

# Druckluft effizient nutzen

Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung  
der Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken

# Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung



Teilnehmer der Projektgruppe „Druckluft effizient regional“ im Rahmen der Agenda 21 der Stadt Nürnberg  
Projektgruppenleitung: Tom Ankirchner

- Faber-Castell Aktiengesellschaft, Klaus Kroner
- Richard Bergner Verbindungstechnik GmbH & Co. KG, Jürgen Lindner
- DATEV eG, Klaus Krauß
- Diehl Metall Stiftung & Co. KG, Hans Bondkowski, Gerhard Grünewald
- Faurecia Exteriors GmbH (ehemals Plastal GmbH), Günter Rieger, Stefan Wieland
- ECKA Granules Germany GmbH, Peter Lorenz
- ECKART GmbH, Alexander Hein
- E-T-A Elektrotechnische Apparate GmbH, Manfred Birkelbach, Robert Gottschalk
- MAN Truck & Bus AG, Harald Schick
- Prinovis Ltd. & Co. KG – Betrieb Nürnberg, Manfred Gotthardt
- Neumeyer Fließpressen GmbH, Manfred Bitter, ext. Mitarbeiter Roland Goetz
- OECHSLER AG, Joachim Hofmann
- KAESER KOMPRESSOREN AG, Dieter Engel
- CompAir Drucklufttechnik GmbH, Rainer Höß
- Pressluft Stölzel GmbH & Co. KG, Gunter Dehne
- Umweltpakt Bayern c/o Regierung von Mittelfranken, Reiner Seidel

Die Erstellung dieses Leitfadens wurde durch Mittel der lokalen Agenda 21 der Stadt Nürnberg unterstützt. Dieser baut auf Ergebnisse auf, die im Rahmen der Pilotprojektgruppe „Druckluft effizient regional“, des Unternehmenszirkels „Kosten- und energieeffiziente Druckluftsysteme“ an der Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken in Kooperation mit dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz und mit der Unterstützung der Regierung von Mittelfranken entstanden.



### Zusammenfassung

Der Energieträger Druckluft ist eine sehr teure Energieform. Ziel dieses Leitfadens ist es, die entsprechenden Anlagen zu optimieren und dabei Energie und Kosten zu sparen.

Dazu vermittelt dieser Leitfaden Einsteigern die wichtigsten Grundkenntnisse, erfahrenere Mitarbeiter gewinnen einen Überblick über den technischen Stand bei Druckluftsystemen. Gleichzeitig werden Einsparpotentiale und Wechselwirkungen im System veranschaulicht. Mit Hilfe der anschließenden Anleitungen und Arbeitsblätter kann die Optimierung der Druckluftanlage geplant und verwirklicht werden.

Einige Empfehlungen dieses Leitfadens können selbst umgesetzt werden, für andere ist die Unterstützung durch Experten notwendig. In letzterem Fall hilft Ihnen dieser Ratgeber dabei, sich einzulesen und zu informieren. Es sind auch Informationen darüber enthalten, was Sie bei der Einholung und Beurteilung von Angeboten beachten sollten.

Deswegen wurde der Leitfaden so knapp wie möglich gehalten. Falls Sie darüber hinaus Fragen haben, erteilen Ihnen die Hersteller von Druckluft-Anlagen Auskunft. Auch die zur Erstellung dieses Leitfadens herangezogene Literatur kann Ihnen Anregungen geben.

# Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Optimierungspotenziale bei Druckluftsystemen</b> .....	<b>6</b>
1.1 Kompressor .....	6
1.1.1 Wahl der passenden Verdichterbauart .....	6
1.1.2 Vergleich der Energieeffizienz von Kompressoren .....	10
1.2 Regelung / Steuerung .....	12
1.2.1 Kompressorinterne Regelungen .....	13
1.2.2 Steuerung mehrerer Kompressoren im Verbund .....	14
1.2.3 Kombination von Verdichtergrößen .....	15
1.2.4 Einfluss der Druckbehältergröße auf die Steuerung .....	16
1.2.5 Einschaltdauer von Kompressoren .....	16
1.3 Aufbereitung .....	17
1.3.1 Trockner .....	17
1.3.2 Filter .....	19
1.3.3 Kondensatableiter .....	20
1.4 Messtechnik .....	20
1.5 Leckagen .....	21
1.5.1 Leckagen als Großverbraucher .....	21
1.5.2 Leckagevermeidung durch Absperrungen / Abschaltungen .....	22
1.5.3 Leckageverringern durch Absenken des Netzdruckes .....	22
1.6 Druck reduzieren und Druckverluste minimieren .....	22
1.6.1 Druckeinstellung bei Kompressoren .....	22
1.6.2 Druckverluste in der Leitung und im Leitungszubehör .....	23
1.7 Wärmerückgewinnung .....	24
1.8 Wartung .....	26
1.9 Umgebungsbedingungen .....	28
1.9.1 Belüftung von Kompressorräumen .....	28
1.9.2 Temperatur .....	28
1.9.3 Luftqualität .....	28
1.10 Auswahl der Druckluft-Anwendungen .....	28
<b>2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b> .....	<b>29</b>
<b>3 Druckluft-Contracting</b> .....	<b>30</b>
<b>4 Vorgehensweise zur Ermittlung der Optimierungspotenziale</b> .....	<b>31</b>
4.1 Datengrundlage erstellen .....	31
4.2 Auf Druckluft wo möglich verzichten .....	33
4.3 Leckagen ermitteln und beseitigen .....	34
4.4 Steuerung / Laufzeiten optimieren .....	36
4.5 Betriebsdruck und Druckverluste prüfen und minimieren .....	38
4.6 Wartung systematisieren .....	39
4.7 Anwender überprüfen .....	41
4.8 Wärmerückgewinnung prüfen .....	42
4.9 Gesamtkonzept erstellen .....	42
<b>5 Anhang</b> .....	<b>44</b>
5.1 Formblatt zur Ist-Stand-Ermittlung .....	45
5.2 Checkliste für eine Wochenverbrauchsmessung .....	51
5.3 Checkliste zum Ermitteln von Verbesserungspotentialen .....	55
5.4 Leckagebestimmung .....	59
5.4.1 Messungen durch Druckbehälterentleerung .....	59
5.4.2 Messung der Belastungszeiten / Gesamtzeiten .....	59
5.5 Berechnung der jährlichen Energiekosten für die Druckluftherzeugung sowie anteilig für Leckagen .....	60
5.6 Hinweise für die Auslegung von Rohrleitungen .....	61
5.7 Literaturverzeichnis und Links .....	62

## Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1.1a:	Verdichterbauarten	6
Abbildung 1.1b:	Leistungspotenziale von Verdichterbauarten	7
Abbildung 1.1c:	Arbeitsweise eines Kolbenkompressors	7
Abbildung 1.1d:	Aufbau eines Schraubenkompressors	7
Abbildung 1.1e:	Leistungsverhalten ölgekühlte - ölfreie Schraubenkompressoren	8
Abbildung 1.1f:	Laufrad eines Turbokompressors	8
Abbildung 1.1g:	Kosten Luft- und wassergekühlter Anlagen	9
Abbildung 1.1h:	Wärmeableitsysteme	9
Abbildung 1.1i:	Kraft- und Leistungsfluss im Kompressor	10
Abbildung 1.1j:	spezifischer Leistungsbedarf von Kompressoren	11
Abbildung 1.2a:	Regelung und Steuerung von Kompressoren	12
Abbildung 1.2b:	Spezifisches Leistungsverhalten eines drehzahlgeregelten Kompressors	13
Abbildung 1.2c:	Überblick über die relative Leistungsaufnahme verschiedener Regelkonzepte	14
Abbildung 1.2d:	Kaskadenregelung	14
Abbildung 1.2e:	Dimensionierung zentraler Druckluftbehälter	16
Abbildung 1.3a:	Verfahren der Drucklufttrocknung	17
Abbildung 1.3b:	Funktionsweise von Kältetrocknern	17
Abbildung 1.3c:	Funktionsweise eines Adsorptionstrockners	18
Abbildung 1.3d:	Betriebskosten für verschiedene Trocknerbauarten	18
Abbildung 1.3e:	Energiekosten durch Druckabfall	19
Abbildung 1.5a:	Leckageraten der untersuchten Betriebe	21
Abbildung 1.5b:	Markierungsmöglichkeit einer Druckluftleckage	22
Abbildung 1.6a:	Druckabfall im Rohrleitungsnetz	23
Abbildung 1.6b:	Schlauchkupplung	24
Abbildung 1.9a:	Aufbauskizze bei unterstützter Konvektion	28
Abbildung 1.9b:	Aufbauskizze für Entlüftung über Abluftkanäle	28
Abbildung 1.10a:	Saugpistolen	29
Abbildung 1.10a:	Kostenstruktur in optimierten Druckluftstationen	30
Abbildung 4.2a:	Vergleich Energiebedarf Kompressor - Elektromotor	33
Abbildung 5.4a:	Leckagemessung durch Druckbehälterentleerung	59
Abbildung 5.6a:	Gleichwertige Rohrlänge bei Armaturen	61
Abbildung 5.6b:	Nomogramm zur Bestimmung des Rohrrinnendurchmessers	61
Tabelle 1.5a:	Jährliche Energiekosten durch Leckage	21
Tabelle 1.8a:	Saugseitige Druckverluste durch verschmutzten Ansaugfilter	26
Tabelle 1.8b:	Erhöhung der Energiekosten durch saugseitige Druckverluste	26
Tabelle 2a:	Energieeinsparpotenziale in Druckluftanlagen	29

## Einleitung

Für die Druckluftherzeugung werden in Deutschland ca. 7 % des industriellen Stromverbrauchs benötigt. Mit einfach realisierbaren und meist äußerst wirtschaftlichen Maßnahmen lässt sich der Energieverbrauch häufig um ein Drittel reduzieren. Dies führt zu erheblichen Kosteneinsparungen und leistet gleichzeitig einen Beitrag zum Ressourcen- und Klimaschutz. In vielen Betrieben sind jedoch die Druckluftverbräuche und die Kosten für deren Erzeugung nicht ausreichend bekannt. Auch die Größenordnung von Leckagen wird meist unterschätzt. Bei vielen Mitarbeitern gilt Druckluft als „kostenloses Medium“.

In der IHK Nürnberg für Mittelfranken wurde deshalb als Pilotprojekt im Rahmen der Agenda 21 ein IHK-Unternehmenszirkel „Kosten – und energieeffiziente Druckluftsysteme“ durchgeführt. Dies geschah in Kooperation mit dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz und mit Unterstützung der Regierung von Mittelfranken. Vertreter von zwölf mittelfränkischen Industrieunternehmen untersuchten ihre Druckluftanlagen. Das Gesamtsystem „Druckluft“, von der Anwendung über die Verteilung bis zur Erzeugung, wurde in Workshops analysiert und optimiert.

Die Auswertungen brachten für alle Teilnehmer überraschende Ergebnisse: Nur ein Drittel der Betriebsstätten hatte eine akzeptable Leckagerate unter 15 %. Ein weiteres Drittel der Betriebe wies eine Leckagerate von 15 – 30 % auf. Bei einem Drittel lagen die Leckageraten sogar bei 30 – 60 % der produzierten Druckluftmenge. Die dadurch entstehenden Kosten lagen in größeren Betrieben bei mehreren 10.000 € bis über 100.000 € pro Jahr.

## 1 Optimierungspotenziale bei Druckluftsystemen

Um wirkungsvolle Ergebnisse zu erzielen, sollte Sie nach folgendem Grundprinzip vorgehen:

1. Druckluft einsparen
2. benötigte Druckluft energieeffizient erzeugen
3. Wärmerückgewinnung nutzen

Ist die Druckluft nicht ersetzbar, so sollte das System energetisch optimiert werden. Folgende Maßnahmen sind möglich:

- Bedarfsgerechte Größen und energieoptimierte Bauarten von Kompressoren auswählen
- Laufzeiten der Kompressoren durch Steuerung optimieren
- Die Druckluft bis zu der benötigten Qualität aufbereiten aber so wenig wie möglich
- Leckagen aufspüren und beseitigen
- Druckhöhe reduzieren und Druckverluste minimieren
- Wärmerückgewinnung realisieren
- Wartung optimieren und systematisieren
- Optimale Umgebungsbedingungen schaffen
- Druckluftbedarf der Anwendungen minimieren

Diese Maßnahmen werden in den nun folgenden Kapiteln erläutert.

### 1.1 Kompressor

#### 1.1.1 Wahl der passenden Verdichterbauart

Kompressoren sind in den Bauarten erhältlich, die das Organigramm in Abbildung 1.1a darstellt:

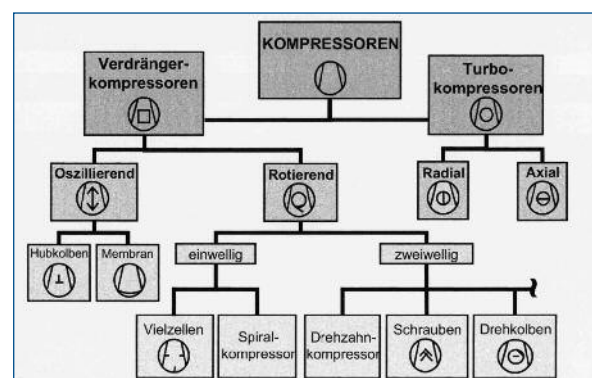


Abbildung 1.1a: Verdichterbauarten  
(aus: Druckluft effizient, Fakten IV Erzeugung)

Die Auswahl des Kompressors erfolgt anhand der benötigten Liefermenge, des Netzdrucks, sowie der Art der Anforderung (Regelmäßigkeit / Unregelmäßigkeit des Bedarfes). Das Leistungspotenzial verschiedener Kompressoren, das vom erzeugten Druck und Volumenstrom abhängt, zeigt die Abbildung 1.1b.

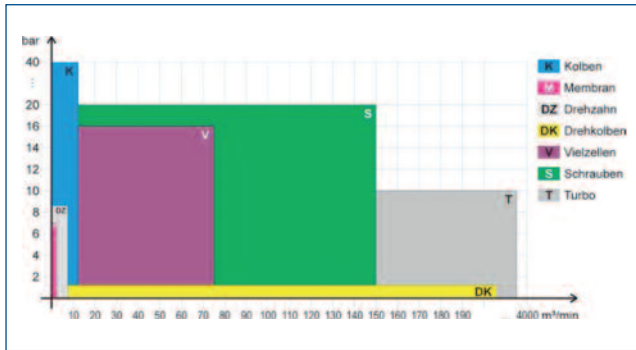


Abbildung 1.1b: Leistungspotenziale von Verdichterbauarten (aus: Druckluft effizient, Fakten IV Erzeugung)

Im Folgenden werden die wichtigsten Kompressorbauarten kurz charakterisiert:

Bei den **Verdrängerkompressoren** wird die Luft durch ein Ventil in einen Verdichtungsraum angesaugt, der sich daraufhin vollständig schließt. Unter Krafteinwirkung wird dieses Volumen verkleinert und so die Luft verdichtet.

Zwei sehr gängige Bauarten sind der Kolbenkompressor und der Schraubenkompressor:

Die Funktionsweise eines **Kolbenkompressors** ist in Abbildung 1.1c dargestellt:

Die Luft wird während des Abwärtshubes über das Saugventil (1) angesaugt.

Beim Aufwärtshub schließt dieses Ventil, die Luft wird verdichtet und über das Druckventil (2) ausgestoßen.

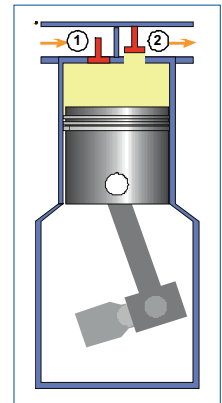


Abbildung 1.1c: Arbeitsweise eines Kolbenkompressors

Ein Kolbenkompressor zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- verdichtet auf hohe Enddrücke (z.B. 45 bar)
- geeignet für geringste Einschalthäufigkeiten
- hohe Verdichtungsendtemperatur

Ein **Schraubenkompressor** ist mit zwei sich gegenläufig drehenden Rotoren ausgestattet. Die angesaugte Luft wird während des Transports in stetig sich verkleinernden Kammern bis auf den Enddruck verdichtet und anschließend in den Druckstutzen ausgeschoben.

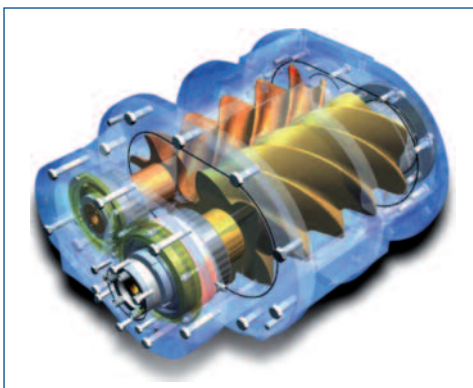


Abbildung 1.1d: Aufbau eines Schraubenkompressors

Für den Schraubenkompressor sind folgende Eigenschaften typisch:

- pulsationsarmer Lauf
- dauerlaufgeeignet
- geringer Geräuschpegel
- geringer Wartungsaufwand

## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

Besonders in der pharmazeutischen-, sowie in der Nahrungs- und Genussmittelindustrie werden aus Hygienegründen trockenlaufende Schraubenkompressoren verwendet. Hier erfolgt die Druckluftverdichtung ohne „Schmierung“. Der spezifische Leistungsbedarf ölfreier Verdichter ist höher als jener von öleingespritzten Verdichtern. Dies zeigt auch Abbildung 1.1e:

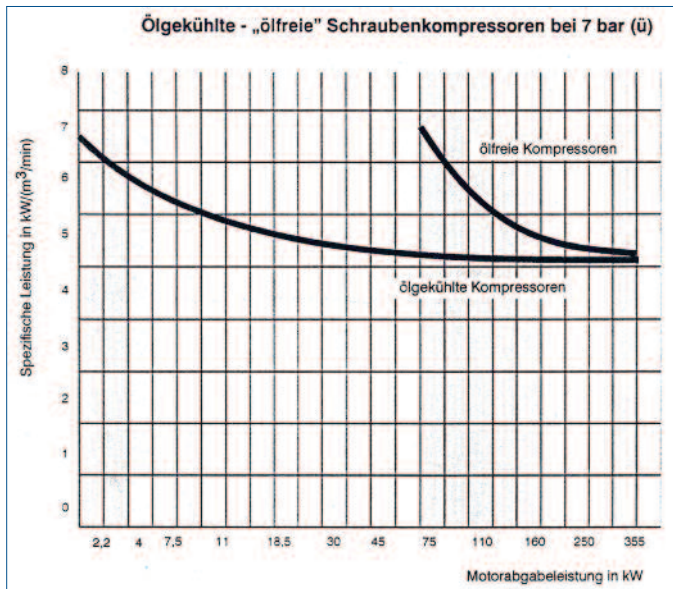
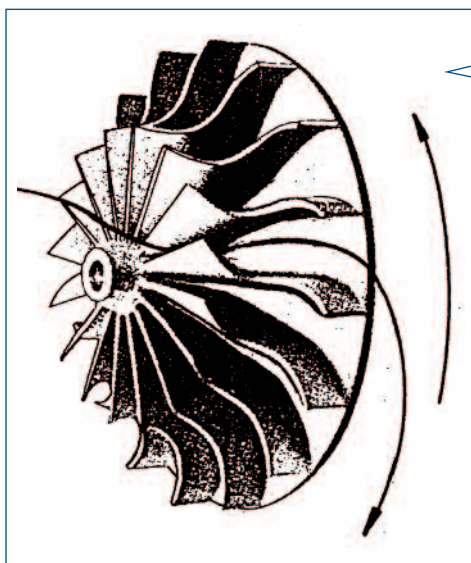


Abbildung 1.1e:  
Leistungsverhalten ölgekühlte- ölfreie Schraubenkompressoren  
(aus: Kaeser, Seminarunterlagen)

Erst ein mehrstufiger trockenlaufender Verdichter ist energetisch etwa gleichwertig zu einem einstufigen Verdichter mit Öleinspritzkühlung. Deshalb müssen vor der Beschaffung eines trockenlaufenden Schraubenkompressors die Vor- und Nachteile sorgfältig gegeneinander abgewägt werden. Oft schreiben jedoch Werks- oder Branchenvorschriften den Einsatz eines solchen Kompressors vor. Bei nach ISO 8573-1 zu sichernder Druckluftqualität ist der Aufwand bei der Druckluftaufbereitung annähernd identisch.

Zur Herstellung von absolut ölfreier Luft kann ein trockenlaufender oder ein fluideingespritzter Kompressor eingesetzt werden. Bei der Auswahl sollte die spezifische Leistung der Gesamtanlage das entscheidende Kriterium sein.

Bei Turbokompressoren wird das zu verdichtende Gas an einem Laufrad beschleunigt und anschließend durch Abbremsen an feststehenden Leitapparaten an den Schaufeln verdichtet.



Ein Turbokompressor weist diese Besonderheiten auf:

- hohe Wirtschaftlichkeit für sehr große Druckluftmengen
- typische Grundlastmaschine im oberen Leistungsbereich
- trockenlaufend verdichtete Luft
- verdichtet einstufig bis 2 bar, zweistufig bis 7 bar, weitere Stufen möglich
- für hohe Drücke nicht gut geeignet
- empfindlich gegen verschmutzte Ansaugluft
- ruhiger Lauf



Abbildung 1.1f: Laufrad eines Turbokompressors



Die Kühlung der Kompressoren kann mittels Luft- oder Wasserkühlung erfolgen. Die Betriebskosten der wassergekühlten Kompressoren liegen ca. 30 % über den von Luft gekühlten. Deshalb sollten aus Kostengründen Kompressoren mit Luftkühlung bevorzugt werden. Die Kühlung mit Kühlwasser wird bei größeren Kompressoren dann notwendig, wenn die Wärme, die von einzelnen Bauteilen abgestrahlt wird, durch eine Luftkühlung nicht mehr ausreichend abgeführt werden kann. Eine zusätzliche geringe Kühlluftmenge ist für das Abführen der Motorwärme erforderlich.

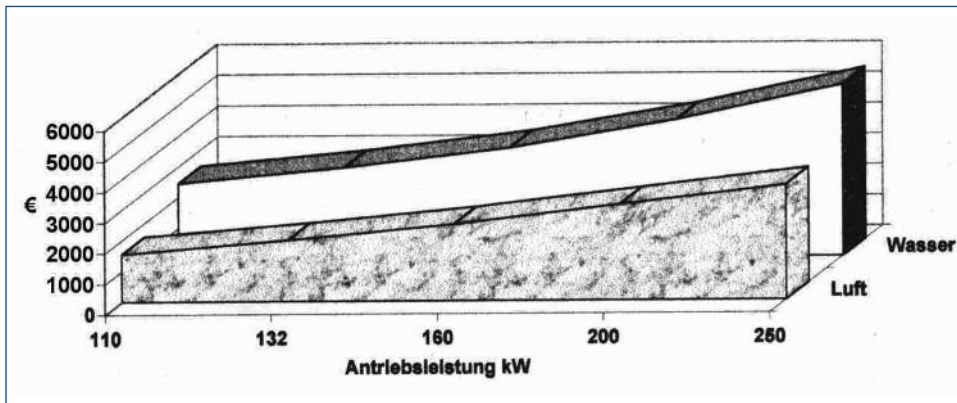


Abbildung 1.1g: Kosten Luft- und wassergekühlter Anlagen  
(aus: Bahr, Ruppelt; Taschenbuch Drucklufttechnik)

Für wassergekühlte Kompressoren gibt es verschiedene Wärmeableitsysteme, die in Abbildung 1.1h dargestellt sind.

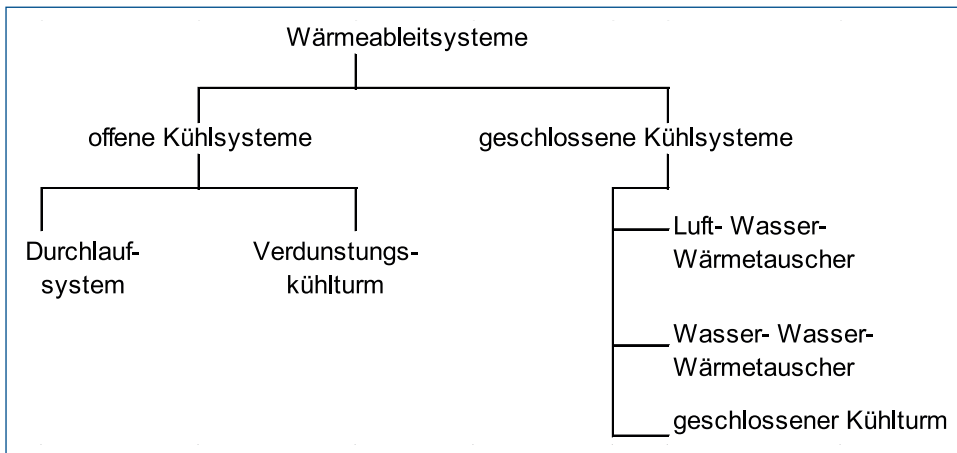


Abbildung 1.1h: Wärmeableitsysteme  
(aus: Jörg Wieczorek, Die wirtschaftliche Druckluftstation)

Auf die verschiedenen Vor-, Nachteile und Energiesparmöglichkeiten kann hier nicht näher eingegangen werden; dies ist in genannten Quellen ausführlich nachzulesen.

# Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

## 1.1.2 Vergleich der Energieeffizienz von Kompressoren

Bei der Beschaffung von Kompressoren wird das Augenmerk in erster Linie auf die Investitionskosten gerichtet. Jedoch zeigt sich, dass die Energiekosten beim Einsatz eines ausgelasteten Industriekompressors den weitaus größeren Anteil von 65 – 85 % der Lebenszykluskosten ausmachen. Daher ist ein sorgfältiger Vergleich der Leistungsdaten dringend zu empfehlen.

Dies ist auch deswegen wichtig, da sich Kompressoren gleicher Bauart und verschiedener Hersteller bezüglich der Energieeffizienz unterscheiden und neuere Modelle häufig einen besseren Wirkungsgrad aufweisen, da sie keine verschlissenen Teile enthalten.

Der Vergleich von Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz verschiedener Kompressoren wird allerdings durch eine Vielzahl von Angaben erschwert.

Hierzu folgendes Beispiel: Für den Vergleich zweier 100 kW-Kompressoren (Motornennleistung) genügt nicht der Vergleich der Liefermenge, da der tatsächliche Energieverbrauch durch verschiedene Verluste im Kraft- und Leistungsfluss der Kompressoren bestimmt wird. Je nach Höhe der Verluste liegt die tatsächliche Leistungsaufnahme deshalb teilweise deutlich über der Nennleistung. Der Kraft- und Leistungsfluss im Kompressor ist in Abbildung 1.1i dargestellt.

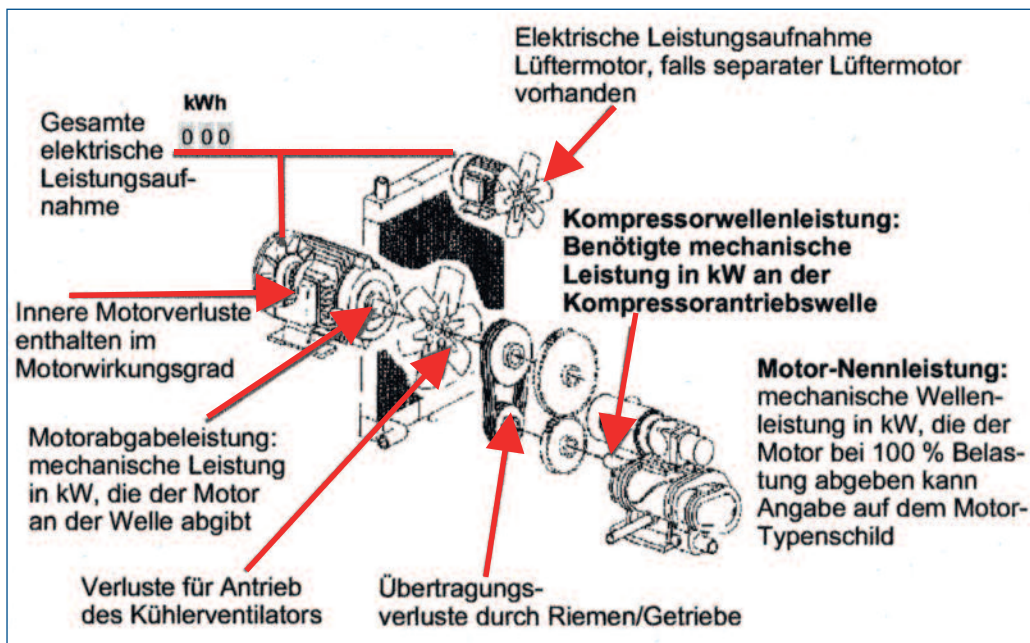


Abbildung 1.1i: Kraft- und Leistungsfluss im Kompressor  
(aus: Druckluft effizient, Fakten IV Erzeugung)

Dementsprechend gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Verluste und damit den Leistungsbedarf gering zu halten, z.B.:

- wirkungsgradoptimierte Elektromotoren (Effizienzklasse 1 – EFF1)
- geringere Übertragungsverluste durch Direktantrieb
- große Kompressorblöcke mit niedrigerer Drehzahl statt kleinere Blöcke mit einer hohen Drehzahl

Um die Energieeffizienz von Kompressoren zu vergleichen, können der spezifische Leistungsbedarf, die Wirtschaftlichkeit und der Leistungsbedarf im Leerlauf herangezogen werden. Diese Parameter werden im Folgenden kurz erläutert.

### Vergleichswert „spezifischer Leistungsbedarf“

Für den Vergleich der Effizienz zweier Kompressoren ist der spezifische Leistungsbedarf die entscheidende Kenngröße: Je niedriger der spezifische Leistungsbedarf, desto energiesparender arbeitet der Kompressor.

Der spezifische Leistungsbedarf ist wie folgt definiert:

$$\text{spezifischer Leistungsbedarf} = \frac{\text{elektrische Gesamtaufnahmeleistung bei Maximaldruck [kW/(Nm}^3\text{/min)]}}{\text{Anlagenlieferung bei Maximaldruck}}$$

Gesamtaufnahmeleistung:

Summe aller Antriebe im Kompressor, d.h. Hauptmotor, Lüftermotor, Ölpumpenmotor, Stillstandsheizung, etc.

Liefermenge:

Anlagenlieferung nach ISO 1217 Anhang C bezieht sich auf die Liefermenge der Kompressoranlage. Die Mengenangabe erfolgt in entspannter Luftmenge.

Hinweis: Manchmal wird die Liefermenge des Kompressorblocks angegeben (nach DIN 1945 und ISO 1217 = Liefermenge ohne alle Nebenaggregate); diese Angabe ist für einen Vergleich jedoch unzureichend.

Der spezifische Leistungsbedarf ist abhängig von der Kompressorbauart und dessen Größe. Anhaltswerte für den anzustrebenden Bereich des spezifischen Leistungsbedarfs gibt Abbildung 1.1j.

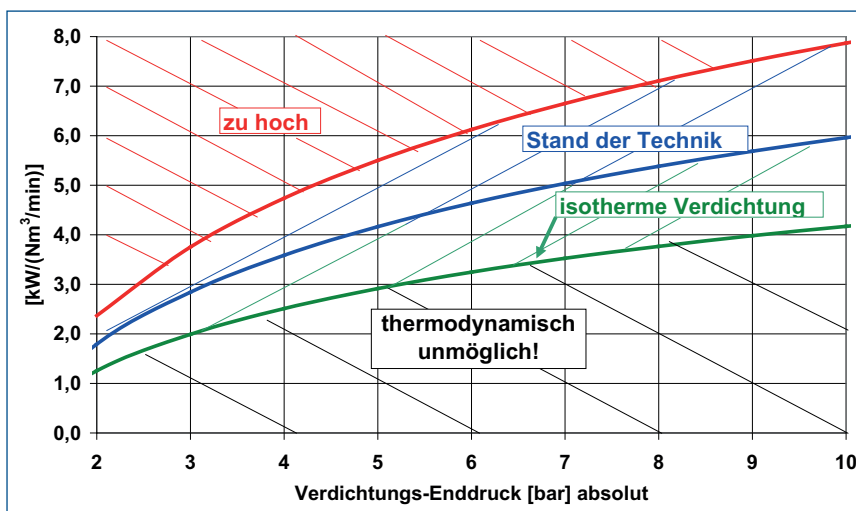


Abbildung 1.1j: spezifischer Leistungsbedarf von Kompressoren  
(aus Weiß A.P., „Drucklufttechnik“, Vorlesungsskript Hochschule Amberg-Weiden, WS2006/2007)

## Vergleich der Kompressoren anhand der Wirtschaftlichkeit

Es ist zu beachten, dass sich der errechnete spezifische Leistungsbedarf auf einen Kompressor mit 100 % Auslastung bezieht. Leerlaufzeiten mit nur ca. 30 % Energieaufnahme und ein erhöhter Leistungsbedarf pro  $m^3$  wegen Überdimensionierung und einer nicht optimalen Steuerung werden nicht berücksichtigt. Für einen möglichst geringen Leistungsbedarf ist es daher entscheidend, dass die Größe des Kompressors möglichst gut an den Bedarf angepasst ist oder mehrere Kompressoren in entsprechender Größenabstufung eingesetzt werden. Die Größenauswahl wird in 1.2.3 dargestellt.

Der spezifische Leistungsbedarf dient dem Vergleich neuer Kompressoren und ist bei älteren Kompressoren häufig höher als der ursprünglich berechnete Wert. Dies wird verursacht von einer Verringerung der Liefermenge bzw. Erhöhung des Energiebedarfs durch schlechten Wartungszustand und Verschleiß. Dadurch entstehen Druck- und Leckageverluste im Kompressor. Neuere Kompressoren ähnlicher Bauart haben zudem in der Regel einen niedrigeren (=besseren) spezifischen Leistungsbedarf durch Bauartverbesserungen. Bei Kompressoren, die älter als zehn Jahre sind, kann sich eine Neuanschaffung über den geringeren Energieverbrauch innerhalb kurzer Zeit amortisieren.

## Vergleichswert „Leistungsbedarf im Leerlauf“

Um den Energieverbrauch von Kompressoren vergleichen zu können, kann gegebenenfalls auch die Leistungsaufnahme im Leerlauf herangezogen werden. Der Energieverbrauch im Leerlauf liegt bei 20 - 30 % des Energiebedarfs im Volllastbetrieb.

## 1.2 Regelung / Steuerung

Durch die Regelung / Steuerung von Kompressoren wird die Druckluftproduktion an den aktuellen Verbrauch angepasst. Es wird unterschieden zwischen der kompressorinternen Regelung und der Steuerung mehrerer Kompressoren im Verbund (übergeordnete Steuerung). Deren Optimierung beinhaltet in vielen Fällen ein großes und meist äußerst rentables Einsparpotenzial. In der EU-Studie „Compressed Air Systems in the European Union“ entdeckten Wissenschaftler, dass das energetische Einsparpotenzial einer kompressorinternen Regelung durchschnittlich 15 % beträgt, durch übergeordnete Steuerung lassen sich in etwa 12 % Energie einsparen.

Die Einsparung wird über folgende Komponenten erreicht:

1. Reduzierung des Leerlaufstroms und weiterer Regelverluste (Luftverluste bei jedem Schaltvorgang, Energieverbrauch bis zutatsächlichen Luftförderung)
2. Senken des maximalen Betriebsdrucks durch ein schmales Druckband (nur eine Druckdifferenz für alle Kompressoren) statt einer Druckkaskade bei Kompressorenverbundsystem
3. bei der Verwendung von Teillastregelungen: Auswahl energieeffizienter Teillastregelungen bzw. Betrieb im wirtschaftsrechtlichen Regelbereich

Bei der Regelung eines Kompressors muss auch berücksichtigt werden, dass jedes Einschalten des Motors mit hohen Anlaufströmen und einer entsprechenden Motorerwärmung verbunden ist. Dies erhöht den Verschleiß am Verdichter. Zur Verschleißminimierung gibt es zulässige Motor-Einschalhäufigkeiten je Stunde in Abhängigkeit von der Motorleistung. Um diese einzuhalten, können Kompressoren in den Betriebszustand Leerlauf gehen, anstatt ganz abzuschalten. Durch den Leerlauf werden die Motorschaltspiele reduziert und damit Verschleiß und Überhitzung vermieden. Der Energieverbrauch für den Leerlauf liegt in der Regel bei 20 – 30 % des Lastbetriebes.

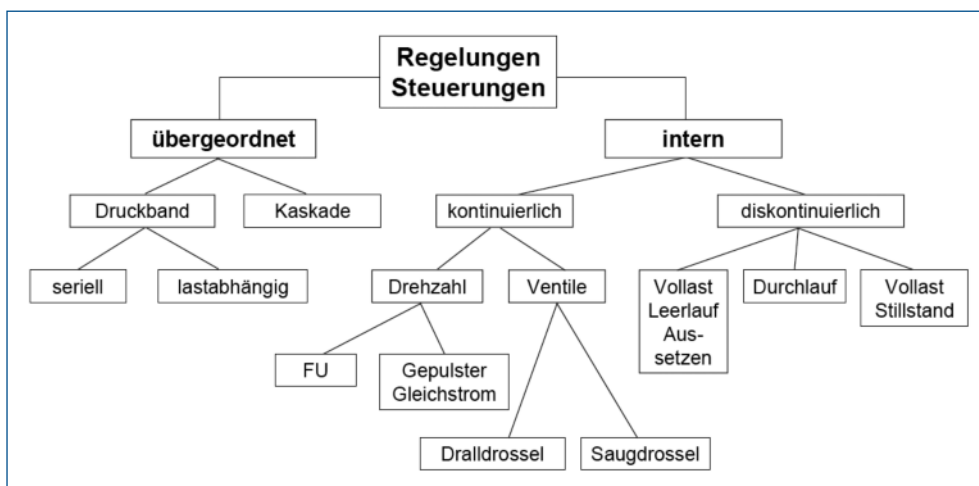


Abbildung 1.2a: Regelung und Steuerung von Kompressoren  
(aus: Druckluft effizient Fakten V Steuerung)

### 1.2.1 Kompressorinterne Regelungen

Im Folgenden werden die verschiedenen Regelungsvarianten näher erläutert. Einen Überblick über die relative Leistungsaufnahme verschiedener Regelkonzepte gibt die Abbildung 1.2c.

Am häufigsten wird die **Zweipunktregelung** (auch diskontinuierliche Regelung genannt) eingesetzt. Hierzu gehören:

- Aussetzregelung
- Last-Leerlauf-Regelung
- Nachlaufregelung (verzögerte Aussetzregelung)

Der Kompressor schaltet in einem Druckband mit einem unteren (Einschaltdruck) und einem oberen Druckniveau (Abschaltdruck) und liefert jeweils die maximale Liefermenge oder gar nicht. Die Differenz aus Einschalt- und Ausschaltdruck ist das Druckband. Alle Kolbenkompressoren sind aussetzgeregelt. Ist der Enddruck erreicht, dann wird der Motor stillgesetzt. Eine zu hohe Schalzhäufigkeit wird durch ein Aufspreizen des Druckbandes vermieden. Es gibt auch Kolbenkompressoren, die für einen Dauerlauf geeignet sind.

Schraubenkompressoren haben meist eine variabel einstellbare Nachlaufzeit. Bei Erreichen des Ausschaltdrucks läuft der Kompressorantrieb im Leerlauf und der Verdichtungsprozess wird unterbrochen. Wird innerhalb der eingestellten Nachlaufzeit der Einschaltdruck nicht erreicht, wird der Motor abgeschaltet. Durch die Nachlaufzeit soll sichergestellt werden, dass die zulässige Schalzhäufigkeit eingehalten wird. Moderne Kompressoren können auch mit einer lastabhängigen Regelung ausgestattet sein. Je nach Luftverbrauch wählt die Steuerung zwischen Nachlaufregelung und Aussetzbetrieb aus.

Bei der **stetigen Regelung**, auch kontinuierliche Regelung genannt, wird der Netzdruck (Druck am Kompressorausgang und idealerweise im gesamten Netz) nahezu konstant gehalten und die Liefermenge wird dem jeweiligen Bedarf angepasst. Dies kann durch verschiedene Methoden mit deutlich unterschiedlichem Leistungsbedarf erreicht werden, wie beispielsweise Drosselregelung oder Drehzahlregelung.

Die **Ventilregelung** wird auch **Drosselregelung** oder **Proportionalregelung** genannt. Durch Drosseln des Ansaugquerschnittes wird nur so viel Luft gefördert, wie gebraucht wird. Der Kompressor läuft dabei durchgehend ohne abzuschalten. Diese, in der Anschaffung sehr preiswerte Lösung, hat jedoch erhebliche wirtschaftliche Nachteile im Betrieb: Der häufig verwendete Name „Proportionalregelung“ ist irreführend, denn der Leistungsbedarf sinkt nicht proportional zur Liefermenge. Am Ende des praktisch nutzbaren Regelbereichs bei 50 % Volumenstrom werden immer noch 80 % der Nennleistung benötigt, bei Nullförderung liegt der Energiebedarf noch bei 70 % (siehe Abbildung 1.2c).

Die Drosselregelung ist deshalb bei stationär betriebenen Kompressoren wirtschaftlich nicht zu empfehlen.

Bei der **Drehzahlregelung**, auch **Teillastregelung** oder **Frequenzrichterregelung** genannt, wird die Anpassung des Volumenstroms an den aktuellen Verbrauch über eine entsprechende Veränderung der Drehzahl erreicht. Dies führt zu einer in etwa proportionalen Veränderung des Volumenstroms. Die Drehzahlregelung kommt der Idealkurve des regelbaren Volumenstroms am Nächsten. Sie weist besonders im Bereich unterhalb 80 % des Volumenstroms eindeutige energetische Vorteile auf. Drehzahlregelungen besitzen eine große Regelspanne zwischen 20 % und 100 % des Nennvolumenstroms. Unterhalb 20 % des Volumenstroms ist eine Drehzahlreduktion nicht weiter möglich. Eine gute Energieausnutzung liegt bei einer Auslastung zwischen 40 und 80 % vor. Unter 40 % Auslastung arbeitet der Kompressor unwirtschaftlich. Bei 100 % Volumenstrom müssen gegenüber anderen Regelungsarten zusätzlich die Verluste des Frequenzumformers gedeckt werden. Deshalb ist der Leistungsbedarf im Volllastbetrieb bei drehzahlgeregelten Kompressoren höher (z.B. um ca. 4 % bei einem 90 kW Kompressor). Das spezifische Leistungsverhalten eines drehzahlgeregelten Kompressors in Abhängigkeit von der Auslastung zeigt die Abbildung 1.2b.

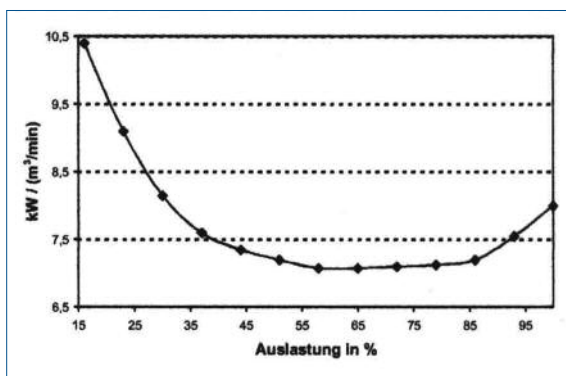


Abbildung 1.2b: Spezifisches Leistungsverhalten eines drehzahlgeregelten Kompressors (aus: Druckluft effizient Fakten V Steuerung)

## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

Bei Drehkolbenverdichtern im Spitzenlastbetrieb ist die Drehzahlregelung häufig die beste Wahl, trotzdem sollte die Grundwirtschaftlichkeit nicht außer Acht gelassen werden. Wenn ein drehzahl geregelter Kompressor ausgewählt wird, dann muss der Regelbereich berücksichtigt und darauf geachtet werden, wie oft der Verdichter im Leistungsoptimum arbeitet. Weitere Informationen zur Größenauswahl bei Spitzenlastkompressoren im Verbund finden Sie in 1.2.3.

Empfehlung: Soll ein Kompressor mit einer stetigen (instationären) Regelung gewählt werden, so ist die Drehzahlregelung dringend zu empfehlen, da hier im sinnvollen Regelbereich der Energieverbrauch zur Liefermenge annähernd proportional sinkt. Im Gegensatz dazu ist die Drosselregelung für stationär betriebene Kompressoren wirtschaftlich nicht zu raten. Denn hier verringert sich der Energiebedarf nicht proportional zur Liefermenge.

Die verschiedenen Regelungsvarianten sind mit ihrer relativen Leistungsaufnahme in der Abbildung 1.2c der Idealkurve gegenüber gestellt.

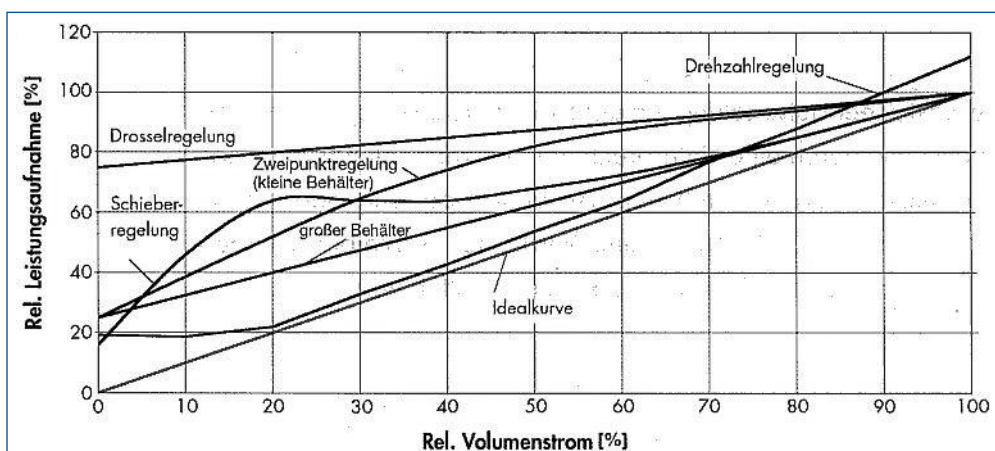


Abbildung 1.2c: Überblick über die relative Leistungsaufnahme verschiedener Regelkonzepte (aus: Energieagentur NRW, Seminarunterlagen Druckluft)

### 1.2.2 Steuerung mehrerer Kompressoren im Verbund

Bei übergeordneten Steuerungen für mehrere Kompressoren gibt es deutliche Unterschiede in der Wirkungsweise und Effizienz. Dabei ist von Bedeutung

1. wie die Kompressoren geschaltet sind:
  - über eigene Druckschalter (aus der Druckkaskade folgt ein hohes Druckniveau)
  - über einen gemeinsamen Drucksensor (geringe Druckdifferenz von wenigen Zehntel bar für alle Kompressoren und dadurch meist eine Reduzierung des Betriebsdruckes von bis zu mehreren bar)
2. wie der Kompressor ausgewählt wird:
  - zyklisches Vertauschen (Grundlastwechselschaltung)
  - zeitabhängiges Festlegen der Kompressoren in Rangstufen (bei Schichtbetrieb mit unterschiedlichem Druckluftbedarf; Reihenfolgeschaltung, speicherprogrammierbare Steuerung)

Die **Grundlastwechselschaltung (Kaskadensteuerung)** basiert darauf, dass jedem Kompressor von der Steuerung ein anderer Schaltbereich zugeordnet wird. Diese werden dann hintereinander angeordnet, so dass je nach Netzdruck bestimmte Kompressoren geschaltet werden. Bei einem geringen Druck wird nur ein Kompressor eingeschaltet, bei entsprechend höherem werden mehrere Kompressoren zugeschaltet.

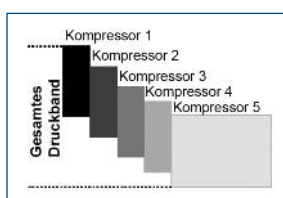


Abbildung 1.2d: Kaskadenregelung (aus Druckluft effizient, Fakten V Steuerung)

Kompressoren gleicher Größe werden wechselweise im Grund-, Mittel- und Spitzenlastbetrieb geschaltet (zyklischer Tausch). Dadurch wird eine gleichmäßige Auslastung, jedoch keine bedarfsgerechte Auswahl bewirkt. Bei Grundlastwechselschaltungen hat jeder Kompressor im Allgemeinen einen eigenen Druckschalter. Bei dieser Schaltung kann keine Energie gespart werden. Dazu muss eine Grundlastwechselschaltung mit einem gemeinsamen Drucksensor installiert werden, damit das Druckband möglichst schmal ist.

Bei der **Reihenfolgeschaltung (speicherprogrammierbare Steuerung)** werden die Kompressoren nach einer vorgegebenen Reihenfolge eingeschaltet. Bei der speicherprogrammierbaren Steuerung können verschiedene Reihenfolgen für verschiedene Tageszeiten (Schichten) einprogrammiert werden. Diese werden nach einer Wochenverbrauchsmessung möglichst energieoptimiert für den typischen Tages- und Wochenverlauf ausgewählt. Dadurch werden Leerlaufzeiten reduziert. Die Druckaufnahme erfolgt über einen gemeinsamen Drucksensor. Dadurch kann die maximale Druckhöhe meist um mehrere bar reduziert werden. Bei sich verändernden Bedingungen passt sich das System nicht automatisch an, sondern es muss neu einprogrammiert werden. Erfolgt dies nicht, erhöhen sich die Leerlaufzeiten, weil nicht die ideale Kompressorgröße ausgewählt wird.

Die Energieersparnis bei der **übergeordneten intelligenten Steuerung** wird dadurch erreicht, dass der maximale Betriebsdruck deutlich gesenkt wird. Dies kann durch ein schmales Druckband statt einer Druckkaskade und durch Leerlaufreduzierung erfolgen. Nur der jeweils kleinste Kompressor schaltet zwischen den Schaltpunkten, die anderen Kompressoren laufen entweder zu 100 % oder stehen still. Dadurch wird der Leerlaufbetrieb minimiert. Eine Auswertung der Verbrauchsdaten über den PC ist meist möglich.

Zur **Steuerung mehrerer Kompressoren im Verbund** ist deshalb die **übergeordnete intelligente (verbrauchserkennende) Steuerung** zu empfehlen.

Aber: Eine intelligente übergeordnete Steuerung kann nur so gut sein wie die zugrunde liegenden Kompressoren. Die Kompressorgößen müssen so aufgeteilt werden können, dass sich der ergebende Netzdruck möglichst gut an den tatsächlichen Bedarf anpasst. Dies ist Voraussetzung für einen minimalen Energieverbrauch.

### 1.2.3 Kombination von Verdichtergrößen

Bei der Auswahl neuer Verdichter sollten folgende Aspekte bedacht werden:

- Die Auswahl der Verdichtergrößen ist abhängig von der Bedarfsstruktur. Bei konstanter Abnahme von Druckluft werden große Verdichter gewählt, bei stark wechselndem Bedarf unter Umständen mehrere kleine Verdichter. Eine Kombination verschiedener Kompressorgößen ist dann sinnvoll, wenn die Steuerung auf das Tages- und Wochenverbrauchsprofil abgestimmt wird. In der Regel wählt man große Grundlast- und angepasste Stand-by-Maschinen, die mit kleineren Spitzenlastmaschinen kombiniert werden. Idealerweise sollte für jeden typischen Druckluftbedarf eine Kombination zur Verfügung stehen, bei welcher der Leerlauf gegen Null geht.
- Die Liefermenge der Spitzenlastmaschinen muss zusammen mindestens gleich oder besser größer sein als die Liefermenge der Grundlastmaschine. Nur so ist eine feine Abstufung mit Einsparung von Leerlaufzeiten möglich.
- Eine Zuordnung der Kompressoren zu Grund- / Spitzenlast oder Stand-by-Betrieb erfolgt durch eine intelligente Steuerung.

**Alternative: Spitzenlast durch drehzahlgeregelten Kompressor abdecken.**

Drehzahlgeregelte Kompressoren sind im Spitzenlastbetrieb häufig die Methode der Wahl. Für die richtige Größenauswahl des drehzahlgeregelten Kompressors gilt: Der Liefermengen-Regelbereich muss größer sein als die Liefermenge der unterhalb des Spitzenlastbereichs zuschaltenden Grundlastmaschinen. Drehzahlgeregelte Kompressoren haben einen höheren Anschaffungspreis (sie sind etwa 15 % teurer bei 90 kW). Für eine gute Amortisation sind lange Laufzeiten mit einem überwiegenden Betrieb im Bereich mittlerer Auslastung notwendig. Sollte der Kompressor nicht im optimalen Regelbereich arbeiten oder an veränderte Luftverbräuche angepasst werden müssen, dann ist diese Alternative unrentabel.

- Bei großen Betrieben mit mehreren separaten Druckluftnetzen kann es vorkommen, dass in einem Bereich des Werks ein Kompressor mit einer für ein anderes Netz besser angepassten Liefermenge steht. Hier könnte ein Austausch von Kompressoren zu der gewünschten Verringerung von Leerlaufzeiten führen.

## 1.2.4 Einfluss der Druckbehältergröße auf die Steuerung

Um die Schaltspiele zu begrenzen und damit auch die Nachlaufzeiten optimal einstellen zu können, sind drei Faktoren zu berücksichtigen: die Größe des Kompressors, die Größe des Druckluftbehälters und die gewählte Schaltdifferenz Einschalt- druck – Ausschalt- druck. Je größer der Druckluftbehälter und damit die Schaltdifferenz gewählt werden, desto länger arbeitet der Kompressor am Stück bzw. desto seltener muss er schalten. Ein ausreichend dimensionierter Druckluftbehälter sorgt also für eine Reduzierung von Verschleiß und Energieverbrauch.

Als Faustformel gilt:

$$\text{Behältergröße [m}^3\text{]} = \frac{\text{Kompressorförderleistung pro Minute}}{3}$$

(zugeschnittene Größengleichung; einzusetzen ist die Kompressorförderleistung des größten bzw. schaltenden Kompressors)

Mit untenstehender Formel kann etwas genauer berechnet werden, wie groß der Druckluftbehälter dimensioniert werden sollte. Der berechnete Wert entspricht der Minimalgröße.

$V_B = \frac{\dot{V}_1 \cdot (x - x^2)}{z \cdot \Delta p}$	<b>Kompressor- leistung</b>	<b>Gängige z-Werte/h bei Motorschaltung:</b>
	7,5 kW 30 kW 110 kW 250 kW	30 15 8 4

**$V_B$**  = Volumen des Druckluftbehälters [m<sup>3</sup>]  
 **$\dot{V}_1$**  = Liefermenge des schaltenden Kompressors [m<sup>3</sup>/h]  
 **$\dot{V}_2$**  = Spitzenverbrauch minus Durchschnittsverbrauch [m<sup>3</sup>/h]  
 **$x$**  =  $\dot{V}_2 : \dot{V}_1$  = Auslastungsfaktor [m<sup>3</sup>/h] /  $\dot{V}_1$   
 **$z$**  = zulässiges Schaltspiel [1/h]  
 **$\Delta p$**  = Druckdifferenz EIN/AUS [bar]

**Ein "Daumenwert":  $(x - x^2) \approx 0,25$**

Abbildung 1.2e: Dimensionierung zentraler Druckluftbehälter  
(aus: Druckluft effizient, Fakten V Steuerung)

Der Druckluftbehälter sollte an einem möglichst kühlen Platz aufgestellt werden. Wenn der Druckluftbehälter vor der Auf- bereitung angeordnet ist, kann darin bereits Kondensat abgeschieden werden.

## 1.2.5 Einschaltdauer von Kompressoren

Der Kompressor sollte nur im Verbrauchszeitraum eingeschaltet sein. Wenn kein echter Verbraucher vorhanden ist, arbeitet der Kompressor nämlich für die Leckagen. Deshalb ist zu prüfen, ob die Kompressoren außerhalb der Betriebszei- ten ausgeschaltet werden können. In diesem Fall kann allerdings ein Druckhaltesystem notwendig sein. Dieses wird zu Betriebsbeginn langsam geöffnet, damit die Aufbereitung nicht überfahren wird.



## 1.3 Aufbereitung

Grundlage für die Auswahl der Aufbereitungssysteme ist die Anforderung an die Qualität (Restölgehalt, Restfeuchte, Reststaub, Keimfreiheit) der Druckluft. Die Qualität wird anhand der Norm ISO 8573-1 festgelegt.

Die Aufbereitung soll die Verbraucher schonen, eine hohe Produktqualität gewährleisten und dem Schutz der Umwelt dienen. Gleichzeitig werden Leckagen vorgebeugt, die durch Korrosion an den Rohrleitungen entstehen. Dadurch ist der Wartungsaufwand geringer.

Zur Aufbereitung werden Trockner, Filter oder Flüssigkeitsabscheider (Kondensatabscheider) eingesetzt. Beim Einsatz von Aufbereitungsmitteln ist zu beachten, dass dadurch auch die Druckverluste erhöht werden und damit mehr Energie aufgewendet werden muss.

Die Aufbereitung kann sowohl zentral für die gesamte erzeugte Druckluft als auch dezentral bei teilweise höheren Anforderungen erfolgen. Auch bei der dezentralen Aufbereitung müssen die Filter regelmäßig überprüft und gewartet werden.

### 1.3.1 Trockner

Trockner dienen dazu, in der Luft enthaltenes Wasser bzw. Öl zu entfernen. Man unterscheidet zwischen Kälte- und Adsorptionstrocknung, sowie Membrantrocknung. Letztere spielt eine untergeordnete Rolle und wird deshalb hier nicht weiter behandelt.

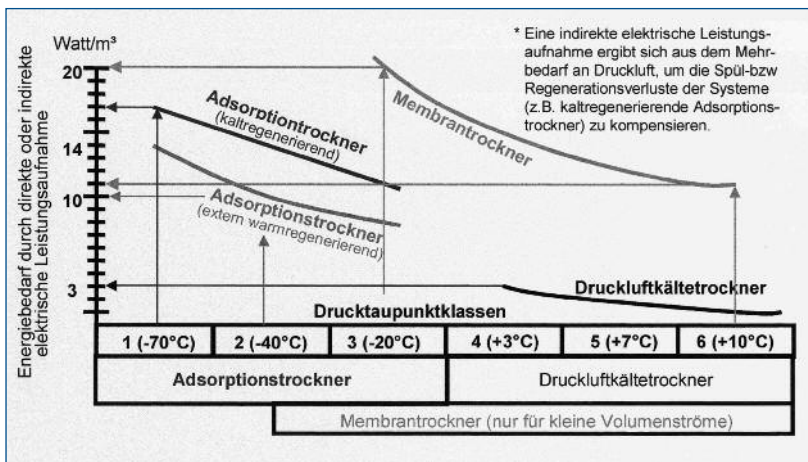
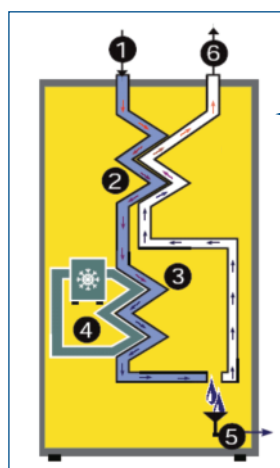


Abbildung 1.3a: Verfahren der Drucklufttrocknung (aus: Druckluft effizient, Fakten VI Aufbereitung)

Die Funktionsweise eines Kältetrockners ist in Abbildung 1.3b schematisch dargestellt.



Das Gemisch aus Luft mit Wasser- und Öldampf tritt in den Trockner ein (1) und wird mittels Wärmetauscher (2, 3, 4) in zwei Stufen abgekühlt. Infolgedessen kondensiert der Wasserdampf und das Öl koaguliert. Die so entstandenen Tropfen werden anschließend abgeschieden (5).



Abbildung 1.3b: Funktionsweise von Kältetrocknern

## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

Kältetrockner werden bevorzugt eingesetzt, wenn ein Drucktaupunkt von  $+3^{\circ}\text{C}$  ausreichend ist. Der Drucktaupunkt ist die Temperatur, auf die verdichtete Luft abgekühlt werden kann, ohne dass Kondensat ausfällt. Er ist abhängig von Verdichtungsdruck. Wegen des geringen Druckverlustes sind Kältetrockner wirtschaftlicher als Adsorptionstrockner.

Ist das Druckluft-Netz nicht frostgeschützt, so werden Adsorptionstrockner eingesetzt. Diese eignen sich auch für einen niedrigeren Taupunkt.

Der wesentliche Unterschied zwischen Adsorptions- und Kältetrockner ist, dass beim Adsorptionstrockner ein Trockenmittel benötigt wird.

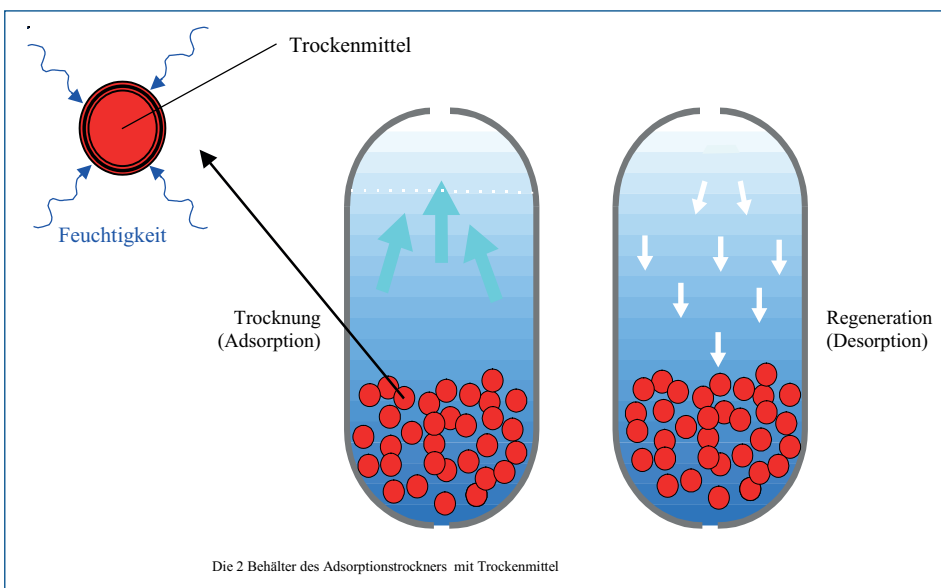


Abbildung 1.3c: Funktionsweise eines Adsorptionstrockners

Das Trockenmittel adsorbiert die Feuchtigkeit und muss regelmäßig unter Energieaufwand regeneriert werden. Deswegen haben Adsorptionstrockner in der Regel einen deutlich höheren Energiebedarf als Kältetrockner, wie der Abbildung 1.3a zu entnehmen ist. Die Regeneration kann kalt oder warm erfolgen. Beim Einsatz trockenlaufender Kompressoren kann jedoch die Kompressorwärme mittels Wärmerückgewinnung zur Regeneration des Trockenmittels für den Adsorptionstrockner verwendet werden. Dieses Verfahren ist sehr wirtschaftlich und der minimal erreichbare Drucktaupunkt liegt hier bei ca.  $-30^{\circ}\text{C}$ . Diese Variante ist den beiden anderen Varianten (Kältetrockner, Adsorptionstrockner ohne Wärmerückgewinnung) in Abbildung 1.3d gegenüber gestellt.

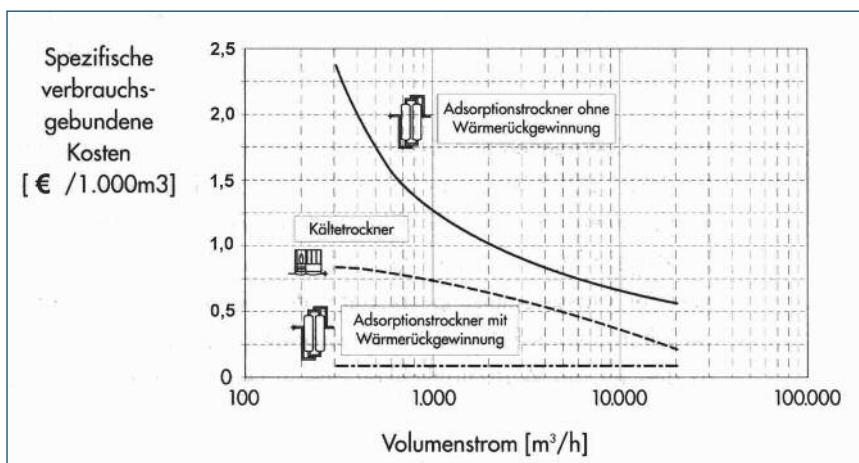


Abbildung 1.3d: Betriebskosten für verschiedene Trocknerbauarten  
(aus: Energieagentur NRW, Seminarunterlagen Druckluft)

**Fazit:** Bei trockenlaufenden Verdichtern sollte der Adsorptionstrockner mit Wärmerückgewinnung gewählt werden, in allen anderen Fällen, wo möglich, der Kältetrockner.

Herkömmliche Trockner sind mit einer Durchlaufregelung ausgestattet, d.h. die darin befindlichen Kälteaggregate laufen ständig. Es gibt aber auch Energiespartrockner, die geregelten Trockner, die nur dann Energie verbrauchen, wenn Luft darüber gefahren wird. In Arbeitspausen, Zeiten geringerer Auslastung und Stillstandszeiten gehen diese Trockner in den Aussetzbetrieb. Die Einsparungen sind dabei umso höher, je häufiger die Zeiten geringerer Auslastung sind.

Im Vergleich zu einer herkömmlichen Durchlaufregelung lassen sich bis zu 90 % der Energiekosten des Trockners sparen. Nach einer Modellrechnung der Fa. Kaeser hat ein geregelter Trockner mit einem Durchsatzvolumen von 1,25 m<sup>3</sup>/min bei 7 bar (ü) und 10 Jahren Einsatzzeit ein Sparpotenzial von 1.304 € bzw. 130 Tonnen CO<sub>2</sub> (bei 1000 Volllaststunden pro Jahr, 0,06 €/kWh, 0,6 t CO<sub>2</sub>/1000kWh).

Auch bei einem Trockner ohne Energiesparregelung kann es Einsparpotenziale geben: Haben Betriebe über Nacht keinen Druckluftbedarf und die Kompressoren können ausgeschaltet werden, kann auch der Trockner außer Betrieb gehen. Er muss jedoch mindestens 15 Minuten vor den Kompressoren wieder eingeschaltet werden.

### Installation des Trockners vor oder nach dem Druckbehälter:

In der Regel sollte der Trockner nach dem Druckbehälter installiert sein. Das hat den energetischen Vorteil, dass schon ein Großteil des Kondensats (ca. 70 %) im Druckbehälter abgeschieden wird und die Druckluft mit einer niedrigeren Temperatur in den Trockner eintritt.

Es ist jedoch zu beachten, dass der Trockner bei schlagartig großer Luftentnahme aus dem Druckbehälter überlastet sein kann. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, den Kältetrockner vor dem Druckbehälter anzuordnen bzw. bei großen Netze einen Druckbehälter dezentral vor Großverbrauchern aufzustellen.

### 1.3.2 Filter

Für die Aufbereitung gilt: Soviel wie nötig, aber so wenig wie möglich. Jeder zusätzliche Filter führt zu einem weiteren Druckabfall und muss gewartet werden. Je höher der Filtrationsgrad, desto höher ist auch der dadurch entstehende Differenzdruck. Die Abbildung 1.3e zeigt, welche Energiekosten der Kompressor verursacht, um den Druckabfall auszugleichen.

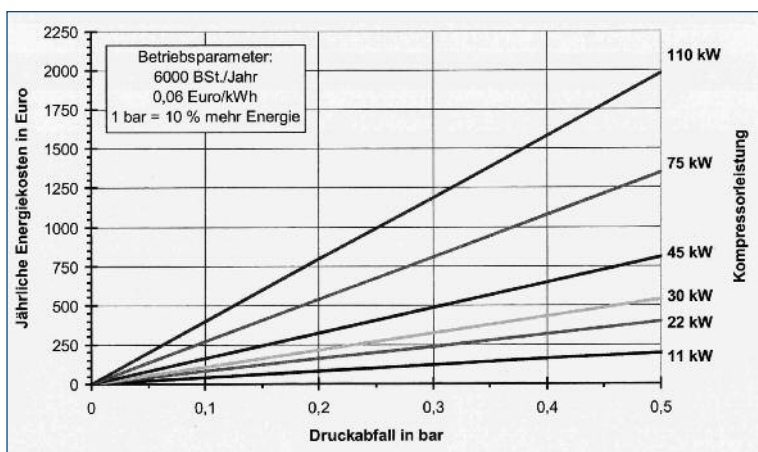


Abbildung 1.3e: Energiekosten durch Druckabfall (aus: Druckluft effizient, Fakten VI Aufbereitung)

Deshalb sollte ein Filter mit einem möglichst geringen Differenzdruck gewählt und die Filterelemente rechtzeitig ausgetauscht werden.

Die derzeit auf dem Markt erhältlichen Filterelemente sind mit einer Anzeige ausgestattet, die über ein von „grün“ auf „rot“ gehendes Feld signalisiert, dass der Filter getauscht werden muss oder den Druckabfall direkt in bar anzeigt. Der Druckabfall über dem Filter sollte nicht mehr als 0,1 bar betragen.

# Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

## 1.3.3 Kondensatableiter

Bei der Verdichtung fällt Wasser, das sich in der Ansaugluft befindet, als Kondensat aus. Es ist verunreinigt mit Mineralölaerosolen, unverbrannten Kohlenwasserstoffen, Staub- und Schmutzpartikeln aus der Ansaugluft, Kühl- und Schmieröl aus dem Kompressor, sowie Rost und Abrieb aus dem Leitungsnetz. Das anfallende Kondensat muss entsorgt werden, denn sonst reißt der Luftstrom das Kondensat zurück ins Leitungsnetz.

Bei den Kondensatableitern gibt es verschiedene Bauformen: Kondensatableiter mit Schwimmersteuerung, mit Magnetventil oder mit Füllstandsmessung, sowie die Ausführung als handbetätigtes Ventil.

Kondensatableiter sind als Störquellen ersten Ranges bekannt. Schwimmergesteuerte Ableiter verkleben leicht, zeitgesteuerte Kondensatableiter sind häufig falsch eingestellt und „verbrauchten“ dadurch unnötig viel Druckluft. Unbedingt zu empfehlen sind deshalb elektronisch niveauregulierte Kondensatableiter. Kondensatableiter müssen regelmäßig auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft und gewartet werden.

Das anfallende Kondensat muss ordnungsgemäß entsorgt werden. Das Kompressorkondensat ist bei der Einleitung genehmigungspflichtig gemäß §19 Wasserhaushaltsgesetz. Ölhaltiges Kondensat muss vor der Einleitung behandelt werden. Dazu sind verschiedene Aufbereitungssysteme zur Öl- Wasser-Trennung am Markt erhältlich. Alternativ kann das Kondensat auch als gefährlicher Abfall entsorgt werden. Bei ölfreien Verdichtern kann das Kondensat mit Genehmigung ohne weitere Behandlung in die Kanalisation eingeleitet werden.

## 1.4 Messtechnik

Die Messtechnik im Bereich der Druckluftverwendung hat verschiedene Funktionen:

Einerseits können die Druckhöhen und Druckdifferenzen im Netz gemessen und beurteilt werden. Andererseits wird auch die Druckluftqualität ermittelt. Daraus lässt sich ableiten, ob die Aufbereitung optimiert werden muss.

Im Netz kann der Druck und der Volumenstrom gemessen werden.

Die **Druckmessung** dient dazu, die Kompressoren und Kompressorstationen zu steuern und zu regeln. Dafür gibt es folgende Messgeräte:

- **Membrandruckschalter:** Ein Membrandruckschalter erfasst den Druck in der Leitung und leitet die Messwerte in elektronischer Form weiter. Die Geräte werden allerdings mit zunehmender Einsatzdauer ungenauer, brauchen viel Platz und benötigen eine hohe Schaltdifferenz.
- **Kontaktmanometer:** Dieses Messgerät wird auch zum Überwachen von Filtern eingesetzt. Es hat den Nachteil, dass der optimale Messbereich nahe am Arbeitsbereich liegen sollte. Außerdem müssen die Kontakte regelmäßig neu eingestellt werden.
- **elektronischer Druckaufnehmer:** Hier wird der Druckwert in ein analoges Signal umgewandelt. Bei dieser Messtechnik ist von Vorteil, dass die Auflösung im maximalen Messbereich sehr hoch ist. Das Gerät ist sehr robust, braucht relativ wenig Platz und hat eine hohe Wiederholgenauigkeit.

Aus dem Ergebnis der **Volumenstrommessung** wird die Förderleistung des Kompressors berechnet. Dies kann sowohl zentral erfolgen, um den Gesamtluftverbrauch zu ermitteln, oder dezentral, um die Einzelverbräuche der Produktionsstätten zu bestimmen.

Dafür gibt es verschiedene Methoden:

### 1. Volumetrische Messung

- Drehgaskolbenzähler: eignet sich im Messbereich zwischen 10 und 90 % Auslastung
- Turbinengaszähler: hohe Genauigkeit im unteren Messbereich

Allerdings haben diese Verfahren den Nachteil, dass die verwendeten Messgeräte sehr wartungsintensiv und durch Druckabfall in der Leitung gefährdet sind.

- ### 2. Kalorimetrische Messung:
- Diese Messung wird beispielsweise mit einem Hitzedrahtanemometer durchgeführt. Allerdings beeinflussen vom Auslegungspunkt abweichende Temperaturen, Feuchtigkeits- und Druckschwankungen das Ergebnis.

3. Karmansche Wirbelstraße: Ein leitungsinterner Körper erzeugt Wirbel, die analog zum Volumenstrom variieren und gemessen werden können. Schwingungen im Leitungsnetz wirken sich hierbei nachteilig aus.

4. Ultraschallmessung

Nähere Informationen zur Volumenstrommessung finden Sie bei Bonfig, „Technische Durchflussmessung“, Vulkan Verlag, Essen, 3. Auflage 2004.

## 1.5 Leckagen

### 1.5.1 Leckagen als Großverbraucher

Leckagen in Druckluftsystemen erreichen oft ungeahnte Größenordnungen und sind somit wesentliche Energieverschwender und unnötige Kostenfaktoren. Wegen ihrer Unauffälligkeit, Ungefährlichkeit sowie mangelnden Wissens über die Höhe der verursachten Kosten werden sie jedoch häufig vernachlässigt. Sie stellen im Durchschnitt das größte Einsparpotenzial bei Druckluftanwendern dar. Den Anteil des Druckvolumens, der durch Leckagen verloren geht, bezeichnet man als Leckagerate. Diese sollte bei kleineren Industriernetzen 5 %, bei größeren 10 % und bei sehr großen Netzen 13 - 15 % nicht überschreiten. Unterhalb dieser Leckagerate liegt der Aufwand zur Beseitigung meist über dem Einsparpotenzial.

Die Teilnehmer des IHK-Unternehmenszirkels „Kosten- und energieeffiziente Druckluftsysteme“ ermittelten in ihren Industriebetrieben folgende Leckageraten:

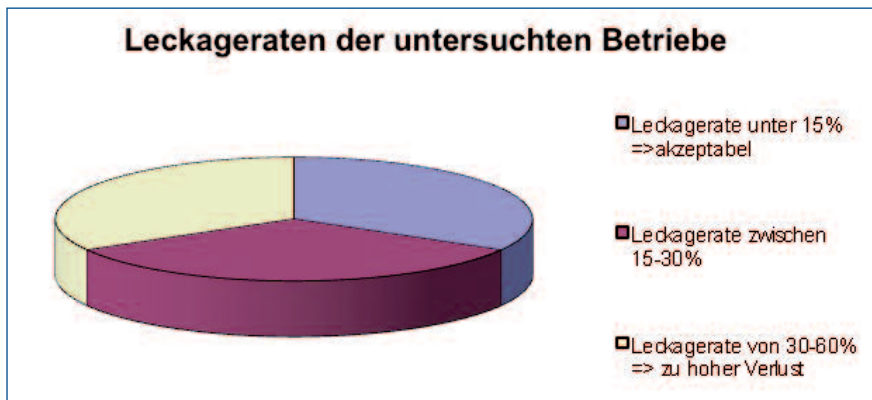


Abbildung 1.5a: Leckageraten der untersuchten Betriebe

Die jährlichen Leckagekosten lagen in größeren Betrieben bei mehreren 10.000 € bis über 100.000 € pro Jahr!

Leckagen sind von der Anwendung über die Verteilung bis zur Druckluftherzeugung, also in allen Bereichen des Druckluftnetzes, zu finden. Den größten Teil machen jedoch häufig Undichtigkeiten im ersten Abschnitt aus, also undichte Steckkupplungen, Schläuche, Armaturen, defekte Werkzeuge, innere Leckagen bei Fertigungsanlagen, etc. Bei den Rohrleitungssystemen können insbesondere bei alten, mit Hanf abgedichteten Stahlleitungen größere Leckagen auftreten. Auch in den Kompressorstationen können Leckagen erheblichen Ausmaßes vorhanden sein (schwimmgesteuerte Kondensatableiter, undichte Ventile in Kompressoren etc.).

Die Tabelle 1.5a verdeutlicht die Kosten, die durch Leckagen verursacht werden.

Lochdurchmesser (mm)	Luftverlust bei 6 bar (l/s)	Luftverlust bei 12 bar (l/s)	Energieverlust kWh bei 6 bar	Energieverlust kWh bei 12 bar	Kosten bei 6 bar	Kosten bei 12 bar
1	1,2	1,8	0,3	1,0	144 €	480 €
3	11,1	20,8	3,1	12,7	1.488 €	6.096 €
5	30,9	58,5	8,3	33,7	3.984 €	16.176 €
10	123,8	235,2	33,0	132,0	15.840 €	63.360 €

Tabelle 1.5a: Jährliche Energiekosten durch Leckage

## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

Die regelmäßige Bestimmung der Leckagerate, deren Ortung und Beseitigung ist deshalb ein wesentlicher Faktor zur Kostensenkung. Parallel zur Leckagesuche durch Instandhaltungspersonal sollten die Mitarbeiter vor Ort über die Kosten durch Leckagen informiert werden. Zur Verfügung gestellte, einfache und einheitliche Markierungsmöglichkeiten erleichtern den betrieblichen Ablauf.

Dieses Beispiel für eine einfache Markierungsmöglichkeit von Druckluftleckagen wurde von der Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt.



Abbildung 1.5b: Markierungsmöglichkeit einer Druckluftleckage

### 1.5.2 Leckagenvermeidung durch Absperrungen / Abschaltungen

Leckagen „arbeiten“ rund um die Uhr. Deshalb sollte geprüft werden, ob außerhalb der Produktion nicht einer der folgenden Maßnahmen verwirklicht werden kann:

- Kompressoren über Nacht bzw. am Wochenende ausschalten
- Falls eine komplette Abschaltung der Kompressoren über Nacht nicht möglich ist, sollte eine Druckabsenkung außerhalb der Betriebszeit in Erwägung gezogen werden: Hierdurch verringert sich die Leckagemenge und demzufolge auch der Energiebedarf, denn bei einer Druckabsenkung um ein bar sinkt der Energieverbrauch um 6 - 10 %.
- Ist die Produktion nicht in allen Bereichen durchgängig, sollten Absperrereinrichtungen für ganze Hallenabschnitte sowie einzelne Anlagen / Entnahmestellen eingebaut werden (möglichst automatisch).

### 1.5.3 Leckageverringering durch Absenken des Netzdruckes

Die absolute Leckagemenge [Nm<sup>3</sup>/min] eines Druckluftnetzes ist direkt proportional zum absoluten Netzdruck in den Leitungen. Kann man den mittleren Netzdruck z.B. von 8 bar auf 7 bar absenken, so geht die Leckagemenge um 1/8 zurück, ohne dass auch nur ein „Loch“ im Netz beseitigt wurde.

## 1.6 Druck reduzieren und Druckverluste minimieren

### 1.6.1 Druckeinstellung bei Kompressoren

Zu Beginn einige Begriffserläuterungen:

Beim Druck unterscheidet man den absoluten Druck vom Überdruck. Beim Überdruck ( $\ddot{u}$ ) (auch effektiver Druck genannt) handelt es sich um den über dem atmosphärischen Druck liegenden, in der Technik nutzbaren Druck (Manometerdruck). Der **absolute Druck** ist die Summe aus dem atmosphärischen Druck – erzeugt durch das Gewicht der Lufthülle, die auf uns ruht – und dem Überdruck.

Wenn in der Drucklufttechnik allgemein und in den folgenden Ausführungen über Drücke gesprochen wird, ist – soweit nicht anders genannt – der effektive (Über-)Druck gemeint. Bei Kompressoren unterscheidet man zwischen dem Einschalt- und dem Ausschalt-Druck. Der **Einschalt-Druck** ist die Druckhöhe, bei der sich der Kompressor einschaltet. Der Kompressor fördert bis zum Erreichen des **Ausschalt-Druckes**.

Der Ausschalt-Druck sollte so niedrig wie möglich gewählt werden. Jedes bar Höherverdichtung erhöht den Energieverbrauch um ca. 6 - 10 %. Der Kompressorenüberdruck sollte daher auf das notwendige Minimum begrenzt werden. Er setzt sich zusammen aus dem benötigten Druck beim Anwender, den Druckverlusten in Aufbereitung und Leitung, sowie der Schaltdifferenz. Nicht selten wird jedoch mit einem höheren Druck als nötig gefahren, weil Sicherheitszuschläge mit eingerechnet werden, hohe Druckverluste im System vorliegen oder ein angeblich höherer Druckbedarf vorliegt.

Die folgenden Möglichkeiten sollen aufzeigen, wie die Anlage mit einem geringeren Druck betrieben und damit Energie eingespart werden kann:

- Druckverluste in der Leitung und im Leitungszubehör gering halten
- notwendiges Druckniveau ermitteln und nicht überschreiten
- größeren Druckluftbehälter als Puffer bei stark schwankendem Bedarf einbauen
- bei mehreren Kompressoren: übergeordnete Steuerung mit einem gemeinsamen Drucksensor für alle Kompressoren statt einer Druckkaskade über eigene Druckschalter; die Druckspreizung bei einer Druckkaskade beträgt oftmals mehrere bar Druckdifferenz und kann auf ein schmales Druckband von wenigen zehntel Bar reduziert werden
- bei einzelnen Verbrauchern mit höherem Druckniveau: Wirtschaftlichkeit eines Nachverdichters oder eines separaten Hochdrucknetzes prüfen
- für Niederdruckanwendungen (2-2,5 bar(ü), z.B. Blasen Kühlen, Fördern), die am normalen 7-bar-Netz hängen, gegebenenfalls eine separate Niederdruckversorgung mit rotierenden Verdränger- oder Turbokompressoren aufbauen
- regelmäßige Wartung durchführen (siehe 1.8)
- Druckabsenkung nachts oder am Wochenende prüfen, wenn ein Abschalten nicht möglich ist

## 1.6.2 Druckverluste in der Leitung und im Leitungszubehör

Hohe Druckverluste erhöhen entweder den erforderlichen Druck in der Leitung, oder die Leistung der Druckluftwerkzeuge ist verringert. Bei einem Druckabfall von 6 bar auf 5 bar sinkt die Leistung eines Werkzeuges um 30 %. Die Leistungsverluste der Werkzeuge haben eine Verlängerung der Arbeitszeiten zur Folge und erhöhen darüber die Arbeitskosten. Maßnahmen zur Verringerung der Druckverluste amortisieren sich also meist innerhalb kürzester Zeit.

Druckverluste entstehen u.a. durch zugesetzte bzw. zu viele Filter, zu gering dimensionierte Leitungen oder Schläuche, zu viele Zwischenstücke, schlecht (winkelig) verlegte Leitungen, zu lange Schläuche, insbesondere Spiralschläuche, schlechtes Leitungszubehör mit hohem Druckabfall und schlechter Durchflusskapazität.

Als Faustregel gilt: Der Druckabfall vom Kessel bis zum Verbraucher sollte ein bar nicht übersteigen (0,1 bar in dem Leitungsnetz, 0,9 bar in dem Anschlusszubehör wie Schläuche, Kupplungen, Filter, Öler).

Abbildung 1.6a zeigt typische Verursacher von Druckabfällen im Rohrleitungsnetz.

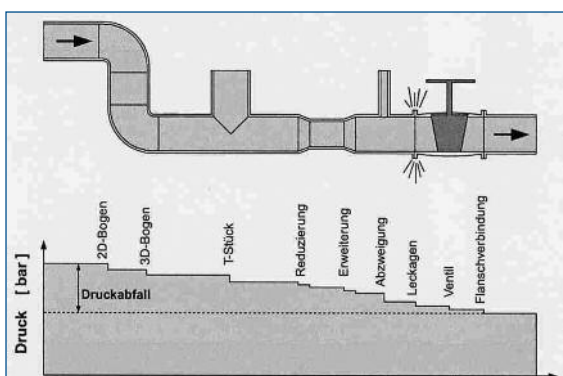


Abbildung 1.6a: Druckabfall im Rohrleitungsnetz  
(aus: Bierbaum, U., Druckluftkompendium)

## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

Bei einem hohen Druckabfall ist eine genauere Analyse des Rohrleitungsnetzes unerlässlich. Es genügt meist, Engpässe zu beseitigen und damit im gesamten Netz Verbesserungen herbeizuführen. Oftmals betragen die einmaligen Sanierungskosten nur einen Teilbetrag der jährlichen Energieverluste. Auslegungsempfehlungen finden Sie in 5.6.

Es ist auch anzumerken, dass aufgrund der Strömungsverhältnisse in Rohren ein größerer Durchmesser einen geringeren Druckverlust verursacht. Daher ist die richtige Dimensionierung der Rohrleitungen entscheidend für den späteren Druckabfall. Sie sollte immer auf Zuwachs ausgelegt werden, da spätere Änderungen ungleich teurer sind.

Bei der Verlegung eines neuen Rohrleitungsnetzes ist zu beachten, dass Leitungen möglichst geradlinig sind. Bei nicht zu vermeidenden Ecken sind lange Bögen und Hosenstücke strömungstechnisch günstiger als Knie- und T-Stücke. Abrupte Querschnittsveränderungen sollten vermieden werden. Hauptleitungen und große Verteilerleitungen sollten mit V-Nähten verschweißt werden, dadurch werden im Inneren der Rohre scharfe Kanten und Schweißperlen vermieden. Stichleitungen im Verteilungsnetz sollten zu Ringleitungen geschlossen werden. Dadurch reduziert sich der Druckabfall und die Durchflussmenge wird verdoppelt.

Bei der Auswahl des Netzzubehörs sollte auf eine hohe Durchflusskapazität und einen geringen Druckabfall geachtet werden.

- Es sollten nur dort Filter und Armaturen eingesetzt werden, wo sie tatsächlich gebraucht werden. Unnötige Filter sind zu entfernen, Filterelemente rechtzeitig zu wechseln (Filter mit Differenzdruckanzeige wählen).
- Es dürfen auf keinen Fall Sitzventile verwendet werden.
- Bei Kugelhähnen ist auf vollen Durchgang zu achten.
- Verteiler sollten mit 1 Zoll Eingängen und jeweils 1/2 Zoll Ausgängen gewählt werden, statt Eingänge und Ausgänge mit 1/2 Zoll zu dimensionieren. Spiralschläuche sollten vermieden werden oder möglichst kurz (max. 3 m) und mit ausreichendem Durchmesser sein.
- Schließlich sollte auf gute Materialien geachtet werden: Messing ist als Material zwar billiger, auf Grund des weicheren Werkstoffs ist der Verschleiß jedoch höher bzw. Verformungen mit daraus resultierenden Leckagen sind wahrscheinlicher. Bei Schläuchen sollte auf gute Qualität geachtet werden, so dass sie biegsam und belastbar sind und nicht so leicht verspröden.
- Schlauchkupplungen müssen gekuppelt „vollen Durchgang“ aufweisen und sollten als Sicherheitskupplungen ausgeführt sein (siehe Abbildung 1.6b).

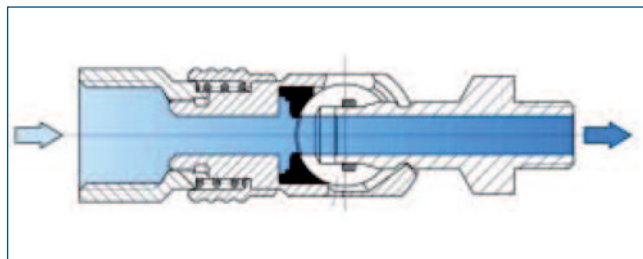


Abbildung 1.6b Schlauchkupplung  
(aus: Druckluft effizient, Fakten IX Druckluftwerkzeuge)

### 1.7 Wärmerückgewinnung

Die gesamte Antriebsenergie, die zur Druckluftherzeugung aufgewendet wird, wird in Wärme umgewandelt. Davon sind theoretisch über 90 % nutzbar. Daher ist es äußerst sinnvoll, Wärmerückgewinnung zu realisieren.

Die Wärmerückgewinnung kann zum Beispiel wie folgt eingesetzt werden:

- Warmluftheizung für Betriebsräume
- Raumtemperierung
- Galvanotechnik
- Warmluft für Trocknungsprozesse
- Einspeisen in Zentralheizungssystem



- Schwimmbeckenaufheizung
- Aufbau von Warmluftschleusen
- Warmwasser für Dusch- und Waschräume
- Nutzwasser für Kantinen und Großküchen
- Vorwärmung von Brennerluft
- Reinigen von Werkstücken
- Regenerationsluft für Adsorptionstrockner
- Reinigungswasser in der Lebensmittelindustrie

Theoretisch sind bei luftgekühlten, ölfreien oder öleingespritzten Kompressoren bis ca. 94 % der Leistungsaufnahme rückgewinnbar, wenn die Warmluft zur Raumheizung eingesetzt wird. Bei allen Öleingespritzten sind bis ca. 72 % nutzbar, wenn eine Wassererwärmung durch Öl- Wasser- Wärmetauscher erfolgt.

Die tatsächlich rückgewinnbare Wärmemenge hängt jedoch von verschiedenen Faktoren ab. Dies sind z.B.

- das Temperaturniveau der Abwärme
- das notwendige Temperaturniveau für den Wärmeverbraucher
- die Gleichzeitigkeit von Wärmefall und -verbrauch
- eine möglichst hohe Anzahl von Nutzungsstunden pro Jahr bei hoher Verdichterauslastung
- die örtliche Nähe von Abwärmeerzeugung und -verbrauch

Prinzipiell ist bei allen Kompressorbauarten eine Wärmerückgewinnung sinnvoll machbar. Je nach Bauweise, Art der Kühlung (Luft / Wasser) und insbesondere im Hinblick auf die betrieblichen Gegebenheiten bieten sich unterschiedliche Varianten an. Im Folgenden sollen die drei Hauptanwendungen kurz erläutert werden:

### **Raumheizung durch Warmluftverwendung:**

Voraussetzung ist ein luftgekühlter Kompressor, über den die Kühlluft gezielt hinweg geführt wird. Die erwärmte Luft kann im einfachsten Fall in benachbarte Räume eingeblasen oder über ein möglichst kurzes Kanalsystem weitergeführt werden. Während der Heizperiode kann nahezu die gesamte Wärme genutzt werden lediglich 4 % Wärme bleiben in der Druckluft. Im Sommer muss die Abwärme durch eine Weiche im Kanal nach außen geführt werden (Klappensteuerung automatisch oder per Hand). Für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung können deshalb nur die Wintermonate herangezogen werden.

### **Heizungswassererwärmung:**

Bei öleingespritzten Schraubenkompressoren wird häufig wegen des höheren Temperaturniveaus zur Wärmerückgewinnung auf den Ölkühler zurückgegriffen. Dazu wird ein Wärmetauscher (in der Regel ein Plattenwärmetauscher) in eine vorhandene Heizwasserleitung eingebaut. Dadurch kann Heizungswasser auf bis zu 70°C erwärmt werden. Dies kann jedoch nur als Ergänzung einer bestehenden Heizungsanlage verwendet werden, da der Kompressor nur dann Heizungswasser erwärmt, wenn er im Lastbetrieb arbeitet.

### **Brauchwassererwärmung:**

Die Erzeugung von Warmwasser in Trinkwasserqualität ist durch den Einsatz von Sicherheitswärmetauschern möglich. Die sichere Bauweise macht ein Vermischen der Medien unmöglich. Warmwasser kann damit auf Temperaturen von ca. 55°C gebracht werden. Im Gegensatz zur Erwärmung von Heizungswasser und der Heizung des Raumes durch Warmluftverwendung ist eine Amortisation uneingeschränkt über das ganze Jahr möglich.

Wie bereits erläutert sollte die Abwärme, wo immer wirtschaftlich realisierbar, genutzt werden. Vorrang haben jedoch die Leckagebeseitigung, die Druckluftsubstitution und effizientere Druckluftverbraucher. Das liegt daran, dass Wärmeenergie wesentlich günstiger ist als elektrische Energie.

# Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

## 1.8 Wartung

Die Wartung der Kompressoren wird in den Betrieben sehr unterschiedlich gehandhabt: Das Spektrum reicht von der selbst ausgeführten Minimalwartung bis hin zu Full-Service-Verträgen inklusive Materialkosten. Die Durchführung einer ordnungsgemäßen Wartung ist wesentlich für einen sicheren und energiesparenden Betrieb von Kompressoren. Eine mangelhafte Wartung wirkt sich dahingehend aus, dass die Betriebssicherheit nicht gewährleistet ist oder das Gerät sogar funktionsuntüchtig wird. Zudem kann sich der Energieverbrauch wesentlich erhöhen, da Druckverluste an Kühlern, Filtern oder Abscheidern zunehmen. Die Auswirkungen von Druckabfällen auf die Energiekosten wurden bereits erläutert. In der Abbildung 1.3e sind diese anschaulich dargestellt.

Eine durchgängige Wartung muss alle Druckluftbereiche im Betrieb miteinbeziehen. Daher sollte die Erzeugung, die Aufbereitung, die Verteilung und die Anwendung regelmäßig gewartet werden.

In Tabelle 1.8a und Tabelle 1.8b wurde die Auswirkung eines verschmutzten Ansaugfilters auf den Energieverbrauch berechnet. In dem Beispiel beträgt der Druckverlust des neuen Filters 20 mbar (Ansaugfilter im Neuzustand), der des gebrauchten Filters 250 mbar (verschmutzter Ansaugfilter). Der Kompressor verdichtet auf 11 bar und muss den Druckverlust ausgleichen. Die Energiekosten erhöhen sich um 12,7 %!

Ansaugfilter im Neuzustand		verschmutzter Ansaugfilter	
- Ansaugdruck	1 bar (a)	- Ansaugdruck	1 bar (a)
- saugseitige Druckverluste	20 mbar	- saugseitige Druckverluste	250 mbar
- Verdichtungsenddruck	11 bar (a)	- Verdichtungsenddruck	11 bar (a)
<b>Druckverhältnis</b>	<b>11 / 0,98 = 11,2</b>	<b>Druckverhältnis</b>	<b>11 / 0,75 = 14,7</b>

Tabelle 1.8a: Saugseitige Druckverluste durch verschmutzten Ansaugfilter  
(aus: Energieagentur NRW, Seminarunterlagen Druckluft)

Auswirkungen saugseitiger Druckverluste			
<b>Vorgaben</b>	a	Verdichtungsenddruck	= 10 bar (ü)
	b	Umgebungsdruck	= 1 bar (a)
	c	Strompreis	= 0,05 €/kWh
<b>Durchführung</b>	Saugdrosselventil vollständig öffnen		
	Einschalten des Verdichters		
	Einstellung eines Enddrucks von 10 bar (ü) am druckseitigen Drosselventil		
	Messung bzw. Berechnung von:		
	d	Leistungsaufnahme Normalbetrieb	= 1,5 kW
	e	Ansaugvolumenstrom Normalbetrieb	= 0,11 m³/min
	f	saugseitiger Unterdruck im Normalbetrieb	= 0,02 bar
	g	Verdichtungsdruckverhältnis	(a+b)/(b-f) = 11,2
	h	spezifische Leistungsaufnahme	d/e = 13,64 kW/(m³/min)
	Simulation Druckverlust ("verschmutzte Filter") durch saugseitiges Drosselventil		
Einstellung eines Enddrucks von 10 bar (ü) am druckseitigen Drosselventil			
Messung bzw. Berechnung von:			
i	Leistungsaufnahme (Filter "verschmutzt")	= 1,275 kW	
j	Ansaugvolumenstrom (Filter "verschmutzt")	= 0,083 m³/min	
k	saugseitiger Unterdruck (Filter "verschmutzt")	= 0,25 bar	
l	Verdichtungsdruckverhältnis	(a+b)/(b-k) = 14,7	
m	spezifische Leistungsaufnahme	i/j = 15,36 kW/(m³/min)	
<b>Auswertung</b>	Druckverlust im Normalbetrieb		f/b*100% = 2 %
	Druckverlust Filter "verschmutzt"		k/b*100% = 25 %
	Volumenstromabnahme		(j-e)/e*100% = -24,5 %
	relative Leistungsaufnahme		(i-d)/d*100% = -15,0 %
	relative spezifische Leistungsaufnahme		(m-h)/h*100% = 12,7 %
	n	Energiekosten pro m³ (Normal)	h*c/60 = 0,011 €/m³
	o	Energiekosten pro m³ (Druckv.)	m*c/60 = 0,013 €/m³
	p	relative Energiekosten (Druckv.)	(o-n)/n*100% = 12,7 %

Tabelle 1.8b: Erhöhung der Energiekosten durch saugseitige Druckverluste  
(aus: Energieagentur NRW, Seminarunterlagen Druckluft)

Daher sind die Filterelemente jährlich zu wechseln, spätestens aber bei einem Differenzdruck von 350 mbar. Aktivkohlefilterelemente haben eine Standzeit von max. 1.500 Betriebsstunden bzw. 3 Monaten.

Regelmäßig durchgeführte Reinigungen, Ölwechsel, etc. sowie Beseitigung von Leckagen im Kompressor senken den Energieverbrauch. Die Leckagen im Kompressor entstehen z.B. durch defekte Ventile. Dadurch wird die Liefermenge verringert. Mit rechtzeitigem Austausch erhöht sich auch die Laufzeit des Kompressors, verringert sich der Verbrauch und die Kosten werden gesenkt.

Folgendes Beispiel (aus Münst, F., Wirkungsgradoptimierung der Druckluftherzeugung und -verteilung) soll die Größenordnung von kompressorinternen Leckagen verdeutlichen:

75 kW Schraubenkompressor mit Liefermenge 500 m<sup>3</sup>/h, 3 x 33 kW Kompressoren als Reserve und Spitzenlast

### Wochenverbrauchsmessung:

Druckluftverbrauch tagsüber 416 m<sup>3</sup>/h

Druckluftverbrauch nachts 341 m<sup>3</sup>/h

### Nachmessung mit der Methode der Druckbehälterentleerung:

Druckluftverbrauch tagsüber 204 m<sup>3</sup>/h

Druckluftverbrauch nachts 45 m<sup>3</sup>/h

Der Verlust von 300 m<sup>3</sup>/h entstand durch ein defektes Entlastungsventil. Wegen ausreichender Kapazität wurde dieser Defekt zuvor nicht erkannt. Eine regelmäßige Kontrolle der Last- und Betriebsstunden hätte den Anstieg des „Verbrauchs“ aufgedeckt. Dadurch entstand ein zusätzlicher Energieverbrauch von 390.000 kWh jährlich. Das entspricht Kosten von 19.500 € bei 0,05 €/kWh für die kompressorinterne Leckage.

Neben den Ventilen sollte auch der Keilriemen regelmäßig auf seine Spannung hin überprüft werden. Damit werden Übertragungsverluste und Verschleiß der Lager gering gehalten. Ein gut gewarteter Keilriemenantrieb hat einen Wirkungsgrad von 97 %, ein schlecht gewarteter Keilriemen dagegen 94 %. Dadurch erhöht sich der Energieverbrauch um 3 %. Dies bedeutet z.B. bei 5.000 h pro Jahr und einem 250 kW - Motor mit einem Motorwirkungsgrad von 95 % einen um 39.474 kWh erhöhten Verbrauch! Dies entspricht zusätzlichen Kosten von ca. 2.000 € bei 0,05 €/kWh.

Manuelle Kondensatableiter sollten in regelmäßigen Abständen entleert und automatische Kondensatableiter überprüft werden. Sie stellen häufig Störquellen ersten Ranges dar. Bei Kondensataufbereitungssystemen ist die Funktionsfähigkeit regelmäßig zu kontrollieren.

An den Kältetrocknern sollte der Kondensatablass täglich inspiziert und die Kältemittelverflüssiger an den Kondensatoroberflächen monatlich gereinigt werden.

Die hier dargestellten Wartungsmöglichkeiten stellen nur eine Auswahl dar, um die Auswirkungen auf den Energieverbrauch deutlich zu machen. Für jedes System sollte ein Wartungsplan anhand der Bedienungsanleitung aufgestellt werden, der optimal an die betrieblichen Bedingungen angepasst ist. Die Wartung kann auch von Kompressorenherstellern oder Händlern durchgeführt werden, die verschiedene Serviceverträge anbieten. Überprüfen Sie, welche Wartungstätigkeiten Ihr Fachpersonal selbst durchführen kann und was Sie durch einen externen Fachmann abdecken lassen möchten oder müssen.

Darüber hinaus ist es sinnvoll, monatlich die Last- und Betriebsstunden auszuwerten (Monitoring). So können Leckagen oder erhöhter Wartungsbedarf im Kompressor oder bei der Aufbereitung rechtzeitig erkannt werden.

## 1.9 Umgebungsbedingungen

### 1.9.1 Belüftung von Kompressorräumen

Bei der Belüftung der Kompressorräume unterscheidet man zwischen der unterstützten Konvektion (mit Ventilator, ohne Kanäle) und der Entlüftung über Abluftkanäle.

Die **unterstützte Konvektion** hat den Vorteil, dass die Investitionskosten relativ gering sind. Es ist nur ein geringer technischer Aufwand erforderlich und der Raum wird im Winter automatisch beheizt.

Es ist zu beachten, dass diese Form der Belüftung nur für kleine bis mittlere Kompressoren ausreicht. Ist die Raumlufttemperatur erhöht, so ist auch eine erhöhte Ventilatorleistung erforderlich und die warme Ansaugluft kann eine Gefahr für den Kompressor darstellen.

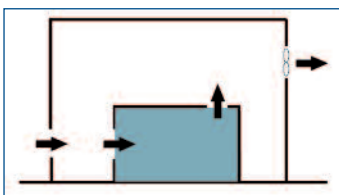


Abbildung 1.9a: Aufbauskeizze bei unterstützter Konvektion  
(aus: Druckluft effizient, Fakten IV Druckluftherzeugung für Industrie, Handwerk und Gewerbe)

Bei der **Entlüftung über einen Abluftkanal** ist der Investitions- und technische Aufwand höher. Die Kühltluftwärmung ist geringer, so dass nur eine geringe Ventilatormenge erforderlich ist. Der Kompressorraum erwärmt sich nur gering, jedoch ermöglicht eine Umluftklappe das Heizen anderer Räume. Ein weiterer Vorteil dieser Variante ist die Schallreduzierung.

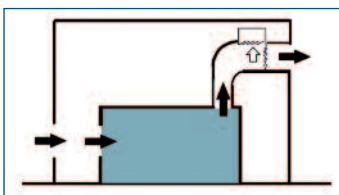


Abbildung 1.9b: Aufbauskeizze für Entlüftung über Abluftkanäle  
(aus: Druckluft effizient, Fakten IV Druckluftherzeugung für Industrie, Handwerk und Gewerbe)

### 1.9.2 Temperatur

Als optimale Umgebungsbedingungen für Kompressoren gelten Temperaturen zwischen 10 und 20°C. Temperaturerhöhungen verschlechtern den Massenstrom, Temperaturen über 35°C können auf Dauer zu Kompressorschäden führen. Davon abgesehen ist der elektrische Leistungsbedarf bei höheren Temperaturen auch entsprechend größer. Bei einer Ansaugtemperatur von 35°C statt 20°C erhöht sich der spezifische Leistungsbedarf um ca. 5 %.

### 1.9.3 Luftqualität

Die Ansaugluft sollte sauber und frei von aggressiven Bestandteilen (z.B. ätzende Dämpfe aus Galvanikbädern) sein. Bei einer staubigen Ansaugluft muss die Anlage häufiger gewartet werden, oder der Energieverbrauch steigt, da die Filter sich schneller zusetzen.

## 1.10 Auswahl der Druckluft-Anwendungen

Für die Drucklufttechnik gibt es viele verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Im Folgenden werden einige vorgestellt:

- **Spannen und Klemmen** mit Druckluft: Diese Technik wird vor allem in der Mechanisierung und Automatisierung verwendet um z.B. Werkstücke zu positionieren.
- **Transport** mit Druckluft: Diese Tätigkeit wird ebenfalls in der Mechanisierung und Automatisierung verwendet um Werkstücke umzulenken. Mit Druckluft können Schüttgüter pneumatisch transportiert werden.

- **Antrieb mit Druckluft:** Schlagende Maschinen und Werkzeuge werden häufig mit Druckluft betrieben, ebenso Vibratoren und Rüttler.
- **Spritzen mit Druckluft:** Mit Druckluft können verschiedene Oberflächenbehandlungsverfahren, wie Sandstrahlen, durchgeführt und Flüssigkeiten vernebelt werden.
- **Blasen mit Druckluft:** Mit dieser Technik werden z.B. Glas- und Kunststoffflaschen erzeugt.



Abbildung 1.10a: Saugpistolen

Da Druckluft eine teure Energieform ist, sollte deren Anwendung auf das Notwendigste beschränkt werden. Dabei kann wie folgt vorgegangen werden: Grundsätzlich sollte überprüft werden, ob eine energetisch günstigere Alternative (elektrische und hydraulische Antriebe sind bis zehn Mal energetisch günstiger) einsetzbar ist. So ist zum Trocknen ein Gebläse sinnvoller als Druckluft. Druckluft sollte auch nicht für Reinigungszwecke durch Abblasen verwendet werden. Alternativ können Staubsauger und druckluftbetriebene Saugpistolen eingesetzt werden.

Des Weiteren sollte der Verbrauch der einzelnen Anwendungen unter die Lupe genommen werden: Ist die Einsatzdauer jeweils optimal eingestellt? Können z.B. „Dauerbläser“ mit Lichtschranken an den tatsächlichen Bedarf gekoppelt werden? Sind die Öffnungszeiten von Düsen mit einem Zeitrelais richtig eingestellt oder kann die Länge der Intervallzeiten verkürzt werden? Können Ausblasdüsen optimiert werden (sind z.B. Venturidüsen einsetzbar)? Schließlich sollten die Werkzeuge regelmäßig gewartet werden, da interne Leckagen oft ein erhebliches Ausmaß erreichen.

## 2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In den vorausgegangenen Kapiteln wurden verschiedene Optimierungspotenziale vorgestellt. Wie hoch sind aber nun die Einsparpotenziale im Schnitt und welche Amortisationszeit ist zu erwarten?

In Tabelle 2a wurde das Einsparpotential bei der Umsetzung aller Maßnahmen berechnet. Für jede Maßnahme wird die Anwendbarkeit, der Effizienzgewinn und damit die prozentuale Anwendbarkeit abgeschätzt.

Energiesparmaßnahme	% Anwendbarkeit <sup>(1)</sup>	% Effizienzgewinn <sup>(2)</sup>	Gesamtpotential <sup>(3)</sup>
<b>Neuanlagen oder Ersatzinvestition</b>			
verbesserte Antriebe (hocheffiziente Motoren, HEM)	25 %	2 %	0,5 %
verbesserte Antriebe (drehzahlvariable Antriebe, ASD)	25 %	15 %	3,8 %
technische Optimierung des Kompressors	30 %	7 %	2,1 %
Einsatz effizienter und übergeordneter Steuerungen	20 %	12 %	2,4 %
Wärmerückgewinnung für Nutzung in anderen Funktionen	20 %	20 %	4,0 %
verbesserte Druckluftaufbereitung (Kühlung, Trocknung und Filterung)	10 %	5 %	0,5 %
Gesamtanlagenauslegung inkl. Mehrdruckanlagen	50 %	9 %	4,5 %
Verminderung der Druckverluste im Verteilsystem	50 %	3 %	1,5 %
Optimierung von Druckluftgeräten	5 %	40 %	2,0 %
<b>Anlagenbetrieb und Instandhaltung</b>			
Verminderung der Leckageverluste	80 %	20 %	16,0 %
häufiger Filterwechsel	40 %	2 %	0,8 %
		<b>SUMME<sup>(4)</sup></b>	<b>32,9 %</b>
<b>Legende:</b>			
<sup>(1)</sup> % DLA, in denen diese Maßnahmen anwendbar und rentabel sind			
<sup>(2)</sup> % Energieeinsparung des jährlichen Energieverbrauchs			
<sup>(3)</sup> Einsparpotenzial - Anwendbarkeit x Effizienzgewinn			
<sup>(4)</sup> Die gesamten Einsparungen sind kleiner als die Summe der Einsparungen der einzelnen Maßnahmen			

Das Einsparpotential aller Maßnahmen liegt bei 32,9 %. Damit beträgt die Amortisationszeit zwischen elf Monaten und drei Jahren. Diese kurze Amortisationszeit beruht darauf, dass die Energiekosten einen hohen Anteil an den Lebenszykluskosten einer Druckluftanlage ausmachen. Dies zeigt auch Abbildung 1.10a auf Seite 30.

Tabelle 2a: Energieeinsparpotenziale in Druckluftanlagen

(aus: Radgen, P., Energieverbrauch, Einsparpotenziale und Maßnahmen zur Aktivierung der Einsparpotenziale bei der Druckluftherzeugung)

# Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

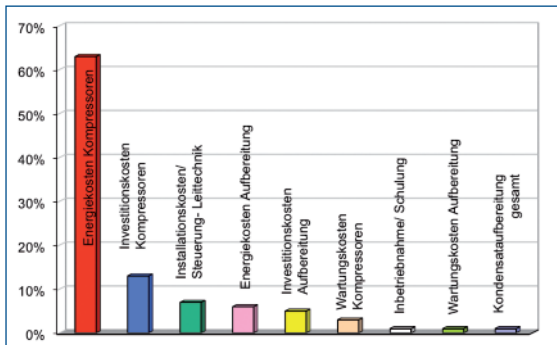
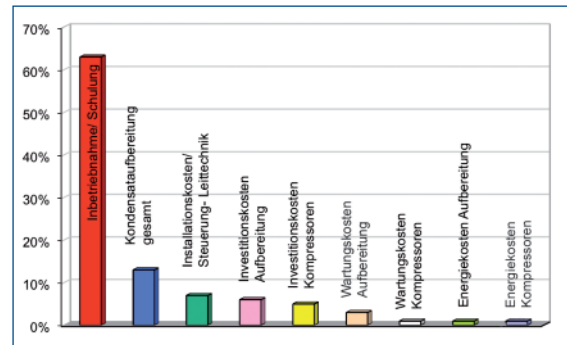


Abbildung 1.10a: Kostenstruktur in optimierten Druckluftstationen (aus: Kaeser Seminarunterlagen)



Hier werden alle Einsparmöglichkeiten noch einmal zusammengefasst:

- Die Kosten pro m<sup>2</sup> erzeugter Druckluft bewegen sich zwischen 0,5 und 2,5 Cent/m<sup>2</sup>. Dies ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie dem aktuellen Strompreis, Größe, Auslastung, Wartungszustand, Bauart des Kompressors, dem Betriebsdruck, etc. Die Kosten pro m<sup>3</sup> können bei geringer Auslastung auch ein Mehrfaches betragen.
- Die jährlichen Energiekosten für eine Leckage / Dauerbläser mit 10 mm Durchmesser liegen für 6 bar bei 15.840 € für 12 bar bei 63.360 € (0,06 €/kWh, 8.000 Bh/a).
- Bei einer Druckerhöhung um ein bar steigen die Energiekosten um 6 – 10 %.
- 5 bar statt 6 bar senken die Leistungsfähigkeit eines Werkzeuges um 30 %.
- Die Betriebskosten für Wasserkühlung liegen ca. 30 % über den von luftgekühlten Kompressoren.
- Die Aufbereitungskosten betragen für Kältetrockner ca. 3 %, für Adsorptionstrockner ca. 14 – 15 % der Gesamtkosten.

Eine einfache Möglichkeit zur überschlägigen Berechnung der jährlichen Kostenanteile Investitionskosten / Energiekosten / Wartungskosten bietet das Berechnungsprogramm „life cycle cost“ der Kampagne „Druckluft effizient“. Dieses wird im Internet unter [www.druckluft-effizient.de](http://www.druckluft-effizient.de) bereitgestellt. Die darin verwendeten Investitionskosten beschränken sich allerdings auf die Beschaffung von Kompressoren. Investitionskosten für die Aufbereitung und die Rohrleitungen, Energiekosten für Trockner, Raumkosten, etc. bleiben unberücksichtigt. Auch der tatsächliche spezifische Leistungsbedarf, der Einfluss des Verdichtungsdruckes etc. gehen nicht in die Berechnung ein. Dieses Instrument eignet sich daher nicht für den Angebotsvergleich mehrerer Kompressoren. Für eine grobe Abschätzung der jährlichen Kosten ist das „life cycle cost“ jedoch durchaus sinnvoll.

## 3 Druckluft-Contracting

Bei veralteten Druckluftstationen kann das Contracting eine interessante Alternative zu Investitionen darstellen. Hierbei wird die Druckluft durch den Contractinganbieter geliefert. In der vertraglichen Gestaltung gibt es je nach Wunsch des Betriebes vielfältige Möglichkeiten. Der Gestaltungsspielraum reicht von Mieten der Druckluftanlage und Betrieb in Eigenregie bis hin zur Komplettlieferteilung der Druckluft mit einem Festpreis pro m<sup>3</sup>. Dabei sollte eine Energieverbrauchsgarantie vereinbart werden: Der Contractor muss einen vereinbarten Energieverbrauch für die Druckluftbereitstellung einhalten. Auch der Übergabepunkt für die Druckluft kann unterschiedlich festgelegt werden: Je nach Wunsch kann die Übergabe direkt nach der Station oder aber erst nach den Hauptleitungen erfolgen.

Eine weitere Variante ist das Einspar-Contracting. Hier wird anhand der bisherigen Kosten kalkuliert. Durchgeführte Maßnahmen werden über eine festgelegte Vertragslaufzeit durch die Einsparungen refinanziert. Danach kommen die Einsparungen dem Betrieb zugute. Grundsätzlich gilt: Als Entscheidungsgrundlage sollten die Gesamtkosten der eigenen Druckluftversorgung bekannt sein. Das Haupteinsparpotenzial Leckagebeseitigung liegt selten im Verantwortungsbereich des Contractors. Auch das Problem der Druckverluste in der Verteilung wird meist nicht durch den Contractor beseitigt.

Nähere Informationen zu diesem Thema finden Sie in: Contracting – Finanzierung – Betreibermodelle. Leitfaden für die Anwendung bei Druckluftanlagen von C. Dudda, P. Radgen, J. Schmid (Druckluft effizient).

## 4 Vorgehensweise zur Ermittlung der Optimierungspotenziale

Für die Ermittlung von Optimierungspotenzialen sind folgende Schritte empfehlenswert:

1. Datengrundlage erstellen
2. Auf Druckluft wo möglich verzichten
3. Leckagen ermitteln und beseitigen
4. Steuerung / Laufzeiten optimieren
5. Betriebsdruck und Druckverluste prüfen und minimieren
6. Wartung systematisieren
7. Anwender überprüfen
8. Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten ermitteln
9. Gesamtkonzept erstellen

### 4.1 Datengrundlage erstellen

#### ! Zielsetzung:

Zusammenstellung der Daten für die weitere Auswertung:

- Bestandsaufnahme der Druckluftversorgung
- Ermittlung des typischen Druckluftverbrauchs an einem Produktionstag und im gesamten Wochenverlauf

#### ! Das ist zu tun:

1. **Unterlagen über die derzeitige Druckluftversorgung zusammenstellen. Erfassen Sie möglichst viele Informationen über Ihre Druckluftversorgung und -verteilung. Tragen Sie die vorhandenen Unterlagen zusammen, z.B.:**
  - Lagepläne der Kompressoren / Stationen
  - Installationspläne für Kompressorstationen
  - Bedienungsanleitungen für Kompressoren
  - Wartungspläne
  - Aufzeichnungen über Betriebsstunden (Laststunden, Leerlaufstunden, deren Verhältnis)
  - Aufzeichnen des Stromverbrauchs der Druckluftanlage einschließlich aller Peripherie-Geräte (Trockner, Ventilatoren etc.)
  - Wartungs- und Serviceverträge
  - Pläne über Druckluftleitungen

Sollten nur wenige Daten über die Druckluftversorgung vorliegen, empfiehlt sich eine ausführlichere Bestandsaufnahme gemäß dem Formblatt in O. In die dazugehörige Liste können alle Kompressoren aufgenommen und miteinander verglichen werden.

#### 2. Lassen Sie eine Wochenverbrauchsmessung durchführen

Wenn Sie die obigen Daten ausgewertet haben, dann beauftragen Sie eine Fachfirma mit der Aufzeichnung Ihres Druckluftverbrauchs über einen Zeitraum von mindestens einer Woche, besser für zehn Tage.

#### ! Darauf ist zu achten:

Für die Ermittlung und Bewertung von Optimierungspotenzialen ist die Durchführung einer Wochenverbrauchsmessung nahezu unerlässlich. Kompressorenhersteller und Händler bieten Ihnen die Messung kostengünstig an. Voraussetzung für eine optimale Auswertung ist eine möglichst ausführliche Datenaufnahme. Derzeit sind unterschiedliche Messsysteme auf dem Markt erhältlich. Sprechen Sie deshalb vor der Auftragsvergabe mit der durchführenden Firma die folgenden Punkte durch und lassen Sie sich Muster-Auswertungen zeigen:

- Last- / Leerlauf: Enthält die Messauswertung Aussagen über die jeweiligen Laufzeiten im Lastbetrieb / Leerlauf wie über Lastwechselzyklen?

## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

- Wird die Energieaufnahme im Lastbetrieb und Leerlauf ermittelt? Wird diese gemessen oder aus Herstellerangaben berechnet?
- Falls Sie drehzahlgeregelte oder proportionalgeregelte Kompressoren einsetzen: Klären Sie, ob bei der Messung der Teillastbetrieb aufgenommen wird!
- Terminfestlegung: Achten Sie darauf, dass die Messung während einer typischen Produktionswoche durchgeführt wird. Sollten Sie teilweise am Sonntag produzieren, legen Sie einen Messzeitraum fest, in dem möglichst ein Produktionssonntag sowie ein produktionsfreier Sonntag enthalten sind.

Achtung: Druckluftverbräuche sind in der Regel Werte, die aus den Laufzeiten der Kompressoren und den Liefermengen nach Herstellerangaben berechnet werden. Die tatsächliche Liefermenge der Kompressoren kann jedoch auf Grund von Verschleiß oder interner Leckagen erheblich von den theoretischen Werten abweichen. Deshalb ist ein guter Wartungszustand der Kompressoren für eine aussagekräftige Verbrauchsmessung notwendig. Auch sollte bei der Auswertung darauf geachtet werden, ob die gemessenen Verbräuche in Abhängigkeit von den jeweils fördernden Kompressoren stark schwanken: Dies könnte ein Hinweis auf eine verminderte Leistungsfähigkeit eines Kompressors sein.

### 3. Auswertung der Wochenverbrauchsmessung: Tagesprofile und Wochenverlauf

Ermitteln Sie Ihren tatsächlichen Verbrauch anhand der Tagesprofile!

- Ermitteln Sie typische Druckluftverbräuche zu verschiedenen Tageszeiten sowie nachts und am Wochenende.
- Verfolgen Sie den Wochenverlauf!
- Sind die Tagesprofile einander ähnlich oder weichen sie stark voneinander ab?
- Berechnen Sie:
  - a. den jährlichen Druckluftverbrauch
  - b. die dadurch entstehenden jährlichen Kosten

Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, bestimmen Sie die Druckluftkennzahl ihres Systems:

$$\text{Druckluftkennzahl [kWh / Nm}^3\text{]} = \frac{\text{Stromverbrauch\_Druckluftstation [kWh]}}{\text{erzeugte\_Druckluftmenge [Nm}^3\text{]}}$$

Aus der Druckluftkennzahl ergibt sich der spezifische Leistungsbedarf:

$$\text{Spezifischer\_Leistungsbedarf [kWh / (Nm}^3\text{ / min)]} = \text{Druckluftkennzahl [kWh / Nm}^3\text{]} * 60$$

Die Druckluftkennzahl des gesamten Systems ist, wie der spezifische Leistungsbedarf des Kompressors, abhängig vom Förderdruck und der Größe der Maschinen. Dennoch kann eine Druckkennzahl im Bereich 0,10 kWh/m<sup>3</sup> bis 0,12 kWh/m<sup>3</sup> als guter bzw. akzeptabler Wert für z.B. 7 bar (ü) bezeichnet werden. Liegt der bestimmte Wert mehr als 10 % darüber, sollten die Ursachen gesucht und beseitigt werden. Berechnungshilfen hierzu finden Sie in 5.5, Dokumentationsformulare und exemplarische Auswertungen für eine Wochenverbrauchsmessung in 5.2.

## 4.2 Auf Druckluft – wo möglich – verzichten

Die Inhalte dieses Unterkapitels stammen aus Seminarunterlagen der EnergieAgentur NRW, Thema Druckluftsubstitution.

### ! Zielsetzung:

Wie bereits mehrfach erwähnt, ist Druckluft eine teure Energieform. Daher ist es unter Umständen sinnvoll, Alternativen einzusetzen. Dabei müssen Ziel und Kosten für die Verwendung von Druckluft oder einer Alternative gegeneinander abgewägt werden.



## ! Das ist zu tun:

Ermitteln Sie folgende Faktoren:

- Produktivität = Produktionsergebnis : eingesetzte Mittel
- Gewinn = Produktivität - Kosten pro Zeiteinheit
- Rentabilität = Gewinn bzw. eingesparte Kosten pro eingesetztes Kapital
- Qualität: Folgekosten / Image / Marktanteil
- Umweltaspekt
- Nachhaltigkeit
- Produktionssicherheit: Minimierung der Stillstandszeiten

Diese Parameter können für verschiedene Alternativen einander gegenübergestellt werden. Aus dem Vergleich dieser Größen lässt sich dann das effektivste Verfahren für den benötigten Arbeitsvorgang ermitteln.

## ! Darauf ist zu achten:

Der Energiebedarf eines Kompressors ist um ein Vielfaches höher als der eines Elektromotors. Dies veranschaulicht die folgende Abbildung 4.2a.

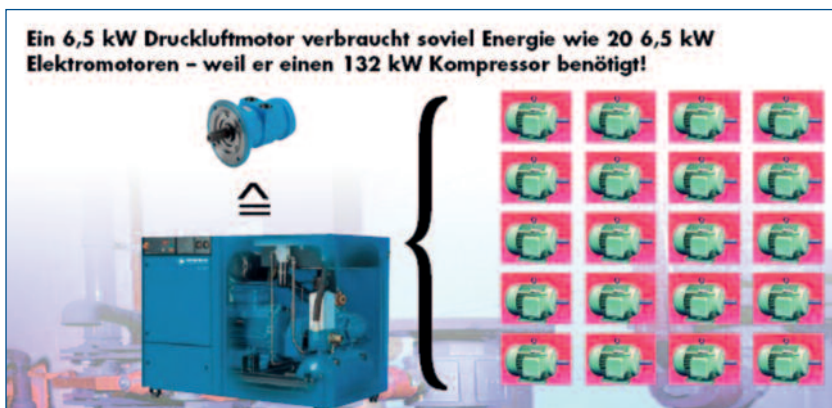


Abbildung 4.2a: Vergleich Energiebedarf Kompressor- Elektromotor  
(aus: Energieagentur NRW, Seminarunterlagen Druckluftsubstitution)

Daraus ergibt sich, dass Druckluft 20 - 40 Mal teurer ist als Strom und die CO<sub>2</sub> - Belastung ebenfalls 20 - 40 Mal größer ist. Andererseits kann effiziente Druckluftversorgung ca. 30 - 50 % der Kosten sparen. Bei der effektiven Nutzung von elektrischen Antrieben anstatt Druckluft kann bis max. 95 % elektrische Energie eingespart werden.

Das größte Einsparpotential besteht also darin, Druckluftsubstitution und effiziente Druckluftversorgung sorgfältig gegeneinander abzuwägen.

## 4.3 Leckagen ermitteln und beseitigen

### ! Zielsetzung:

- Ermittlung der Verluste durch Leckagen und dabei entstehende jährliche Kosten
- Leckagesuche
- Leckagebeseitigung bzw. Minimierung

### ! Das ist zu tun:

1. Leckagen: Schätzen Sie die Leckagen anhand des Verbrauchs in der produktionsfreien Zeit grob ab!

- Ermitteln Sie die „Verbräuche“ in der produktionsfreien Zeit (Sonntag): Sind echte Verbraucher / durchlaufende Anwendungen bekannt?

## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

- Ziehen Sie diese vom Verbrauchswert am Wochenende ab. So ergeben sich grob ermittelt Ihre Leckagen (inklusive sogenannter „Dauerbläser“)
- Berechnen bzw. schätzen Sie graphisch Ihren prozentualen Anteil an Leckagen am gesamten durchschnittlichen Druckluftverbrauch während der Produktionszeiten. Der ermittelte Wert sollte in folgender Größenordnung liegen:
  - a) bis 5 % bei kleinen Netzen
  - b) bis 10 % bei größeren Industrienetzen
  - c) bis 15 % bei sehr großen Netzen (z.B. Gießereien, Stahlwerke, Werften)

Bei größeren Leckagewerten haben Sie Handlungsbedarf! Eine beispielhafte Auswertung finden Sie in 5.2.

Sollten Sie rund um die Uhr und sieben Tage die Woche produzieren, gibt es ein von der Energieagentur NRW entwickeltes Verfahren, das von einer Firma für Druckluftoptimierung aus Bremen weiterentwickelt wurde. Hier wird die Höhe der Leckagen (inklusive Dauerbläser) ermittelt, indem eine Leckagepotenzialmessung bei laufender Produktion durchgeführt wird. Dazu wird über eine Kupplung oder einen zölligen Anschluss ein Drucksensor in das Leitungsnetz eingebaut. Über einen längeren Zeitraum werden die Drücke gemessen und anschließend Nutzlast- und Leckageanteile errechnet.

Sie können die Leckagemenge auch während der Betriebsruhe durch das einfache Verfahren in 5.3 abschätzen.

### 2. Konkretisieren Sie die Leckageabschätzung nach Verursacher und Ort!

Führen Sie eine einfache Leckagemessung gemäß 5.3 in zwei Varianten durch:

- a) Ermittlung der Leckagemengen in den Hauptleitungen (Wert 1); Hallenabgänge oder Verbraucher sind abgesperrt
- b) Gesamt inkl. Anschlüsse und Verbraucher (Wert 2)

Der ermittelte Wert 1 gibt die Leckagemenge der Hauptleitungen wieder. Wert 2 gibt die Leckagen insgesamt wieder. Wert 2 minus Wert 1 ergibt die Leckagen im letzten Abschnitt sowie bei den Verbrauchern selbst.

Sollte das Ergebnis der Leckagemessung durch Druckbehälterentleerung für die gesamten Leckagen deutlich niedriger sein als der in der Wochenverbrauchsmessung ermittelte Verbrauch in der produktionsfreien Zeit, liegt der Verdacht einer kompressorinternen Leckage nahe.

### 3. Berechnen Sie die durch Leckagen entstehenden Kosten!

Verwenden Sie hierzu 5.4

### 4. Suchen Sie die Leckagen und beseitigen Sie diese!

Nach Leckagen sollte bei der Erzeugung und Aufbereitung, der Verteilung, sowie an den Anschlüssen und Anwendern gesucht werden. Dies kann folgendermaßen geschehen:

- Hören auf Zischgeräusche: Größere Leckagen lassen sich so außerhalb der Produktionszeiten leicht identifizieren.
- kleinere Leckagen: Verbindungselemente, Abzweigungen, Ventile etc. mit Dichtheitsprüfmittel oder mit Seifenwasser einpinseln. Dies führt an undichten Stellen zu Blasenbildung.
- Rundgänge mit einem Ultraschall-Leckage-Suchgerät: Mit etwas Übung lassen sich hier die Leckagestellen gut ermitteln. Diese Vorgehensweise eignet sich auch für Leckagen in hoch liegenden oder in Kanälen befindlichen Leitungen.

Hier sind einige typische Beispiele aufgelistet, wo besonders häufig Leckagen auftreten:

- **in der Verdichterstation**
  - undichte Schraub- und Flanschverbindungen
  - undichte Schweißnähte oder Lötstellen
  - Lecks in Kompressoren (z.B. undichte (Entlastungs-)Ventile)
  - defekte / undichte (Magnet-)Ventile
  - festsitzende Schwimmerableiter

- falsch installierte Trockner oder Filter
- **im Netz**
  - undichte Schraub- und Flanschverbindungen
  - undichte Schweißnähte oder Lötstellen
  - korrodierte Leitungen, Beschädigungen
  - defekte / undichte (Magnet-)Ventile
  - festsitzende Schwimmerableiter
  - falsch installierte Filter
- **beim Verbraucher**
  - innere Leckagen im System
  - defekte Schläuche und Schlauchkupplungen
  - undichte Schraub- und Flanschverbindungen (nicht festgezogen, fehlende Dichtungen)
  - falsch installierte oder defekte Filter und Wartungseinheiten (kaputte Schaugläser, Haarrisse)
  - Armaturen

**!** Die schadhafte Stellen sollten umgehend markiert und die zuständigen Mitarbeiter informiert werden, welche die Leckage beheben.

### **Darauf ist zu achten:**

Für die Leckageermittlung und deren Beseitigung können auch Fachfirmen herangezogen werden. Diese bieten ein unterschiedliches Leistungsspektrum an, das von der reinen Leckageortung und Markierung bis zur sofortigen Leckagebeseitigung reicht. Es gibt Firmen, die Ihnen nach einer Besichtigung vor Ort und Durchführung einer Leckagemessung vertraglich das Erreichen oder Unterschreiten einer bestimmten Leckagemenge zusichern (mit Erfolgskontrolle). Bei dieser Art des Angebotes können Sie mit einem Festpreis (unabhängig von den Arbeitsstunden) rechnen und dadurch genau Aufwand und Nutzen kalkulieren. Folgende Stichworte können bei der Auswahl geeigneter Fachfirmen helfen:

- Klären des Auftragsumfangs: nur Leckageortung und Markierung oder auch Beseitigung?
- Wird eine festgelegte Leckagerate zu festen Kosten (unabhängig von der Arbeitszeit) gewährleistet?
- Erfolgt eine Messung vorher / nachher (Erfolgskontrolle) durch die Fremdfirma? Oder müssen die Messungen selbst durchgeführt werden?
- Wie viel eigenes Personal wird benötigt? Wie werden die Tätigkeiten und die Materialbereitstellung aufgeteilt?
- Wie wird bei Leckagen an „sensiblen Stellen“ verfahren (Kenntnisse der Anlage / Prozesse zur Leckagebeseitigung nötig)?
- Werden die Leckagestellen und die typischen fehlerhaften bzw. undichten Teile dokumentiert?
- Werden Materialempfehlungen gegeben: Was hält länger dicht?

Die Erkenntnisse einer derartigen Aktion mit einer Fachfirma sollten in einen regelmäßigen Leckagebeseitigungsplan aufgenommen werden.

### **5. Schulen Sie die Mitarbeiter vor Ort und ermöglichen Sie eine einfache Markierung der Leckagestellen!**

- Machen Sie den Mitarbeitern bewusst, welche Kosten durch Leckage verursacht werden.
- Stellen Sie gegebenenfalls einheitliche Schilder zur Verfügung, mit denen Mitarbeiter festgestellte Leckagen markieren können (Beispiel siehe Abbildung 1.5b).
- Veranstalten Sie regelmäßig Informationstage zum Thema Druckluft und führen Sie Aktionen durch, indem Sie z.B. Mitarbeiter Leckagen markieren lassen!
- Binden Sie bei diesen Aktionen auch das Ideenmanagement mit ein, um Optimierungsmöglichkeiten bei der Druckluftanwendung zu finden. (Dauerbläser an Bedarf koppeln, Druckluft bei Bläs Vorgängen durch Gebläse ersetzen, etc.)

## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

### 6. Leckagevermeidung:

Um die Leckagen außerhalb der Produktionszeiten zu minimieren, prüfen Sie, ob Sie folgenden Maßnahmen realisieren können!

- Kompressoren während der bedarfsfreien Zeiten abschalten, z.B. über eine in die Steuerung integrierte Schaltuhr.
  - Hierfür müsste eine Druckhaltevorrichtung bzw. ein vordruckgeregelter Schieber installiert sein, da sonst die Vorreinigung nicht funktioniert.
  - Es muss vorher geprüft werden, dass der Druckverlust zu keinen Schäden führt, beispielsweise in automatisierten Prozessen, in denen pneumatische Zylinder verwendet werden.
  - Achtung: Bei sicherheitsrelevanten Anlagen muss die Druckluftversorgung sichergestellt sein (z.B. pneumatische Rauchabzugesanlagen mit CO<sub>2</sub>-Patrone, vorgesteuerte Sprinkleranlagen).
  - Falls eine komplette Ausschaltung der Kompressoren nicht möglich ist sollte geprüft werden, ob eine Druckabsenkung bei Betriebsruhe umsetzbar ist.
- Hallenversorgung bzw. einzelne Bereiche während der produktionsfreien Zeit mit pneumatischen Stellgeräten oder Ventilen mit Stellmotoren abschieben. Diese können über ein Zeitschaltwerk oder über eine Kopplung mit dem Hauptschalter geschaltet werden.
- Großverbraucher und andere Entnahmestellen mit Absperreinrichtungen versehen.

7. Führen Sie vorher und nachher Leckagemessungen durch und dokumentieren Sie die Ergebnisse. Hierzu dient 5.3!

8. Nehmen Sie die regelmäßige Leckagesuche (Rundgänge einmal monatlich) und die monatliche Auswertung der Betriebsstunden / Laststunden in Ihren Wartungsplan auf, um einen unerklärlichen Anstieg der Verbräuche rechtzeitig erkennen zu können! Bestimmen Sie monatlich Ihre Druckluftkennzahl!

## 4.4 Steuerung / Laufzeiten optimieren

### ! Zielsetzung:

Ist-Stand-Ermittlung

- Verhältnis Leerlauf / Betriebsstunden gesamt analysieren
- Energieverbrauch und Kosten des Leerlaufs in Augenschein nehmen
- vorhandene Regelungen und Steuerungen der Kompressoren erfassen; Leerlaufreduzierung, Druckabsenkung, Teillastregelung und Schaltung bei geringem Bedarf (über Nacht oder übers Wochenende) prüfen
- Auslegung der Kompressorengrößen kontrollieren
- Größe des Druckluftbehälters auf ausreichende Dimensionierung überprüfen
- Optimierungsmöglichkeiten bei der Wasserkühlung untersuchen

### ! Das ist zu tun:

#### 1. Auswertung Leerlauf / Lastlauf für einzelne Kompressoren

Werten Sie die Messergebnisse aus. Verwenden Sie hierzu 5.2.

- $\text{Verhältnis Leerlauf / Betriebsstunden gesamt} = \text{Leerlaufstunden} \times 100 \% : \text{Betriebsstunden gesamt}$

Bei den Kompressoren gilt:

- Verhältnis Leerlauf < 30 %, Lastlauf > 70 %: in Ordnung
- Verhältnis Leerlauf > 30 %, Lastlauf < 70 %: Optimierbarkeit prüfen

#### 2. Berechnung der jährlichen Kosten für den Leerlauf wie in 5.5

- Für eine überschlägige Berechnung können Sie auch das Verhältnis Leerlauf / Gesamtbetriebsstunden über die gesamte bisherige Laufzeit der Kompressoren anhand der Zählerstände an den Kompressoren berechnen
- Betriebsstundenzähler
- Laststundenzähler
- Leerlauf = Betriebsstundenzähler minus Laststundenzähler
- $\text{Verhältnis Leerlauf / Betriebsstunden gesamt} = \text{Leerlauf} \times 100 \% : \text{Betriebsstunden gesamt}$

### 3. Bei Leerlauf >30 % der gesamten Betriebsstunden: Ursache überprüfen

- Ist die Regelung der einzelnen Kompressoren anders einstellbar?
- Sind die Kompressorengrößen falsch ausgelegt?
- Ist keine übergeordnete Steuerung vorhanden oder ist diese falsch eingestellt?
- Ist die Größe des Druckbehälters ausreichend?

### 4. Regelung einzelner Kompressoren auf Optimierbarkeit untersuchen

Bei hohen Leerlaufzeiten einzelner Kompressoren:

- Kann die Nachlaufzeit verkürzt und gleichzeitig die maximale Motorschalthäufigkeit eingehalten werden?
- Beachten Sie hierzu auch die angegebenen Lastwechselzyklen, sofern Ihre Messauswertung diese enthält.

### 5. Prüfung der Kompressorengrößen auf richtige Auslegung

- Stellen Sie die Tagesprofile den vorhandenen Kompressoren und möglichen Liefermengen gegenüber: Ist für jeden typischen Druckluftverbrauch eine passende Kompressorkombination vorhanden, so dass der Leerlauf minimal ist?
- Vergleichen Sie die Laufzeit der einzelnen Kompressoren mit dem jeweiligen Verbrauchsprofil: Waren die Kompressoren in Betrieb, deren Größe am Besten ins Verbrauchsprofil passt?
- Können die Kompressoren gezielt zugeschaltet werden, oder ist die Steuerung optimierbar?

Beispiele zur Auswertung finden Sie in 5.2, Erläuterungen zur Kombination von Kompressorengrößen in 1.2.3.

Lassen Sie sich gegebenenfalls Angebote mit einer Aufteilung der Kompressorengrößen gemäß dem ermittelten Verbrauchsprofil erstellen. Gleiches gilt für drehzahlgeregelte Kompressoren als Spitzenlastmaschinen.

### 6. Steuerung der Kompressoren im Verbund

Ist bei mehreren Kompressoren eine übergeordnete Steuerung vorhanden?

- Wenn nein: Holen Sie ein Angebot für eine übergeordnete Steuerung ein und führen Sie Wirtschaftlichkeitsberechnungen durch!
- Wenn ja:
  - Hat die übergeordnete Steuerung einen gemeinsamen Druckaufnehmer?
  - Ist die übergeordnete Steuerung intelligent (verbrauchserkennend)?
  - Wenn die übergeordnete Steuerung nicht verbrauchserkennend ist: Stimmt die Einstellung der Reihenfolge der Kompressoren mit dem Bedarf überein oder besteht hier Handlungsbedarf?

### 7. Größe des Druckluftbehälters auf ausreichende Dimensionierung überprüfen

- Berechnen Sie die notwendige Größe des Druckbehälters mit einer der Formeln aus 1.2.4 und vergleichen Sie diese mit dem vorhandenen Volumen des Druckbehälters.
- Sollte der Druckbehälter wesentlich kleiner dimensioniert sein, als mit der Formel errechnet, so holen Sie Angebote zur Beschaffung eines Neuen ein! Sollte der Druckbehälter wesentlich kleiner dimensioniert sein, als mit der Formel errechnet, so holen Sie Angebote zur Beschaffung eines Neuen ein!

### 8. Ist ein Kompressor proportional geregelt?

Sollten Sie einen proportional geregelten Kompressor stationär betreiben, dann ersetzen Sie diesen aus wirtschaftlichen Gründen z.B. durch eine drehzahlgeregelte Anlage.

### 9. Abschaltung bei geringem Bedarf (über Nacht oder übers Wochenende) prüfen

- Können einzelne Kompressoren ausgeschaltet werden?
- Sind automatische Absperreinrichtungen für verschiedene Hallenbereiche vorhanden?
- Ist eine Absenkung des Druckes über Nacht sinnvoll und möglich?

## 10. Optimierungsmöglichkeiten bei Wasserkühlung prüfen

- Sind die Kühlkreisläufe an die Laufzeiten der Kompressoren gekoppelt?

### ! Darauf ist zu achten:

- Wird bei einer vorhandenen Reihenfolgeschaltung / speicherprogrammierbaren Steuerung (nicht verbrauchs-erkennend) die Einstellung anhand des aktuellen Bedarfs überprüft?
- Sind die Wochenverläufe relativ konstant oder über das Jahr je nach Produktion sehr unterschiedlich? In letzterem Fall sollten Sie sich ein Angebot über eine verbrauchserkennende Steuerung einholen.
- Sollten Sie einen proportional geregelten Kompressor betreiben: Prüfen Sie, inwieweit Sie diesen im Volllastbetrieb fahren können, da im Teillastbetrieb die Energiebilanz äußerst schlecht ist.

## 4.5 Betriebsdruck und Druckverluste prüfen und minimieren

### ! Zielsetzung:

- Druckhöhe der einzelnen Kompressoren bestimmen
- Notwendigkeit der Druckhöhe prüfen
- Druckverluste in der Verteilung ermitteln
- untersuchen, ob es möglich ist den Druck zu reduzieren

### ! Das ist zu tun:

#### 1. Ermitteln Sie den jeweiligen Einschalt- und Ausschalt-Druck der einzelnen Kompressoren

Dies ist vor allem bei deutlich mehr als 7 bar minimalem Einschalt-Druck notwendig.

#### 2. Prüfen Sie die Notwendigkeit der Druckhöhe

- Gibt es einzelne Verbraucher, die diesen Druck benötigen? Wo und welche?
- Falls ja: Holen Sie Angebote ein zu
  - separater Versorgung durch Hochdrucknetz oder dezentralem Kompressor mit höherem Druckniveau
  - Druckerhöhung durch Nachverdichter
- Prüfen Sie die Breite der gesamten Druckkaskade (niedrigster Einschalt-Druck – höchster Ausschalt-Druck). Bei einem breiten Gesamtdruckband – bei Kolbenkompressoren sollte der Ausschalt-Druck 20 %, bei Schraubenkompressoren etwa 0,5 - 1 bar über dem Einschalt-Druck liegen – durch Druckkaskade sollten Sie Angebote zu einer übergeordneten intelligenten Steuerung mit einem gemeinsamen Druckaufnehmer einholen.
- Gibt es Niederdruckanwendungen (2 - 2,5 bar(ü)), die am normalen 7-bar-Netz hängen? Holen Sie Angebote ein und prüfen Sie, ob eine separate Niederdruckversorgung mit rotierenden Verdrängerkompressoren (oder bei sehr großen Mengen mit Turbokompressoren) eine wirtschaftlichere Alternative darstellt.
- 3. Ermitteln Sie die Druckverluste im System
- Führen Sie an verschiedenen Stellen eine Fließdruckmessung durch.
- Liegt der Fließdruck bei den Druckluftwerkzeugen zwischen 6 und 6,3 bar? In diesem Bereich arbeiten die Werkzeuge am effektivsten.
- Bei Druckabfällen von über einem bar Fließdruck von der Erzeugung bis zur Anwendung sollte die Ursache ermittelt werden:
  - Erfassen Sie die Durchmesser der Rohrleitungen, überprüfen Sie die Druckabfälle und die richtige Auslegung (gegebenenfalls rechnergestützte Analyse); Hilfen hierzu finden Sie in 5.6.
  - Überprüfen Sie die Engstellen des Druckluftnetzes:
    - > falsche (=verwinkelte) Verlegung der Rohrleitungen
    - > zu viele oder schlecht gewartete Filter
    - > Schnellkupplungen / Kugelventile / Filter mit schlechter Durchflusskapazität und hohem Druckabfall
    - > Kugelhähne, die keinen vollen Durchgang aufweisen
    - > Verteiler mit gleichem Durchmesser von Eingang und Ausgang

- > Schläuche, die zu lang sind oder zu geringe Durchmesser haben
- > Schläuche, die leicht verspröden
- > zu viele und zu lange Spiralschläuche
- > geflickte Stellen in Schläuchen etc.
- Sind Stichleitungen vorhanden, bei denen der Druckabfall durch Ringschluss reduziert und die Durchflussmenge verdoppelt werden kann?

#### 4. Beseitigen Sie Engstellen

#### 5. Überprüfen Sie erneut die Druckverluste

#### 6. Justieren Sie gegebenenfalls den Betriebsüberdruck der Kompressoren neu auf den untersten Wert

#### ! Darauf ist zu achten:

Als Unterstützung für die Berechnung der Druckverluste erhalten Sie beim Rohrleitungshersteller eine entsprechende Software.

Die Bemühungen, Energie durch Reduzierung der Druckhöhe zu sparen, sollten nicht zu Lasten der Leistungsfähigkeit der Druckluftanwendungen gehen. Eine großzügige Dimensionierung der Rohrleitungsdurchmesser sowie eine sorgfältige Materialauswahl und Verlegung ist deshalb eine notwendige Voraussetzung.

Bei einem niedrigeren Betriebsdruck sinkt das maximal mögliche Durchsatzvolumen des Kältetrockners. Bei der Druckreduzierung ist deshalb zu überprüfen, ob die Trockner auf entsprechend geringeren Druck ausgelegt sind. Korrekturfaktoren erhalten Sie beim Hersteller.

## 4.6 Wartung systematisieren

#### ! Zielsetzung:

- Ist-Stand der Wartung erfassen
- notwendige Wartungen ermitteln
- Wartungsdurchführung
- Wartungssystematisierung

Die Wartung sollte für die Bereiche Erzeugung, Verteilung und Anwendung erfolgen.

#### ! Das ist zu tun:

Erfassen Sie den Ist-Stand der Wartung und ermitteln Sie notwendige Wartungsarbeiten

##### 1. Erzeugung

- Sind Wartungsverträge vorhanden?
- Werden die Wartungen bei
  - Kompressoren,
  - Kältetrocknern,
  - Kondensatableitern,
  - Kondensataufbereitern,
  - Druckluftfilterngemäß den Bedienungsanleitungen durchgeführt und dokumentiert?
- Werden Sicherheitseinrichtungen und Druckbehälter von Sachkundigen gemäß den Vorschriften geprüft?
- Wird eine regelmäßige Leckageortung und -beseitigung durchgeführt?

# Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

## 2. Verteilung

- Werden die Kondensatableiter regelmäßig entleert und überprüft?
- Wird eine regelmäßige Leckageortung und -beseitigung durchgeführt?
- Werden die Filter gewartet?
- Werden die Wartungseinheiten regelmäßig kontrolliert, manuelle Filterentleerungen betätigt und die Öler nachgefüllt?

## 3. Anwendung

- Wird eine regelmäßige Leckageortung und -beseitigung durchgeführt?
- Werden Druckluftwerkzeuge regelmäßig gewartet, auf Leckagen geprüft und schwer gängige Teile repariert?

## 4. Wartungsdurchführung und Systematisierung

- Beseitigen Sie erkannte Mängel bei der Wartung und sorgen Sie dafür, dass diese systematisch durchgeführt und dokumentiert wird.
- Veranlassen Sie die regelmäßige Überprüfung wichtiger Kontrollparameter.
- Notieren Sie regelmäßig Betriebsstunden/Laststunden (mind. monatlich) und werten Sie diese auf einen unerklärlichen Anstieg sowie das Verhältnis Last/Leerlauf aus.
- Führen Sie regelmäßige Liefermengenmessungen zur Früherkennung von kompressorinternen Leckagen durch.

### ! Das ist zu tun:

Wartungen am Kompressor müssen laut Unfallverhütungsvorschriften durch sachkundige Personen durchgeführt werden. Prüfen Sie deshalb, welche Tätigkeiten eigenes Personal erledigen kann und für welche Tätigkeiten Sie eine Fachfirma heranziehen (Wartungsvertrag).

Nehmen Sie die regelmäßige Kompressorrevision durch einen Fachmann zum Anlass und sprechen Sie mit ihm. Ein guter Fachmann sollte die Laufzeiten Ihres Kompressors nach Last- und Leerlaufstunden auswerten und Ihnen gegebenenfalls Optimierungen Ihrer Steuerung anbieten. Dabei sollte auch hinterfragt werden, ob Betriebsdrücke bzw. Einschaltdrücke größer 7 bar notwendig sind.

## 4.7 Anwender überprüfen

### ! Zielsetzung:

- energetisch günstigere Alternativen zu Druckluft als Energieträger suchen
- Möglichkeiten der Verbrauchsminimierung ermitteln

### ! Das ist zu tun:

1. Prüfen Sie, ob bei folgenden Anwendungen die Druckluft als Energieträger notwendig ist und suchen Sie gegebenenfalls nach Alternativen

Anwendung:	energetisch günstigere Alternative:
Abblasen	Staubsauger
Kühlen	Gebläse
Fördern	Gebläse, Förderband
Druckluftmotor	Elektromotor
Druckluftzylinder	Linearmotor, Hydraulik

## 2. Ermitteln Sie Möglichkeiten zur Verbrauchsminimierung

- Einsatzdauer prüfen: Dauerbläser z.B. mit Lichtschranke an tatsächlichen Bedarf koppeln
- Einstellung der Apparate prüfen: z.B. Öffnungszeiten mit Zeitrelais auf das notwendige Minimum beschränken



- Ausblasdüsen optimieren: z.B. Ejektordüsen einsetzen, die Umgebungsluft ansaugen und dadurch dieselbe Blaskraft bei geringerem Druckluftverbrauch erzielen

### 3. Achten Sie darauf, dass die Mitarbeiter, insbesondere in den Planungsabteilungen, regelmäßig geschult werden!

Folgende Themen sollten dabei angesprochen werden:

- ungünstiger Energieverbrauch von Druckluft im Vergleich zu Strom und Hydraulik (Abwägung der Vor- und Nachteile anregen und Alternativen vorstellen)
- Optimierungsmöglichkeiten bei Anwendungen
- Pflichtenhefte für Produktionsanlagen: Anlagen müssen auf einen Betriebsüberdruck von 6 bar ausgelegt sein (Ausnahmen separat absprechen wegen eigener Druckluftversorgung).

Daneben können auch Veranstaltungen mit Vorschlägen zur Druckluftoptimierung durchgeführt werden.

Gerade bei hohen Verbräuchen außerhalb der Produktionszeiten sollte neben der Leckagebeseitigung auch nach sogenannten Dauerbläsern gesucht werden. Diese machen oft einen deutlich größeren Anteil am Leckageverlust aus als vermutet. Der Verbrauch kann hier durch einfache Maßnahmen deutlich reduziert werden.

#### ! Darauf ist zu achten:

Gerade bei hohen Verbräuchen außerhalb der Produktionszeiten sollte neben der Leckagebeseitigung auch nach sogenannten Dauerbläsern gesucht werden. Diese machen oft einen deutlich größeren Anteil am Leckageverlust aus als vermutet. Der Verbrauch kann hier durch einfache Maßnahmen deutlich reduziert werden.

## 4.8 Wärmerückgewinnung prüfen

#### ! Zielsetzung:

Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung ermitteln und auf Wirtschaftlichkeit prüfen

Das ist zu tun:

#### 1. Ermitteln Sie mögliche Wärmeabnehmer

(siehe Beispiele in 1.7)

#### 2. Prüfen Sie das nutzbare Potenzial an Abwärme und deren Einsetzbarkeit anhand folgender Kriterien

- Ist das Temperaturniveau der Abwärme für den Bedarf nutzbar?
- Kann die Abwärme zur gleichen Zeit genutzt werden, wenn sie anfällt?
- Ist die Anzahl der Nutzungsstunden bei hoher Verdichterauslastung pro Jahr sehr groß?
- Liegen die Abwärmeerzeugung und -nutzung im Betrieb nah beieinander?

#### 3. Holen Sie Angebote ein

#### ! 4. Prüfen Sie die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen

Darauf ist zu achten:

Bei der Berechnung der Wärmemengen muss daran gedacht werden, dass nur bei den Volllaststunden mit der vollen Leistungsaufnahme gerechnet werden kann und die Leerlaufstunden nur mit < 30 % der Aufnahmeleistung berücksichtigt werden dürfen.

Von den Herstellern erhalten Sie Tabellen, in denen die Heizkostensparnis für verschiedene Kompressorengrößen berechnet ist. Bitte beachten Sie auch hier: Für die Berechnung des nutzbaren Wärmestroms können nur die Volllaststunden herangezogen werden. Beachten Sie, auf welchen Basiswerten die Berechnungen beruhen (spezifischer Heizwert, Heizölpreis, Heizungswirkungsgrad, Volllaststunden). Wärmeverluste bleiben auf Grund der unterschiedlichen Betriebsverluste unberücksichtigt. Diese sind entsprechend abzuschätzen und abzuziehen!

## 4.9 Gesamtkonzept erstellen

### ! Zielsetzung:

- ideales Druckluftversorgungskonzept für die betriebliche Situation ermitteln
  - Dimensionierung der Kompressoren
  - Auswahl und Kombination von Kompressorgrößen
  - zentrale/dezentrale Aufstellung: Vor- und Nachteile abwägen
  - Einsatz eines Druckluftmanagementsystems
- spezifischen Leistungsbedarf auf „Stand der Technik“ überwachen (siehe Abbildung 1.1j)
- Aufbereitung auf Vollständigkeit und Wirtschaftlichkeit prüfen
- Umgebungsbedingungen festlegen
- Contracting als Alternative untersuchen

### ! Das ist zu tun:

#### 1. Ermitteln Sie das ideale Druckluftversorgungskonzept für die betriebliche Situation

#### 2. Prüfen Sie die Dimensionierung der Kompressoren

- Stellen Sie die Tagesprofile den vorhandenen Kompressoren und möglichen Liefermengen gegenüber: Ist für jeden typischen Druckluftverbrauch eine passende Kompressorkombination vorhanden, so dass der Leerlauf minimal ist? (siehe 1.2.2; Erläuterungen zur Kombination von Kompressorengrößen finden Sie in 1.2.3)
- Lassen Sie sich gegebenenfalls Angebote zu einer Aufteilung der Kompressorengrößen gemäß dem ermittelten Verbrauchsprofil erstellen, ebenso auch ein Angebot mit einem drehzahlgeregelten Kompressor als Spitzenlastmaschine
- Ist eine ausreichende Redundanz an Kompressoren und Aufbereitungseinheiten für die Betriebssicherheit gegeben? Für eine entsprechende Absicherung sollte in der Regel für den größten Verdichter ein redundanter Kompressor mit entsprechender Verschaltung vorhanden sein.
- Ist eine übergeordnete, trenderkennende Steuerung vorhanden?

#### 3. Überprüfen Sie die Wirtschaftlichkeit Ihrer Kompressoren

- Sind die Kompressoren älter als zehn Jahre?
- Entsprechen sie dem Stand der Technik?
  - Vergleichen Sie die Liefermenge mit neuen Anlagen gleicher Nennleistung!
  - Berechnen Sie den spezifischen Leistungsbedarf alt/neu, soweit Daten vorhanden sind!
  - Berücksichtigen Sie bei der Abschätzung verschleißbedingte Verschlechterungen!
- Wägen Sie anhand der Laufzeiten der Kompressoren die Auswirkung eines höheren Energieverbrauchs auf die Gesamtkosten ab!

#### 4. Überprüfen Sie, inwieweit Sie an dem vorhandenen Konzept zentral bzw. dezentral etwas ändern sollten. Lassen Sie sich hierzu von Fachleuten beraten

#### 5. Untersuchen Sie, ob die Aufbereitung vollständig und wirtschaftlich ist

- Überprüfen Sie die Anforderungen an die Qualität Ihrer Druckluft mit der vorhandenen Situation: Ist Ihre Druckluft ausreichend ölfrei und trocken?
- Liegen auftretende Probleme
  - an der Überlastung der Aufbereitungseinheiten,
  - an alten Ablagerungen im Netz,
  - an einer falschen bzw. nicht ausreichenden Aufbereitung?
- Wird nur soviel aufbereitet wie nötig und nur dort, wo notwendig?

- Bei unterschiedlichen Anforderungen an die Qualität: Lässt sich eine dezentrale Aufbereitung inklusive regelmäßiger Überprüfung und Wartung der Filter sicherstellen?
- Ist der Trockner energiespargeregelt? Hat Ihr Betrieb ein unregelmäßiges Verbrauchsprofil? Dann lassen Sie sich ein Angebot mit Wirtschaftlichkeitsberechnung für einen energiespargeregelten Trockner erstellen.
- Sind die Kondensatableiter elektrisch niveaureguliert?

### 6. Prüfen Sie die Umgebungsbedingungen der Kompressoren und Trockner

- Sind die Kompressorräume ausreichend belüftet?
- Sind die Temperaturen während der Sommermonate sehr hoch (über 38 °C)?
- Kann die Ansaugöffnung für die Druckluft gegebenenfalls in kältere Bereiche verlegt werden?
- Sind die Kompressoren staubgeschützt aufgestellt?

### 7. Sind Investitionen in die Druckluftversorgung derzeit nicht gewünscht? Stellt ein Druckluft-Contracting für Ihren Betrieb eine Alternative dar?

- Lassen Sie sich gegebenenfalls ein Angebot hierzu erstellen.

#### **!** Darauf ist zu achten:

Für die Optimierung Ihrer gesamten Druckluftversorgung ist der Rat eines Fachmanns unverzichtbar. Eine gute Vorbereitung Ihrerseits ermöglicht ein weitgehend maßgeschneidertes Konzept und erleichtert Ihnen den Vergleich verschiedener Angebote. Bei einer vorausschauenden Planung des Idealzustandes kann bei einer unvermutet notwendigen Ersatzbeschaffung die passende Kompressorengröße ausgewählt werden. Tatsächlich wird ansonsten in der Regel aus Zeitgründen ein gleich großer Kompressor ausgewählt.

Zur Ermittlung des Druckluftbedarfs und zur Erhebung der Druckluftsituation eignet sich auch das Online-Werkzeug „Druckluftbedarf ermitteln“. Den Link dazu finden Sie unter 5.7.

## 5 Anhang

Auf den folgenden Seiten befinden sich die Arbeitsblätter, auf die in den vorhergehenden Kapiteln mehrmals verwiesen wurde:

- 5.1 Formblatt zur Ist-Stand-Ermittlung
- 5.2 Checkliste für eine Wochenverbrauchsmessung
- 5.3 Checkliste zum Ermitteln von Verbesserungspotentialen

Darüber hinaus finden Sie im Anhang noch detailliertere Ausführungen zu den folgenden Themenbereichen:

- 5.4 Leckagebestimmung
- 5.5 Berechnung der jährlichen Energiekosten für die Druckluftherzeugung sowie anteilig für Leckagen
- 5.6 Hinweise für die Auslegung von Rohrleitungen

Der Anhang schließt mit einem Informationsteil:

- 5.8 Literaturverzeichnis und Links

## 5.1 Formblatt zur Ist-Stand-Ermittlung

1. Nutzerinformationen			
Betrieb:			
Ansprechpartner:			
2. Kurzbeschreibung des Standortes			
Fertigung von:			
Anzahl Mitarbeiter:			
Schichtbetrieb/Fertigungszeiten:			
	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3
von... bis...			
Schwankungsbreite des Verbrauchsprofils: <input type="checkbox"/> hoch <input type="checkbox"/> mittel			
<input type="checkbox"/> niedrig			
Fertigung auch am Sonntag: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein			
Druckluftverwendung für:			
3. Gesamtsituation der Druckluftversorgung			
installierte Gesamtleistung der Kompressoren:		kW	
ungefährer Jahresbedarf:		m <sup>3</sup> /a	
Anzahl der Stationen (ggf. Übersichtsplan):			
Wochenverbrauchsmessung vorhanden:		<input type="checkbox"/> ja u. ggf. (Jahr                      )	
<input type="checkbox"/> nein			
übergeordnete Steuerung:		<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	
Einspeisung in:		<input type="checkbox"/> gemeinsames Netz	
		<input type="checkbox"/> separate Netze	<input type="checkbox"/> gleiches Druckniveau <input type="checkbox"/> unterschiedliches Druckniveau

eingestellter Betriebsüberdruck (Netzdruck):	
Aufbereitung für:	<input type="checkbox"/> Gesamtanlage (zentral) <input type="checkbox"/> Linienaufbereitung <input type="checkbox"/> Gesamtaufbereitung mit Nachfilterung vor Ort
Anforderungen an die Druckluftqualität: <input type="checkbox"/> gering <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> hoch <input type="checkbox"/> unterschiedlich je nach Betriebsbereich oder Klassen nach DIN ISO 8573 (nur wenn bekannt): Drucktaupunkt: Gesamtölgehalt: feste Verunreinigungen:	
auftretende Probleme? (z.B. Kondensat in der Druckluft, Öl in der Druckluft, Betriebssicherheit, Druck ausreichend)	
Druckluftbehälter:	<input type="checkbox"/> an Stationen <input type="checkbox"/> auch dezentral
Gesamtstromverbrauch für die Druckluftherzeugung:	<div style="text-align: right;">kWh</div>
Wartung:	<input type="checkbox"/> Wartungsvertrag <input type="checkbox"/> interne vorbeugende Wartung <input type="checkbox"/> keine regelmäßige vorbeugende Wartung
Abwärmennutzung vorhanden?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> teilweise
Nutzung für:	
<b>4. Druckluftnetz</b>	
Ringleitung:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
ungefähre Länge des Druckluftnetzes (Hauptleitung):	
Nennweite der Hauptleitung:	
Material der Leitungen:	
Leitungen:	

<input type="checkbox"/> verschraubt <input type="checkbox"/> gelötet <input type="checkbox"/> geschweißt <input type="checkbox"/> gequetscht <input type="checkbox"/> geklebt	
bekannte/ geschätzte Leckverluste (%):	
Verbraucher- bzw. Bereichsabspernung bei Nichtbedarf:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Außerbetriebnahme einzelner Kompressoren am Wochenende:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
<b>5. sonstiges</b>	
spezielle Fragestellungen/ Schwerpunkte:	
<b>6. Beschreibung der Station</b>	
Bezeichnung der Station:	
Druckluftbehälter :	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <span style="margin-left: 100px;">Volumen:</span>
Drucklufttrockner vorhanden:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Typbezeichnung: kW: Bauart:	
<input type="checkbox"/> Kältetrockner energiespargeregelt <input type="checkbox"/> Kältetrockner ohne Energiesparregelung <input type="checkbox"/> Adsorptionstrockner kaltregeneriert <input type="checkbox"/> Adsorptionstrockner warmregeneriert: <input type="checkbox"/> extern beheizt <input type="checkbox"/> intern beheizt <input type="checkbox"/> Membrantrockner	
eigene Kondensataufbereitung:	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Kondensatableiter:	<input type="checkbox"/> Handablass <input type="checkbox"/> schwimmergesteuert <input type="checkbox"/> zeitgetaktet <input type="checkbox"/> elektrisch niveaureguliert <input type="checkbox"/> unbekannt
Abwärmenutzung vorhanden?	
<input type="checkbox"/> ja => wie?	
<input type="checkbox"/> nein => Nutzungsmöglichkeiten vorhanden?	

bei mehreren Kompressoren:

- übergeordnete elektrische Steuerung
- „Schaltung über Druckschalter“ (druckabhängiger Folgeinsatz)

ggf. Breite der gesamten Druckkaskade (bar):

#### 7. Vorhandene Filter:

- Aktivkohlefilter  Aktivkohleabsorber  Oberflächenfilter
- Tiefenfilter  Tiefen-(Steril-)Filter



8. Kompressoren					
Kriterien/ Kompressoren	K 1	K 2	K 3	K 4	K 5
Station:					
Typenbezeichnung:					
Hersteller:					
Baujahr des Kompressors:					
Bauart: (Schraube, Kolben, Turbo, Vielzellen/Rotation, sonstiges)					
Stufenzahl:					
installierte Leistung (kW):					
effektive Liefermenge: nach ISO 1217 Annex C (=gesamt)(m <sup>3</sup> /min)					
eingestellter Betriebsüberdruck (Einschaltdruck – Ausschaltdruck):					

Leerlaufleistungsaufnahme (kW):						
Steuerungsart: (Aussetz-/ Nachlauf-/ Proportional-/ Drehzahlregelung/ lastabhängige Regelung):						
Schmierung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• ölgeschmiert / öleingespritzt</li> <li>• ölfreie Verdichtung (wassereingespritzt / trockenlaufend)</li> </ul>						
Kühlung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• luftgekühlt</li> <li>• wassergekühlt: Wasserkreislauf geschlossen / offen</li> </ul>						
(Gesamtbetriebsstunden pro Jahr):						
(Lastbetriebsstunden pro Jahr):						

## 5.2 Checkliste für eine Wochenverbrauchsmessung

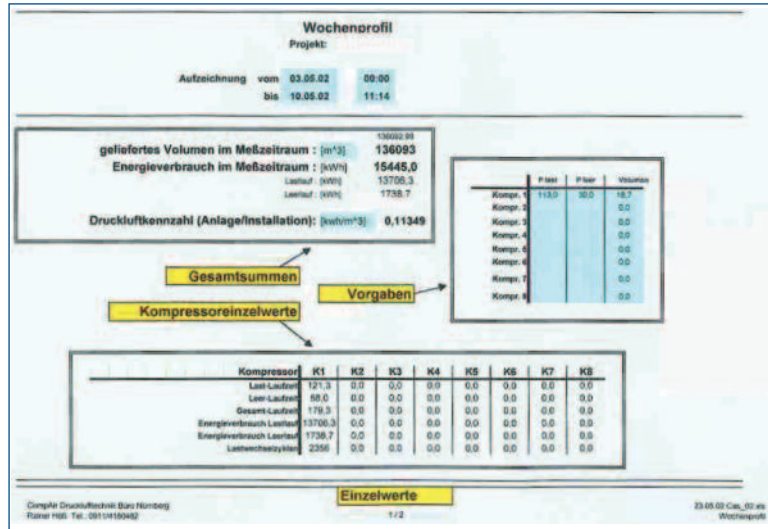
Firma:	Betriebsbereich:		
<b>1. Analyse des Messzeitraums</b>			
typische Arbeitswoche:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	
Feiertage:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	
Anzahl Arbeitstage:			
Anzahl produktionsreduzierte Tage:			
Anzahl produktionsfreier Tage inkl. Feiertag:			
<b>2. typisches Profil eines Produktionstages</b>			
durchschnittlicher Verbrauch während der verschiedenen Schichten:			
	Schicht 1	Schicht 2	Schicht 3
Verbrauch m <sup>3</sup> /min			
maximaler Verbrauch:	m <sup>3</sup> /min		
minimaler Verbrauch:	m <sup>3</sup> /min		
Druckluftverbrauch je Produktionstag in m <sup>3</sup> /d (Durchschnitt aus Produktionstagen des Messzeitraumes):	m <sup>3</sup> /d		
<b>3. typisches Wochenprofil</b>			
Schwankt der Verbrauch an den verschiedenen Arbeitstagen oder bleibt er gleich?	<input type="checkbox"/> schwankt	<input type="checkbox"/> in etwa gleichbleibend	
Ursache	<input type="checkbox"/> Schwankungen liegen innerhalb des tatsächlichen Verbrauchs  <input type="checkbox"/> tatsächliche Leistungsfähigkeit der Kompressoren		
Druckluftverbrauch am Samstag:	m <sup>3</sup> /d		
Druckluftverbrauch am Sonntag:	m <sup>3</sup> /d		
<b>4. Leckageabschätzung anhand des Verbrauchs in der produktionsfreien Zeit</b>			
durchschnittlicher Verbrauch in der produktionsfreien Zeit:	m <sup>3</sup> /min		
ggf. bekannte durchlaufende Druckluftanwendungen abziehen:	m <sup>3</sup> /min		
Leckage:	m <sup>3</sup> /min		
Leckage in % vom durchschnittlichen			

Verbrauch an Druckluft während der Produktionszeit:			
pro Jahr für Leckage „verbrauchte“ Druckluft in m <sup>3</sup> /a (Anzahl Betriebstage Kompressoren/a x 24 Stunden x 60 min x Leckage in m <sup>3</sup> /min):		m <sup>3</sup> /a	
<b>5. Auslegung der Kompressoren/Leerlauf/Steuerung</b>			
Kompressorengrößenstaffelung entsprechend dem wechselnden Bedarf:		<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
		<input type="checkbox"/> bedingt	
Laufzeiten der Kompressoren gesamt in Stunden:			
	Lastlauf	Leerlauf	gesamt
Produktionstag			
produktionsfreier Tag			
hohe Leerlaufzeiten durch <input type="checkbox"/> Spitzenlast- oder <input type="checkbox"/> „wild schaltende“ Kompressoren			
Laufzeiten- Leerlauf in % der Gesamtlaufzeit:			
maximales Druckniveau:		bar	
Breite der Druckkaskade:		bar	
Einsparpotential bei Reduzierung auf gemeinsame Schaltdifferenz von 0,3 bar (Gesamtdruckbandbreite für Druckkaskade (bar) - 0,3 bar]x6 - 10% der Lastenergie pro Jahr):			
kWh			
Art der übergeordneten Steuerung:			
<input type="checkbox"/> Grundlastwechselschaltung		<input type="checkbox"/> Reihenfolgeschaltung	
<input type="checkbox"/> speicherprogrammierbare Steuerung		<input type="checkbox"/> verbrauchserkennend	
<b>6. Berechnung der jährlichen Kosten</b>			
Jahresverbrauch berechnen: korrigierten Verbrauch des Messzeitraums (Feiertage/Anzahl Arbeitstage) auf das Jahr hochrechnen (Betriebszustand an arbeitsfreien Tagen berücksichtigen); ggf. für verschiedene Netze:			
Jahresbedarf	m <sup>3</sup> für	bar- Netz	
Jahresbedarf	m <sup>3</sup> für	bar- Netz	
Jahresbedarf	m <sup>3</sup> für	bar- Netz	
Jahresbedarf	m <sup>3</sup> für	bar- Netz	
derzeit durchschnittlicher Strompreis		/kWh	
Jahresbedarf Leerlauf:		kWh für	
Jahresbedarf Last:		kWh für	
jährliche Energiekosten gesamt:			
berechnete Gesamtkosten (jährliche Gesamtkostenberechnung für Drucklufterzeugung: 1 Cent bis 2,5 Cent pro m <sup>3</sup> Druckluft bei Stromkosten von 5 Cent pro kWh und 7 bar):			

bei Cent pro m <sup>3</sup>			
jährliche Gesamtkostenberechnung für Leckage ( <i>Betriebszustand an arbeitsfreien Tagen berücksichtigen</i> ):			
<b>7. Konsequenzen</b>			
Konsequenzen	Handlungsbedarf		Bemerkung
	ja	nein	
Leckageminimierung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Absperrungen/Abschaltungen prüfen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Regelung von Einzelanlagen prüfen; Speichervolumen Druckluftbehälter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Angebot für übergeordnete intelligente Steuerung einholen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Druckabsenkung prüfen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Neubeschaffung abgestufter Kompressorengrößen prüfen (ggf. erst nach Leckagebeseitigung!)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
bei separaten Netzen: Kann ein Versetzen der Kompressoren zu einer besseren Auslastung führen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
spezifischer Leistungsbedarf des Systems	kW*min/Nm <sup>3</sup>		
Druckluftkennzahl des Systems			

# Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

(Beispielhafte Auswertung)



## 5.3 Checkliste zum Ermitteln von Verbesserungspotentialen

Kompressoren	kein Handlungsbedarf	Handlungsbedarf
	ja	nein
Wurde entsprechend den Anforderungen die geeignetste Kompressor-Bauart gewählt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurde auf einen möglichst passenden Verdichtungsdruck geachtet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind die Kompressoren auf dem neuesten technischen Stand und nicht älter als zehn Jahre?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Weisen die Kompressoren einen niedrigen spezifischen Leistungsbedarf auf?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wird zur Kühlung ein Luftkühler verwendet? (außer die Wärmemenge lässt sich nicht ausreichend abtransportieren)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind die Größen der Kompressoren optimal anhand des Verbrauchsprofils ausgewählt, so dass zu den typischen Verbrauchszeiten jeweils passende Kompressorengrößen mit minimalem Leerlauf zur Verfügung stehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Steht alternativ zu abgestuften Kompressorengrößen ein drehzahl geregelter Kompressor mit hohen Laufzeiten bei einer Auslastung von 40 - 80 % zur Verfügung?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Regelung/Steuerung

	ja	nein
Betragen die Leerlaufzeiten weniger als 30 % der Gesamtlaufzeit?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurde die Nachlaufzeit der Kompressoren optimal eingestellt, bei der Auswahl der Kompressoren die passende Größe berücksichtigt und eine übergeordnete Steuerung für Kompressoren im Verbund installiert?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hat die übergeordnete Steuerung einen gemeinsamen Druckaufnehmer für alle Kompressoren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wählt die übergeordnete Steuerung als Spitzenlastkompressor die jeweils passenden Kompressorengrößen aus (verbrauchserkennend oder Anpassung an das Wochenverbrauchsprofil)?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden keine Kompressoren drosselgeregelt / proportionalgeregelt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wird ein vorhandener drehzahl geregelter Kompressor als Spitzenlastkompressor mit hohen Laufzeiten bei einer Auslastung von 40 - 80 % eingesetzt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind die Druckluftspeicher ausreichend groß gewählt, um die Leerlaufzeiten und Schaltspiele zu minimieren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden Kompressoren außerhalb der Produktionszeit ausgeschaltet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden Kompressoren, die nicht abgeschaltet werden können, über Nacht oder am Wochenende mit reduziertem Druck gefahren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ist der Kühlwasserkreislauf an die tatsächliche Kompressorlaufzeit gekoppelt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Aufbereitung

	ja	nein
Werden Kältetrockner eingesetzt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden für ölfrei verdichtende Kompressoren warmregenerierende Adsorptionstrockner mit Nutzung der Verdichterwärme eingesetzt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden energiesparegeregelte Trockner eingesetzt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden die Trockner nach Abschaltung der Kompressoren außerhalb der Betriebszeiten ebenfalls ausgeschaltet und erst eine Viertelstunde vor Inbetriebnahme der Kompressoren eingeschaltet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wird die Druckluft nur bis zur tatsächlich benötigten Qualität aufbereitet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden vorhandene Filter regelmäßig gewartet und ausgetauscht und sind diese mit einer Differenzdruckanzeige ausgestattet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wird bei der Auswahl der Filter auf einen geringen Druckabfall und eine gute Durchflusskapazität bei passendem Abscheidegrad geachtet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ist der Druckluftspeicher in einem möglichst kühlen Bereich aufgestellt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Befindet sich der Druckluftbehälter vor dem Trockner?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden elektronisch niveauregulierende Kondensatableiter oder zeitgesteuerte Magnetventile verwendet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wird das Kondensat ordnungsgemäß aufbereitet und entsorgt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Leckagen

	ja	nein
Ist der Erzeugungsdruck so niedrig wie möglich, um die absolute Leckagemenge auf das Minimum zu reduzieren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind die Höhe der Leckagen sowie die jährlich entstehenden Kosten bekannt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Liegen die Leckagen bei kleinen Netzen unter 5 %, bei mittelgroßen Netzen unter 10 % und bei sehr großen Netzen unter 15 %?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wird in den Bereichen Erzeugung, Verteilung und Anwendung regelmäßig eine Leckagesuche und –beseitigung durchgeführt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind die Mitarbeiter vor Ort über mögliche Kosten durch Leckagen informiert?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Haben die Mitarbeiter eine einfache und effektive Möglichkeit, Leckagen an ihrem Arbeitsplatz zu markieren und zu melden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden die Last- und Betriebsstundenzähler mindestens monatlich abgelesen und die Ergebnisse kontrolliert?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind einzelne Hallenbereiche sowie Maschinen und Entnahmestellen mit Absperreinrichtungen versehen, so dass sie außerhalb der Verbrauchszeiten nicht mit Druckluft versorgt werden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Können die Absperreinrichtungen per Hand aktiviert werden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind die Schläuche aus gutem Material, so dass sie belastbar sind und nicht so leicht verspröden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



**Druckhöhe und Druckverluste**

	ja	nein
Sind die Rohrleitungen und das Leitungszubehör ausreichend dimensioniert und auf minimalen Druckabfall ausgelegt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Können Stichleitungen zu Ringleitungen erweitert werden, um den Druckverlust zu senken und die Durchflussmenge zu verdoppeln?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Liegt der bei der Anwendung anstehende Druck im optimalen Bereich (z.B. bei Druckluftwerkzeugen 6 - 6,5 bar)?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wird nur auf die tatsächlich notwendige Druckhöhe verdichtet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden Anwender, die eines höheren Druckniveaus bedürfen, durch ein separates Hochdrucknetz oder Nachverdichter versorgt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden Niederdruckanwendungen (2 - 2,5 bar (ü)) über ein separates Niederdrucknetz versorgt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurde die Schaltdifferenz zwischen Einschaltdruck und Ausschaltdruck möglichst gering gehalten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurde ein Kompromiss zwischen niedrigem Enddruck und wenigen Schaltspielen pro Zeiteinheit gefunden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden mehrere Kompressoren über einen gemeinsamen Drucksensor mit entsprechender übergeordneter Steuerung statt einer Druckkaskade zugeschaltet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Weisen die ausgewählten Schnellkupplungen / Kugelventile eine möglichst gute Durchflusskapazität und einen möglichst geringen Druckabfall auf?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden Sicherheitskupplungen mit vollem Durchgang verwendet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurde und wird auf qualitativ hochwertige Materialien geachtet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Weisen die Eingänge einen größeren Durchmesser auf als die Ausgänge?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurde bei der Auswahl von Kugelhähnen auf einen vollen Durchgang geachtet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden so wenig Filter wie möglich eingesetzt und diese entsprechend gewartet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurden ausreichende Querschnitte gewählt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurde bei der Beschaffung von Filtern auf geringen Druckabfall und eine gute Durchflusskapazität bei ausreichendem Abscheidegrad geachtet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurden die Schläuche so kurz wie möglich gewählt (max. 3 m)?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind die Schläuche aus gutem Material, so dass sie belastbar sind und nicht so leicht verspröden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden Spiralschläuche nur dort verwendet, wo sie unbedingt notwendig sind?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden nur notwendige Armaturen eingebaut und diese in Luftfließrichtung in der Reihenfolge Luftfilter, Druckregler, Öler?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sind Leitungen und Schläuche so geradlinig wie möglich verlegt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden bei Bedarf lange Bögen und Hosenstücke statt Knie- und T-Stücke verwendet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden Provisorien vermieden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Wärmerückgewinnung

	ja	nein
Wurde die Möglichkeit einer Wärmerückgewinnung geprüft und umgesetzt?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Wartung

	ja	nein
Werden Kompressoren, Kältetrockner, Filter, Kondensatableiter und Kondensataufbereitung systematisch gewartet und diese Wartung auch dokumentiert?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wurde für nicht selbst durchführbare Wartungen ein Wartungsvertrag abgeschlossen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden Sicherheitseinrichtungen und Druckbehälter von Sachkundigen gemäß den Vorschriften geprüft?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werden die Betriebsparameter der Kompressoren und Trockner, bei Filtern	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 5.4 Leckagebestimmung

Die folgenden zwei Messmethoden können zu einer überschlägigen Kalkulation der Leckagemengen herangezogen werden. Für beide Methoden gilt: Die Leckageermittlung wird während der Betriebsruhe durchgeführt. Um die Leckagemengen in den Leitungen bzw. bei den Verbrauchern abschätzen zu können, wird in zwei Durchgängen gemessen:

1. gesamte Leckagen: Werkzeuge, Maschinen und Geräte sind angeschlossen (aber nicht in Betrieb), Absperrventile sind offen
2. Netzleckagen: Absperrventile vor den Anschlüssen der Druckluftausrüstung sind geschlossen

Die Messung der Belastungszeiten / Gesamtzeiten ist nur dann sinnvoll, wenn die Liefermenge des Kompressors genau bekannt und nicht durch kompressorinterne Leckagen reduziert ist.

### 5.4.1 Messungen durch Druckbehälterentleerung

Diese Methode beruht auf folgendem Prinzip: Der Druck im Behälter wird auf den benötigten Maximaldruck erhöht. Dann wird die Zeitdauer gemessen, in welcher der Druck auf Grund der Leckagen um 1-2 bar sinkt. Die Zuleitung vom Kompressor ist dabei abgeriegelt. Die Methode ist in Abbildung 5.4a dargestellt.

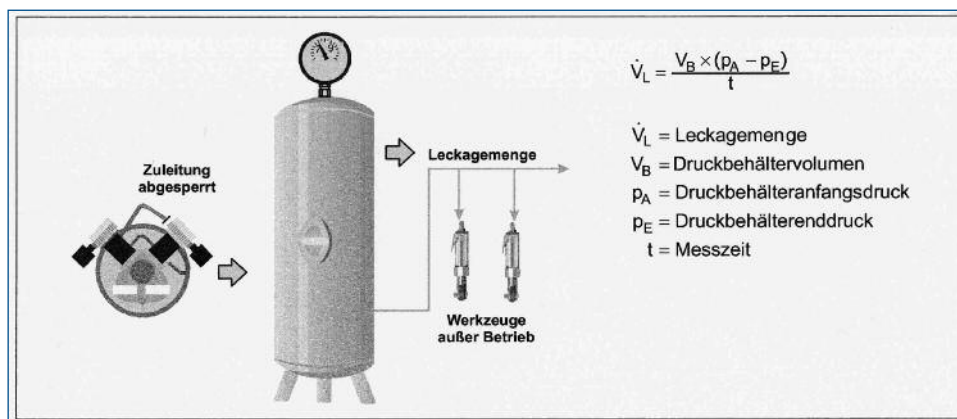


Abbildung 5.4a: Leckagemessung durch Druckbehälterentleerung  
(aus Druckluft effizient, Fakten III Messtechnik)

Mit der angegebenen Formel kann die tatsächliche Leckagemenge berechnet werden.

Sollte das Ergebnis dieser Messung deutlich niedriger sein als die in der Wochenverbrauchsmessung ermittelten Verbräuche in der produktionsfreien Zeit, dann liegt der Verdacht einer kompressorinternen Leckage nahe.

### 5.4.2 Messung der Belastungszeiten / Gesamtzeiten

Leckageermittlung während Betriebsruhe: Mit einer Stopp-Uhr wird die Arbeitszeit des Kompressors (Vorsicht – ohne Nachlaufzeit) und Gesamtzeiten gemessen und ins Verhältnis gesetzt:

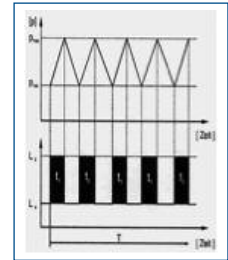
$$V^0_L = \frac{V^0_K \cdot t}{T}$$

mit:  $V^0_L$  = Leckagemenge in m<sup>3</sup>/min  
 $V^0_K$  = Kompressor-Volumenstrom in m<sup>3</sup>/min  
 t = Gesamtzeit in Sekunden, in denen der Kompressor arbeitet  
 T = Gesamtzeit in Sekunden

## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung

Für die Messung ist folgendes zu beachten:

- Der ausgewählte Kompressor muss mind. 30 % des normalen Druckluftverbrauchs liefern.
- Der Volumenstrom (Liefermenge) muss als gesichert angesehen werden.
- Diese Methode ist nur bei Kompressoren mit Aussetz- oder Leerlaufbetrieb möglich.
- Die Messdauer sollte mind. 5 Schaltintervalle dauern, dass die Messung genauer ist.
- $t$  = alle Zeiteinheiten, in denen der Kompressor arbeitet  
=  $t_1+t_2+t_3+t_4+t_5$



Beispielrechnung:

- Ein Kompressor mit einer effektiven Liefermenge  $V^0_K$  von 1,65 m<sup>3</sup>/min hat während der Messzeit  $T = 180$  s fünf Schaltspiele. Die Gesamtzeiteinheiten  $t$  des Kompressors, in denen er arbeitet, betragen 30 s.

$$V^0_L = \frac{(1,65 \text{ m}^3/\text{min} \times 30 \text{ s})}{180 \text{ s}} = 0,275 \text{ m}^3/\text{min}$$

- Die Leckagemenge beträgt 0,275 m<sup>3</sup>/min.

Für beide Methoden gibt es ein Online-Tool der Fa. Kaeser. Der Link ist in 5.7 zu finden.

### 5.5 Berechnung der jährlichen Energiekosten für die Druckluftherzeugung sowie anteilig für Leckagen

$$\text{Gesamtleistungsaufnahme} = \frac{\text{elektr. Leistungsbedarf der Gesamtanlage [kW]}}{\text{Motorwirkungsgrad [-]}}$$

$$\text{Energiekosten pro m}^3 \text{ Druckluft [€/m}^3\text{]} = \frac{\text{Gesamtleistungsaufnahme [kW]} \times \text{Strompreis [€/kW]}}{\text{Liefermenge der Gesamtanlage [m}^3/\text{h]}}$$

$$\text{Energiekosten pro Jahr} = \frac{\text{Druckluftbedarf [m}^3/\text{h]} \times \text{Laststunden [h/a]}}{\text{Energiekosten pro m}^3 \text{ Druckluft [€/m}^3\text{]}}$$

$$\text{Energiekosten Leerlauf [€/a]} = \text{Leistungsaufnahme im Leerlauf [kW]} \times \text{Leerlaufstunden pro Jahr [h/a]} \times \text{Strompreis [€/kWh]}$$

Die Leerlaufstunden pro Jahr können aus dem Messzeitraum hochgerechnet werden.

**Alternativ:**

Für eine überschlägige Berechnung können Sie auch das Verhältnis Leerlauf / Gesamtbetriebsstunden über die gesamte bisherige Laufzeit der Kompressoren anhand der Zählerstände an den Kompressoren berechnen:

- Betriebsstundenzähler
- Laststundenzähler
- Leerlauf = Differenz Betriebsstundenzähler – Laststundenzähler
- Verhältnis Leerlauf / Betriebsstunden gesamt = Leerlauf x 100 pro Betriebsstunden gesamt

**Anteilige Energiekosten pro Jahr für Leckage:**

Für die Berechnung der Energiekosten / Jahr für die Leckagen wird an Stelle des Druckluftbedarfs die ermittelte Leckagemenge je Stunde gesetzt.

$$\text{Energiekosten für Leckage [€/a]} = \text{Leckagemenge / h} \times \text{Betriebsstunden [h/a]} \times \text{Energiekosten pro m}^3 \text{ Druckluft [€/m}^3\text{]}$$

### 5.6 Hinweise für die Auslegung von Rohrleitungen

Die folgenden Auslegungsempfehlungen stammen aus Bierbaum, Freitag: Druckluft-Kompedium.

Um den erforderlichen Innendurchmesser eines Rohres zu bestimmen, muss zuallererst die äquivalente Rohrlänge abgeschätzt werden.

Rohrleitungen bestehen nicht nur aus geraden Rohrstücken, sondern auch aus Ventilen, Armaturen und Rohrkrümmern, die einen wesentlichen Teil des Strömungswiderstandes ausmachen.

Für diese Armaturen muss entsprechend der vorliegenden Rohrlänge noch eine gleichwertige Rohrlänge für alle Armaturen aufgerechnet werden, um die strömungstechnische / äquivalente Rohrlängung zu erhalten.

Armaturen	Gleichwertige Rohrlänge [ m ]						
	Rohr- und Armaturenennweite [ DN ]						
	DN 25	DN 40	DN 50	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150
Absperrventil	8	10	15	25	30	50	60
Membranventil	1,2	2,0	3,0	4,5	6	8	10
Absperrschieber	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5
Kniebogen 90°	1,5	2,5	3,5	5	7	10	15
Bogen 90° R = d	0,3	0,5	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5
Bogen 90° R = 2d	0,15	0,25	0,3	0,5	0,8	1,0	1,5
T-Stück	2	3	4	7	10	15	20
Reduzierstück D = 2d	0,5	0,7	1,0	2,0	2,5	3,5	4,0

Bei Neuanlagen, bei denen die Anzahl der Armaturen noch nicht bekannt ist, wird pauschal die Rohrlängung mit 1,6 multipliziert, um die äquivalente Rohrlängung zu erhalten.

Unter Zuhilfenahme des folgenden Nomo-gramms kann graphisch der benötigte Innen-durchmesser abgelesen werden.

Abbildung 5.6a: Gleichwertige Rohrlänge bei Armaturen (aus: Bierbaum, U., Druckluft-Kompedium)

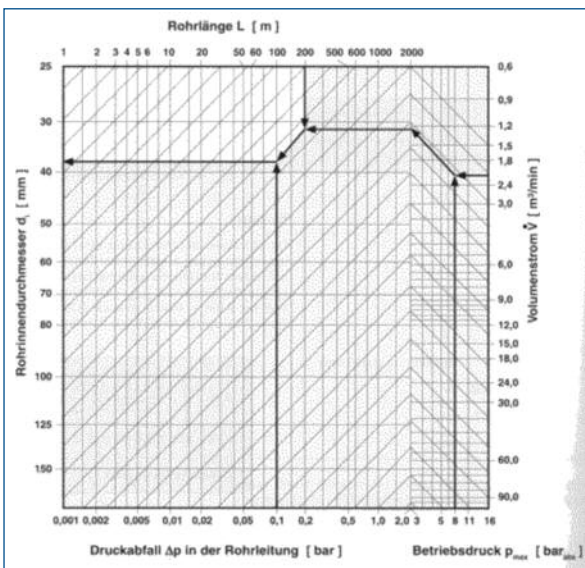


Abbildung 5.6b: Nomogramm zur Bestimmung des Rohrlinnendurchmessers (aus: Bierbaum, U., Druckluft-Kompedium)

Der benötigte Innendurchmesser kann aber auch mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$d_i = \sqrt[3]{\frac{1,6 \cdot 10^3 \cdot \rho^{0,85} \cdot L}{10^{10} \cdot \Delta p \cdot p_{max}}}$$

- $d_i$  Innendurchmesser der Rohrleitung [m]
- $V$  Gesamtvolumenstrom [m³/s]
- $L$  äquivalente Rohrlänge [m]
- $\Delta p$  agestrebter Druckabfall [bar]
- $p_{max}$  Kompressoraussschalt- druck [barabs]

## 5.7 Literaturverzeichnis und Links

### Literaturverzeichnis

- Bahr, M. und Ruppelt, E.: Taschenbuch Drucklufttechnik. Hg. Kaeser Kompressoren. Essen, 2000.
- Bierbaum, U. und Freitag, G.: Druckluft-Kompodium. Hg. Hoppenstedt Bonnier Zeitschriften, Darmstadt, 2004.
- Druckluft effizient, Fraunhofer-Institut Systemtechnik und Innovationsforschung: Druckluft effizient Fakten I-IX; Karlsruhe 2002
- Dudda, C., Radgen, P., Schmid, J.: Contracting – Finanzierung – Betreibermodelle. Leitfaden für die Anwendung bei Druckluftanlagen. Hg. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung. Karlsruhe, 2002.
- Energieagentur NRW: Seminarunterlagen Druckluft. Wuppertal.
- Feldmann, K.-H.: Optimale Druckluftverteilung. Hg. expert Verlag Renningen, 2003
- Feldmann, K.-H., Mohrig, W. und Stapel, A.G.: Druckluftverteilung in der Praxis. Hg. Atlas Copco Tools GmbH, Gräfelfing, 1985.
- Gloor, R.: Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz. Hg. Bundesamt für Energie. Bern, 2000
- Kaeser Kompressoren GmbH: Druckluft-Seminarunterlagen, Coburg.
- Müntz, F.: Wirkungsgradoptimierung der Druckluftherzeugung und –verteilung. Materialien zu Ravel. Hg. Bundesamt für Konjunkturfragen. Bern, 1992.
- Palletin, W. und Stapel, A.G.: Volles Rohr für mehr Produktivität. Installationsleitfaden für Luftwerkzeuge. Hg. Atlas Copco Tools Central Europe GmbH. Essen, 2001.
- Radgen, P.: Energieverbrauch, Einsparpotentiale und Maßnahmen zur Aktivierung der Einsparpotentiale bei der Druckluftherzeugung. Hg. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung. Stuttgart, 2001
- Radgen, P., und Blaustein, E.: Compressed Air Systems in the European Union. Hg. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung. Stuttgart, 2001.
- Ruppelt, E. (u.a.): Druckluft Handbuch. Hg. Kaeser Kompressoren GmbH. Essen, 1996.
- Wieczorek, J.: Die wirtschaftliche Druckluftstation. Hg. Atlas Copco Kompressoren GmbH. München, 2000.
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Effiziente Druckluftsysteme, Augsburg 2004

**Links:**

Weitere Informationen zum Thema Druckluft finden Sie im Internet auf der Plattform [www.druckluft-effizient.de](http://www.druckluft-effizient.de). „Druckluft effizient“ ist eine bundesweite Kampagne der Deutschen Energie- Agentur, dem Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung und dem VDMA (Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.), die durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wird. Hier gibt es neben Informationen, Links und Literatur auch die Möglichkeit zur Teilnahme an einem Benchmarking sowie ein Diskussionsforum.

Unter [www.kaeser.de/online-services/toolbox/default.asp](http://www.kaeser.de/online-services/toolbox/default.asp) findet sich eine Vielzahl an Online-Berechnungsmöglichkeiten zu Wärmerückgewinnung, Druckabfall, Leckagen, Kesselgrößen, Druckluftbedarf.

[www.druckluft-e-market.de](http://www.druckluft-e-market.de) ist eine herstellerübergreifende Plattform, die Produkte, Firmen und Dienstleistungen präsentiert. Hier sind jedoch nur einige Hersteller vertreten; sie stellt somit keine komplette Marktübersicht dar.

Das im Literaturverzeichnis erwähnte Druckluftkompendium, initiiert von einer Kompressorenherstellerfirma und herausgegeben von Hoppenstedt Bonnier Zeitschriften, ist auch im Internet unter [www.drucklufttechnik.de](http://www.drucklufttechnik.de) in digitalisierter Fassung zu finden.

**Rückmeldungen/Erfahrungsberichte:**

Der Leitfaden lebt von Erfahrungsberichten der Betriebe. Möchten Sie Ihre Erfahrungen in die nächste Aktualisierung einfließen lassen? Dann teilen Sie uns diese unter folgender Adresse mit:

Industrie- und Handelskammer Nürnberg  
Innovation | Umwelt  
Hauptmarkt 25/27  
90403 Nürnberg

**Impressum**

Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken  
Geschäftsbereich Innovation | Umwelt  
Dr.-Ing. Robert Schmidt  
Hauptmarkt 25/27  
90403 Nürnberg

**Erarbeitung der Inhalte**

Petra Lämmer  
Büro für Arbeitssicherheit, Umweltschutz und Energiemanagement  
Gerhart-Hauptmann-Straße 102  
90763 Fürth  
E-Mail: [PetraLaemmer@web.de](mailto:PetraLaemmer@web.de)

1. Auflage, April 2012

© IHK Nürnberg für Mittelfranken

Dank bei der Erstellung des Leitfadens an:

- Herrn Czuja, Kaeser Kompressoren, Erlangen / Coburg
- Herrn Prof. Weiß, Hochschule Amberg - Weiden



## Druckluft effizient nutzen – Praxisleitfaden für Energieeffizienz und Kosteneinsparung