

INITIATIVE
EnergieEffizienz +
Industrie & Gewerbe

Infoblätter Druckluftsysteme: Messtechnik.

Wozu messen? + Was wird gemessen? + Druck + Volumenstrom +
Luftqualität + Leckageraten.

Wozu messen?

Wer ein System bedienen oder optimieren möchte, sollte wissen, was in ihm geschieht. Messgeräte geben Aufschluss über aktuelle Zustands- und Prozessgrößen und in Zusammenarbeit mit Datenaufzeichnungsvorrichtungen oder Prozessleitsystemen auch über Trends, Abweichungen und das dynamische Zusammenspiel der Systemkomponenten. Die Signale aus der Messtechnik dienen als Feedback für Regelkreise.

Messsignale werden aber nicht nur für die Prozesssteuerung eingesetzt, sondern auch für die Überwachung, z. B. von

- Filtern
- Dichtheit (Leckagen)
- Qualität
- Kompressorleistung
- Wirkungsgraden

Ausgewertet dienen die archivierten Messgrößen als Datengrundlage für Erweiterungen, Neuauslegungen und Optimierungen.

Die Vielfalt der möglichen Messgeräte ist schier endlos.

Für jede Messgröße gibt es eine Vielzahl verschiedener Messverfahren und für jedes Messverfahren wiederum ein breites Spektrum an Geräteausführungen. Messungen können kontinuierlich oder diskontinuierlich, z.B. mobil erfolgen. Für Regelkreise sind die Messgeräte fast immer fest installiert und speisen ein digitales oder analoges Signal in einen Feldbus oder einen lokalen Regler ein. Zur Überwachung von Maschinen und Anlagen und zum Sammeln von Daten für die Anlagenplanung werden oft mobile Messgeräte oder fest eingebaute mechanische Messgeräte mit lokaler Anzeige eingesetzt. Zur Erfassung der Daten muss ein Techniker zu dem entsprechenden Gerät gehen. Oft kann er die Daten von dort direkt in ein Notebook oder in ein digitales Handgerät auslesen. Später werden die Informationen dann an einem Arbeitsplatzrechner ausgewertet.

Als Anlagenbetreiber sollte man darauf achten, die Anzahl der verwendeten Gerätetypen und Anschlussarten zu begrenzen.

Abhängig von der Art des Messgerätes, den Umgebungsbedingungen, den hygienischen Anforderungen und der Frage, wie oft die Geräte demontiert werden müssen, steht eine Vielzahl von Anschlussarten bereit. Einige Beispiele sind:

- Flanschverbindungen
- Rohrverschraubungen
- Klemmverschlüsse
- Tri-Clamp-Verschlüsse
- Steckanschlüsse

Die Messgeräte selber gibt es wiederum in unterschiedlichen Güteklassen (Messgenauigkeiten) und mit unterschiedlichen Messbereichen. Beim Einsatz eines elektronischen Messgerätes muss sich der Anwender zudem noch entscheiden, welches Ausgangssignal er verwenden will. Allgemein üblich sind einfache digitale Signale (An/Aus) oder analoge Signale entweder von 0 bis 20 mA oder von 4 bis 20 mA. Während ein Messsignal von 0 bis 20 mA eine höhere Auflösung ermöglicht, erkennt bei einem Signalbereich von 4 bis 20 mA das Prozessleitsystem automatisch, ob ein Messkabel gebrochen ist oder versehentlich entfernt wurde. Diese Messgeräte bieten daher eine höhere Sicherheit. Für die Auslesung komplexerer Daten und zur Kalibrierung der Messgeräte sind RS232-Schnittstellen üblich.

Angesichts dieser Vielfalt ist es sinnvoll, sich auf einige wenige Standardgeräte zu konzentrieren. Je höher die Anzahl verschiedener Geräte, Anschlüsse, Messklassen, desto größer wird auch der Aufwand für die Instandhaltung und die Ersatzteilverhaltung.

Was wird gemessen, und wie?

Im Folgenden wird eine Auswahl von Messverfahren beschrieben, die für Druckluftsysteme eine besondere Relevanz hat. Hierbei gibt es jeweils die Möglichkeit, entweder die Messgröße kontinuierlich zu messen, oder nur ein Kontrollsignal beim Erreichen eines bestimmten Grenzwertes zu erhalten. Die wichtigsten Messgrößen für die Steuerung und Überwachung eines Druckluftsystems sind:

- Druck
- Volumenstrom
- Luftqualität
- Leckageraten

Statischer Druck, Staudruck, Differenzdruck.

Der Druck ist die wichtigste Steuer- und Kontrollgröße in einem Druckluftsystem. Der Gesamtdruck in einem durchströmten Rohrleitungssystem setzt sich aus dem statischen und dem dynamischen Druck zusammen. Der statische Druck ist der, den wir empfinden, wenn wir tief unter Wasser tauchen. Die Energie des dynamischen Druckes spüren wir auf unserer Haut, wenn wir unser Gesicht in den Wind halten. Die beiden Druckarten existieren nicht unabhängig nebeneinander sondern sind miteinander verknüpft und ineinander umwandelbar. Wenn sich in einem Rohrleitungssystem der Querschnitt verengt, muss die Strömung dort schneller fließen und der dynamische Druck nimmt zu. Da aber die Gesamtenergiehöhe gleich bleiben muss, nimmt der statische Druck ab. Dieser Zusammenhang wird in der Strömungslehre durch die **Bernoulli-Gleichung** beschrieben:

Gesamtdruck = Statischer Druck + Dynamischer Druck

$$p_t = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

Hierbei ist ρ die Dichte und v die Strömungsgeschwindigkeit.

Den statischen Druck kann man messen, indem man ein Manometer quer zur Strömungsrichtung installiert, so dass die Luft parallel an der Druckaufnehmermembran vorbeiströmt. Den Staudruck misst man, wenn man die Strömung senkrecht auf die Druckmessfläche treffen lässt. Zwei Beispiele, wie die Staudruckmessung in der Praxis umgesetzt wird, finden sich im Abschnitt Volumstrommessung.

Misst man den statischen Druck an zwei verschiedenen Stellen, kann man aus der Druckdifferenz entweder den Strömungswiderstand des Rohrabschnitts zwischen den beiden Punkten oder die Strömungsgeschwindigkeit berechnen, wenn eine der beiden Größen bekannt ist. Der Strömungswiderstand gibt z. B. Aufschluss darüber, wie stark ein Filter zugesetzt ist, aus der Strömungsgeschwindigkeit lässt sich der Volumenstrom errechnen.

Druckmessgeräte, vom klassischen Manometer zum elektronischen Druckaufnehmer.

Das bekannteste, klassische Druckmessgerät ist das Sichtmanometer, bei dem der Druck lokal auf einer Zeigerskala abgelesen wird. Ausgestattet mit Kontakten wird das Manometer zum elektrischen Grenzwertgeber, das heißt es sendet ein Signal beim Erreichen eines fest vorgegebenen Wertes. Diese Technik wurde in Druckluftstationen bis zum Ende des letzten Jahrhunderts z.B. an Differenzdruckmanometern zur Überwachung von Filtern

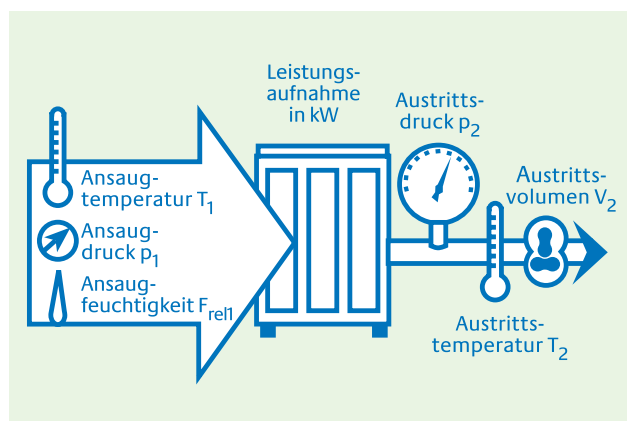
eingesetzt. Wegen des hohen Einstellungsaufwandes, mäßiger Wiederholgenauigkeit und einer oft auch zu geringen Auflösung ist diese Technik heute nicht mehr zeitgemäß. Messwerte werden heute durch elektronische Druckaufnehmer ermittelt, als reine Grenzwertgeber kommen Membrandruckschalter zum Einsatz. Sichtmanometer haben heute nur noch ergänzend zur Vor-Ort-Kontrolle ihren Platz.

Volumenstrom, Massenstrom, Strömungsgeschwindigkeit.

Die Volumenstrommessung wird zum Nachweis der Förderleistung, zur Bestimmung des Gesamtluftverbrauchs eines Betriebes und der Verbrauchswerte einzelner Produktionseinheiten verwendet.

Der Volumenstrom ist gleich dem Massenstrom geteilt durch die Dichte des Gases. Da Luft kompressibel ist, hängt der Volumenstrom vom Druck ab und verändert sich daher bei Änderungen des Rohrquerschnitts (s. Bernoulli-Gleichung) und über die Rohrlänge aufgrund der Reibungsdruckverluste. Darüber hinaus hängt der Volumenstrom ebenfalls von der Temperatur ab.

Abb. 1: Messung des Ansaugvolumenstromes



Um eine Vergleichbarkeit zu erhalten, rechnet man den Luftvolumenstrom bei Betriebsbedingungen in den Volumenstrom um, den die Luft hätte, wenn ihre Dichte der Luftdichte bei physikalischen Normbedingungen oder bei Umgebungsbedingungen entspräche. Praxisrelevanter ist die Angabe bei Umgebungsbedingungen, da diese einen Aufschluss über die Arbeitsfähigkeit des Luftstroms gibt. Schließlich kann sich die Druckluft im Pneumatikwerkzeug wieder bis auf Umgebungsbedingungen entspannen.

Für diese Umrechnung ist die kontinuierliche Ermittlung des Umgebungszustandes notwendig, was zusätzlichen Mess- und Automatisierungsaufwand bedeutet. Bei Volumenstrommessungen zur innerbetrieblichen Abrechnung oder zum Planen einer neuen Kompressorstation wird oft vereinfachend auf die durchschnittlichen Druck- und Temperaturbedingungen am Aufstellungsort zurückgegriffen. Unerlässlich ist jedoch in den meisten Fällen eine gleichzeitige Messung des Betriebsdruckes und der Betriebstemperatur an der Messstelle, da diese in der Regel stärker schwanken.

Der Volumenstrom kann entweder direkt („volumetrisch“) gemessen oder aus dem gemessenen Massenstrom, dem Staudruck oder der Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden.

Die volumetrische Messung ist genau aber aufwendig.

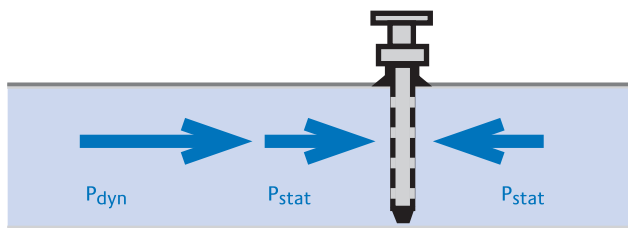
Volumetrische Messverfahren liefern hochgenaue Messwerte, die u.a. zum Bestimmen der Förderleistung von Kompressoren genutzt werden. Die wichtigsten volumetrischen Messgeräte sind der Drehkolbengaszähler und der Turbinenmessradzähler. Während der Drehkolbengaszähler in einem Messbereich von 10 bis 90 Prozent seines maximalen Durchsatzvolumens eingesetzt werden sollte, bietet der Turbinenmessradzähler auch im unteren Messbereich hohe Genauigkeit.

Volumetrische Messgeräte sind aufgrund ihres komplexen Aufbaus relativ wartungsintensiv und empfindlich gegen Überlast und Druckstöße.

Staudruckmessgeräte „rechnen“ den statischen Druck von selber raus.

Eine Messung des Staudrucks ermöglicht es, den Volumenstrom mit hoher Genauigkeit zu ermitteln. Dabei kann wahlweise ein Prandtl-Rohr oder eine Staudrucksonde zum Einsatz kommen. Das Prandtl- bzw. Pitotrohr ist ein Röhrchen, dessen Eingang quer und dessen Ausgang parallel zur Strömungsrichtung liegt. Am Eingang liegt der Gesamtdruck, also die Summe aus dynamischem und statischem Druck an. Da am Ausgang nur der statische Druck anliegt, entspricht der Differenzdruck zwischen Ein- und Ausgang dem dynamischen Druckanteil. Dieser ist proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit. Das Pitot-Rohr wird auch in der Luftfahrt zur Strömungsmessung benutzt. Es ist erkennbar durch ein kleines Röhrchen, das aus der Flugzeugnase ragt.

Abb. 2: **Staudrucksonde**



Auch die Staudrucksonde misst lediglich den dynamischen Druck, da die statischen Druckkräfte von allen Seiten gleich sind und sich gegenseitig aufheben. Die Abbildungen 2, 3, 4 und 5 zeigen die Messprinzipien, wobei das U-Rohr-Manometer hier symbolisch für einen beliebigen Differenzdruck-Messaufnehmer steht.

Differenzdruck-Strömungsmesser provozieren Druckdifferenzen.

Eine Einschnürung in einer Rohrleitung bildet einen Strömungswiderstand. Der Energieverlust über diesen Widerstand ist proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit. Diese Tatsache nutzt die Strömungsmessung mittels Messblende, indem sie gezielt einen Druckverlust erzeugt. Auf Basis ihres bekannten Widerstandsbeiwertes kann dann die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden.

Abb. 3: **Pitot- bzw. Prandtl-Rohr**

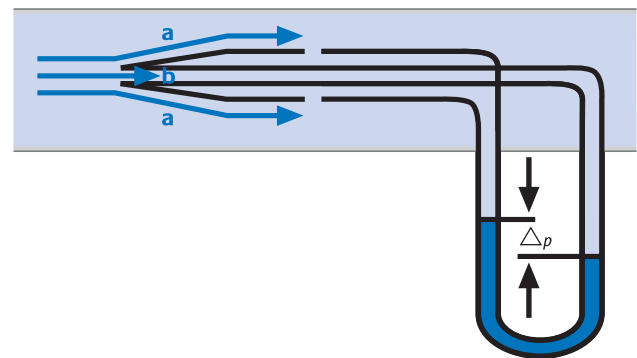
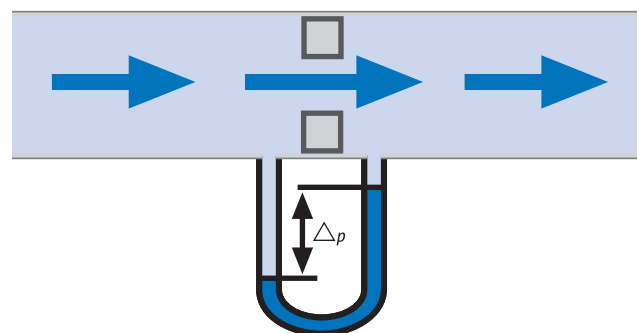
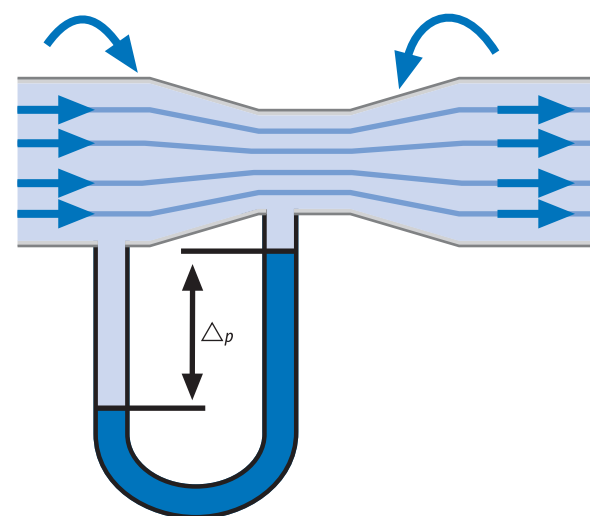


Abb. 4: **Messblende**



Etwas eleganter ist das Venturimeter. Es braucht keinen Energieverlust für die Messung. Stattdessen nutzt es den in der Bernoulli-Gleichung beschriebenen Zusammenhang und die Tatsache, dass sich bei einer Verengung des Querschnittes die Strömungsgeschwindigkeit erhöht. Die daraus resultierende Erhöhung des dynamischen Druckes (kinetische Energie) hat aufgrund des Energieerhaltungsgesetzes eine lokale Absenkung des statischen Druckes zur Folge. Aus dieser Druckdifferenz kann man auf die Strömungsgeschwindigkeit rückschließen.

Abb. 5: **Venturimeter**

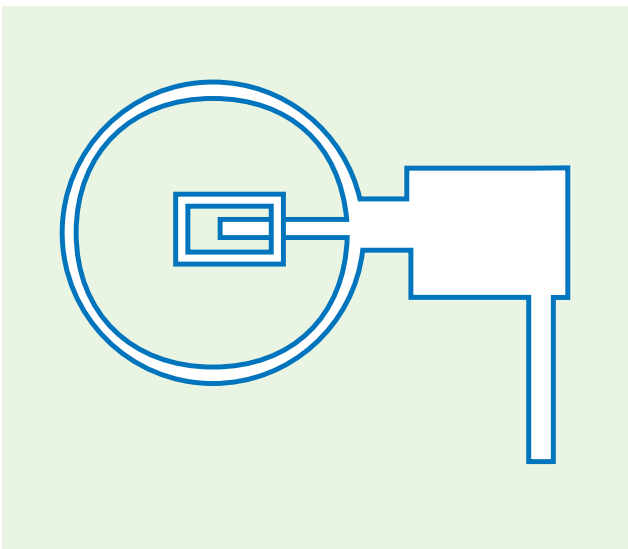


Kalorimetrische Messverfahren messen die Kühlwirkung der Luft.

Kalorimetrische Messverfahren schließen aus dem Wärmetransport vom Messgerät in die Luft auf die Strömungsgeschwindigkeit. Ihr Vorteil gegenüber mechanischen Messverfahren ist, dass sie bereits auf sehr kleine Strömungsgeschwindigkeiten bei sehr geringem Druck ansprechen. Das sogenannte Hitzdrahtanemometer besteht aus einem Heizdraht, der durch die vorbeiströmende Luft gekühlt wird. Die Änderung des Heizdrahtwiderstandes hängt vom Massenstrom ab.

Die physikalischen Zusammenhänge sind komplex, so dass eine gute Kalibrierung nötig ist. Vom Auslegungspunkt abweichende Temperatur, Feuchtigkeit und Druckschwankungen beeinflussen das Ergebnis stark. In vielen Fällen ist daher eine Temperatur- und Druckkompensation notwendig. Moderne Varianten arbeiten mit zwei in der Strömung hintereinander geschalteten Temperaturfühlern. Über einen Heizkreis im ersten wird Energie an das Fluid abgegeben. Aus der gemessenen Temperaturdifferenz lässt sich der Massenstrom errechnen.

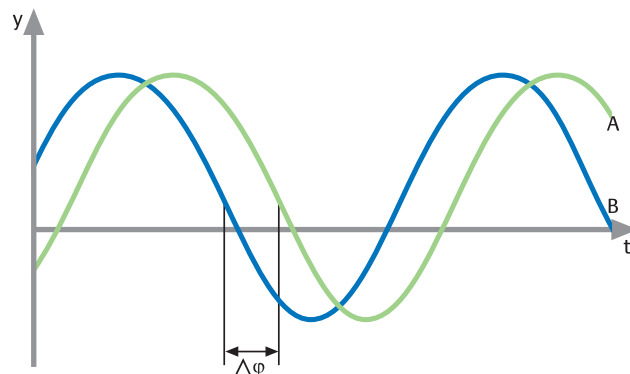
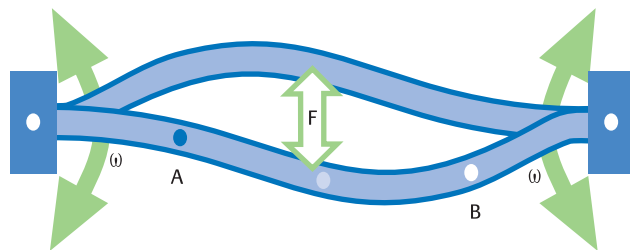
Abb. 6: Kalorimetrische Volumenstrommessung



Coriolis-Massenstrommesser schwingen im Kreis.

Coriolis-Massenstrommesser nutzen die „Coriolis-Kräfte“, die entstehen, wenn sich geradlinige und drehende Bewegungen überlagern. Die Coriolis-Messgeräte bestehen aus zwei bogenförmigen metallischen Rohren, die mittels Magneten in Schwingung gesetzt werden. Das vorbeiströmende Fluid verursacht eine Phasenverschiebung in der Schwingung, welche über Magnete an den Enden der Schwingarme in eine Spule induziert und dann elektronisch ausgewertet wird. Neben dem Massenstrom lässt sich auch die Dichte des vorbeiströmenden Fluids bestimmen, da diese die Resonanzfrequenz des Schwingensystems beeinflusst. Die Messungen haben eine hohe Genauigkeit. Zudem hat ein Coriolis-Massenstrommesser den Vorteil einer spaltfreien Konstruktion, was ihn besonders für hygienische Anwendungen interessant macht.

Abb. 7: Coriolis Massenstrommessung



- ω = Winkelgeschwindigkeit
- F = Corioliskraft
- $\Delta\phi$ = Phasenverschiebung
- A,B = Sensoren
- y = Amplitude
- t = Zeit

Auch der Kompressor kann als Messgerät agieren.

Aus den über einen „Datalogger“ aufgezeichneten Vollast-, Leerlauf- und Stillstandszeiten des Verdichters lässt sich der Gesamtluftverbrauch eines Druckluftsystems ermitteln. Dieses indirekte Messverfahren ist vor allem für die Kostenerfassung und Systemoptimierung nützlich. Auf Basis der ausgewerteten Daten kann man die Prozesssteuerung so anpassen, dass die Kompressorleistung vergleichmäßigt wird. Eine Reduzierung der Lastspitzen erlaubt eine Steigerung der Anlagenkapazität, ohne dass ein größerer Kompressor nötig wird. Eine Verminderung der Leerlaufzeiten erhöht den Systemwirkungsgrad. Trendanalysen geben Hinweise auf Störungen, Leckagen und Ineffizienzen im System. Da die entsprechenden Signale ohnehin oft schon bereitstehen, sind die Installations- und Anschaffungskosten gering.

Bei der Messung der Luftqualität ist die Art der Probenahme entscheidend.

Turbulenzen, Strömungsumlenkungen und die Schwerkraft sorgen dafür, dass Schadstoffe in Rohrströmungen nicht gleichmäßig verteilt sind. Durch Effekte, die mit der Wirkungsweise von Zentrifugen oder Zyklonen vergleichbar sind, werden Partikel in manchen Zonen aufkonzentriert. Insbesondere wenn Randströmungen vorhanden sind, ist die Probe an einem Ort zu entnehmen, an dem sicher gestellt ist, dass sie eine repräsentative und verwertbare Mischung aller Bestandteile der Druckluft enthält. Messanordnungen für eine solche (isokinetische) Probenentnahme und nachgeschaltete Messsysteme sind in der Norm ISO 8573ff beschrieben.

Abb. 8: Isokinetische Probeentnahme

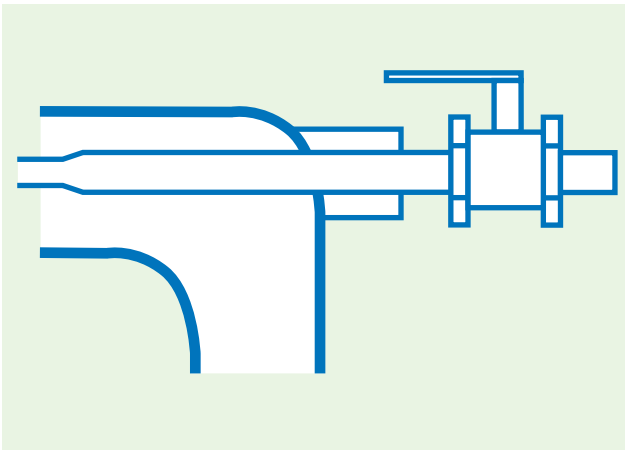
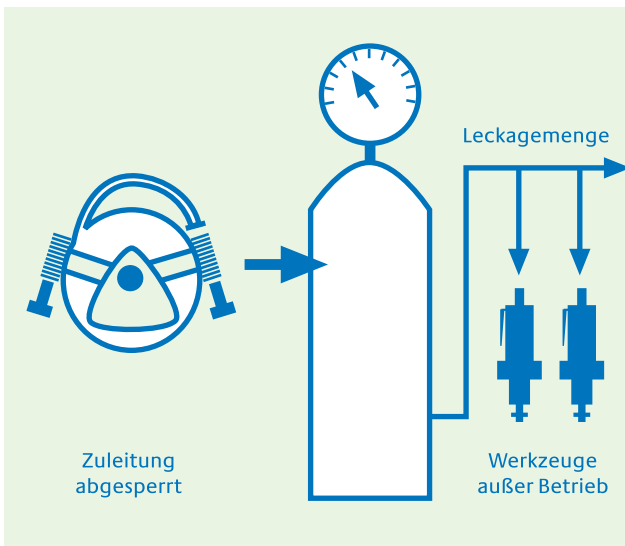


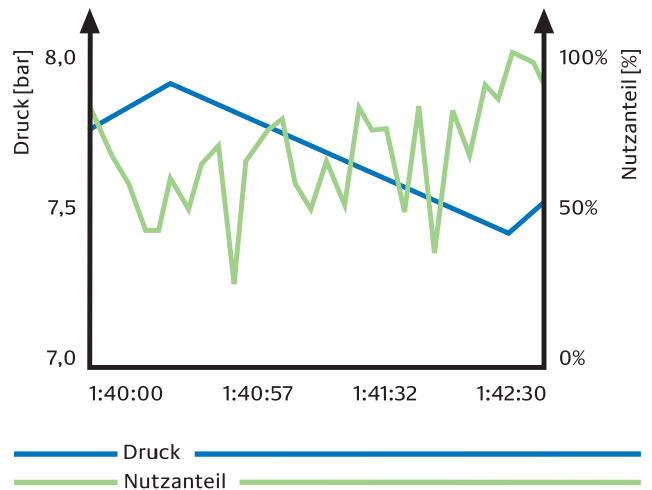
Abb. 9: Leckage-Messung durch Druckluftbehälterentleerung



Die Dynamik des Druckverlaufs gibt Aufschluss über Leckagen.

Eine einfache Methode Leckraten zu ermitteln ist, den Kompressor und alle Druckluftwerkzeuge abzuschalten und zu messen, wie schnell der Druck im Druckbehälter sinkt. Da dies bei Anlagen, die sonst rund um die Uhr laufen, unnötige Stillstandskosten verursacht, sind Verfahren gefragt, die im laufenden Betrieb angewandt werden können. Dazu wurden Verfahren entwickelt, welche die Leckrate aus der Dynamik des Druckverlaufs ermitteln.

Abb.10: Leckage-Analyse bei laufendem Betrieb



Mithilfe eines Drucksensors werden über einen längeren Zeitraum in kurzen Abständen die Drücke gemessen und gespeichert. Gleichzeitig werden die Kompressorlaufzeiten aufgezeichnet. Die Druckkurven werden anschließend mit einem mathematischen Verfahren derart bearbeitet, dass das Unternehmen hinterher zu jedem einzelnen Messzeitpunkt genau weiß, wie groß der Nutzlastanteil ist. Dies erfolgt durch eine Berechnung der Druckabfälle und deren Gradienten, die mittels eines mathematischen Algorithmus eine „Idealkurve“ ergeben. Die Idealkurve wird mit den real gemessenen Kurven verglichen.

Aus den ermittelten relativen Verlustraten (in Prozent) lassen sich unter Hinzuziehung der Verdichterlaufzeiten die Gesamtverluste errechnen.

Die Angebote der Initiative EnergieEffizienz.

Fast alle Branchen des produzierenden oder weiterverarbeitenden Gewerbes setzen Druckluft für die verschiedensten Anwendungen ein. Dabei bestehen in diesem Bereich erhebliche Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz: meist können in den Betrieben der Stromverbrauch – und damit die Kosten – um 5 bis 50 Prozent gesenkt werden. Die meisten Effizienzmaßnahmen sind mit Amortisationszeiten von weniger als zwei Jahren und hohen Kapitalrenditen von über 20 Prozent wirtschaftlich sehr attraktiv für die Unternehmen.

Die *Initiative EnergieEffizienz* will mit diesen Faktenblättern und vielen weiteren Angeboten einen Beitrag zur Erschließung dieser Potenziale leisten. Näheres zu diesen Angeboten finden Sie im Internetportal www.druckluft-energieeffizienz.de.

Neben der Druckluftnutzung bestehen auch in weiteren Bereichen oft große Effizienzpotenziale in Industrie- und Gewerbebetrieben aller Branchen.

Daher bietet die *Initiative EnergieEffizienz* über das Thema Druckluft hinaus auch in weiteren Bereichen umfassende Informationen und praxisnahe Unterstützung für Unternehmen, die Strom effizienter nutzen und Kosten einsparen möchten.

Die *Initiative EnergieEffizienz* steht für effiziente Stromnutzung in allen Verbrauchssektoren und ist eine in dieser Form einmalige Public-Private-Partnership: Mit zielgruppenspezifischen Kampagnen und Projekten werden Endverbraucher in privaten Haushalten, in Industrie und Gewerbe sowie im Dienstleistungssektor über die Möglichkeiten des effizienten Stromeinsatzes informiert und zum energieeffizienten Handeln motiviert. Näheres zu den Angeboten in diesen Sektoren finden Sie unter www.initiative-energieeffizienz.de.

Die *Initiative EnergieEffizienz* wird getragen von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) sowie den Unternehmen der Energiewirtschaft – EnBW Energie Baden-Württemberg AG, E.ON AG, RWE AG und Vattenfall Europe AG und wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

Eine Initiative von



Gefördert durch das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Impressum:
Informationsblätter
Druckluftsysteme

Herausgeber:
Deutsche Energie-Agentur
GmbH (dena)
Energieeffizienz im
Elektrizitätsbereich
Chausseestraße 128a, 10115 Berlin

Kontakt:
Tel.: +49 (0) 30 - 72 61 65 - 600
Tel.: +49 (0) 30 - 72 61 65 - 699
E-Mail: info@dena.de

Internet:
www.druckluft-energieeffizienz.de
www.dena.de