einer drehzahlgeregelten Spitzenlastanlage muss entsprechend der Regelbereich größer sein als die Liefermenge des nächsten zu schaltenden Kompressors. Ansonsten ist die Wirtschaftlichkeit der Druckluftversorgung nicht zu gewährleisten.

d) Sichere Datenübertragung
Eine weitere wichtige Voraussetzung für das einwandfreie Funktionieren und die Effizienz einer maschinenübergreifenden Steuerung ist sichere Datenübertragung.

Dazu muss sichergestellt sein, dass nicht nur Meldungen innerhalb der einzelnen Kompressoranlagen, sondern auch zwischen den Kompressoren und dem übergeordneten Leitsystem übertragen werden. Außerdem muss auch der Signalweg überwacht werden, so dass Störungen, wie etwa der Bruch eines Verbindungskabels, umgehend erkennbar sind.

Die üblichen Übertragungswege sind:
1. Potentialfreie Kontakte
2. Analogsignale 4 - 20 mA
3. Elektronische Schnittstellen z. B. Profibus DP, Modbus oder Ethernet.

Die modernste Übertragungstechnik bietet das Industrial Ethernet. Auf diesem Weg lassen sich problemlos große Datenmengen in kürzester Zeit über große Entfernungen senden. Kombiniert mit moderner Übertragungstechnik bietet sich die Möglichkeit

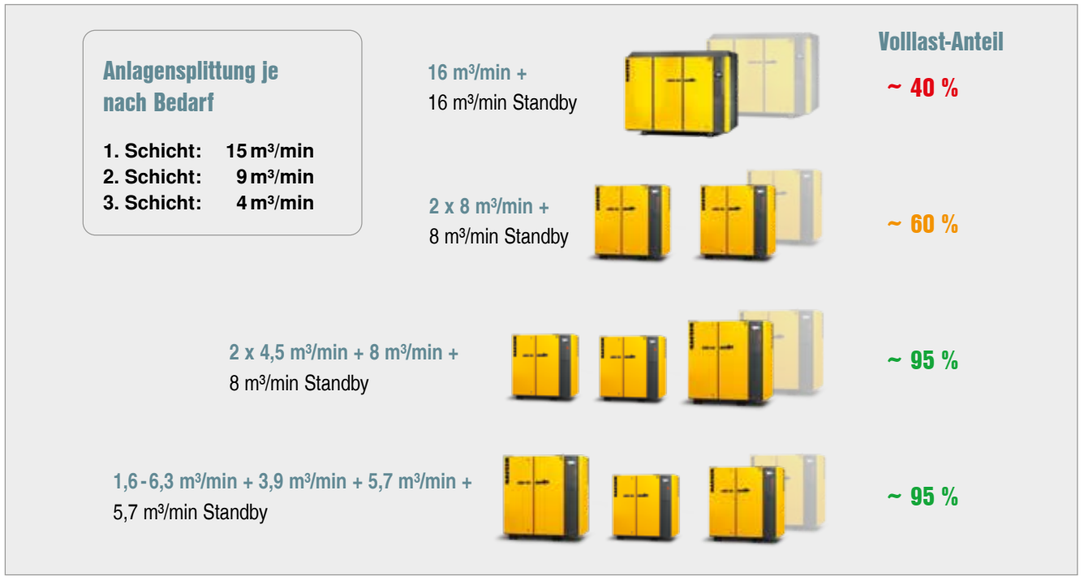
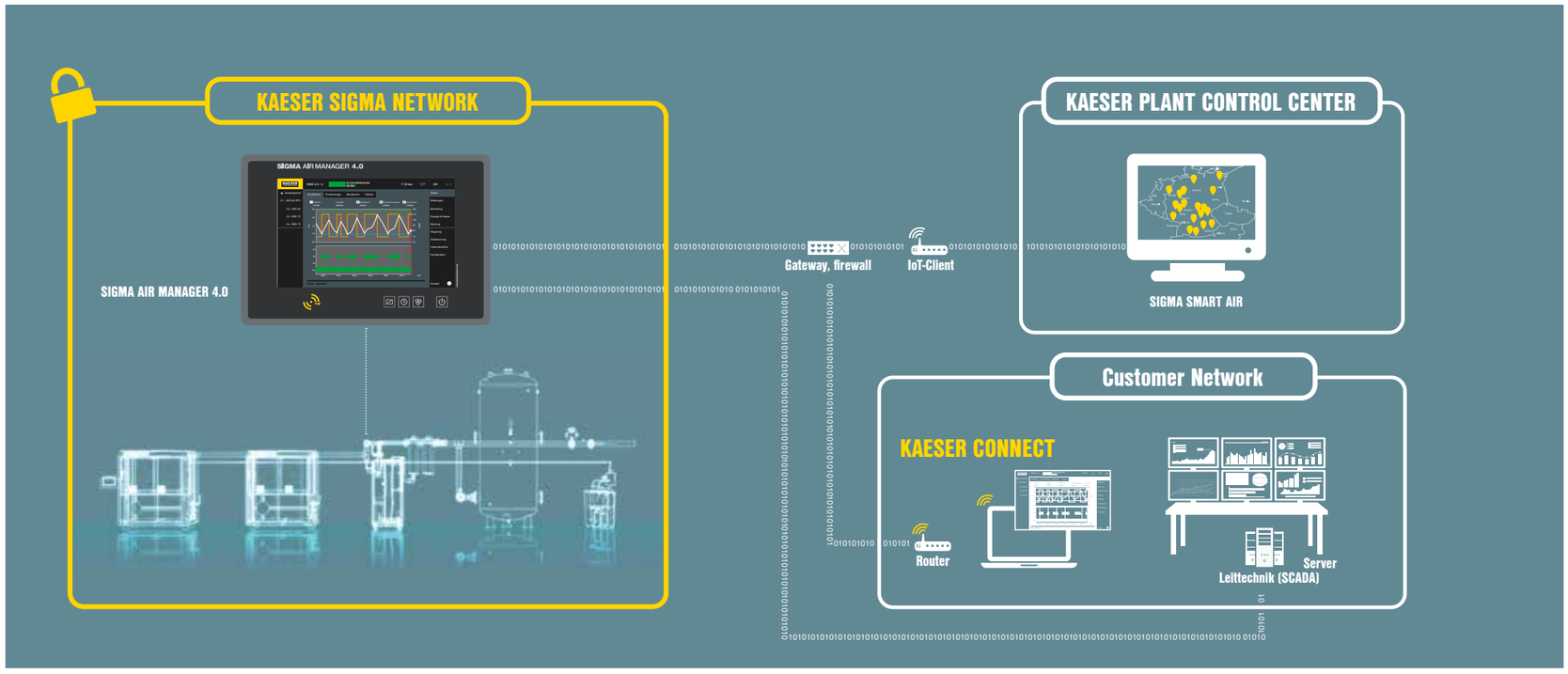


Abb. 7: Bedarfsabhängige Lastverteilung auf Kompressoren verschiedener Leistungsgrößen

zur Visualisierung und Anbindung an standardisierte Computer und Überwachungssysteme. Somit müssen übergeordnete Leitsysteme auch nicht unbedingt in der Druckluftstation platziert werden **(Abb. 8)**.

Abb. 8: Umfassende Anbindungsmöglichkeiten einer übergeordneten Steuerung tragen zum effizienten Betrieb einer Druckluftstation bei





Kapitel 7

Optimale verbrauchsorientierte Abstimmung von Kompressoren

Druckluftstationen bestehen zumeist aus mehreren Kompressoren gleicher oder unterschiedlicher Baugröße(n). Um diese Einzelmaschinen zu koordinieren, bedarf es einer maschinenübergreifenden Steuerung: Die Drucklufterzeugung ist optimal auf den Bedarf des Anwenderbetriebs abzustimmen, zugleich ist höchstmögliche Energieeffizienz zu erreichen.

Die allgemein als Kompressorsteuerungen bezeichneten Systeme sind im Sinn der Regelungstechnik als Regelungen zu betrachten. Sie verteilen sich auf vier Gruppen:

1. Kaskadenregelung
Die klassische Art, Kompressoren regelungstechnisch zu verbinden, ist die Kaskadenregelung. Dabei wird jedem Kompressor ein unterer und ein oberer Schaltpunkt zugeordnet. Sind mehrere Kompressoren zu koordinieren, ergibt sich daraus ein treppen- oder kaskadenähnliches Regelungssystem. Während bei niedrigem Luftbedarf nur ein Kompressor geschaltet wird und somit der Druck im oberen Bereich zwischen dem Minimal- (p_{min}) und dem Maximaldruck (p_{max}) dieses Kompressors schwankt, fällt bei höherem Luftbedarf und Schaltung mehrerer Kompressoren der Druck ab **(Abb. 1, Spalte 1)**. Damit ergibt sich eine relativ ungünstige Konstellation: Bei niedrigem Luftverbrauch herrscht maximaler Druck im System was die Energieverluste durch Leckagen erhöht; bei hohem Verbrauch hingegen sinkt der Druck und die Druckreserve im System wird reduziert. Je nachdem, ob herkömmliche Membrandruckschalter, Kontaktmanometer oder elektronische Druckaufnehmer als Messwertaufnehmer zum Einsatz kommen, ist die Druckspreizung des Regelungssystems wegen der Einzelzuordnung der Kompressoren zu einem bestimmten Druckbereich sehr groß. Je mehr Kompressoren im Einsatz sind, desto größer fallen die Druckbereiche insgesamt aus.
Dies führt zu ineffektiven Regelungen mit den bereits erwähnten erhöhten Drücken, Leckagen und Energieverlusten. Kaskadenregelungen sollten daher bei der Kombination von mehr als zwei Kompressoren durch andere Regelungsverfahren ersetzt werden.

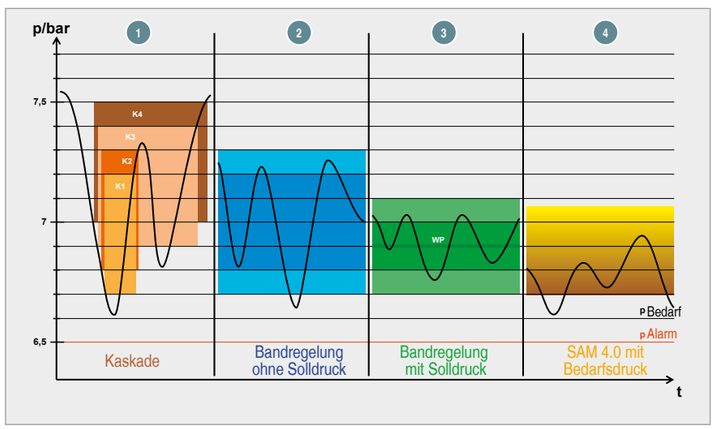


Abb. 1: Verschiedene Varianten übergeordneter Kompressorenregelung

2. Druckbandregelung
Im Gegensatz zur Kaskadenregelung bietet die Druckbandregelung **(Abb. 1, Spalte 2)** die Möglichkeit, den Betrieb mehrerer Kompressoren in einem bestimmten Druckbereich zu koordinieren. Damit lässt sich der Druckbereich, innerhalb dessen die gesamte Druckluftstation geregelt wird, relativ eng begrenzen.

2. *a) Einfache Druckbandregelung*
Einfache Versionen der Druckbandregelung sind jedoch nicht in der Lage, den Betrieb von Kompressoren unterschiedlicher Größe zu koordinieren; sie entsprechen deshalb nicht den Anforderungen an die Spitzenlastabdeckung in Druckluftnetzen, die ständig wechselnden Bedarfssituationen genügen müssen.
Deshalb wurde dieses Verfahren durch ein System ergänzt, das versucht, mit Orientierung an Druckabfall- und -anstiegszeiten die jeweils passenden Kompressoren anzusteuern und so den Druckluft-Spitzenlastbedarf zu decken. Diese Regelungscharakteristik erfordert aber eine relativ große Spreizung des Druckbands **(Abb. 2)**. Zudem werden ähnlich wie bei der Kaskadenregelung die Reaktionen der Kompressoren und des Druckluftnetzes nicht berücksichtigt, woraus sich ein Unterschreiten des minimal möglichen Druckpunkts ergibt. Deswegen ist es erforderlich, einen Sicherheitsabstand zwischen dem benötigten Mindestdruck und dem untersten Schaltdruck der Regelung einzuhalten.

2. *b) Solldruckorientierte Druckbandregelung*
Eine entscheidende Verbesserung brachte die solldruckorientierte Druckbandregelung **(Abb. 1, Spalte 3)** mit sich. Diese ist bestrebt, einen bestimmten vorgegebenen mittleren Solldruck innerhalb von definierten Druckgrenzen einzuhalten, bei gleichzeitiger Überwachung des Druckverlaufs in engeren Grenzen und dadurch je nach Druckluftverbrauch, Kompressoren unterschiedlicher Größe ansteuern. Der besondere Vorteil dieser Regelungsvariante besteht in der Möglichkeit, den durchschnittlichen Betriebsdruck des Druckluftsystems deutlich zu senken und so erhebliche Energie- und Kostenersparnisse zu erreichen.

3. Bedarfsdruckregelung
Die Bedarfsdruckregelung **(Abb. 1, Spalte 4)** bietet das derzeitige regeltechnische Optimum. Bei dieser Variante werden keine festen Druckgrenzen und Schaltpunkte mehr vorgegeben, sondern nur der niedrigstmögliche Betriebsdruck, der am Messpunkt des Drucksensors nicht unterschritten werden darf. Durch das Beobachten und Aufzeichnen des Druckluftverbrauchsverlaufs und der vollzogenen Schalthandlungen werden die Geschehnisse im Druckluftsystem analysiert und dabei die wesentlichen Einflüsse für das Verhalten der Station und ihrer Komponenten erlernt. Unter Berücksichtigung aller möglicher Verluste verursacht durch Druckerhöhung, Anfahr-, Reaktions- und Leerlaufzeiten **(Abb. 3)** werden durch das simulationsbasierende Optimierungsverfahren der übergeordneten Steuerung SIGMA AIR MANAGER 4.0 in Echtzeit die effizientesten Schalthandlungen vorausschauend getroffen. Maßgebend für die Entscheidungen ist das Erreichen der geringsten Kosten für die Drucklufterzeugung – bei Einhaltung des vorgegebenen Bedarfsdrucks **(Abb. 4)**.

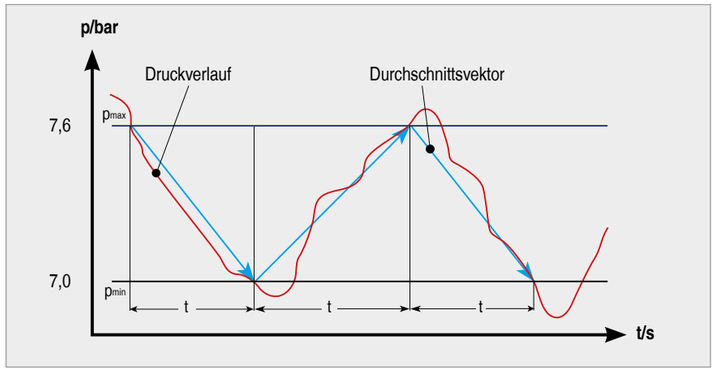


Abb. 2: Einfache Druckbandregelung mit Durchschnittsauswertung des Druck-Zeit-Verlaufs und großer Spreizung des Druckbands

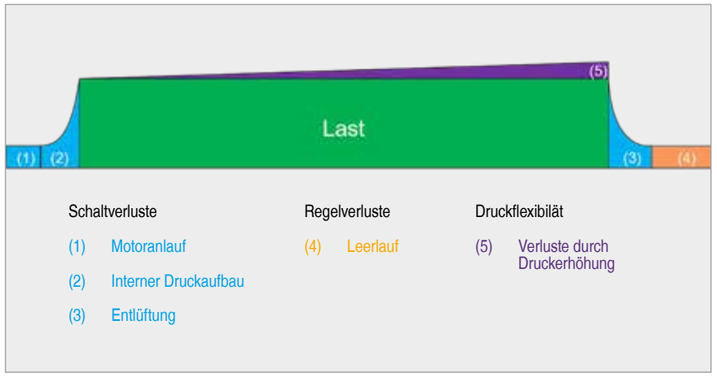


Abb. 3: Schaltzyklus eines Schraubenkompressors

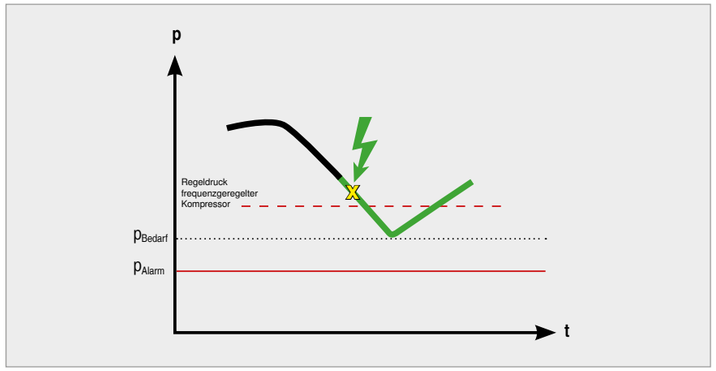


Abb. 4: Das System verhindert durch rechtzeitiges Zuschalten ein Unterschreiten des vorgegebenen Mindest-Bedarfsdrucks

Energie einsparen mit Wärmerückgewinnung

Angesichts der kontinuierlichen Verteuerung von Energie ist sparsamer Umgang mit Energieressourcen nicht nur eine ökologische, sondern zunehmend auch eine wirtschaftliche Notwendigkeit. Die Kompressorenhersteller bieten dazu viele Möglichkeiten wie z. B. die Wärmerückgewinnung bei Schraubenkompressoren an.

1. Kompressoren erzeugen in erster Linie Wärme

Tatsache ist, dass 100 % der einem Kompressor zugeführten Energie in Wärme umgewandelt werden. Bei Verdichtung wird die Luft im Kompressor mit einem Energiepotenzial aufgeladen **(Abb. 1)**. Die entsprechende Energiemenge ist durch Entspannung auf Umgebungsdruck, Abkühlung und Wärmeaufnahme aus der Umgebung nutzbar.

2. Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung

Wer an einer noch wirtschaftlicheren Druckluftnutzung interessiert ist, kann zwischen verschiedenen Varianten der Wärmerückgewinnung wählen:

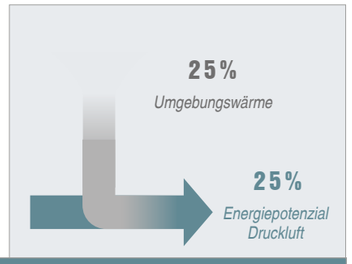
a) Warmluftheizung

Die einfachste Möglichkeit der Wärmerückgewinnung bei luft- und öl- bzw. fluidgekühlten Schraubenkompressoren ist die direkte Nutzung der vom Kompressor erwärmten Kühlluft. Dabei wird die Abwärme über ein Luftkanalsystem in die zu beheizenden Räume geleitet.

Natürlich lässt sich die Warmluft auch für andere Zwecke wie Trocknungsprozesse, für Torschleieranlagen oder zum Vorwärmen von Brennerluft einsetzen. Ist keine Wärme erforderlich, wird der Abluftstrom durch Umlegen einer Schwenkklappe oder Jalousie ins Freie geleitet. Eine thermostatgeregelte Jalousiesteuerung erlaubt es, die Warmluft so genau zu dosieren, dass konstante Temperaturen erreicht werden. Mit dieser Variante sind bis zu 96 % der elektrischen Leistungsaufnahme eines Schraubenkompressors nutzbar. Sie kann sich auch bei kleinen Anlagen lohnen, denn schon mit der Abwärme eines 7,5-kW-Kompressors lässt sich mühelos ein Einfamilienhaus beheizen.

b) Warmwasserheizung

Der Einbau eines Wärmetauschers in den Fluidkreislauf ermöglicht, sowohl mit luft- als auch mit wassergekühlten Schraubenkompressoren Warmwasser für verschiedene Zwecke zu erzeugen. Hierfür kommen in der Regel Plattenwärmetauscher zum Einsatz, oder auch Sicherheitswärmetauscher bzw.



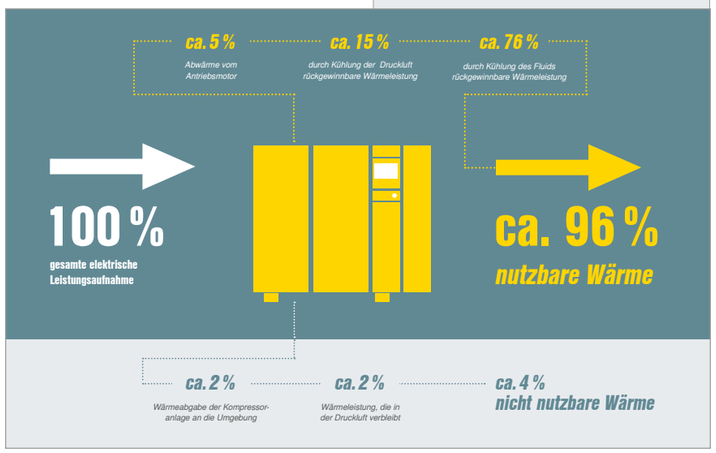


Abb. 1: Wärmeflussdiagramm

die Wärmeübertragung erfolgt über einen Zwischenkreislauf – je nachdem, ob das Warmwasser für Heizzwecke, als Dusch- und Waschwasser oder bei Produktions- und Reinigungsprozessen verwendet werden soll **(Abb. 3)**.

Mit diesen Wärmetauschern sind Wassertemperaturen bis 70 °C erreichbar. Die zusätzlichen Aufwendungen für diese Wärmerückgewinnungsvariante amortisieren sich bei Kompressoranlagen ab 7,5 kW Antriebsleistung erfahrungsgemäß innerhalb von zwei Jahren. Voraussetzung ist allerdings eine korrekte Planung **(Abb. 2)**.



Abb 2: Vorschriftsmäßige Anbindung von Kompressoren an ein Wärmerückgewinnungssystem

3. Sicherheit beachten

Normalerweise sollte das primäre Kühlsystem des Kompressors nie zugleich als Wärmerückgewinnungssystem eingesetzt werden. Bei einem eventuellen Ausfall der Wärmerückgewinnung wäre sonst auch die Kompressorkühlung und damit die Drucklufterzeugung gefährdet. Deshalb sind für die Wärmerückgewinnung immer spezielle Wärmetauscher zusätzlich in die Kompressoranlage einzubauen. Dann nämlich sorgt der Kompressor im Fall einer Störung selbst für seine Sicherheit: Wird über den Fluid-Wasser-Wärmetauscher des Wärmerückgewinnungssystems keine Wärme abgeführt, schaltet der Kompressor intern auf das primäre Luft- oder Wasserkühlsystem um. Damit bleibt die Druckluftversorgung weiterhin gesichert.

4. Bis zu 96 % nutzbare Energie

Der größte Teil der eingesetzten und als Wärme nutzbaren Energie, und zwar 76 %, ist bei Kompressoren mit Öl- oder Fluideinspritzkühlung im Kühlmedium zu finden, 15 % in der Druckluft und bis zu 5 % im Wärmeverlust des Elektroantriebsmotors. Bei vollgekapselten öl- oder fluidgekühlten Schraubenkompressoren lassen sich sogar diese Energieverluste des Elektromotors mit gezielter Kühlung als Wärmeenergie zurückgewinnen. Insgesamt sind also bis zu 96 % der für den Kompressor eingesetzten Energie thermisch nutzbar. Lediglich 2 % gehen durch Wärmeabstrahlung verloren und 2 % Wärme verbleiben in der Druckluft **(Abb. 1)**.

5. Fazit

Wärmerückgewinnung ist definitiv eine bedenkenswerte Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit einer Druckluftanlage zu erhöhen und zugleich die Umwelt zu entlasten. Der erforderliche Aufwand ist verhältnismäßig gering. Die Höhe der Investitionen richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten des Anwenderbetriebs, nach dem Einsatzzweck und dem gewählten Wärmerückgewinnungsverfahren **(Abb. 4)**.

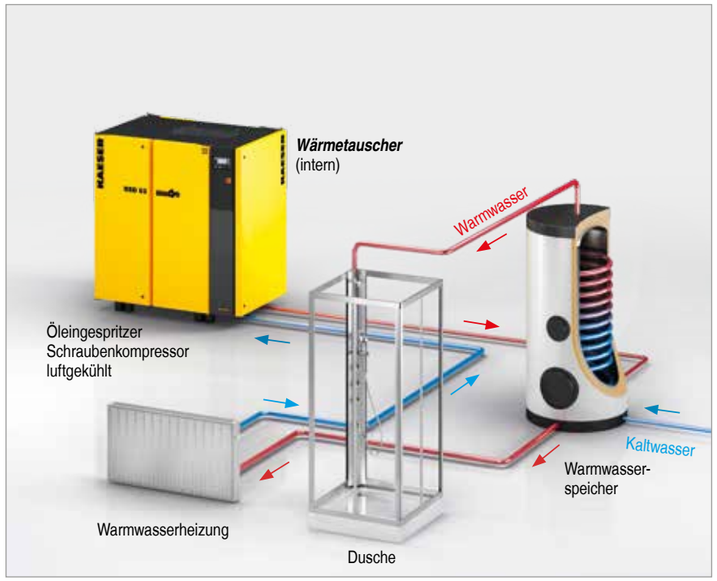


Abb. 3: Schema Wärmerückgewinnung für die Warmwassernutzung

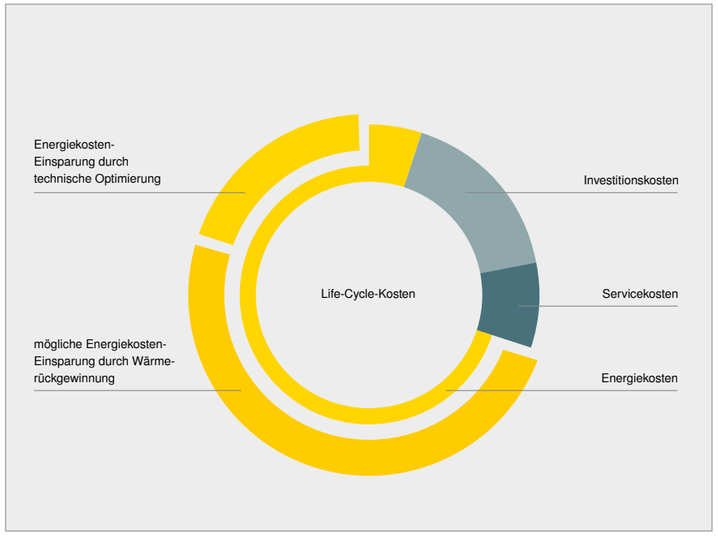


Abb. 4: Wärmerückgewinnung bietet ein bedeutendes zusätzliches Energiekosten-Einsparpotenzial

Kapitel 9

Druckluftnetz-Neuplanung

Druckluft ist vor allem dann ein wirtschaftlicher Energieträger, wenn ihre Erzeugung, Aufbereitung und Verteilung so gut wie möglich aufeinander abgestimmt sind. Dazu gehören neben der richtigen Planung und Ausführung der Druckluftstation selbst auch die angemessene Dimensionierung und Installation des Druckluftnetzes.

1. Wirtschaftliche Drucklufterzeugung

Unter Berücksichtigung aller Aufwendungen für Energie, Kühlmittel, Wartung und Abschreibung kostet der Kubikmeter Druckluft je nach Größe, Auslastung, Wartungszustand und Bauart des Kompressors zwischen etwa 1 und 3 Cent. Viele Betriebe legen daher großen Wert auf besonders wirtschaftliche Drucklufterzeugung. Das ist auch der Grund für den Siegeszug der öl- bzw. fluidgekühlten Schraubenkompressoren: Damit lassen sich bis zu 20 % der früher anfallenden Drucklufterzeugungskosten einsparen.

2. Die Aufbereitung beeinflusst das Druckluftnetz

Schon geringere Beachtung findet dagegen bedarfsgerechte Druckluftaufbereitung. Das ist bedauerlich, denn nur gut aufbereitete Druckluft hält die Wartungskosten für Druckluftverbraucher und Rohrleitungsnetz niedrig. Wo Rohrleitungen feuchtigkeitsbeladene, noch nicht getrocknete Druckluft transportieren, muss auf jeden Fall Rohrleitungsmaterial mit Korrosionsschutz verwendet werden. Ansonsten ist darauf zu achten, dass nicht mangelhafte Rohrleitungen die einmal mit dem Aufbereitungssystem erzielte Druckluftqualität wieder verschlechtern.

a) Kältetrockner senken den Wartungsbedarf

In ca. 80 % aller Anwendungsfälle reichen Kältetrockner für die Druckluftaufbereitung aus. So ersparen sie oft den mit Druckverlusten verbundenen Einsatz von Filtern im Rohrleitungsnetz und beanspruchen nur etwa 3 % der Energiekosten, die der Kompressor beim Erzeugen einer entsprechenden Druckluftmenge verursacht. Hinzu kommt, dass die Kostenersparnis durch niedrigen Wartungs- und Reparaturaufwand an Rohrleitungen und Druckluftverbrauchern bis zum Zehnfachen der für die Kältetrocknung eingesetzten Mittel reicht.

b) Platzsparende Kombigeräte

Für kleinere Betriebe oder dezentrale Versorgung sind auch platzsparende Kombinationen aus Schraubenkompressor, Kältetrockner und Druckluftbehälter **(Abb. 1)** auf dem Markt erhältlich.

3. Neuplanung und Installation eines Druckluftnetzes

Vorab ist zu klären, ob die Druckluftversorgung zentral oder dezentral aufgebaut sein soll. Für kleinere und mittlere Betriebe eignet sich meist eine zentrale Versorgung: Hier treten gewöhnlich nicht die Probleme auf, die sich bei einem weitläufigen zentralen Druckluftnetz stellen können: hoher Installationsaufwand, Gefahr des Einfrierens unzureichend isolierter Freileitungen im Winter und verstärkter Druckabfall durch große Leitungslängen.



Abb. 1: Moderne Druckluft-Kompaktstation AIRCENTER für platzsparende Druckluft-erzeugung, -aufbereitung und -speicherung

a) Das Netz richtig dimensionieren

Zur Dimensionierung eines Leitungsnetzes sollte in jedem Fall eine Berechnung gehören.

Ihre Grundlage ist ein maximaler Druckabfall von 0,1 bar zwischen Kompressor und Druckluftverbrauchern, dazu kommt die übliche Standard-Druckluftaufbereitung (Kältetrocknung) sowie die Schaltdifferenz des Kompressors.

Im Einzelnen rechnet man mit folgenden Druckverlusten **(Abb. 2)**:

Hauptleitung (1)	0,03 bar
Verteilungsleitung (2)	0,03 bar
Anschlussleitung (3)	0,04 bar
Trockner (4)	0,20 bar
Wartungseinheit und Schlauch (5)	0,50 bar
Ingesamt max.	**0,80 bar**

Diese Aufstellung zeigt, wie wichtig es ist, die Druckverluste in den einzelnen Leitungsabschnitten zu berechnen. Dabei sind auch Formteile und Absperreinheiten zu berücksichtigen. Es genügt nicht, die geraden Meter Rohr in eine Berechnungsformel oder -tabelle einzusetzen.

Es ist vielmehr die strömungstechnische Länge der Rohrleitungen zu ermitteln. Normalerweise hat man jedoch bei Beginn der Planung noch keinen Überblick über die Gesamtheit aller Formteile und Absperreinheiten. Deshalb berechnet man die strömungstechnischen Rohrlängen, indem man die anzusetzenden geraden Meter Rohr mit dem Faktor 1,6 multipliziert. Die Rohrleitungsdurchmesser lassen sich dann anhand gängiger Formeln **(Abb. 3)** oder Auslegungsdiagramme auf einfache Weise ermitteln.

Mit Hilfe der KAESER-Toolbox (http://www.kaeser.de/service/wissen/rechner) ist ebenfalls eine Auslegung möglich.

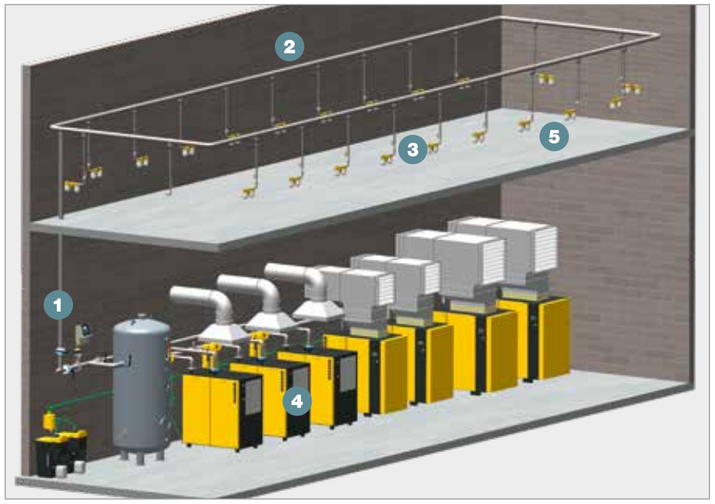


Abb. 2: Hauptbestandteile eines Druckluft-Verteilungssystems: Hauptleitung (1), Verteilerleitung (2), Anschlussleitung (3), Trockner (4), Wartungseinheit/Schlauch (5)

b) Rohrleitungen energiesparend verlegen

Um Energie einzusparen, ist das Rohrleitungssystem so gerade wie möglich zu verlegen. Biegungen, etwa beim Umgehen von Stützpfeilern, kann man vermeiden, indem man die Rohrleitung in einer geraden Linie neben dem Hindernis verlegt. Scharfkantige, hohen Druckverlust verursachende 90-Grad-Ecken sind ebenfalls leicht durch groß dimensionierte 90-Grad-Bögen ersetzbar. Statt der noch häufig anzutreffenden Wasserabsperreinheiten sollten Kugelhähne oder Klappenventile mit vollem Durchgang eingesetzt werden.

Näherungsformel:

$$d_i = \sqrt[5]{\frac{1{,}6 \times 10^3 \times V^{1{,}85} \times L}{\Delta p \times p_s}}$$

di = Innendurchmesser des Rohres (m)
ps = Systemdruck (absolut in Pa)
L = Nennlänge (m)
V = Volumenstrom (m³/s)
Δp = Druckverlust (Pa)

Abb. 3: Näherungsformel zur Ermittlung von Rohrleitungsdurchmessern

Im Feuchtrohrleitungsbereich, bei einer modernen Druckluftstation also lediglich im Kompressorenraum, sind die Zu- und Abgänge von der Hauptleitung nach oben oder zumindest seitlich zu verlegen. Die Hauptrohrleitung sollte ein Gefälle von zwei Promille haben. Am tiefsten Punkt dieser Leitung ist eine Kondensatabscheidemöglichkeit vorzusehen. Im Trockenbereich dagegen können die Leitungen horizontal verlegt werden und die Rohrleitungsabgänge direkt nach unten führen.

c) Welches Rohrleitungsmaterial ist das richtige?

Hier lässt sich im Hinblick auf die Materialeigenschaften keine bestimmte Empfehlung geben, lediglich in Kompressoren sollten wegen der hohen thermischen Belastungen immer Metall-Leitungen eingesetzt werden. Auch die Anschaffungspreise eignen sich nicht als alleinige Entscheidungshilfe: Verzinkte Rohre, Kupfer- oder Kunststoffrohre haben etwa das gleiche Preisniveau, werden Werkstoff- und Installationskosten zusammengerechnet. Rund 20 % höher liegen die Preise für Edelstahlrohrleitungen. Effizientere Verarbeitungsmethoden haben jedoch auch hier inzwischen Preissenkungen ermöglicht.

Mittlerweile bieten nicht wenige Hersteller Tabellen an, in denen die optimalen Bedingungen für jedes Rohrleitungsmaterial genannt sind. Vor einer Investitionsentscheidung ist es daher ratsam, sich diese Tabellen genau anzusehen, die Belastungen im künftigen Betriebsablauf zu berücksichtigen und danach einen Anforderungskatalog für die Rohrleitungen zu erstellen. Nur so lässt sich eine wirklich gute Auswahl treffen.

d) Wichtig: die richtige Verbindungstechnik

In der traditionellen Verbindungstechnik sollten Rohrleitungsteile entweder mit Schweißen oder Kleben oder mit Verschrauben und Kleben miteinander verbunden werden. Wenn auch die Lösbarkeit darunter leidet, so kann man doch sicher sein, dass derartige Verbindungen mögliche Leckagen auf ein Minimum reduzieren. Inzwischen sind auch Pressverbindungen an Kupfer-, Edel- und C-Stahlrohren weit verbreitet. Das Material des jeweils zur Abdichtung eingesetzten O-Rings hängt vom Durchflussmedium und den Betriebsbedingungen ab. Die Qualität der Verbindung wird im Wesentlichen durch das Presswerkzeug bestimmt, Hilfsstoffe sind bei der Erstellung von Pressverbindungen nicht nötig.

Kapitel 10

Druckluftnetz-Sanierung

Jahr für Jahr gehen in vielen Betrieben Tausende Euro buchstäblich in die Luft. Die Ursache: Ein veraltetes und/ oder mangelhaft gewartetes Rohrleitungsnetz treibt den Energiebedarf des Druckluftsystems in die Höhe. Wer diesen Mangel beheben möchte, muss wohlüberlegt vorgehen. Es folgen einige Tipps zur richtigen Sanierung von Druckluft-Rohrleitungsnetzen.

1. Grundvoraussetzung: trockene Druckluft

Beim Planen eines neuen Druckluftnetzes lassen sich viele Fehler und damit später auftretende Probleme von vornherein vermeiden. Das Sanieren eines Altnetzes ist dagegen oft mit Schwierigkeiten verbunden. Sie ist vor allem dann ein so gut wie hoffnungsloses Unterfangen, wenn weiterhin feuchte Druckluft in das Netz eingespeist wird. Vor Beginn einer Sanierung muss daher auf jeden Fall eine zentrale Trocknungseinheit verfügbar sein.

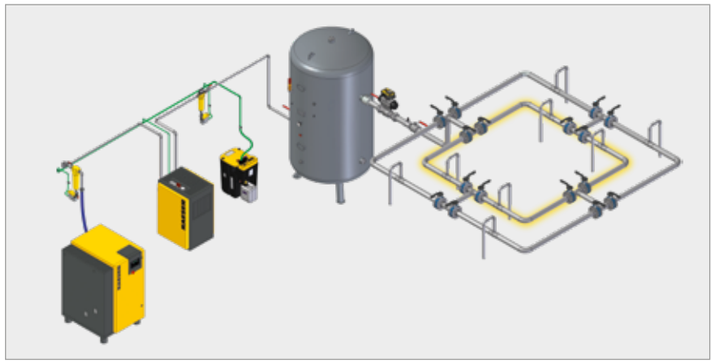


Abb. 1: Sanieren einer Druckluftrohrleitung durch Installation eines zweiten Leitungsrings

2. Was hilft bei zu großem Druckabfall im Netz?

Ist der Druckabfall im Leitungsnetz auch nach der Installation einer angemessenen Aufbereitung sehr groß, sind Ablagerungen in den Rohren die Ursache. Sie entstehen durch Verunreinigungen, die in der Druckluft mitgeführt werden und den Strömungsquerschnitt auf ein Minimum verkleinert haben.

a) Austauschen oder Freiblasen

Sind diese Ablagerungen bereits verkrustet, hilft in den meisten Fällen nurmehr der Austausch der betroffenen Rohrleitungen. Häufig ist aber mit Freiblasen und anschließendem Austrocknen der Leitungen das Vergrößern des Strömungsquerschnitts möglich, wenn die Ablagerungen noch keine erheblichen Verengungen verursacht haben.

b) Ergänzende Leitungen installieren

Eine sehr gute Möglichkeit, zu eng gewordene Stichleitungen zu erweitern, ist das Ziehen einer Parallelleitung, die mit der Stichleitung vernetzt ist. Bei zu eng gewordenen Ringleitungen bietet sich entsprechend das Ziehen eines zweiten Ringes an **(Abb. 1)**. Ist ein solches Doppelstich- oder Doppelringleitungssystem richtig dimensioniert, kann sich neben dem beabsichtigten Haupteffekt – spürbare Abnahme von Druckverlusten – zusätzlich der Vorteil einer noch zuverlässigeren Druckluftverteilung ergeben.

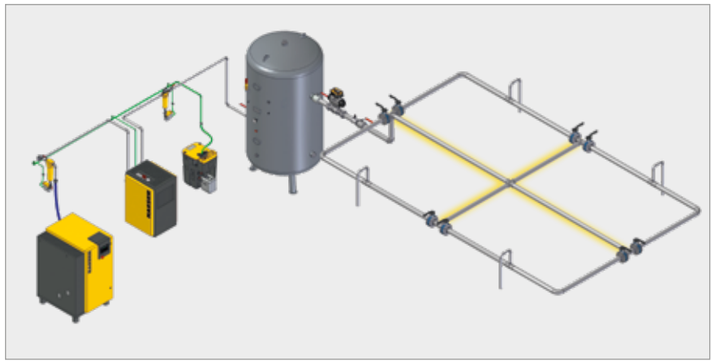


Abb. 2: Erweitern der Leitungskapazität durch sogenannte Zwischenmaschen

Eine weitere Sanierungsmöglichkeit für Ringleitungen besteht darin, das System durch so genannte Zwischenmaschen zu erweitern **(Abb. 2)**.

3. Leckagen ermitteln und beseitigen

Sanierungsmaßnahmen führen natürlich nur dann zum optimalen Ergebnis, wenn auch die Leckagen im Druckluftnetz weitestgehend beseitigt werden.

a) Feststellen der gesamten Leckagemenge

Bevor man sich auf die Suche nach einzelnen undichten Stellen im Rohrleitungssystem macht, ist das gesamte Ausmaß der Leckagen zu bestimmen. Dafür gibt es eine einfache Methode: Zuerst werden alle Druckluftverbraucher ausgeschaltet und dann die Einschaltzeiten des Kompressors während eines bestimmten Zeitraums

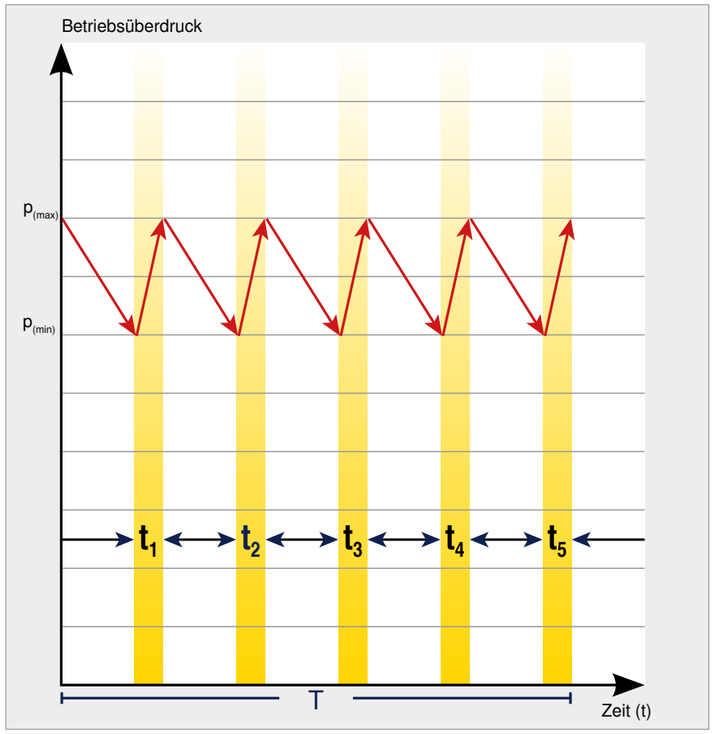


Abb. 3: Ermitteln von Leckagen durch Messen der Einschaltzeiten des Kompressors bei ausgeschalteten Druckluftverbrauchern

gemessen **(Abb. 3)**. Auf Grundlage dieser Mesung errechnet sich die Leckagemenge nach folgender Formel:

$$VL = \frac{VK \times \sum t_x}{T}$$

Legende:

VL = Leckagemenge (m³/min)
VK = Volumenstrom des Kompressors (m³/min)
∑ tx = t1 + t2 + t3 + t4 + t5 Zeit, in der der Kompressor belastet lief (min)
T = Gesamtzeit (min)

b) Ermitteln der Leckagen an den Verbrauchern

Um Leckagen an dezentralen Druckluftverbrauchern zu ermitteln, schließt man zunächst alle pneumatischen Werkzeuge, Maschinen und Geräte an und misst die Summe aller Leckagen **(Abb. 4)**. Dann schließt man die Absperrventile vor den Anschlüssen der Verbraucher und misst die Leckagen im Rohrleitungsnetz **(Abb. 5)**. Die Differenz aus Gesamt- und Netzleckagen ergibt schließlich die Verluste an den Luftverbrauchern, ihren Armaturen und Fittings.

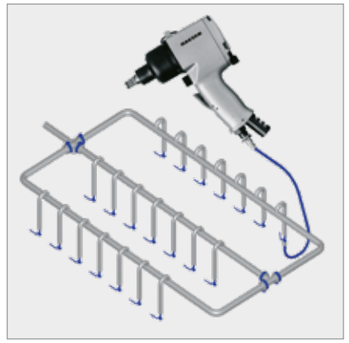


Abb. 4: Leckagemessung der Druckluftverbraucher + Rohrleitungsnetz

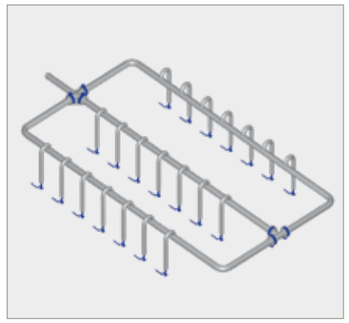


Abb. 5: Leckagemessung des Rohrleitungsnetzes

4. Wo finden sich die meisten Leckagen?

Erfahrungsgemäß sind etwa 70 % der Leckagen in den letzten Metern, also an den Endabnahmestellen des Druckluftnetzes, zu finden. Diese Endstellenleckagen lassen sich mit Hilfe von Seifenlauge oder Spezialsprays genau orten. Hauptrohrleitungen weisen gewöhnlich nur dann zahlreiche und große Leckagen auf, wenn etwa ein ursprünglich feuchtes Netz, das mit alten Hanfdichtungen ausgestattet ist, mit trockener Druckluft betrieben wird und diese Dichtungen dann nach einiger Zeit austrocknen. Zum genauen Orten von Leckagen im Hauptrohrleitungsnetz empfiehlt sich der Einsatz eines Ultraschallgeräts. Sind zu guter Letzt die Leckagen erfasst, beseitigt und die Rohrleitungsquerschnitte dem aktuellen Druckluftbedarf angepasst, so ist aus dem alten Netz (wieder) ein wirtschaftliches Druckluftverteilungssystem geworden.

Kapitel 11

Druckluft-Bedarfsanalyse (ADA): Ermitteln der IST-Situation

Moderne Druckluftstationen sind meist komplexe Systeme. Wirklich wirtschaftlich lassen sie sich nur betreiben, wenn dies bei Neuplanung, Erweiterung und Modernisierung angemessen berücksichtigt wird. Dazu bietet KAESER ein umfassendes Dienstleistungskonzept an. Es verbindet bewährte Elemente wie Druckluftkomponenten, Anwenderberatung und -betreuung mit neuen Möglichkeiten der Informationstechnologie in der Drucklufttechnik.

Das Spektrum der Druckluftanwender reicht von A wie Automobilhersteller bis Z wie Zementwerk. Eine wesentliche Voraussetzung für effizienten Drucklufteinsatz in den verschiedensten Bereichen ist zuverlässige Erzeugungs- und Aufbereitungstechnik. Sie muss Druckluft kostengünstig in exakt definierter Menge und Qualität liefern.

1. Beratung entscheidet über Wirtschaftlichkeit

Ein Druckluftsystem, das diesen Anforderungen entspricht, muss genau auf Anwendung(en) sowie Aufstellungs- und Umgebungsbedingungen abgestimmt sein. Das heißt, es muss über richtig dimensionierte Kompressoren, Aufbereitungsgeräte und Rohrleitungen ebenso verfügen wie über effiziente Steuerung, angemessene Lüftungstechnik und Kondensataufbereitung; zudem sollte es möglichst die Nutzung der Wärmerückgewinnung einbeziehen. Dieser Erkenntnis entspricht das „KAESER-Energie-Spar-System“ (KESS). Es umfasst Druckluftbedarfsanalyse, Planung **(Abb. 1)**, Realisation, Weiterbildung und Kundendienst.

Entscheidend ist dabei die Qualität der Beratung und die Auswahl der richtigen Technik: Die größten Kosteneinsparpotenziale liegen nämlich in den Bereichen Energiebedarf und Wartung und nicht in der Beschaffung.

2. Druckluft-Bedarfsanalyse

Ausgangspunkt jeder KESS Beratung ist eine Analyse des gegenwärtigen und gegebenenfalls künftigen Druckluftbedarfs. Diese bei KAESER als ADA (Analyse der Druckluft-Auslastung) geführte Untersuchung berücksichtigt je nach Bedarfsfall unterschiedliche Rahmenbedingungen:

a) Neuplanung einer Druckluftversorgung

Zum Planen einer neuen Druckluftstation erhält der künftige Betreiber einen speziellen Auslegungsfragebogen **(Abb. 2)**. Dieser ermöglicht es, in Zusammenarbeit mit einem erfahrenen KAESER-Druckluftfachberater den zu erwartenden Druckluftbedarf und die dazu erforderliche Ausstattung zu ermitteln. Die Fragen decken alle für wirtschaftliche, umweltgerechte Druckluftversorgung wichtigen Aspekte ab.

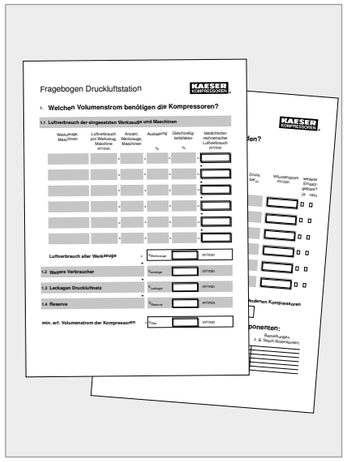


Abb. 2: Fragebogen „Druckluftstation“ zur Aufnahme von Neu- und Altanlagen (siehe auch Anhang, Seite 56 f.)

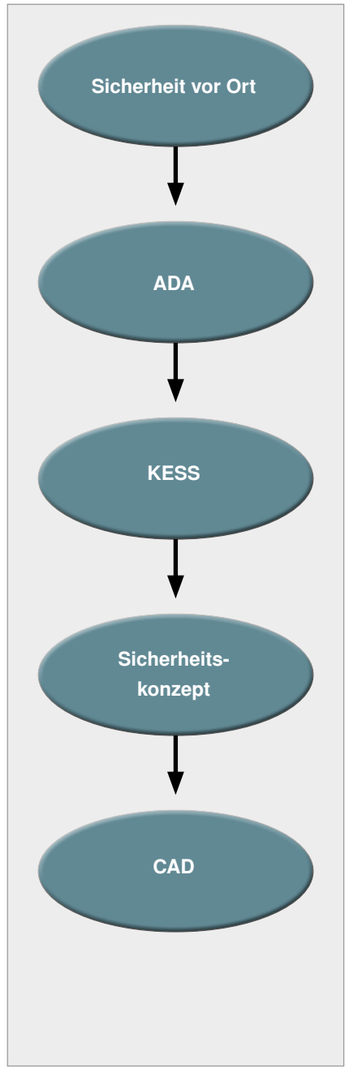


Abb. 1: System der Druckluftanalyse von KAESER Kompressoren

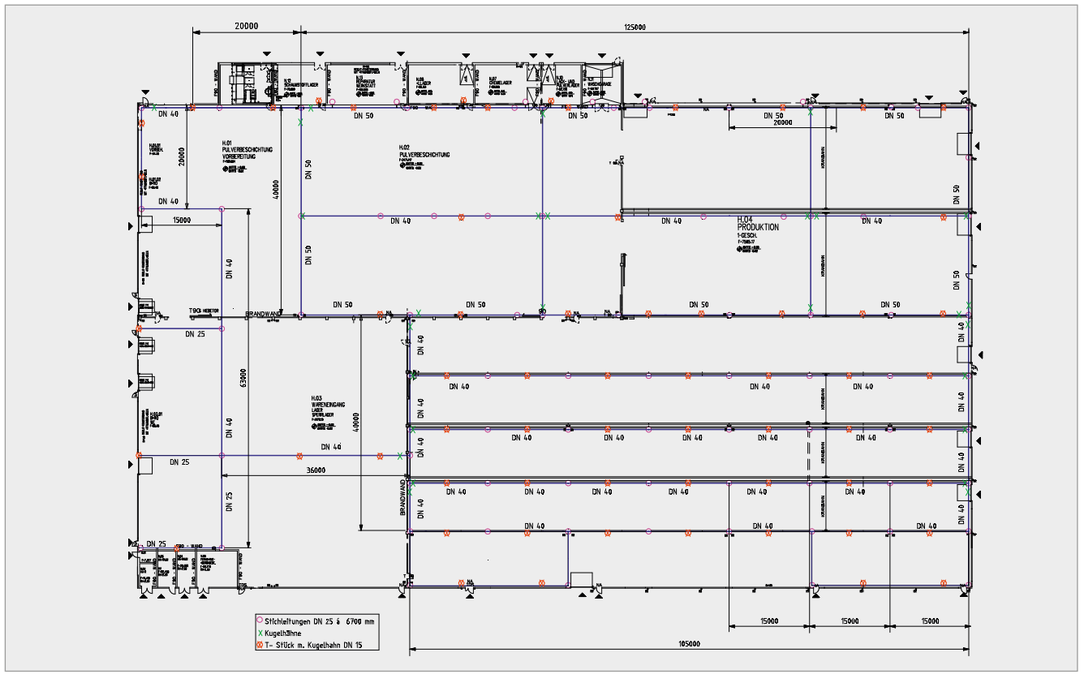


Abb. 3: Grundrissplan eines Betriebs mit Druckluft-Rohrleitungssystem

b) Erweiterung und Modernisierung

Anders als bei Neuprojekten bieten Erweiterungsvorhaben hinreichend Anhaltspunkte zur bedarfsgerechten Auslegung. KAESER stellt dem Anwender Messverfahren und -geräte zur Verfügung, mit denen der Druckluftbedarf in betroffenen Betriebsteilen zu verschiedenen Zeiten exakt ermittelt werden kann. Dabei ist es wichtig, nicht nur Durchschnittswerte, sondern auch Maximal- und Minimalwerte zu ermitteln **(Abb. 8, Seite 31)**.

c) Prüfen der Effizienz bestehender Stationen

Auch bei bestehenden Stationen empfiehlt es sich, von Zeit zu Zeit mit Hilfe eines computergestützten Analysesystems festzustellen, ob die Kompressoren (noch) richtig belastet werden, ob möglicherweise maschinenübergreifende Steuerungen nicht (mehr) richtig programmiert sind oder die Leckagerate sich noch im Toleranzbereich bewegt. ADA sollte auch zum Einsatz kommen, wenn alte Kompressoren durch neue ersetzt werden. Das bietet die Chance, eventuell fehlerhafte Leistungsgrößen durch richtige zu ersetzen, das Betriebsverhalten der Kompressoren (Teillastbereich!) zu verbessern und eine optimierte maschinenübergreifende Steuerung einzuplanen.

d) Veränderte Druckluft-Einsatzbedingungen

Auch bei geänderten Einsatzbedingungen sollte ein Fachmann zu Rate gezogen werden. In vielen Fällen lassen sich nämlich mit angepasster Aufbereitungstechnik oder Druckabstimmung erhebliche Kostensenkungen erreichen.

3. Informationen des Betreibers

a) Grundrissplan

Zur allgemeinen Orientierung muss ein Grundrissplan des Betriebs **(Abb. 3)** zur Verfügung stehen.

Darin sollten Hauptdruckluftleitung, Verbindungsleitungen und Einspeisepunkte der Druckluftstation verzeichnet sein. Zudem sind Angaben über Rohrleitungsdimensionierung und -materialien sowie über Stellen des Haupt-Druckluftverbrauchs sowie der Entnahme von Luft besonderen Drucks und besonderer Qualität erforderlich.

b) Einsatzarten der Druckluft

Da Druckluft ein sehr vielseitiges Medium ist, sind Details über ihre Einsatzarten unverzichtbar: Wird die Druckluft z. B. als Steuerluft, bei der Oberflächenbeschichtung, für drehende Werkzeuge, zu Reinigungszwecken, als Prozessluft usw. eingesetzt?

c) Installierte Kompressoren

Neben den Typen und Bauarten der Kompressoren sind deren technische Daten wie Betriebsdruck, Volumenstrom, Leistungsaufnahme, Art der Kühlung und gegebenenfalls Abwärmenutzung zu nennen.

d) Druckluftaufbereitung

Bei der Druckluftaufbereitung ist es wichtig, ob zentral und/oder dezentral aufbereitet wird und welche Qualitätsklassen erforderlich sind. Natürlich sind auch die technischen Daten der Komponenten zu benennen. Ein Fließschema sorgt für Übersicht **(Abb. 4, Seite 30)**.

e) Anlagensteuerung / -überwachung

Da neben den Eigenschaften der Einzelkompressoren vor allem deren Zusammenspiel die Wirtschaftlichkeit ▶

Druckluft-Bedarfsanalyse (ADA): Ermitteln der IST-Situation

einer Station maßgeblich beeinflusst, darf eine Beschreibung der Steuerungs- und Überwachungstechnik nicht fehlen.

4. Gespräch Betreiber/ Druckluftfachmann
Liegen alle Informationen vor, sollte der Druckluftfachmann in einem Vorgespräch zunächst in die gesammelten Unterlagen eingewiesen und erörtert werden, welche Probleme es mit der Druckluftversorgung gibt. Dazu könnten etwa zu niedriges oder schwankendes Druckniveau, mangelhafte Luftqualität, schlechte Auslastung der Kompressoren oder Probleme mit der Kühlung zählen.

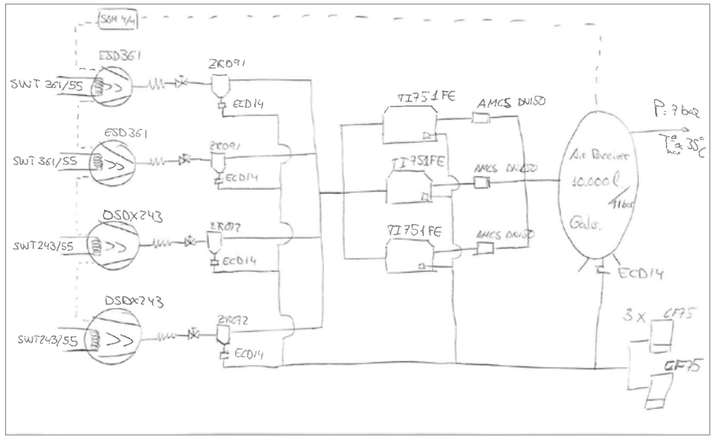


Abb. 4: Von Hand gezeichnetes Fließschema einer Druckluftstation

5. Begehung des Drucklufsystems
Am aufschlussreichsten ist in der Regel eine Begehung des Druckluftsystems. Dabei empfiehlt es sich, in der kritischsten Zone zu beginnen, wo beispielsweise starke Druckabfälle oder schlechte Luftqualitäten zu erwarten sind **(Abb. 5)**. Erfahrungsgemäß sind das meist die Endabnahmestellen.

a) Anschluss-Schläuche, Druckminderer, Wasserabscheider
Insbesondere die Schlauchverbindungen zu den Luftverbrauchern weisen oft Leckstellen auf. Sie sind deshalb auf Schäden und Undichtigkeiten zu prüfen.
Sind Druckminderer vorhanden, ist deren Einstellung (Vor- und Nachdruck) unter Lastbedingungen ebenfalls zu prüfen **(Abb. 6)**. Vor den Druckminderern installierte Wasserabscheider sind auf etwaige Flüssigkeiten und Verunreinigungen zu untersuchen.
Dies gilt auch für senkrecht nach unten führende Abgangsleitungen **(Abb. 7)**.

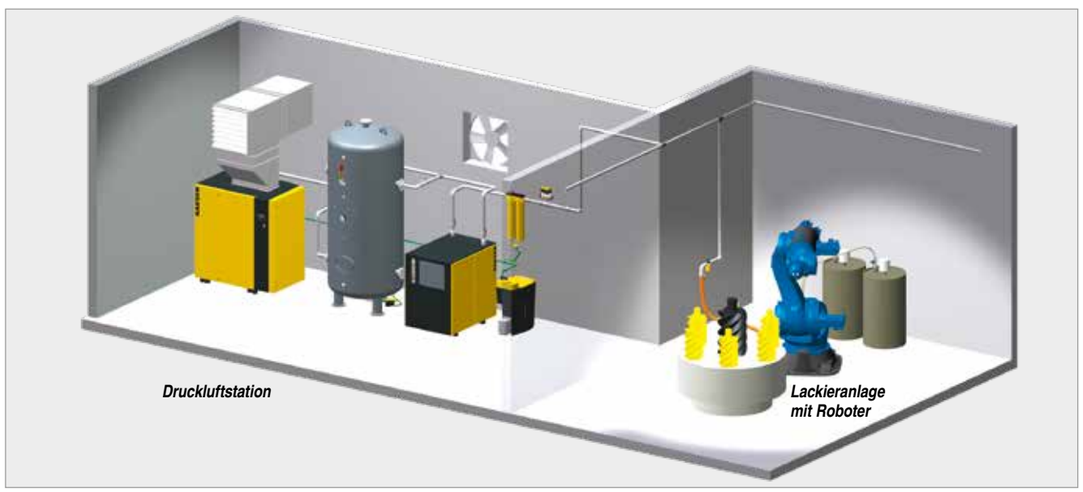
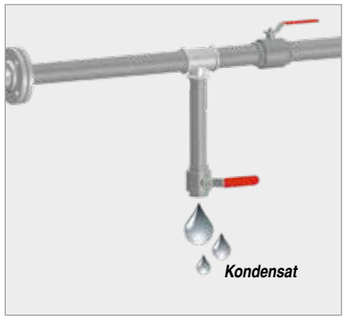


Abb. 5: Aufschlussreich: Begehung des Druckluftsystems


Abb. 6: Wartungseinheit mit Druckminderer


Kondensat
Abb. 7: Druckluft-Abgangsleitung auf Feuchtigkeit prüfen

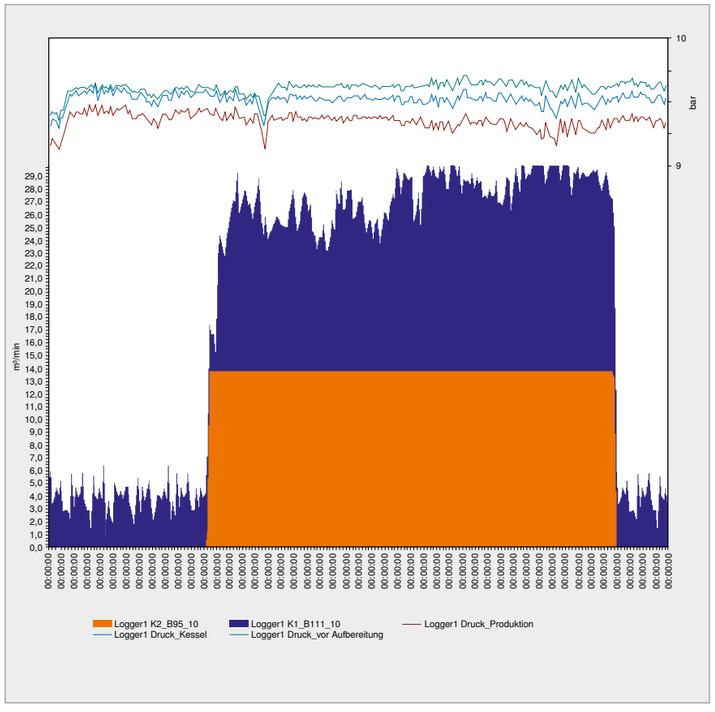


Abb. 8: Gemessene Druck- und Druckluftverbrauchsstruktur eines Industriebetriebs

b) Absperreinrichtungen
Großen Einfluss auf die Systemeffizienz hat der Zustand der vom Hauptnetz abzweigenden Verbindungsleitungen. Zu deren neuralgischen Punkten gehören die Absperreinrichtungen. So ist zu kontrollieren, ob es sich beispielsweise um strömungsgünstige Kugelhähne mit vollem Durchgang bzw. Absperrklappen oder um strömungsungünstige Wasserabsperrarmaturen bzw. Eckventile handelt.

c) Hauptrohrleitungsnetz
Beim Hauptrohrleitungsnetz kommt es vor allem darauf an, Engstellen als Druckabfall-Verursacher zu ermitteln.

d) Druckluft-Aufbereitungssystem
Hier sind die wichtigsten Prüfkriterien der erreichte Drucktaupunkt (Trockenheitsgrad) und der jeweils verursachte Differenzdruck. Je nach Einsatzfall können auch weitere Qualitätsprüfungen notwendig sein.

e) Druckluftstation
Auch die Druckluftstation selbst kann natürlich erhebliche Mängel aufweisen. Im Einzelnen sind die Aufstellung der Maschinen, das Lüftungssystem, die Kühlung und die Verrohrung zu prüfen. Darüber hinaus ist die Gesamtschaltdruckdifferenz der Kompressoren, die Größe der Druckluftspeicher und der Messpunkt festzustellen, von dem aus die Kompressoren gesteuert werden.

f) Bestimmen der Messpunkte
Nach der Begehung legt der Druckluftfachmann gemeinsam mit dem Betreiber die Messpunkte für die Verbrauchsanalyse fest. Mindestanforderung ist die Druckmessung vor und nach der Aufbereitung sowie am Ausgang des Druckluftnetzes.

6. Druck- und Luftverbrauchsmessung (ADA)
Beim Messen von Druck und Luftverbrauch wird der Betrieb der Druckluftstation und des gesamten Systems über mindestens 10 Tage mit Hilfe moderner Datenloggertechnik analysiert. Der Datenlogger erfasst die relevanten Messwerte und überträgt sie an einen Rechner, der ein detailliertes Verbrauchsdiagramm erstellt **(Abb. 8)**. Erkennbar sind Druckabfälle, Druck- und Verbrauchsschwankungen, Leerlaufverhalten, Last- und Stillstandszeiten der Kompressoren sowie die Zuordnung der Leistung jedes einzelnen Kompressors zum jeweiligen Druckluftverbrauch. Um das Bild zu vervollständigen, sind während der Messung auch die Leckagen zu ermitteln. Dies geschieht wie in **Kapitel 10, S. 26 / 27** dargestellt und erfordert unter anderem ein gezieltes Absperren bestimmter Netzbereiche während des Wochenendes.

Kapitel 12

Ermitteln des wirtschaftlichen Konzepts

Mit konsequenter Optimierung von Druckluftsystemen ließen sich über 30 % der durchschnittlichen Druckluftkosten europäischer Industriebetriebe einsparen. Hauptkostenanteil ist der Energiebedarf mit ca. 70 bis 90 %. Angesichts der Preisentwicklung wird für Anwender das Ermitteln des effizientesten Druckluftkonzepts immer wichtiger.

Mit der Optimierungsrechnung des KAESER-Energie-Spar-Systems (KESS) lässt sich aus mehreren Druckluftversorgungsvarianten rasch die für den jeweiligen Anwenderbetrieb geeignetste ermitteln. Berechnungsgrundlage ist bei Neuplanungen der ausgefüllte Auslegungsfragebogen. Für bestehende Kompressorstationen dient ein mit der Analyse der Druckluft-Auslastung (ADA) erfasster, charakteristischer Tagesverlauf als Berechnungsbasis **(siehe S. 31, Abb. 8)**.

1. Rechnergestützte Ermittlung

Zum Optimieren einer Station werden die technischen Daten der installierten Kompressoren und möglicher neuer Varianten in das Programm eingegeben. KESS berechnet dann die optimale Variante und die Möglichkeiten der Kostensenkung. Dabei wird nicht nur der punktuelle Energieverbrauch bei einem bestimmten Druckluftbedarf samt Verlustleistungen kalkuliert.
Es ist vielmehr möglich, sich ein genaues Bild des spezifischen Leistungsverhaltens der Kompressorstation während der gesamten Laufzeit zu machen **(Abb. 1)**. So lassen sich Schwachstellen im Teillastbereich schon im Vorfeld erkennen und beheben. Als Gesamtresultat ergibt sich eine klare Aussage über die erreichbare Kostensenkung und die Amortisation.

2. Die Mischung macht‘s

Zumeist erweist sich eine genau abgestimmte Konfiguration aus Kompressoren unterschiedlicher Leistungsgrößen als richtige Lösung. Sie besteht in der Regel aus großen Grundlast- und Standby-Maschinen, kombiniert mit kleineren Spitzenlastmaschinen.
Aufgabe der maschinenübergreifenden Steuerung ist es, für möglichst ausgeglichenen spezifischen Leistungsbedarf zu sorgen. Dazu muss sie automatisch die jeweils günstigste Kombination von Grund- und Spitzenlastkompressoren auswählen können – energetisch optimiert für bis zu 16 Kompressoren in einem möglichst geringen Druckschwankungsbereich oberhalb des Bedarfsdrucks ohne diesen zu unterschreiten. Diese Anforderung erfüllen intelligente Steuerungssysteme, wie der SIGMA AIR MANAGER 4.0. Diese Steuerung kann über ein KAESER spezifisches Netzwerk mit Kompressoren und weiteren Komponenten wie Trocknern, Kondensatableitern usw. Daten austauschen. Zudem lässt sie sich an eine zentrale Leittechnik anschließen und kann sämtliche Betriebsdaten dorthin weiterleiten.

3. Bautechnische Optimierung

Neuplanung oder Modernisierung einer Kompressorstation sollte die räumlichen Gegebenheiten optimal nutzen. Moderne Planungssysteme, wie KAESER sie einsetzt, leisten hier wertvolle Unterstützung. Sie beziehen nicht nur Grundrisszeichnungen und R+I-Schemata (Fließschemata), sondern auch computergenerierte 3D-Darstellungen und -Animationen in den Planungsprozess ein. So ist es z. B. oft möglich, trotz beengter Raumverhältnisse wirtschaftliche Luftkühlung anzuwenden. Damit lassen sich gegenüber der Wasserkühlung etwa 30 bis 40 % Kosten einsparen. **(Abb. 2a bis c)**.

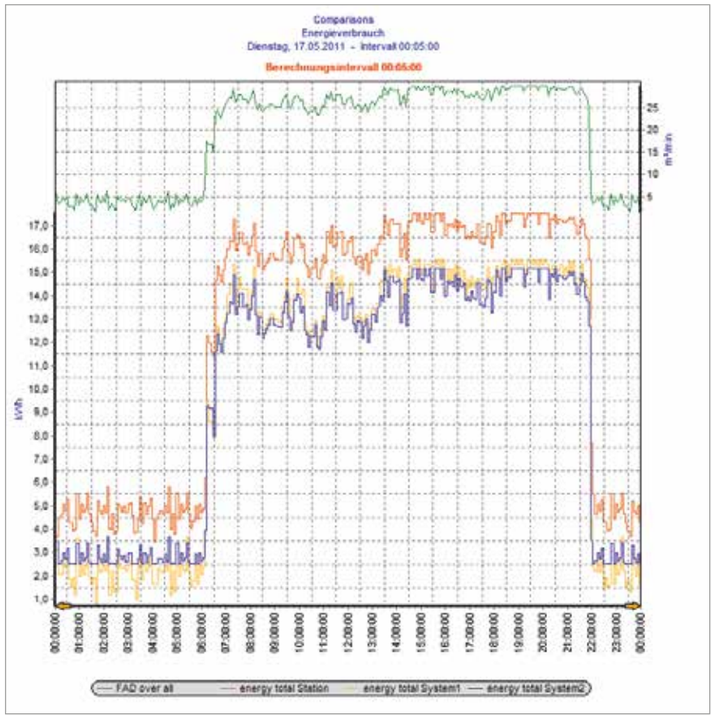


Abb. 1: Vergleich des Energieverbrauchs einer bestehenden Druckluftstation mit neuen Anlagenvarianten während eines Betriebstags abhängig vom Druckluftbedarf

4. Betriebsoptimierung und Controlling - Druckluftmanagement

Um die Wirtschaftlichkeit der Druckluftversorgung langfristig zu sichern, muss nicht nur ein optimiertes Kosten-Nutzen-Verhältnis, sondern auch die für effektives Controlling erforderliche Transparenz gegeben sein. Basis dafür ist die Kompressorregelung SIGMA CONTROL, ein Industrie-PC mit fünf programmierten Steuerungsarten und der Möglichkeit, Daten zu sammeln und an ein Datennetz weiterzuleiten. Auf der Ebene der übergeordneten Regelung entspricht dem ein weiterer Industrie-PC, der schon erwähnte SIGMA AIR MANAGER 4.0 (im Schema auf Seite 18 / 19). Neben optimiertem Regeln und Überwachen der Station ist es seine Aufgabe, alle relevanten Daten zu sammeln, aufzubereiten und ggf. an eine zentrale Leittechnik weiterzugeben. Der SIGMA AIR MANAGER 4.0 bietet mit der Visualisierung über Internet-Technologie eine abrufbare Übersicht über alle Komponenten der Station und ihre wichtigsten Betriebsdaten. So ist rasch erkennbar, ob die Station einwandfrei arbeitet, ob Wartungs- oder Störungshinweise anstehen und wie hoch der Betriebsdruck ist.
Um Umweltbelastungen und Kosten für Unternehmen zu reduzieren, legt die DIN EN ISO 50001 fest, wie Unternehmen ihre Energieeffizienz systematisch und kontinuierlich verbessern sollen. Druckluft-Managementsysteme wie der SIGMA AIR MANAGER 4.0 helfen bei der Erstellung des Zertifizierungsreports – effektiv und Zeit sparend. Sie liefern eine sichere Betriebsdatenspeicherung der Druckluftanlage und bieten neben Kennzahlen auch detaillierte Auswertungen und Energiebilanzen.

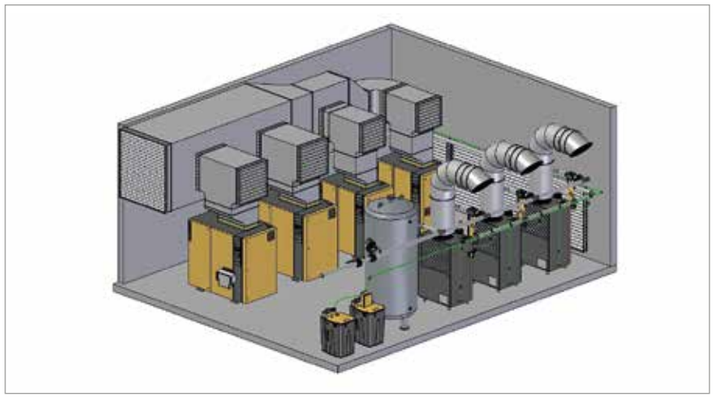


Abb. 2a: CAD-optimierte 3-D-Planung einer Druckluftstation

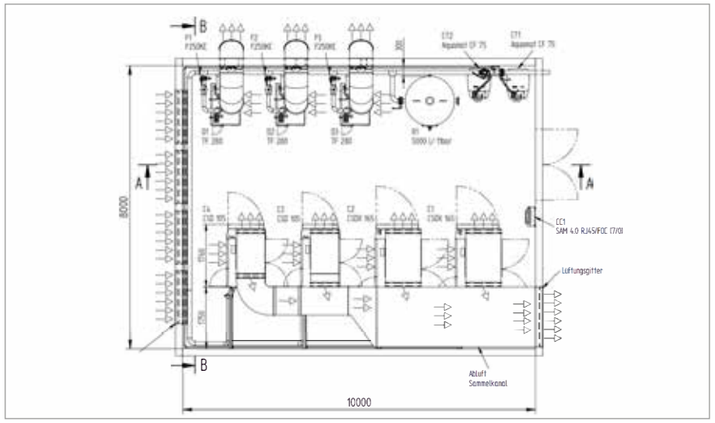


Abb. 2b: Grundrisszeichnung einer Druckluftstation

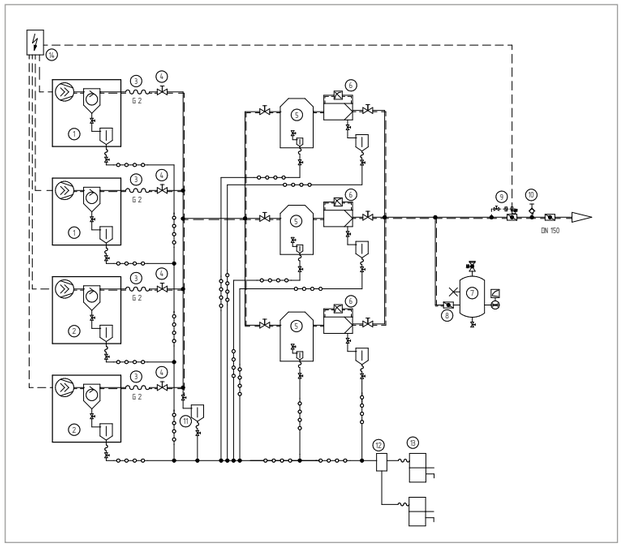


Abb. 2c: R+I-Schema einer Druckluftstation

Kapitel 13

Die Druckluftstation effizient kühlen

Kompressoren wandeln 100 % der ihnen zugeführten elektrischen Energie in Wärme um. Schon ein relativ kleiner 7,5-kW-Kompressor liefert als Nebenprodukt so viel Wärme, dass man damit gut ein Einfamilienhaus beheizen könnte. Effiziente Kühlung ist deshalb für den störungsfreien Betrieb einer Druckluftstation unerlässlich.

Die von Kompressoren erzeugte Abwärme eignet sich bestens zum Energieeinsparen. Mit Hilfe von Wärmerückgewinnungssystemen lassen sich bis zu 96 % der eingesetzten Energie zurückgewinnen, nutzen und die Kosten der Drucklufterzeugung deutlich senken (siehe Kapitel 8, S. 22). Doch auch bei Druckluftanlagen mit Wärmerückgewinnung muss ein vollwertiges Kühlsystem vorhanden sein, mit dem sich ebenfalls viel Geld einsparen lässt. So können die Kosten für Luftkühlung um bis zu 30 % niedriger liegen als die für Wasserkühlung. Luftkühlung ist daher, wo möglich, vorzuziehen.

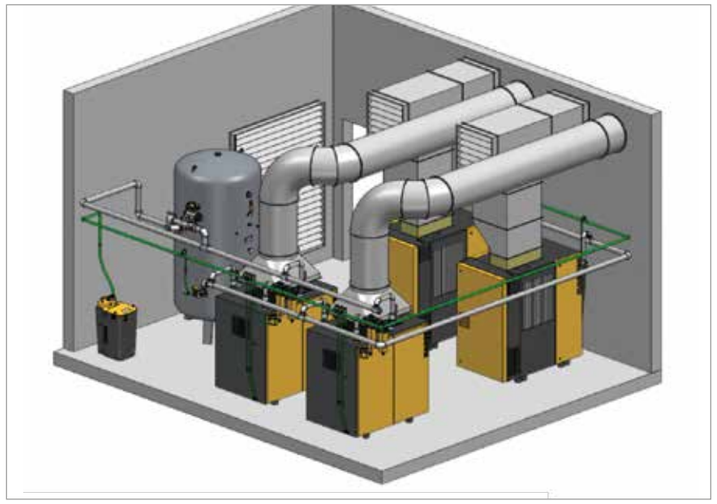


Abb. 1: Beispiel einer Druckluftstation mit Abluftsystem und thermostatisch gesteuerter Zusatzlüftung für die Kältetrockner

1. Umgebung der Kompressoren

1.1 Sauber und kühl ist Trumpf

In der Berufsgenossenschaftlichen Regel „Betreiben von Arbeitsmitteln“ (DGUV Regel 100-500 / BGR 500, Abschnitt 3) heißt es: „Die Umgebungstemperatur soll im Allgemeinen bei stationär aufgestellten Luftkompressoren mit ölgeschmierten Druckräumen und Luftkühlung 40 °C … nicht überschreiten.“ Außerdem ist der Hinweis enthalten, „dass bei Luftkompressoren die Ansaugöffnungen so angeordnet werden, dass gefährliche Beimengungen nicht angesaugt werden können.“ Dies sind Minimalforderungen mit dem Ziel, die Unfallgefahr möglichst niedrig zu halten. Zu einem wirtschaftlichen, wartungsarmen Kompressorbetrieb gehört allerdings einiges mehr.

1.2 Der Kompressorenraum ist keine Abstellkammer

Der Kompressorenbetriebsraum ist von sachfremden Gerätschaften, Staub und sonstigen Verunreinigungen freizuhalten.

Der Boden sollte nach Möglichkeit abriebfest sein. Keinesfalls darf Kühlluft – ebenso wie die zur Verdichtung vorgesehene Luft – ohne intensive Filtration aus einer mit Staub-, Rußpartikeln oder Ähnlichem belasteten Umgebung angesaugt werden. Selbst unter normalen Betriebsbedingungen sind Ansaug- und Kühlluft der Kompressoren mit Filtern zu reinigen.

1.3 Wohltemperiertes Klima

Erheblichen Einfluss auf Zuverlässigkeit und Wartungsbedarf von Kompressoren haben auch die Temperaturverhältnisse: Ansaug- und Kühlluft dürfen weder zu kalt (<+3 °C) noch zu warm (>+40 °C) sein. So kommt es im Sommer bei Sonneneinstrahlung auf der Süd-, zuweilen auch auf der Westseite von Betriebsgebäuden zeitweise zu starker Lufterwärmung mit Temperaturen von über 40 °C auch in gemäßigten Breiten. Daher empfiehlt es sich, Öffnungen für Ansaug- und Kühlluft nicht dort zu platzieren, wo sie starker Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind. Die Größe der Öffnungen richtet sich nach der Leistung der Kompressoren und nach der Belüftungsart.

2. Belüftung des Kompressorenraums

Nicht nur luft-, auch wassergekühlte Kompressoren brauchen angemessene Belüftung des Kompressorenraums. In jedem Fall sind die Strahlungswärme innerhalb der Kompressoranlage und die Abwärme des elektrischen Antriebsmotors abzuleiten – zusammen etwa 7 % der Antriebsleistung des Kompressors.

3. Verschiedene Belüftungsarten

3.1 Natürliche Belüftung

Die Kühlluft wird vom Kompressor angesaugt, erwärmt, steigt nach oben und verlässt wegen des herrschenden Überdrucks über eine oben platzierte Abluftöffnung den Raum **(Abb. 2)**. So einfach geht es jedoch nur in Ausnahmefällen und für Kompressorenleistungen bis zu 5,5 kW. Denn schon Sonneneinstrahlung oder auf die Abluftöffnung drückender Wind kann diese natürliche Belüftung beenden.

3.2 Künstliche Belüftung

Diese Methode arbeitet mit geleitetem Kühlluftstrom. Temperaturen unter +3 °C in der kalten Jahreszeit verhindert eine Thermostatsteuerung. Zu niedrige Temperaturen würden die Funktionsfähigkeit von Kompressoren, sowie von Kondensatableitung und -aufbereitung beeinträchtigen. Die Steuerung über Thermostate ist erforderlich, weil im Kompressorenraum bei künstlicher Belüftung ein gewisser Unterdruck herrscht, der das Rückströmen erwärmter Luft in den Raum verhindert. Es gibt zwei Möglichkeiten:

3.2.1 Belüftung mit externem Ventilator

Ein in der Abluftöffnung des Kompressorenraums installierter externer Ventilator mit Thermostatsteuerung **(Abb. 3)** saugt die erwärmte Luft ab. Dabei ist es wichtig, die Ansaugöffnung (rechts unten) nicht zu klein zu dimensionieren, sonst würde ein zu großer Unterdruck begleitet von zu starker, geräuschvoller Luftströmung entstehen. Zudem würde die Kühlung der Station gefährdet. Die Lüftung muss so ausgelegt sein, dass die Temperaturerhöhung durch die Kompressorenabwärme 10 K nicht übersteigt bzw. nicht über der max. zulässigen Umgebungstemperatur liegt. Sonst könnte es zu einem Wärmekurzschluss und zum Ausfallen der Kompressoren kommen.

3.2.2 Belüftung mit Abluftkanal

Vollgekapselte Schraubenkompressoren ermöglichen eine fast ideale Belüftungsvariante mittels Abluftkanal: Der Kompressor saugt Zuluft über eine Öffnung an und gibt erwärmte Abluft an den Kanal ab, der sie direkt aus dem Kompressorenraum leitet **(Abb. 4)**. Der Vorteil besteht darin, dass der Kühlluftstrom stärker erwärmt werden kann, und zwar auf ca. 20 K Temperaturerhöhung. Damit verringert sich die benötigte Kühlluftmenge. Normalerweise reichen die serienmäßigen Ventilatoren in den Kompressoren für den Ablufttransport aus. Im Gegensatz zur Belüftung mit externem Ventilator ist kein zusätzlicher Energieaufwand erforderlich. Dies gilt jedoch nur, wenn die Restpressung der Ventilatoren nicht überschritten wird. Ferner muss der Abluftkanal über eine thermostatgesteuerte Umluftjalousie **(Abb. 5)** verfügen, um im Winter ein Auskühlen des Kompressorenraums zu vermeiden. Sind dort auch luftgekühlte Trockner aufgestellt, dann ist das ebenfalls zu berücksichtigen: Kompressor und Trockner dürfen sich lüftungstechnisch nicht gegenseitig beeinflussen. Bei Temperaturen über + 25 °C empfiehlt es sich zudem, den Kühlluftdurchsatz einen zusätzlichen externen Ventilator oder durch ein thermostatgesteuertes Abluftsystem für den Kältetrockner zu erhöhen **(Abb. 1)**.

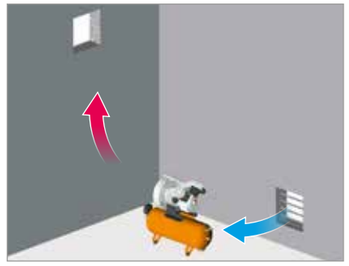


Abb. 2: Natürliche Belüftung für Anlagen bis 5,5 kW

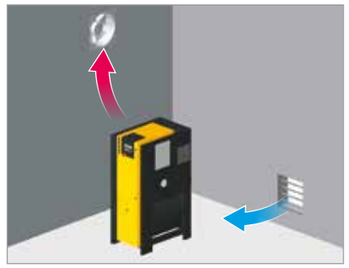


Abb. 3: Künstliche Belüftung mit Ventilator für Anlagen von 5,5 bis 11 kW

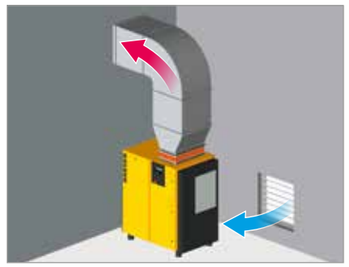


Abb. 4: Künstliche Belüftung mit Abluftkanal – für Anlagen ab 11 kW

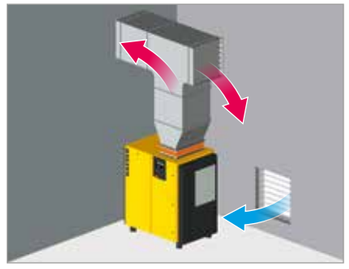


Abb. 5: Eine thermostatgesteuerte Umluftjalousie sorgt für Temperaturausgleich

Kapitel 14

Zuverlässigkeit und Kostenoptimierung langfristig erhalten

Auf den Seiten 24 bis 27 ist zu lesen, was beim Installieren neuer und beim Sanieren bestehender Druckluftnetze zu beachten ist, und wie die Planung einer effizienten Kompressorstation aussehen sollte. Energie- und kostenbewusstes Planen und Ausführen sind aber höchstens die halbe Miete. Wer die Wirtschaftlichkeit seiner Druckluftversorgung dauerhaft sichern will, muss vor allem für effizienten Betrieb des Druckluftsystems sorgen.

Möglichst hohe Druckluftеffizienz lohnt sich für Anwender gleich dreifach: Die Versorgungssicherheit ist höher, Druckluftkosten und Energieverbrauch sind deutlich niedriger. Das Effizienzpotenzial ist hoch: Laut einer Abschätzung verbrauchten im Jahr 2020 die europäischen Druckluftkompressoren 133 Milliarden kWh; mindestens 30 % davon ließen sich einsparen **(Abb. 1)**.

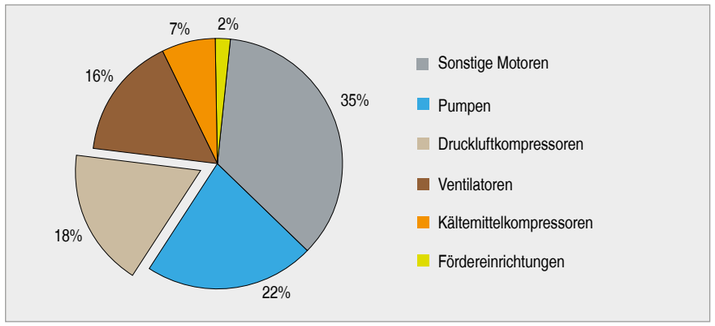


Abb. 1: Abschätzung Anteil der Druckluftkompressoren am Energieverbrauch industriell eigesetzter Antriebe

1. Was heißt optimale Wirtschaftlichkeit?

Die Wirtschaftlichkeit eines Druckluftsystems spiegelt sich in seiner Kostenstruktur wider. Das erreichbare Optimum wird je nach Betrieb und Produktion unterschiedlich aussehen. Entscheidend sind die Laufzeiten der Kompressoren, das Druckniveau und weitere kommerzielle Parameter. Hier als Beispiel ein optimiertes System mit luftgekühlter Druckluftstation: Laufzeit 5 Jahre, Strompreis 15 Cent/kWh, Zinssatz 6 %, 7 bar Betriebsüberdruck, Druckluftqualität gem. ISO 8573-1: Reststaub Klasse 1, Restwasser Klasse 4, Restölgehalt Klasse 1.

Das Beispiel zeigt: Auch unter optimalen Bedingungen macht der Energieverbrauch mit rund 70 % den Löwenanteil der Druckluftgesamtkosten aus **(Abb. 2)**. Die Auffälligkeiten in Deutschland installierter Druckluftstationen ermittelte eine Studie der Fachhochschule Coburg im Rahmen der Initiative „Druckluft effizient“ **(Abb. 3)**.

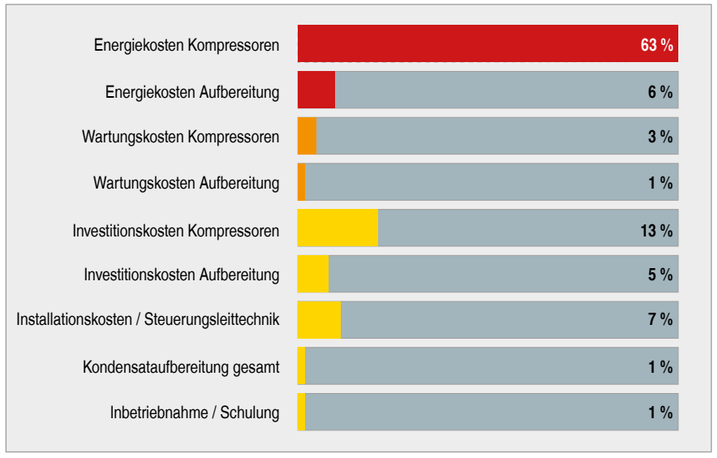


Abb. 2: Kostenstruktur eines optimierten Druckluftsystems

2. Erhalten der Wirtschaftlichkeit

Wer an einer dauerhaft wirtschaftlichen Druckluftversorgung interessiert ist, sollte einige wichtige Punkte beachten:

2.1 Bedarfsorientierte Wartung

Interne Kompressorsteuerungen wie „SIGMA CONTROL 2“ und Druckluft-Managementsysteme wie „SIGMA AIR MANAGER 4.0“ auf Industrie-PC-Basis informieren genau über die Wartungsintervalle der Komponenten einer Druckluftstation. Damit ist es möglich, Wartungsarbeiten bedarfsgesteuert und vorbeugend durchzuführen. Das Resultat: niedrigere Wartungskosten, höhere Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Druckluftversorgung und somit auch der betrieblichen Produktion.

2.2 Einsatz passender Verbraucher

Nicht nur auf der Erzeugungs-, sondern auch auf der Verbrauchsseite kann an der falschen Stelle gespart werden: Indem etwa Produktionsmaschinen gekauft werden, die zwar im Anschaffungspreis günstig sind, aber einen höheren Betriebsdruck benötigen. Die damit erforderliche Druckerhöhung und/oder Erweiterung des Druckluftsystems wird schnell die Mehrkosten für die Anschaffung einer Maschine übertreffen, die mit einem niedrigeren Betriebsdruck von z. B. 6 bar auskommt. Deshalb sollten für den Einkauf von Produktionsmaschinen Richtlinien erlassen werden, die nicht nur die Spannungs-, sondern auch die Druckluftversorgung berücksichtigen.

2.3 Geänderte produktionsbedingte Anforderungen
2.3.1 Druckluftverbrauch

a) Umbau der Produktion

Verbrauchsschwankungen sind vielerorts an der Tagesordnung. Das wird oft zu wenig beachtet, und so kann es vorkommen, dass nach Umbau der Produktion Kompressoren in einer Schicht plötzlich extrem unterbelastet laufen, in einer anderen aber so viel Luftbedarf besteht, dass die Sicherheitsreserven mit aufgebraucht werden. Die Druckluftversorgung ist daher stets geänderten Produktionsstrukturen anzupassen.

b) Erweiterung der Produktion

In diesem Fall müssen nicht nur die Kompressorleistungen, sondern auch die Rohrleitungen und die Druckluftaufbereitung auf die veränderten Bedingungen abgestimmt werden. Wenn die Produktionskapazität durch nochmaligen Aufbau einer vorhandenen Anlage erhöht werden soll, empfiehlt es sich, den Druckluftverbrauch der vorhandenen Anlage messtechnisch zu erfassen um möglichst detaillierte Informationen zu erhalten und die Versorgung entsprechend anpassen zu können.

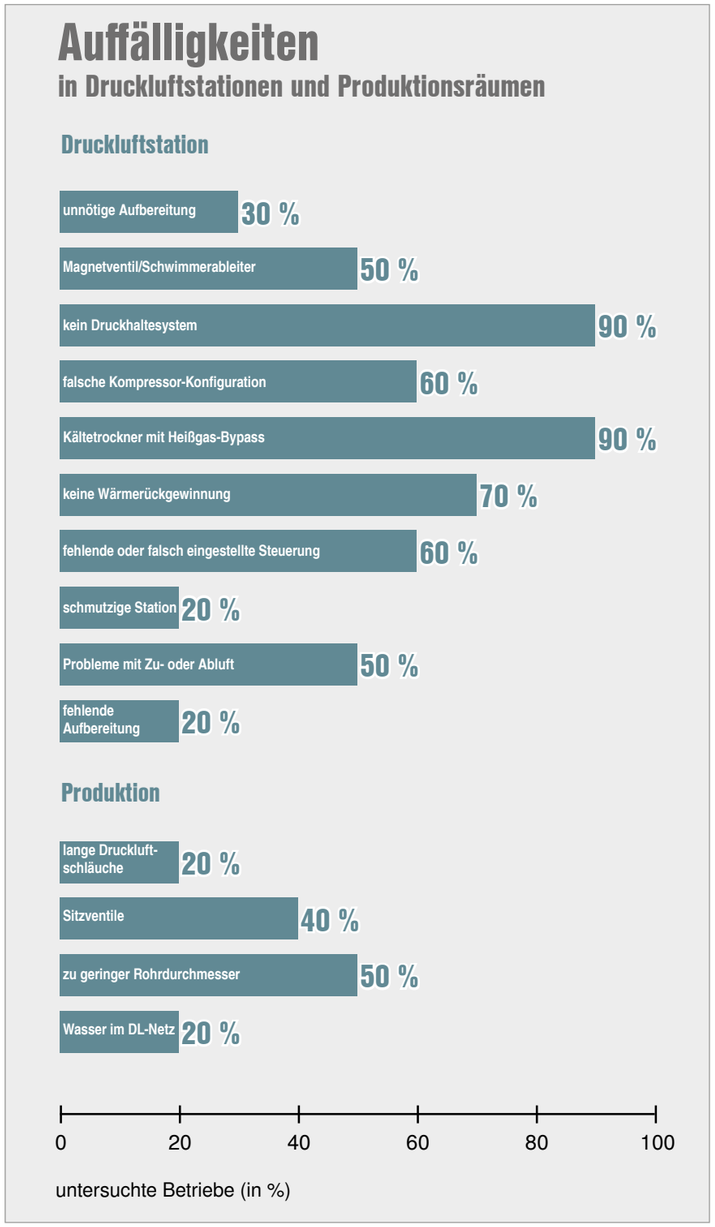


Abb. 3: Zusammenstellung der Ergebnisse der von KAESER KOMPRESSOREN durchgeführten Air-Audits im Rahmen einer Studie der Fachhochschule Coburg für die Kampagne „Druckluft effizient“

Zuverlässigkeit und Kostenoptimierung langfristig erhalten

2.3.2 Versorgungssicherheit
Bei Druckluftstationen ist es üblich, einen Standby-Kompressor vorzusehen. In der Druckluftaufbereitung wird dagegen oft auf Sicherheitsreserven verzichtet. Steigt der Verbrauch, so springt zwar der Standby-Kompressor ein, wegen mangelnder Aufbereitungskapazität kommt es aber zur Verschlechterung der Druckluftqualität. Daher ist für jeden Standby-Kompressor eine Aufbereitungseinheit (Trockner/Filter) einzuplanen.

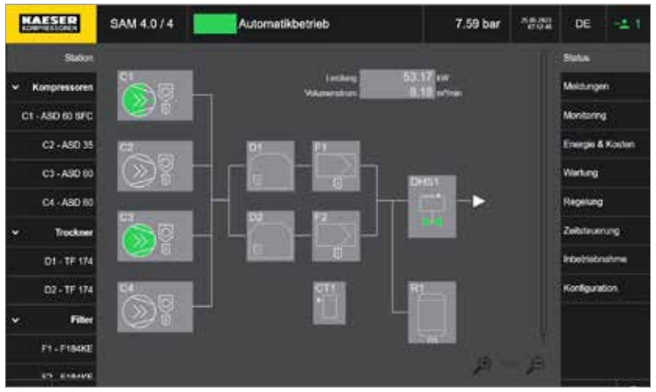


Abb. 5a: Managementsystem: Übersicht Station und Status



Abb. 4: Ortung von Leckagen mit Ultraschall

2.3.3 Änderung der Druckluftqualität
Wird höhere Druckluftqualität benötigt, so ist zu unterscheiden, ob die ganze Produktion oder nur ein Teilbereich betroffen ist. Im ersten Fall genügt es nicht, die zentrale Druckluftaufbereitung aufzurüsten. Auch Rohrleitungen, die bisher Luft geringerer Qualität transportiert haben, müssen gereinigt oder erneuert werden. Im zweiten Fall dagegen empfiehlt sich eine separate Aufbereitung, welche die geforderte Druckluftqualität liefert. Um diese zu sichern, muss eine Durchflussbegrenzung installiert werden.
Sonst könnte die Aufbereitung von einer zu großen Druckluftmenge „überfahren“ werden, denn sie ist natürlich nicht auf die maximal mögliche Kompressorenförderleistung ausgelegt.

2.4 Leckagen überwachen
In jedem noch so gut gewarteten Druckluftnetz sind Leckagen anzutreffen. Mitunter können sie zu erheblichen Energieverlusten führen. Hauptursache ist der Verschleiß an Werkzeugen, Schlauchverbindungen und Maschinenbauteilen. Es ist daher wichtig, auf solche Mängel zu achten und für Abhilfe zu sorgen. Zudem ist es ratsam, z. B. mit dem SIGMA AIR MANAGER 4.0 turnusmäßig die Gesamtleckagen zu ermitteln. Stellt sich eine Erhöhung heraus, so müssen die Leckstellen aufgespürt und beseitigt werden **(Abb. 4)**.

3. Kostenmanagement sichert Wirtschaftlichkeit
Die bei Planung durch Analyse gewonnenen Daten sind – jeweils aktualisiert – auch für den späteren Betrieb interessant. Sie zu erheben bedarf es keiner gesonderten Analysen mehr. Systeme wie SIGMA AIR MANAGER 4.0 übernehmen diese Aufgabe. Das schafft die Grundlage für Druckluftaudits und effektives Druckluft-Kostenmanagement **(Abb. 5a bis e)**. Je mehr Anwender Transparenz in ihre Druckluftkosten bringen, Einsparpotenziale ausloten und beim Anschaffen von Druckluftkomponenten Energieeffizienz in den Vordergrund stellen, desto näher kommen alle Beteiligten dem Ziel, den Energieverbrauch der Drucklufterzeugung flächendeckend um 30 % und mehr zu drosseln – den Unternehmensbilanzen und der Umwelt zuliebe.



Abb. 5b: Volumenstrom- und Druckverlauf mit Überwachung der Druckgüte



Abb. 5c: Monitoring: Spezifische Leistung



Abb. 5d: Energie- und Kosten-Zeitraumvergleich



Abb. 5e: Wartung - Übersicht

Praxis-Tipps

Tipp 1 - 7

40-51

Tipp 1

Mit optimalem Druck sparen

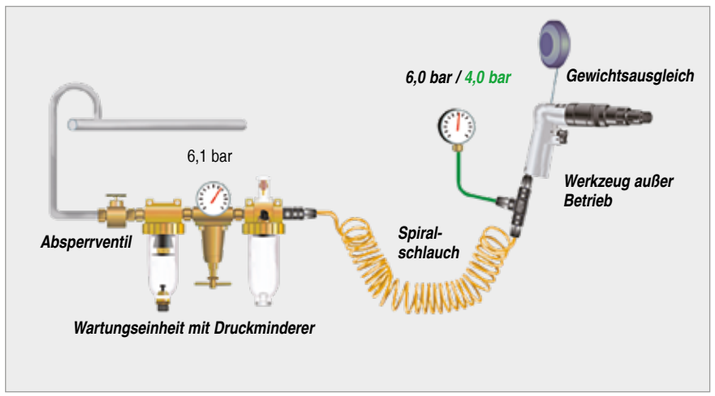
Die Wirtschaftlichkeit eines Druckluftsystems hängt nicht zuletzt vom richtigen Betriebsüberdruck ab. Bereits kleine Maßnahmen haben hier oft große Wirkungen.

Vielfach sieht die Anbindung der Druckluftwerkzeuge wie folgt aus: Bei ruhender Arbeit liegen an der Wartungseinheit 6,1 und am Werkzeug 6,0 bar an. Dieser Druck ist jedoch nicht gleich dem Druck bei Luftverbrauch.

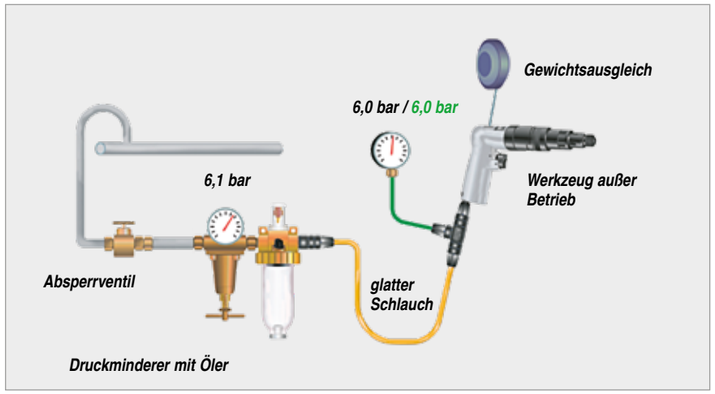
Druckabfall am Werkzeug – was tun?
Häufig zeigt die Druckmessung bei arbeitendem Werkzeug einen erheblichen Druckabfall. Im vorliegenden Beispiel beträgt er 2 bar; das heißt, das Werkzeug erbringt nur 54 % seiner möglichen Leistung.

Die **Ursachen** lassen sich oft leicht beheben:

a) Zu kleiner Anschlussquerschnitt: Schnellkupplung mit größerem Durchgang verwenden.
b) Falsch eingestellter Druckminderer: weiter öffnen.
c) Zu niedriger Systemdruck: Druck im Hauptnetz erhöhen oder Rohrleitungen mit größerem Querschnitt einbauen.
d) Zu kleiner Spiralschlauch: größeren Spiralschlauch oder – noch besser – glatten Schlauch verwenden.
e) Druckabfall im dezentralen Wasserabscheider: Druckluft zentral trocknen (Abscheider überflüssig).
Mit diesen Maßnahmen lässt sich der optimale Druck am Werkzeug (hier 6 bar) erreichen. Es wird dann 100 % Leistung erbringen.



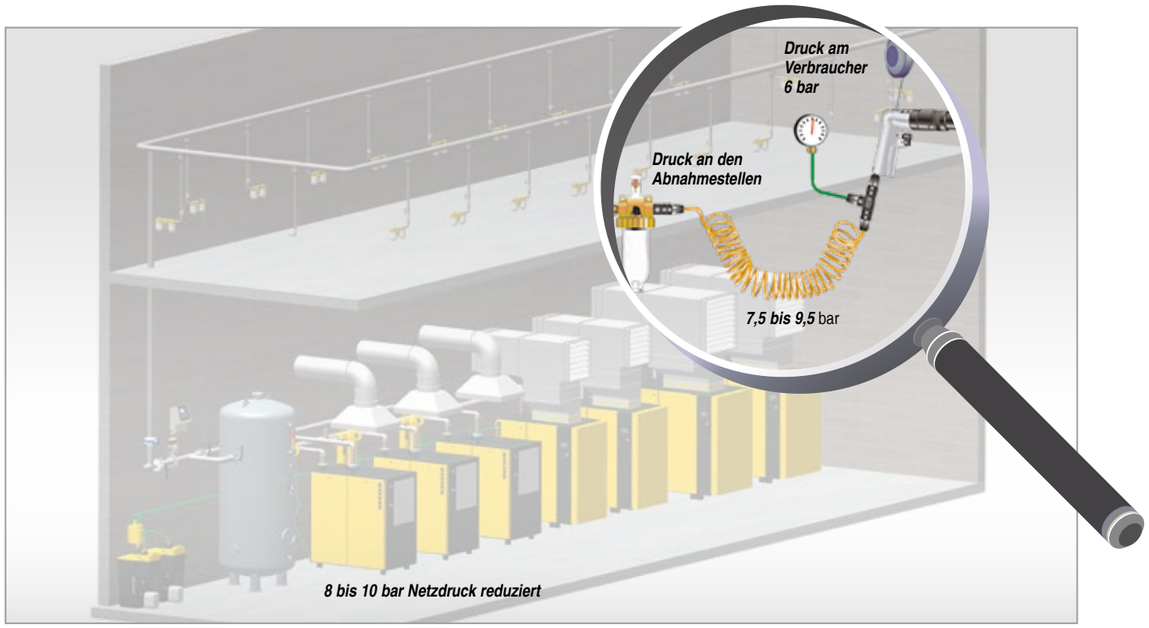
Werkzeuganschluss mit Spiralschlauch – Druck 6,0 bar bei Druckluft-Nullverbrauch. 4,0 bar bei Werkzeugbetrieb = 2 bar Druckabfall bei Werkzeugbetrieb: nur noch 54 % Leistung!



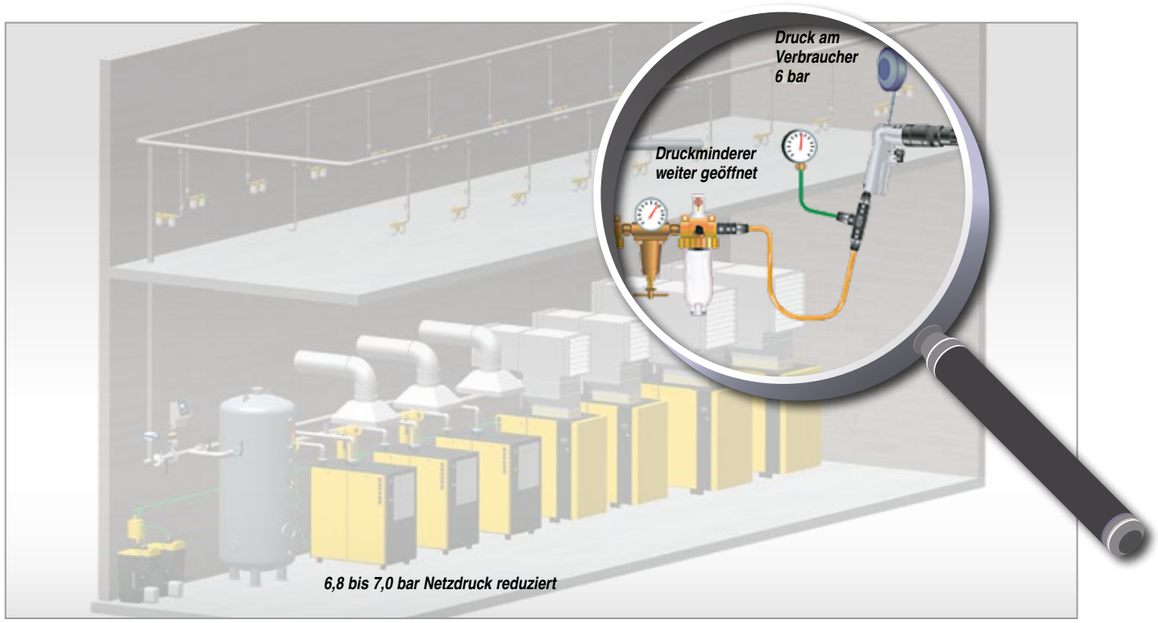
Wasserabscheider und Spiralschläuche sind Energiefresser: Stattdessen Druckluft zentral trocknen und glatte Schläuche verwenden – 6,0 bar bei Werkzeugbetrieb, 100 % Leistung

Energie einsparen – mit dem richtigen Dreh

Druckminderer beeinflussen die Effizienz des Drucklufteinsatzes stärker als vielfach angenommen. Im vorliegenden Beispiel wird ein Druckluftsystem mit 8 bis 10 bar betrieben. Die an den Abnahmestellen anliegenden 7,5 bis 9,5 bar werden mit Druckminderern auf 6 bar reduziert. Um Energie einzusparen, wird der Systemdruck auf 6,8 bis 7 bar reduziert. So liegen an den Netzabnahmestellen 6,1 bar, an den Werkzeugen aber nur noch 4 bar an. Die Folgen: längere Arbeitsdauer, fehlerhafte Arbeitsergebnisse wegen zu niedrigen Drucks am Werkzeug und längere Kompressorenlaufzeiten. Die angestrebte Einsparung lässt sich dagegen mühelos erreichen, wenn nicht nur der Systemdruck reduziert, sondern zugleich glatte Schläuche eingesetzt, überflüssige Wasserabscheider entfernt und die Druckminderer an den Verbrauchern weiter geöffnet werden.



Energieverschwendung pur: Zu hoch verdichten und dann am Verbraucher Druck reduzieren ...



... stattdessen: Systemdruck senken und Druckminderer weiter öffnen

Tipp 2

Richtiger Druck am Luftanschluss

Der Druck in der Kompressorstation stimmt eigentlich, aber bei den Luftverbrauchern kommt trotzdem zu wenig davon an. Woran liegt‘s?

Nicht selten sind Schläuche, Schnellkupplungen oder Druckminderer die „Übeltäter“. Oft ist aber der Druck bereits an der Abnahmestelle aus dem Netz zu niedrig: So kann es etwa sein, dass von ursprünglich vorhandenen 6,8 bis 7 bar für die Verbraucher nur magere 5 bar übrig bleiben.

Das Gegenmittel ist meist schnell gefunden: „Stellen wir eben den Druck in der Station um 1 bar höher ein, was soll’s!“ Genau hier wird es aber kritisch, denn jedes Bar Druckerhöhung treibt nicht nur den Energiebedarf der Kompressorstation um 6 % , sondern auch die Leckagerate erheblich nach oben. Daher ist es mehr als ratsam, die Ursachen herauszufinden und für Abhilfe zu sorgen.

Fehlerquelle Rohrleitungsnetz
Wenn der Druck unmittelbar nach dem Kompressor stimmt und nachgeschaltete Aufbereitungskomponenten ihn nicht übermäßig reduzieren, kann der Fehler nur im Rohrleitungsnetz liegen. Es gliedert sich in drei Abschnitte: Hauptleitung, Verteilerleitung und Anschlussleitung **(Abb.1)**. In einem optimierten Druckluftsystem sind folgende Druckabfälle wirtschaftlich vertretbar:

Hauptleitung (1):	0,03 bar
Verteilerleitung (2):	0,03 bar
Anschlussleitung (3):	0,04 bar
Hinzu kommen:	
Trockner (4):	0,2 bar
Wart.einh. / Schlauch (5):	0,5 bar
insgesamt:	**0,8 bar**

„Flaschenhälse“ beseitigen
Bei genauerem Hinsehen stellt sich oft heraus, dass Haupt- und Verteilerleitungen zwar ausreichend dimensioniert, aber die Anschlussleitungen zu eng sind. Ihre Rohrweite sollte nicht kleiner als DN 25 (1“) sein. Zur genauen Querschnittsermittlung bietet KAESER KOMPRESSOREN auf seiner Website ein Tool an: **http://www.kaeser.de/service/wissen/rechner/druckabfall/**

Auf richtige Anbindung achten
Um Störungen und Schäden durch eventuell entstehende Feuchte zu vermeiden, sollte die Verbindung zwischen Verteilungs- und Anschlussleitung als strömungsgünstiger „Schwanenhals“ **(Abb. 2)** ausgeführt sein: Nur wenn hundertprozentig gewährleistet ist, dass in der Rohrleitung kein Kondenswasser auftritt, kann auch ein direkter Rohrabgang nach unten gewählt werden **(Abb. 3)**.
Die optimierte Anbindung mit einem Druckabfall von höchstens 1 bar zwischen Druckluftaustritt am Kompressor und Luftverbraucher sieht dann so aus wie auf **Seite 42 / 43**.

Schlagartige Luftentnahme
Bei Druckluftverbrauchern, die nicht kontinuierlich betrieben werden aber dann plötzlich einen großen Volumenstrom benötigen, kann ein dezentraler Druckluftbehälter als Pufferspeicher einen kurzfristigen Druckabfall ausgleichen **(Abb. 4)**. Auch hierzu ist auf der Website von KAESER KOMPRESSOREN ein Tool zu finden: **http://www.kaeser.de/service/wissen/rechner/behaeltergroessen/**

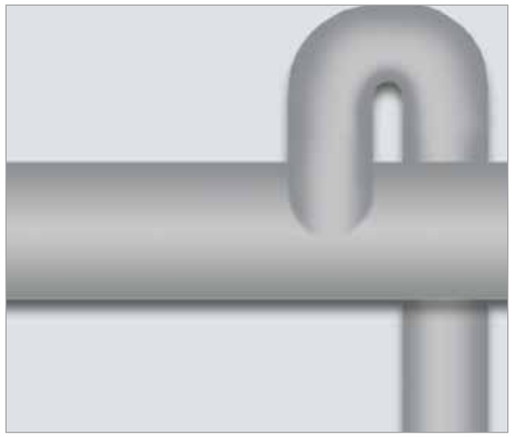


Abb. 2: Schwanenhals

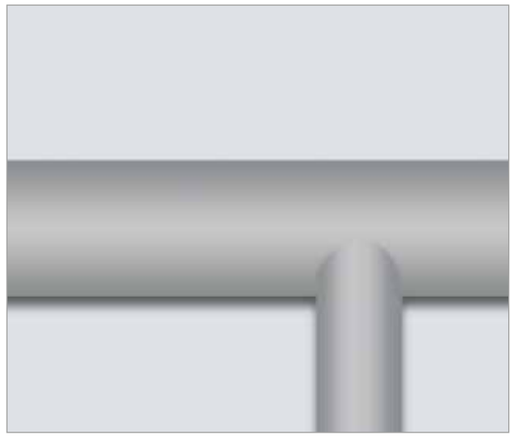


Abb. 3: direkter Rohrabgang

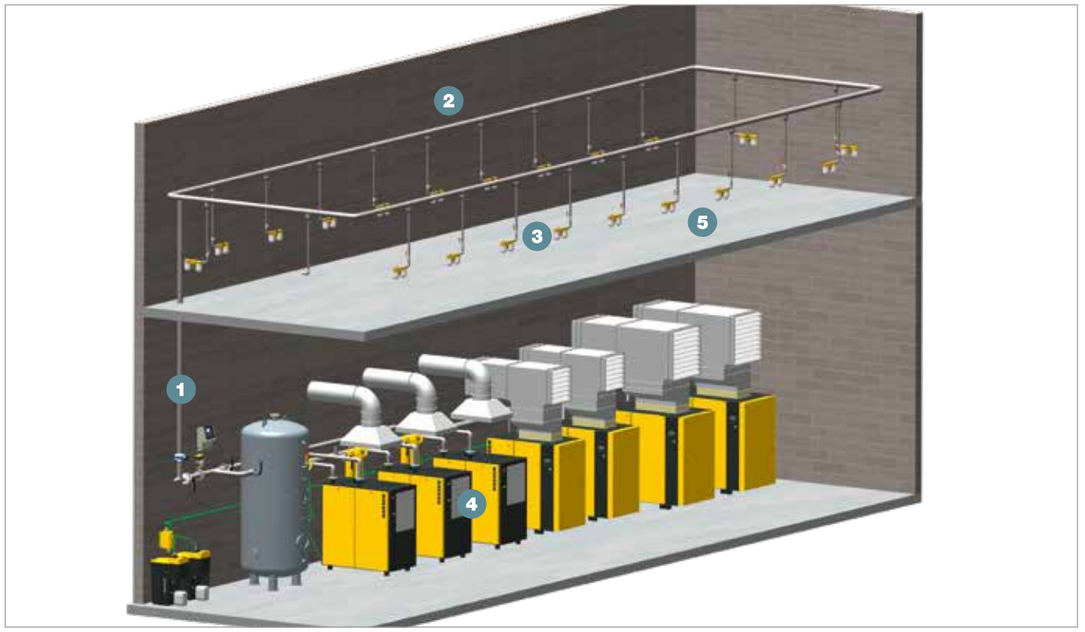


Abb. 1: Hauptbestandteile eines Druckluft-Verteilungssystems: Hauptleitung (1), Verteilerleitung (2), Anschlussleitung (3), Trockner (4), Wartungseinheit / Schlauch (5)



Abb. 4: Druckluftbehälter als Pufferspeicher

Tipp 3

Druckluft effizient verteilen

Welche der drei Arten, Druckluft im Betrieb zu verteilen – Stichleitung, Ringleitung, Netzwerk – richtig ist, hängt von den betrieblichen Gegebenheiten ab. Wer Druckluft wirtschaftlich nutzen will, muss nicht nur für energiesparendes Erzeugen, sondern auch für möglichst effizientes Verteilen im Betrieb sorgen. Wie, erfahren Sie hier.

Stichleitung
Das Installieren einer Stichleitung mit Abgängen zu den einzelnen Druckluftverbrauchern **(Abb. 1)** ist verhältnismäßig einfach. Die zu verlegende Rohrlänge ist zwar vergleichsweise gering, aber sie braucht ausreichend Transportkapazität für den gesamten Luftverbrauch.
Das bedeutet, ihr Querschnitt muss verglichen mit Ringleitung oder Netzwerk wesentlich größer sein. Auch die Anschlussleitungen zu den Verbrauchern fallen wegen der weiteren Wege länger aus und sind deshalb größer zu dimensionieren. Da es zudem keine Möglichkeit gibt, Teile des Rohrleitungssystems für Erweiterungs- oder Sanierungsarbeiten abzusperren, eignen sich Stichleitungssysteme meist nur für kleine Betriebe.

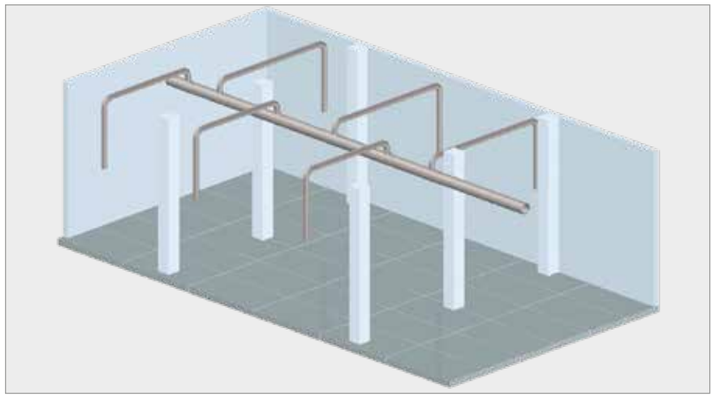


Abb. 1: Druckluft-Stichleitung

Ringleitung
Ringleitungen **(Abb. 2)** haben trotz höherem Installationsaufwand gegen über Stichleitungen einen entscheidenden Vorteil: Sind durchweg Verbraucher mit gleich großem Druckluftbedarf vorhanden, lassen sich Rohrleitungslängen und -volumina um die Hälfte kleiner dimensionieren. Daher genügen kleinere Rohrquerschnitte für gleiche Transportkapazität. Die kurzen Anschlussleitungen werden nur selten größer ausgelegt als DN 25. Eine hinreichende Zahl von Absperreinheiten ermöglicht das Stilllegen einzelner Leitungsabschnitte für Sanierungs- und Erweiterungsarbeiten bei laufendem Betrieb.

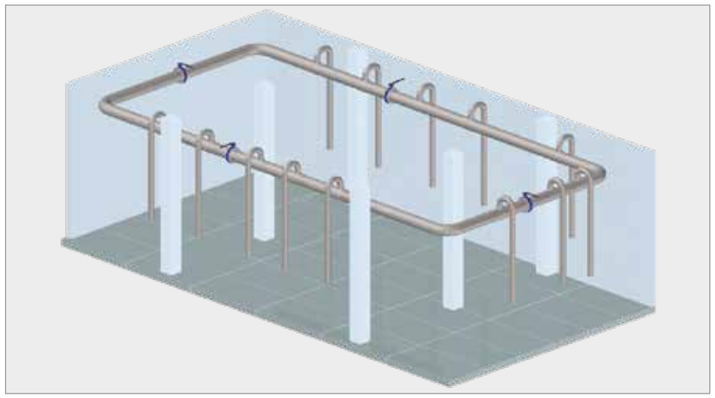


Abb. 2: Druckluft-Ringleitung

Netzwerk
Für großflächig strukturierte Betriebe empfiehlt sich ein Rohrleitungsnetz - also eine mit Längs- und Querverbindungen (Rohrmaschen) zu einer Netzstruktur erweiterte Ringleitung **(Abb. 3)**. Zwar ist der Installationsaufwand hier am größten, doch die Vorteile überwiegen: Dank der Netzstruktur lassen sich große Werkhallen zuverlässig und energieeffizient mit Druckluft versorgen, ohne dass die Abmessungen der Rohrleitungen ausufern. Im Gegenteil: Aufgrund der Vernetzung können hier – ähnlich wie bei der Ringleitung im kleineren oder mittleren Betrieb – die Dimensionen verhältnismäßig klein gehalten werden. Auch dieses System lässt sich, wenn erforderlich, mit Absperreinheiten teilweise stilllegen.

Auslegen der Hauptleitung(en)
Die Hauptleitung des Druckluftsystems verbindet die Verteilerleitungen der einzelnen Betriebsbereiche (Gebäude) mit der Druckluftstation (Erzeugung).

Entscheidend für das Dimensionieren der Druckluft-Hauptleitung ist die Gesamtförderleistung der eingesetzten Kompressoren.
Sie bestimmt Maße und Kapazität der Leitung. Der Druckverlust sollte 0,03 bar nicht überschreiten.

Versorgung mit einer Station
Versorgt eine Druckluftstation mehrere Betriebsbereiche (Produktionshallen), so sind die entsprechenden Hauptleitungen für die einzelnen Bereiche auf den maximalen Druckluftbedarf des jeweiligen Bereichs auszulegen (Druckverlust < 0,03 bar). In einem Rohrleitungssammler zusammengefasste Rohrleitungen in der Druckluftstation bieten den Vorteil, die Druckluftversorgung ganzer Betriebsbereiche bei Bedarf einfach absperren zu können. Mit eingebauten Volumenstrom-Messgeräten lassen sich zudem die Luftverbräuche einzelner Bereiche leicht feststellen **(Abb. 4)**.

Versorgung mit mehreren Stationen
Speisen zwei oder mehr Druckluftstationen in ein großes Hauptleitungssystem ein, sind die Rohrleitungen dieses Systems so zu dimensionieren, dass die Höchstliefermenge der größten Station alle Betriebsbereiche erreichen kann. Der Druckverlust zwischen den einzelnen Stationen sollte wiederum nicht höher sein als 0,03 bar. Andernfalls wären aufwendige Regelungssysteme erforderlich **(Abb. 5)**.

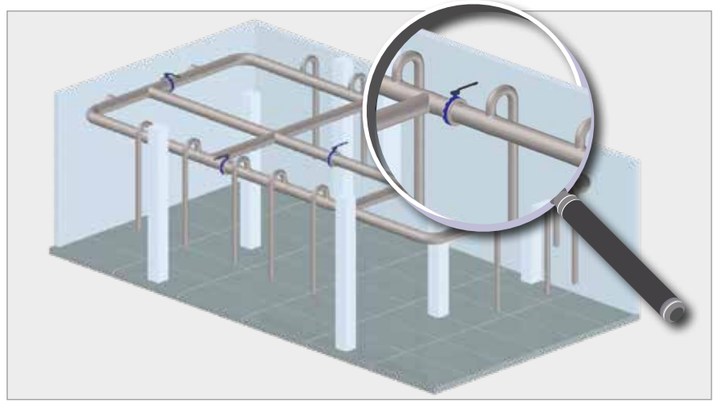


Abb. 3: Druckluft-Leitungsnetz mit Rohrmaschen

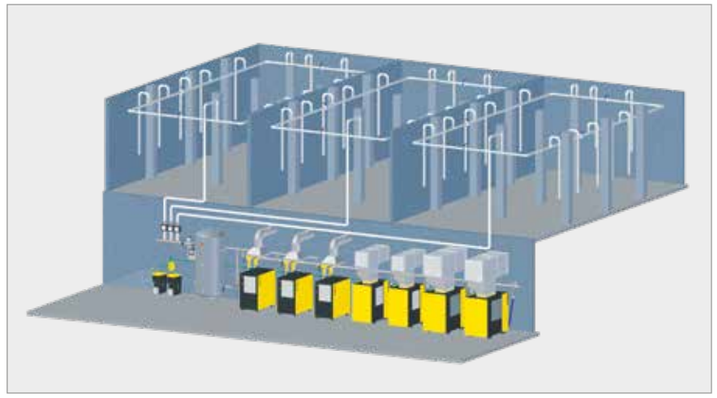


Abb. 4: Druckluftversorgung mit einer zentralen Druckluftstation für mehrere Produktionsbereiche

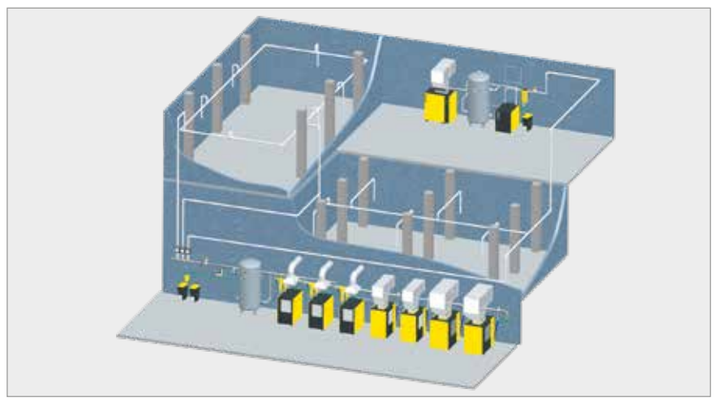


Abb. 5: Druckluftversorgung mit zwei Stationen und zentraler Regelung für mehrere Produktionsbereiche

Tipp 4

Rohrleitungen in der Druckluftstation

Neben dem Verteilen der Druckluft im Betrieb haben Rohrleitungen die Aufgabe, die Kompressoren und die weiteren Komponenten der Druckluftstation an das Gesamtsystem anzubinden. Um auch hier möglichst hohe Betriebssicherheit und Effizienz zu erreichen, sind bei der Installation einige wichtige Punkte zu beachten.

Generell sollten die Rohrleitungen in der Druckluftstation so ausgelegt sein, dass der durch sie verursachte Druckverlust bei voller Förderleistung weniger als 0,01 bar beträgt. Außerdem ist es ratsam, dort wegen der nicht zu definierenden Wärmebelastung nur Metallrohre zu verwenden.

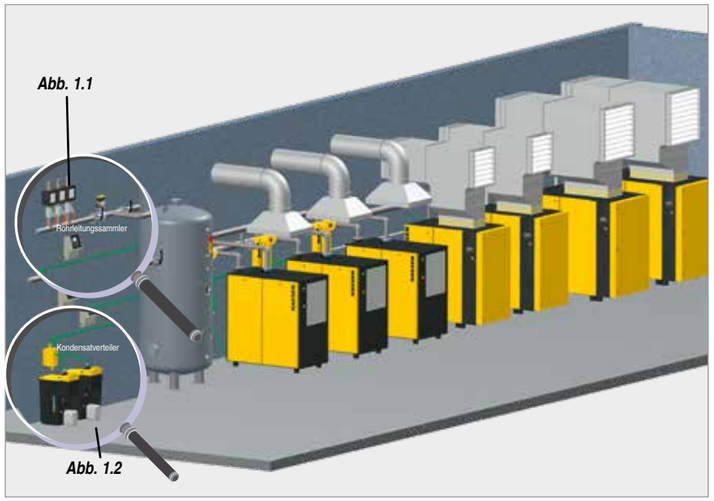


Abb. 1: Druckluftstation mit Rohrleitungssammler

Anschluss der Druckluft-Verteilungsleitungen
Für den Anschluss der Rohrleitungen in der Station an das Druckluftnetz empfiehlt sich ein Sammler, von dem aus dann alle Verteilungsleitungen abgehen **(Abb. 1.1)**. So kann im Fall des Falles die Versorgung bestimmter Betriebsbereiche gesperrt werden.

Installation im Feuchtbereich
Im Bereich feuchter Druckluft, das heißt in den Rohrleitungsabschnitten nach den Kompressoren und vor den Trocknern, ist möglichst kein Wassersack einzusetzen. Andernfalls muss die Rohrleitung ein Gefälle in Richtung des Wassersacks aufweisen und dieser gezielt über einen Kondensatableiter entwässert werden **(Abb. 2)**.

Komponenten richtig anbinden
Innerhalb der Druckluftstation sind die einzelnen Komponenten (Kompressoren, Trockner etc.) grundsätzlich von oben aus mit der Hauptleitung zu verbinden **(Abb. 3a, 3b)**. Ab Rohrweite DN 100 können sie auch seitlich angeschlossen werden, wenn der Hauptleitungsdurchmesser mindestens 2 Größen über dem Durchmesser der Anschlussleitung liegt (z.B. DN 100 / DN 65).

Anschluss der Kompressoren
Um keine Vibrationen zu übertragen, müssen die Kompressoren schwingungselastisch mit dem Rohrleitungsnetz verbunden werden. Für Rohrweiten < DN 65 eignen sich Schlauchverbindungen **(Abb. 4)**. Zwischen Schlauch und erster Rohrkrümmung wird eine Befestigung angebracht, die auftretende Kräfte aufnimmt und so deren Übertragung auf das Rohr verhindert **(Abb. 4.1)**. Für Rohrweiten > DN 65 müssen statt eines Schlauches Axialkompensatoren **(Abb. 3b)** für den schwingungselastischen Anschluss des Kompressors an das Rohrleitungsnetz verwendet werden.

Kondensat sicher entfernen
Zuverlässiges Entfernen des anfallenden Kondensats ist eine der Grundvoraussetzungen für optimierte Betriebssicherheit und Verfügbarkeit der Druckluftstation. Hier gilt es, insbesondere beim Verlegen der Kondensatleitungen Fehler zu vermeiden.

Trotz moderner Ableitungstechnik werden oft die Anschlussleitungen an das Kondensat-Aufbereitungssystem falsch verlegt. Wer sich hingegen an die **folgenden Tipps** hält, wird diese Fehler nicht begehen und auf der sicheren Seite bleiben:

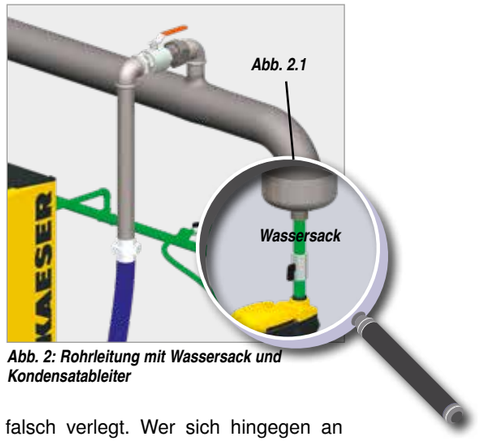


Abb. 2: Rohrleitung mit Wassersack und Kondensatableiter

Kondensatableiter absperren
Kondensatableiter sollten beidseitig mit je einem Kugelhahn absperrbar sein, damit sie im Wartungsfall problemlos aus dem System entfernt werden können **(Abb. 2.1)**.

Richtige Anschlussgröße
Der Anschluss an die Sammelleitung muss mindestens 1/2 Zoll betragen.
Nur so lässt sich unnötiger Staudruck vermeiden.

Anschluss von oben
Die Kondensatleitungen sollten von oben an die Sammelleitung angeschlossen werden, damit sich die Ableitungsstellen nicht gegenseitig beeinflussen können **(Abb. 3a (1))**.

Leitung drucklos – mit Gefälle
In jedem Fall ist die Kondensat-Sammelleitung mit freiem Gefälle zu verlegen. Sie sollte außerdem drucklos sein. Nur in eine solche Leitung dürfen Kondensatableiter verschiedener Systemkomponenten (Zyklonabscheider, Druckluftbehälter, Kältetrockner, Druckluftfilter) mit unterschiedlichem Druckniveau einleiten. Ist dies nicht gegeben, so müssen verschiedene Anschlussstellen am Kondensat-Aufbereitungsgerät („AQUAMAT“) benutzt werden.

Mehrere Aufbereitungsgeräte
Sind wegen der anfallenden Kondensatmenge mehrere Aufbereitungsgeräte notwendig, dann muss die Haupt-Kondensatleitung über einen Kondensatverteiler angeschlossen werden **(Abb. 1.2)**.

Systemdruck über 16 bar
Bei Systemen mit einem Druckniveau über 16 bar ist vor dem Einleiten des Kondensats in das Aufbereitungsgerät eine separate Hochdruck-Entlastungskammer einzusetzen.

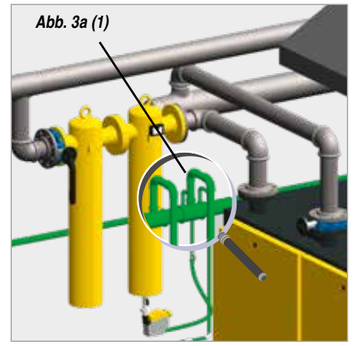


Abb. 3a: Anschluss von Kältetrockner und Kondensatableiter (jeweils von oben)



Abb. 3b: Schwingungselastischer Kompressoranschluss mit Axialkompensator



Abb. 4: Schwingungselastischer Kompressoranschluss mit einem Schlauch

Tipp 5

Kompressoren richtig aufstellen

Aufstell- und Umgebungsbedingungen beeinflussen die Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Druckluftererzeugung erheblich. Hier gilt es, vor allem drei Gebote zu beachten.

1. Station sauber halten
Die Sauberkeit und der Wartungszustand vieler Druckluftstationen lassen zu wünschen übrig, auch wenn es nicht überall so aussieht wie auf **Abb. 1**. Für Sauberkeit sorgen heißt vor allem, die Anlagen vor Staub schützen. Sonst werden sich die Ansaugluftfilter der Kompressoren schnell zusetzen; das führt zu mehr Wartungsbedarf, schlechterer Leistung und beeinträchtigter Luftkühlung. Weitere Folgen wären Kompressor-Betriebsstörungen durch Überhitzung, Abfall der Trocknerleistung, somit vermehrte Kondensatentstehung mit der Gefahr



Abb. 1: Vernachlässigte Druckluftstation

von Schäden an Verbrauchern und verminderter Produktqualität. Lässt sich Staubbelastung mit geeigneter Standortwahl nicht vermeiden, sind zum Reinigen der Ansaugluft zentrale Kühlluftfiltermatten bzw. -filtersysteme ratsam **(Abb. 2a, 2b)**, die jedoch keinen zu hohen Ansaugdruckverlust aufweisen dürfen.

2. Gemäßigte Temperaturen
Während der kalten Jahreszeit ist die Druckluftstation frostfrei zu halten: Erstens wird dort vor dem Aufbereiten feuchte Druckluft erzeugt und transportiert. Bei Frost wegen Kondensat eingefrorene Leitungen hätten empfindliche Betriebsstörungen zur Folge. Zweitens haben die Öle und Lagerfette der Kompressoren bei Temperaturen unter +5 °C nurmehr eingeschränkte



Abb. 2a: Zentrale Kühlluftfiltermatten



Abb. 2b: Kühlluft-Filtersystem

Schmierfähigkeit, was auch Betriebsstörungen hervorriefe. Im Sommer ist dagegen so viel Kompressorenabwärme abzuleiten, dass die Raumtemperatur die Außentemperatur möglichst nicht überschreitet. Sonst können Motoren und Elektrokomponenten überhitzen, und die Trockner durch zu geringe Rückkühlung der Druckluft überlastet werden. Kondensatanfall und Störungen an den Verbrauchern wären die Folge. Schlimmstenfalls führt ein von unzureichender Be- und Entlüftung verursachter Wärmestau zum kompletten Stillstand von Kompressoren und Trocknern und damit zum Totalausfall der Druckluftversorgung.
Dem beugen Kühlsysteme vor, die den Wärmehaushalt der Druckluftstation über thermostatisch gesteuerte Zu-, Ab- und Umluftführung automatisch regeln **(Abb. 3)**.

3. Wartungsfreundliche Station
Moderne Kompressoren und Aufbereitungsgeräte haben zwar wenig Wartungsbedarf – ganz ohne geht es aber doch nicht. Sie sollten so platziert sein, dass guter Zugang zu allen Wartungsstellen gegeben ist. Höchstmögliche Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Druckluftererzeugung lässt sich nur erreichen, wenn alle drei der hier behandelten Kriterien angemessen berücksichtigt sind.



Abb. 3: Druckluftstation mit thermostatisch gesteuerter Luftführung

Tipp 6

Druckluftstationen belüften

Das richtige Belüften einer Druckluftstation kann erheblich zur Druckluftverfügbarkeit und Minimierung der Wartungskosten beitragen.

1. Zuluftöffnungen richtig platzieren
Zum Belüften der Druckluftstation ist die Lage der Zuluftöffnungen sehr wichtig. Für Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit sollte von außen zugeführte Luft möglichst wenig vom Wetter beeinflusst sein. So ist es ratsam, Zuluftöffnungen auf der sonnenabgewandten Seite wettergeschützt in der unteren Hälfte der Stationsaußenwand anzubringen.

2. Schmutz und Schadstoffe fernhalten
Es muss gewährleistet sein, dass möglichst wenig Staub und Schadstoffe angesaugt werden. Dazu gehören aggressive und brennbare Stoffe wie auch Abgase aus Verbrennungsmotoren. Lkw-Verkehr sollte aus der Luftansaugzone der Druckluftstation verbannt werden. Lassen sich hoher Staub- oder Schmutzanfall in der Umgebung der Station nicht vermeiden, sind geeignete Schutzmaßnahmen unumgänglich. Bei mäßiger Belastung schaffen Kühlluftfilter, in Extremfällen sogenannte Staubfallen Abhilfe.

3. Zuluftöffnungen richtig dimensionieren und ausrüsten
Die Größe der Zuluftöffnungen richtet sich zunächst nach der Leistung vorhandener luftgekühlter Kompressoren. Pro Kilowatt installierter Nennleistung sollten für den freien Querschnitt der Zuluftöffnungen 0,02 bis 0,03 m² angesetzt werden. Das entspricht einer Kühlluftmenge von 130 bis 230 m³/h.
Besonders zu beachten ist die Angabe „freier Querschnitt“. Wetterschutzgitter, Jalousien und die bei ungünstigen Ansaugbedingungen erforderlichen Filter schmälern diesen Querschnitt erheblich: Je nach Lüftungssystem beträgt die Reduzierung 20 bis 60 %. Es lohnt sich, möglichst strömungsgünstige Lüftungssysteme auszuwählen. Auf jeden Fall sind von Schutz- und

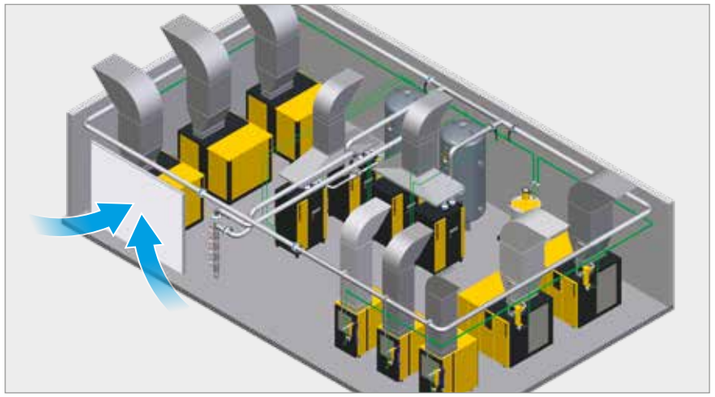


Abb. 2: Druckluftstation mit Zuluftsystemen

Regeleinrichtungen verursachte Querschnittsverengungen auszugleichen.
Üblicherweise besteht ein Zuluftsystem **(Abb. 1)** aus Wetterschutzgitter, Vogelschutzgitter, motorisch betätigter Zuluftjalousie und gegebenenfalls Zuluftfilter. Bei Stationen mit mehreren Kompressoren ist es ratsam, die Zuluftsysteme thermostatisch zu steuern und ihre Öffnungen nach der Lage und Leistung der einzelnen Anlagen aufzuteilen **(Abb. 2)**.

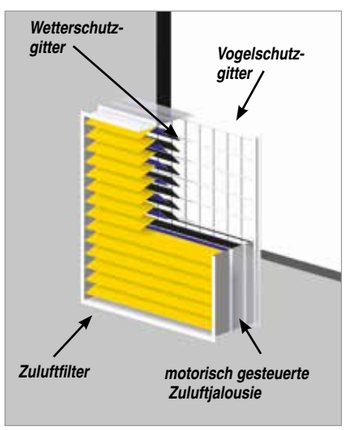


Abb. 1: Zuluftsystem (Aufbau)

4. Auch wassergekühlte Kompressoren belüften
Auch Kompressoren mit Wasserkühlung werden gewöhnlich von luftgekühlten Motoren angetrieben und geben Strahlungswärme ab, brauchen also ebenfalls ausreichende Belüftung. Etwa 10 % der installierten Leistung eines wassergekühlten Kompressors sind als Abwärme mit Kühlluft abzutransportieren. Deshalb sind auch hier entsprechend dimensionierte Zuluftöffnungen vorzusehen.

Tipp 7

Druckluftstationen entlüften

Wer Druckluft-Verfügbarkeit sichern und Wartungskosten niedrig halten will, muss die Druckluftstation angemessen entlüften. Fällt die Außentemperatur unter +5 °C, ist der Betriebsraum der Station mit Umluft zu temperieren.

1. Abluft einfach führen
Abluftkanäle erfüllen in der Druckluftstation eine wichtige Aufgabe: Sie entfernen erwärmte Kühlluft und mit ihr Motorab- und Strahlungswärme der Kompressoren **(Abb.1)**. Bei modernen Maschinen verlässt die aus unterschiedlichen Quellen stammende Abwärme die Anlage über eine einzige Abluftöffnung **(Abb. 1, Lupe)**. Diese ist über einen Segeltuchstutzen flexibel mit dem Abluftkanal zu verbinden **(Abb. 2)**. Bei Außentemperaturen über +10 °C wird so die gesamte über Luft abgeführte Wärmemenge aus dem Betriebsraum der Kompressoren entfernt. An die häufig noch getrennten Abluftführungen älterer Kompressoren sind gegebenenfalls Einzelkanäle anzubauen.



Abb. 2: Lüftungsanschluss des Kompressors mit Segeltuchstutzen

2. Sammelkanal installieren
Sind einzelne Abluftkanäle bautechnisch nicht möglich, ist ein Abluft-Sammelkanal **(Abb. 3)** die Lösung. Zum richtigen Anbinden der Kompressoren sind Rückschlagjalousien nötig. Geschlossen verhindern sie bei Stillstand des jeweiligen Kompressors das Rückströmen warmer Luft in die Station. Motorisch zu betätigende Jalousieklappen verringern den Druckverlust und lassen sich mit dem Signal „Motor läuft“ ansteuern. Leitbleche im Sammelkanal verringern Druckverluste.

3. Mit Umluft temperieren
Bei Außentemperaturen unter +5 °C müssen Umluftklappensysteme vorhanden sein, die ab +10 °C aktiv werden, sich also je nach Temperatur mehr oder weniger weit öffnen **(Abb. 1)**. Bei zeitweise komplett stillgesetzten Druckluftstationen muss eine Zusatzheizung die Temperatur im Betriebsraum über +5 °C halten.

4. Kältetrockner entlüften
Kältetrockner erzeugen etwa das Vierfache der ihnen zugeführten elektrischen Leistung an Wärme. Deshalb brauchen sie ein eigenes Abluftsystem mit thermostatisch gesteuertem Ventilator **(Abb. 1 und 3)**. Sind in der Station mehrere Kältetrockner vorhanden, muss der Ventilator eine Stufensteuerung haben, die ab +20 °C aktiviert wird. Da dieses Abluftsystem nicht ständig arbeitet, darf der Abluftkanal nicht direkt auf dem Trockner aufsitzen – außer der Trockner hat einen starken integrierten Lüfter mit entsprechender Restpressung.

5. Abluftsysteme richtig auslegen und ansteuern
Alle Abluftsysteme sind so auszulegen, dass sie nicht mehr Druckverlust hervorrufen als die kleinste Maschine an Restpressung liefert (Herstellerangaben beachten). Sonst würde die Abluft von dieser Anlage in den Betriebsraum zurückströmen. Reicht die Restpressung nicht aus, sind zusätzliche Ventilatoren nötig. Die Klappen sollten über Raumthermostate und Kompressoren automatisch angesteuert werden. Um Fehlfunktionen der Klappen rasch erkennen und an die Leittechnik übertragen zu können, empfiehlt sich die Überwachung mit einer maschinenübergreifenden Steuerung (z. B. „SIGMA AIR MANAGER 4.0“).

6. Sonderfall Wasserkühlung
Da auch wassergekühlte Kompressoren ca. 10 % der installierten Leistung als Strahlungswärme abgeben, ist hier ebenfalls angemessen zu entlüften.

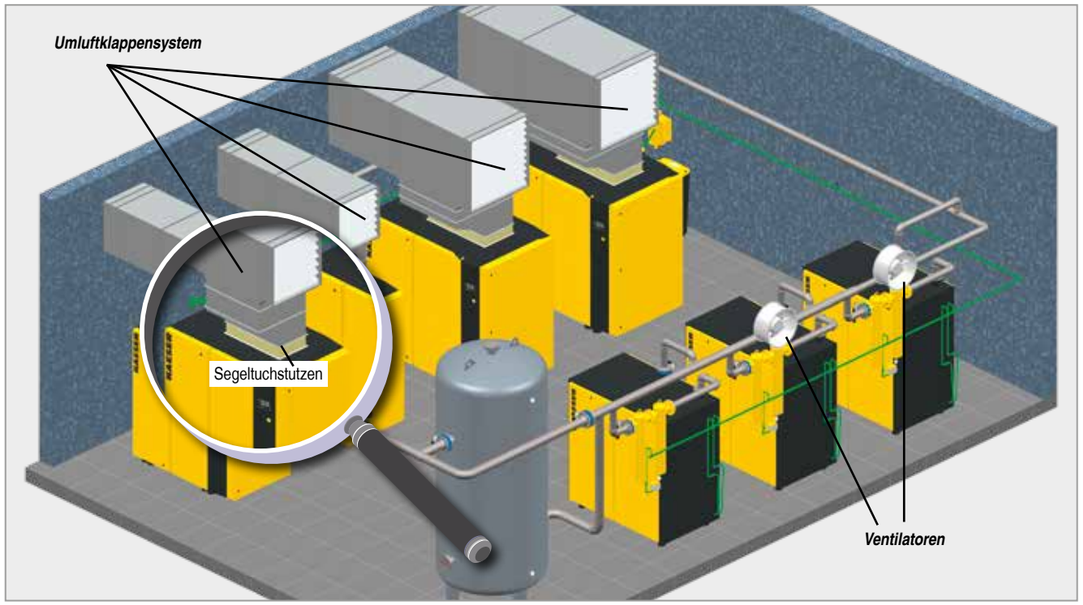


Abb. 1: Abluftsystem mit Einzelkanal je Kompressor

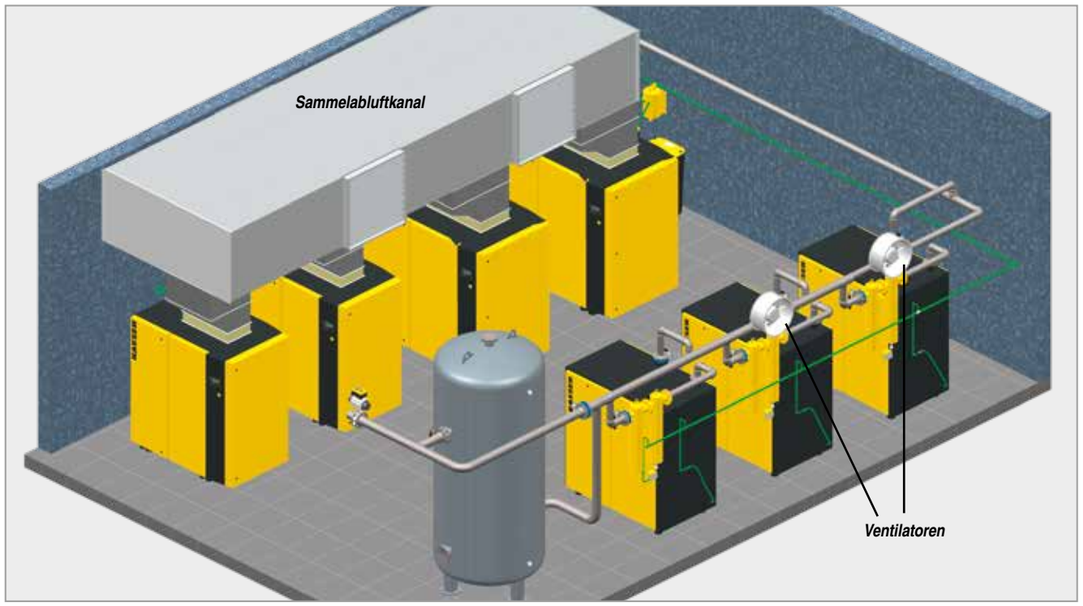


Abb. 3: Abluftsystem mit Sammelabluftkanal für alle Kompressoren

Anhang

Fragebögen
Notizen

54-57

Fragebögen Druckluftstation

Fragebogen Druckluftstation

KAESER KOMPRESSOREN®

1. Welchen Volumenstrom benötigen die Kompressoren?

1.1 Luftverbrauch der eingesetzten Werkzeuge und Maschinen

Werkzeuge, Maschinen	Luftverbrauch pro Werkzeug, Maschine m³/min		Anzahl, Werkzeuge, Maschinen		Auslastung %		Gleichzeitigkeitsfaktor %		tatsächlicher rechnerischer Luftverbrauch m³/min
		x		x		x		=	
		x		x		x		=	
		x		x		x		=	
		x		x		x		=	
		x		x		x		=	
		x		x		x		=	

Luftverbrauch aller Werkzeuge = $V_{Werkzeuge}$ m³/min

\+

1.2 Weitere Verbraucher $V_{sonstige}$ m³/min

\+

1.3 Leckagen Druckluftnetz $V_{Leckage}$ m³/min

\+

1.4 Reserve $V_{Reserve}$ m³/min

min. erf. Volumenstrom der Kompressoren = V_{Ges} m³/min

Fragebogen Druckluftstation

KAESER KOMPRESSOREN®

2. Sind bereits Kompressoren vorhanden?

☐ **nein**

☐ **ja**

Bezeichnung des Betreibers	Hersteller	Typ	Druck bar(ü)	Volumenstrom m³/min	weiterer Einsatz geplant? ja	nein
					☐	☐
					☐	☐
					☐	☐
					☐	☐
					☐	☐
					☐	☐

gesamter Volumenstrom der weiterhin eingesetzten vorhandenen Kompressoren

= $V_{vorhandenges}$ m³/min

Vorhandene Druckluftaufbereitungskomponenten:

Typ / Modell (Trockner, Filter, Ableiter etc.)	Hersteller	Ausgelegt für m³/min	bar(ü)	Bemerkungen z. B. falsch dimensioniert

Fragebögen Druckluftstation

Fragebogen Druckluftstation

KAESER KOMPRESSOREN

3. Wurden bisher Standby-Kompressoren (Reserve, zur Sicherheit) eingesetzt?

☐ **ja,** wie viele? ☐

☐ **nein**

☐ **zukünftig geplant**

4. Ist eine übergeordnete Steuerung vorhanden?

☐ **ja,** welche?

☐ **nein**

zukünftig geplant:
- ☐ Grundlastwechselschaltung
- ☐ Druckbandsteuerung
- ☐ Managementsystem SAM 4.0 - _

5. Wurde Wärmerückgewinnung eingesetzt?

☐ **ja**, Verwendungszweck:

☐ **nein**

☐ **zukünftig geplant:**

6. Welche Druckluftqualität ist notwendig?

(siehe Kapitel 2, „Druckluft wirtschaftlich aufbereiten“)

Zentral Luftverbrauch m³/min	Dezentral Luftverbrauch m³/min	Klasse Druckluftqualität nach ISO 8573-1 Feststoffe / Staub	Wasser	Öl
☐	☐			
☐	☐			
☐	☐			
☐	☐			

3 / 6

Fragebogen Druckluftstation

KAESER KOMPRESSOREN

7. Welchen Maximaldruck benötigen die Kompressoren?

7.1 Min. notwendiger Arbeitsdruck am Verbraucher			p_{Wmin}	$bar_{(ü)}$
7.2 Druckverluste				
des Rohrleitungsnetzes	Material der Rohrleitung		+ p_R	bar
	Länge des Rohrleitungsnetzes	m		
des Aktivkohleadsorbers	p_{AKmin}	bar	+ p_{AKmax}	bar
des Sterilfilters	p_{FSTmin}	bar	+ p_{FSTmax}	bar
des Mikrofilters	p_{FXAmin}	bar	+ p_{FXAmax}	bar
der Mikrofilterkombination	p_{FXmin}	bar	+ p_{FXmax}	bar
des sonstigen Filters	p_{FVmin}	bar	+ p_{FVmax}	bar
des Trockners			+ p_{Trock}	bar
7.3 Regeldifferenz der Kompressoren			+ p_{Regel}	bar

Erforderlicher Maximaldruck der Kompressoren = p_{maxerf} $bar_{(ü)}$

Minimaler Druck der Kompressoren (p_{maxerf} - p_{Regel}) p_{min} $bar_{(ü)}$

4 / 6

Fragebögen Druckluftstation

Fragebogen Druckluftstation

KAESER KOMPRESSOREN®

8. Randbedingungen

8.1 Maximale Ansaugtemperatur		t_{Amax}	°C
8.2 Minimaler Luftdruck (bei maximaler Ansaugtemperatur)		P_{Amin}	bar
8.3 Maximale relative Luftfeuchte (bei max. Ansaugtemperatur)		$F_{relAmax}$	%
8.4 Minimale Ansaugtemperatur		t_{Amin}	°C

8.5 Kühlung

☐ **luftgekühlt**

☐ **wassergekühlt**

☐ geschlossenes Kühlsystem	Kühlwassereintrittstemperaturen	t_{einmax}	°C
☐ offenes Kühlsystem		t_{einmin}	°C
Kühlwasserqualität:	Kühlwasserrücklauftemperaturen	$t_{rückmax}$	°C
☐ nach KAESER-Standard		$t_{rückmin}$	°C
	Kühlwasserdruck	$p_{Kühlw}$	$bar_{(ü)}$
	Kühlwasserdruckverlust	$p_{KWdelta}$	$bar_{(ü)}$

Fragebogen Druckluftstation

KAESER KOMPRESSOREN®

8.6 Wärmerückgewinnung

☐ **Warmluftnutzung** Verwendungszweck:

☐ **Wassererwärmung** Verwendungszweck:

Wasservorlauftemperatur	t_{vorWRG}	°C
Wasserrücklauftemperatur	$t_{rückWRG}$	°C
Wassermenge	$V_{WasserWRG}$	m^3/h

8.7 Aufstellungsbedingungen Kompressorenraum

Staubgehalt

☐ **gering**

☐ **hoch**

Sauberkeit

☐ **gering**

☐ **hoch**

Zuluft-Öffnung

☐ **vorhanden,** ☐ **m²**

☐ **nicht vorhanden**

Frostschutz

☐ **vorhanden,** ☐ **m²**

☐ **nicht vorhanden**

Abluft-Öffnung

☐ **vorhanden,** ☐ **m²**

☐ **nicht vorhanden**

Notizen

Notieren Sie sich die wichtigsten Informationen:

Mehr Druckluft mit weniger Energie

Auf der ganzen Welt zu Hause

Als einer der größten Kompressorenhersteller, Gebläse- und Druckluft-Systemanbieter ist KAESER KOMPRESSOREN weltweit präsent:

In über 140 Ländern gewährleisten eigene Tochterfirmen und Partnerfirmen, dass Anwender hochmoderne, effiziente und zuverlässige Druckluftanlagen und Gebläse nutzen können.

Erfahrene Fachberater und Ingenieure bieten umfassende Beratung und entwickeln individuelle, energieeffiziente Lösungen für alle Einsatzgebiete der Druckluft und Gebläse. Das globale Computer-Netzwerk der internationalen KAESER-Firmengruppe macht das Know-how dieses Systemanbieters allen Kunden rund um den Erdball zugänglich.

Die hochqualifizierte, global vernetzte Vertriebs- und Service-Organisation sichert weltweit nicht nur optimale Effizienz, sondern auch höchste Verfügbarkeit aller KAESER Produkte und -Dienstleistungen.



KAESER KOMPRESSOREN AG
Grossäckerstrasse 15 – CH-8105 Regensdorf
Telefon 044-871 63 63 – Fax 044-871 63 90 – E-Mail: info.swiss@kaeser.com – www.kaeser.com

P-2010CHD Technische und sonstige Änderungen vorbehalten! /25