

Programm *Elektrizität*
Forschungsprojekt



Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz

ausgearbeitet durch
Rolf Gloor
Gloor Engineering
7434 Sufers

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Vertragsnummer: 73 503
Projektnummer: 33 564

**Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden.
Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor
dieses Berichts verantwortlich.**

Zusammenfassung

In der Schweiz verbrauchen 150'000 Druckluftanlagen im Jahr rund 750 GWh Elektrizität, was 1,5% des nationalen Stromverbrauchs ausmacht. In Industrie- und Gewerbebetrieben beanspruchen Druckluftanlagen bis zu 25% des betrieblichen Stromverbrauchs. Pneumatische Prozesse haben aber einen schlechten Gesamtwirkungsgrad, was wirtschaftliche Energiesparmöglichkeiten zwischen 5% und 50% ermöglicht. In der Schweiz könnten mit energieeffizienten Druckluftanlagen theoretisch 300 GWh, praktisch 100 GWh Strom pro Jahr eingespart werden.

Tendenziell kann festgestellt werden, dass grössere Druckluftanlagen einen überproportionalen Stromverbrauch aufweisen aber auch grössere und wirtschaftlichere Energiesparmöglichkeiten bieten. Die etwa 10'000 grösseren Druckluftanlagen (ab 15 kW Kompressorleistung) verbrauchen rund 80% des Druckluftstromes. Mit jährlichen Stromkosten für Druckluft von über 5000 Franken sind für die Betreiber dieser Anlagen Energiesparmassnahmen interessant. Bei den übrigen kleinen Anlagen sind Sparbemühungen weniger wirtschaftlich.

Bei Druckluftanlagen spielen ähnliche Mechanismen wie bei Haustechnikanlagen (Wärme, Lüftung, Kälte). Bezogen auf den Stromverbrauch sind aber vor allem die grossen Anlagen relevant. Diese Anlagen sind komplex und erfordern Fach- und Marktwissen. Dafür wäre eine Fachhochschule als unabhängiges Kompetenzzentrum für Druckluft eine geeignete Instanz. Nur auf einer soliden technischen Plattform kann mit den spezialisierten Anbietern kompetent über Checklisten und Label verhandelt werden. Die erfolgreichste Massnahme ist eine ausgeklügelte Anleitung (Checkliste), welche die Anbieter beim Verkauf von nützlichen Energiesparmassnahmen unterstützt.

Summary

In Switzerland 150'000 compressed air units use approximately 750 GWh electricity, which constitutes 1.5% of the national current consumption in the year. In industrial companies require compressed air units up to 25% of the operational current consumption. Pneumatic processes have however a bad overall efficiency, which enables economic possibilities to save energy between 5% and 50%. In Switzerland theoretically 300 GWh, practically 100 GWh electrical current per year could be saved with energy-efficient compressed air units.

Generally can be found that larger compressed air units indicate a superproportional current consumption, but that offers also larger and more economical possibilities to save energy. Those for instance 10'000 larger compressed air units (starting from 15 kW of compressor capacity) cause approximately 80% of the pneumatic flow. With annual costs of electricity for compressed air of over 5000 Swiss Francs energy saving measures are interesting for the operators of these systems. With the remaining small systems savings efforts are less economical.

With compressed air units similar mechanisms play as with building services systems (heating system, ventilation, cooling plant). Related to the current consumption however above all the large systems are relevant. These systems are complex and require specialized technical and market knowledge. An engineering school would be as independent authority center for compressed air a suitable instance. Only on a solid technical platform can be negotiated with the specialized suppliers competently about check lists and label. The most successful step is supported a thought out guidance (check list) which helps the suppliers with the sales of useful energy saving measures.

Résumé

En Suisse, par année des 150'000 installations à air comprimé consomment environ 750 GWh d'électricité, ce qui constitue 1,5% de la consommation d'énergie électrique nationale. Dans les entreprises traditionnelles et industrielles les installations à air comprimé emploient jusqu'à 25% de la consommation d'énergie électrique de service. Les processus pneumatiques ayant toutefois un mauvais rendement total permettent des possibilités de sauvetage énergétiques économiques entre 5% et 50%. En Suisse, il serait théoriquement possible d'économiser 300 GWh d'électricité par année, pratiquement 100 GWh, sur les installations à air comprimé.

Tendanciellement on peut constater que plus les installations à air comprimé sont grandes, elles prétendent une consommation d'énergie électrique supérieure à la proportionnelle, mais elles offrent aussi des possibilités de sauvetage énergétiques plus grandes et plus économiques. Par exemple les 10'000 plus grandes installations à air comprimé (à partir de 15 kW de puissance de compresseur) emploient environ 80% de l'électricité d'air comprimé. Si les dépenses annuelles pour l'air comprimé dépassent les 5000 francs, les mesures d'économie d'énergie sont intéressantes pour les exploitants de ces installations. Pour les autres petites installations les efforts d'économisé sont moins réels.

Dans les installations à air comprimé, les mécanismes sont semblables a ceux des installations (chaleur, aération, froid). Par rapport à la consommation d'énergie électrique, ce sont surtout les grandes installations qui sont significatives. Cette installations sont complexes et elles exigent des connaissances techniques et le savoir du marché. Une école technique supérieure serait une instance qualifiée comme centre de compétence indépendant pour air comprimé. Ce n'est que sur une plate-forme technique solide, qu'on peut négocier avec compétence avec les soumissionnaires spécialisés sur les listes de contrôle et Label. L'opération la plus réussie est sans doute un guide bien étudié (liste de contrôle) qui aidera les soumissionnaires dans la vente des mesures d'économie d'énergie utiles.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage und Ziel	6
2.	Definition von Druckluftanlagen	6
3.	Energiesparmöglichkeiten bei Druckluftanlagen	7
3.1.	Druckluftverbraucher	7
3.2.	Druckluftverteilung	9
3.3.	Drucklufterzeugung	11
3.4.	Zusammenstellung der Einflussfaktoren	13
4.	Druckluftanlagen in der Schweiz	15
4.1.	Statistik über Druckluftanlagen	15
4.2.	Branchenzuordnung	16
5.	Marktmechanismen	18
6.	Massnahmen	20
6.1.	Grundlagen	20
6.2.	Umsetzung	21
6.3.	Förderbeiträge	22
6.4.	Zusammenstellung der Massnahmen	23
7.	Schlussfolgerungen	24
8.	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	25
9.	Literaturverzeichnis	26

1. Ausgangslage und Ziel

Druckluftanlagen gehören in den meisten Industrie- und Gewerbebetrieben zur Infrastruktur. Untersuchungen [1] zeigen, dass pneumatische Prozesse einen tiefen Gesamtwirkungsgrad aufweisen und oft mit überdimensionierten Aggregaten betrieben werden. Über die Energieeffizienz bei Druckluftanlagen gibt es wenig fundiertes Wissen. Die Spezialisten im Markt konzentrieren sich vor allem auf den Verkauf von neuen Kompressoren.

Im Rahmen dieser Studie soll eine Auslegeordnung der in der Schweiz installierten Druckluftsysteme und deren Komponenten durchgeführt werden. Die Druckluft-Branchen sollen identifiziert und genannt werden. Damit soll einerseits der effektiv durch Druckluft verursachte Stromverbrauch und das mutmassliche Einsparpotential abgeschätzt werden und andererseits sind die energierelevanten Bereiche zu identifizieren. Ebenfalls sollen Massnahmen zur Erhöhung der Effizienz bei Sanierungen und Rahmenbedingungen für Neusysteme aufgezählt werden. Zudem sollen aufgrund der Ergebnisse konkrete Projekte für Massnahmen im Sinne von erfolgversprechenden Handlungsalternativen (z.B. Einsparcontracting, Kurse, Checks usw.) vorgeschlagen werden.

2. Definition von Druckluftanlagen

In Druckluftanlagen werden mit verdichteter Luft als Betriebsmittel Druckluftwerkzeuge und Druckluftapparate betrieben. Es gibt eine technische Verwandtschaft zu Kompressoranlagen in der Kältetechnik, Gastechnik und Turbinentechnik und auf der anderen Seite zu Vakuumanlagen. Die in diesem Projekt untersuchten Anlagen haben Kompressoren mit Elektroantrieb ab 1 kW Leistung und arbeiten mit dem Medium Luft zwischen 2 und 15 bar Überdruck.

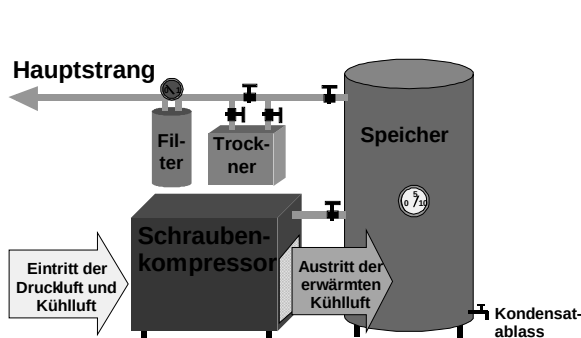


Abb. 1) Eine einfache Druckluftherzeugungsanlage.

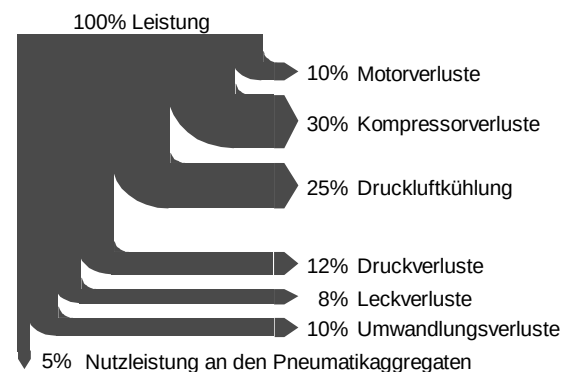


Abb. 2) Energiefluss durch eine Druckluftanlage.

Bei der Luftverdichtung wird die ganze zugeführte mechanische Leistung in Wärme umgewandelt. Bei der Luftexpansion in der Anwendung wird der Umgebung wieder Wärme entzogen. Bei ideal aufeinander abgestimmten Komponenten (zum Beispiel Druckluftauto [9]) wäre ein Gesamtwirkungsgrad von über 70% möglich. In realen Druckluftanlagen liegt der Gesamtwirkungsgrad aber unter 10%. Die physikalischen Gründe dafür sind:

- **Druckverlust** zwischen Erzeugung und Anwendung
- **Luftverlust** in Lecks und beim Abschalten des Kompressors
- **Tiefer Wirkungsgrad** bei kleinen Druckluftapparaten

3. Energiesparmöglichkeiten bei Druckluftanlagen

Eine Druckluftanlage lässt sich in 3 Bereiche unterteilen:

- **Druckluftverbraucher** (Maschinen, Geräte, Anschlüsse)
- **Druckluftverteilung** (Rohrleitung, Trocknung, Filter, Speicher)
- **Druckluftherzeugung** (Kompressor, Steuerung, Infrastruktur)

Ausgangspunkt für die Optimierung von Druckluftanlagen sind die Druckluftverbraucher. Aufbauend auf den erforderlichen Luftmengen und Drücken erfolgt die Betrachtung der Druckluftverteilung. Im wesentlichen geht es dann darum, weder Luft noch Druck zu verlieren. Bei der abschliessenden Untersuchung der Druckluftherzeugung ist das Ziel: Mit möglichst wenig Energieaufwand die erforderliche Luftmenge beim notwendigen Druck zu liefern und wenn möglich die anfallende Abwärme zu nutzen.

3.1. Druckluftverbraucher

Die Druckluftverbraucher beeinflussen den übrigen Teil der Druckluftanlage. Erst wenn die verschiedenen Anwendungen analysiert und auf das Notwendige reduziert worden sind, sollte mit der Optimierung der Verteilung fortgefahren werden.

Apparate Systemwahl

Viele Druckluftverbraucher (Drehen, Blasen, Fördern, Kühlen) können durch energieeffizientere ersetzt werden. So benötigt ein Saugheber mit einem eigenen Gebläse nur 1,5 kW Leistung während ein mit Druckluft betriebener Saugheber einen 7,5 kW Kompressor auslastet. Bei 1000 Betriebsstunden ergibt das 6000 kWh Einsparung, was den rund 1000 Franken Mehrkosten für die Gebläseausführung entspricht. Die Wirtschaftlichkeit solcher Energiesparpotentiale hängt stark von der Einsatzdauer der Anwendungen ab. Für eine Druckluftverbraucher kann aber auch das Werkzeuggewicht oder der Explosionsschutz sprechen, dagegen nebst dem Energieverbrauch der Lärm.

Druckluftverbraucher	Alternative	Nachteile	Vorteile
Blasdüse zum Reinigen	Staubsauger	man muss näher ran	der Dreck ist weg
Saugheber	Gebläse	keine	geringerer Lärm
Kühlen	Gebläse	wärmere Luft	grösserer Luftstrom
Förderung	Gebläse, Förderband ...	abhängig vom Medium	abhängig vom Medium
Druckluftmotor	Elektromotor (Akku, Hochfrequenz, flexible Welle)	schwerer, weniger robust, teurer	bessere Regelung, geringerer Lärm
Druckluftzylinder	Linearmotor, Hydraulik	teurer	geringerer Lärm

Tab 1) Einige Beispiele für die Systemwahl bei Druckluftverbraucher.

Wenn zum Beispiel ein Pneumatikzylinder einen Druck von 8 bar erfordert und alle andern Apparate nur 4 bar muss die ganze Anlage deswegen auf einem höheren Druckniveau betrieben werden und braucht fast doppelt soviel Energie als nötig. In diesem Fall steht also viel Geld aus der möglichen Stromeinsparung für einen grösseren Zylinder oder eine kleine Druckerhöhungsanlage zur Verfügung.

Im allgemeinen sind Druckluftwerkzeuge in der Anschaffung günstiger als energieeffiziente Alternativen. Der Betreiber hat meistens schon eine Druckluftanlage und beachtet die dadurch entstehenden Energiekosten zu wenig. Eine gute Maschine sollte keine oder möglichst wenig Druckluft brauchen (der m³ kostet etwa 20 Rappen) und einen möglichst geringen Nenndruck erfordern (unter 5 bar Überdruck).

Apparate Einsatzdauer

Oft laufen Anlagenteile, ohne dass sie etwas nützen. Zum Beispiel sind in automatischen Lackieranlagen Blasdüsen zur Gehängereinigung auch in Betrieb, wenn gar kein Gehänge im Einflussbereich ist. Bei der Installation hat man sich die 500 Franken teure Steuerung mit einer Lichtschranke gespart, dafür zahlt man jährlich einen Betrag in dieser Grössenordnung für diesen unnötigen Elektrizitätsverbrauch für Druckluft. Solche Optimierungsmöglichkeiten erkennt man, wenn man einen Prozess aufmerksam beobachtet.

Apparate Einstellung

Es gibt Druckluftverbraucher, welche nicht optimal eingestellt sind. Zum Beispiel die Öffnungszeiten (meistens 2 Sekunden, obwohl oft 0,7 Sekunden genügen würden) eine zu kurze Intervallzeit (am besten über den Differenzdruck geregelt) der Pneumatikventile von Filterabreinigungsanlagen. Nebst der Einsparung von Druckluftenergie wird durch eine optimale Einstellung auch die Lebensdauer der Anlagen erhöht.

Apparate Defekt

Druckluftapparate werden meistens solange betrieben bis sie nicht mehr funktionieren. Wenn die Leistung schwächer wird, gibt man mehr Druck bis man am Anschlag ist. Vielleicht erhöht man dann noch den Solldruck des Kompressors. Erst dann beginnt man Lecks oder schwer gängige Teile zu reparieren. Durch eine regelmässige Wartung und Funktionskontrolle der Druckluftapparate kann nicht nur Druckluftenergie gespart werden, sondern die Zuverlässigkeit wird auch erhöht.

Anschluss Leck

Zwischen der Wartungsstation (Wasserabscheider, Filter, Öler, Druckreduzierventil mit Manometer) an der Rohrleitung und dem Schlauchanschluss des Druckluftapparates sind oft Steckkupplungen anzutreffen, welche nicht dicht sind. Leckgeräusche von Komponenten der ganzen Drucklufteinrichtung hört man am besten nach Betriebsschluss. Es gibt auch spezielle Ultraschallmessgeräte, welche die Geräusche von ausströmender Luft detektieren, welche über dem menschlichen Hörbereich liegen.

Bei vielen Anlagen ergeben sich nach kurzer Betriebszeit wieder neue Lecks. Die Arbeitskosten, diese zu reparieren sind höher, als der Energiekosten (20 Rappen pro m³). Um ausserhalb der Betriebszeit dieser Anlagen die Leckverluste zu vermeiden, kann mit einem manuellen oder automatischen Ventil die Anlage vom Druckluftnetz getrennt werden.

Anschluss Querschnitt

Ein dünner Schlauch und oft auch eine schlechte Anschlusskupplung erfordern bei grossen Druckluftverbrauchern einen hohen Systemdruck, damit am Apparat noch der notwendige Druck ansteht. Durch eine Reduktion des Druckabfalls in der Anschlussleitung

wird meistens auch die Leistungsfähigkeit des Apparates erhöht, welcher dann unabhängig vom Luftverbrauch den gleichen Druck zur Verfügung hat.

3.2. Druckluftverteilung

Die Druckluftverteilung ist meistens im Gebäude fest installiert und wird ohne Umplatzierung von Verbrauchern kaum verändert. In dieser Strukturierung werden die Komponenten zur Druckluftaufbereitung und Speicherung auch der Druckluftverteilung zugeordnet.

Rohrleitung Querschnitt

Ein zu geringer Rohrleitungsquerschnitt bewirkt einen grossen Druckabfall bei hohem Luftverbrauch. Die Auswirkungen sind ähnlich wie bei einem zu kleinen *Anschluss Querschnitt*. Zusätzlich kann bei verändertem Luftbedarf ein Ausschlagen des Manometers beim Druckreduzierventil beobachtet werden. Eine Massnahme ist eine grössere Rohrleitung. Wenn der grosse Luftbedarf nur kurzzeitig erforderlich ist, kann auch mit einem lokalen Druckluftspeicher die Situation verbessert werden.

Rohrleitung Hauptventile

Die Idee eines Absperrventils, wie unter *Anschluss Leck* für einen Druckluftanschluss, kann auch auf eine ganze Werkstatt oder ein Gebäude übertragen werden. Das manuelle oder automatische Schliessen des Ventils ergibt keine Probleme. Das Öffnen sollte langsam erfolgen wenn der Druckluftspeicher unter Druck ist und die Aufbereitungsarmaturen nachgeschaltet sind. Vor allem der Drucklufttrockner könnte den kurzzeitig sehr hohen Volumenstrom nicht richtig entfeuchten.

Druckluftaufbereitung Systemwahl

Es gibt Druckluftverbraucher (Nahrungsmittel, Oberflächentechnik, Werkzeuge ...) welche spezielle Anforderungen an die Druckluftqualität wie Öl-, Staub- und Wassergehalt stellen (DIN ISO 8573-1). Für die angeschlossenen Anwendungen sollten nur die notwendigen Komponenten installiert sein. Es ist zum Beispiel nicht sinnvoll für eine grosse Sandstrahlanlage einen Mikrofilter einzusetzen nur weil die kleine Lackiererei einen solchen erfordert.

Druckluftaufbereitung Querschnitt

Je höher der Luftdurchsatz ist, desto grösser und teurer sind Filter. Oft wird in Druckluftanlagen in diesem Punkt gespart. Über die zu kleinen Querschnitte entsteht ein grosser Druckabfall, welcher einen hohen Systemdruck erfordert.

Druckluftaufbereitung Filterzustand

Druckluftfilter behalten das Filtrat zurück und sind nach einer gewissen Zeit voll. Der Filterzustand kann bei der Wartung mit dem Differenzdruckmanometer überprüft werden. Bei Bedarf oder nach festgelegten Serviceintervallen sollte das Filterelement ausgewechselt werden. Damit wird nicht nur der Systemdruck niedrig gehalten, sondern auch die Druckluftqualität gesichert.

Drucklufttrockner Systemwahl

Die aus dem Kompressor kommende Luft hat eine relative Feuchtigkeit von 100%. Damit in kalten Bereichen der Rohrleitung und durch der Abkühlung bei der Expansion in den Druckluftapparaten kein Wasser kondensiert, wird die Druckluft oft entfeuchtet. Für mittlere Anforderungen wird eine Art Kühlschrank (Kältetrockner) eingesetzt, welcher die Luft bis zu einem Taupunkt von + 3 °C entfeuchtet. Für besonders trockene Luft oder Druckluftverbraucher im Frostbereich wird ein Adsorptionstrockner (Taupunkt – 70 °C) eingesetzt. Dieser Adsorptionstrockner verbraucht rund zusätzlich die Hälfte der Menge entfeuchteter Luft zur Regeneration des adsorbierenden Materials. Es gibt effizientere Adsorptionstrockner welche mit Warmluft regenerieren (Taupunkt – 40 °C).

Ein in kalter Umgebung aufgestellter Druckluftspeicher kann auch eine Entfeuchtung bewirken. Bei grossen Luftverbrauchern im Aussenbereich lohnt sich ausserhalb der Frostzeit den Adsorptionstrockner durch einen Kältetrockner zu ersetzen.

Bei sehr unregelmässigem Luftbedarf sollten die Komponenten zur Druckluftaufbereitung zwischen Kompressor und Speicher installiert sein, damit ihre optimale Funktion gewährleistet ist.

Drucklufttrockner Funktion

Die Funktion von Drucklufttrocknern sollte regelmässig überprüft werden. Bei Kältetrockner gehört die Temperatur, der Kondensatorzustand und der Kondensatablass dazu. Wie ein Kühlschrank hat ein Kältetrockner in einer kühlen Umgebung einen bessern Wirkungsgrad. Bei Adsorptionstrockner ist der Druckabfall, die Dichtheit der Ventile und die Einstellung der Regenerationsschaltung zu überprüfen.

Drucklufttrockner Laufzeit

Ein Kältetrockner kann ausserhalb der Betriebszeit des Kompressors auch ausgeschaltet werden. Er sollte aber beim Einsschalten des Kompressors schon auf Betriebstemperatur sein, damit die Luft nicht feucht ins Druckluftnetz gelangt. Dazu ist er je nach Grösse etwa eine Viertelstunde vor dem Einschalten des Kompressors in Betrieb zu nehmen. Bei 2000 Betriebsstunden im Jahr ergibt sich bei einer Anlage mit einem 15 kW Kompressor eine Stromeinsparung beim Kältetrockner von etwa 500 kWh (100 Franken) im Jahr.

Druckluftspeicher Dimensionierung

Ein grosses Druckluftspeichervolumen reduziert die Schalzhäufigkeit des Kompressors, was die Energieeffizienz und Lebensdauer des Kompressors erhöht. Im allgemeinen lohnt sich eine grosszügige Dimensionierung. Ein 1000 Liter Kessel kostet weniger als 3000 Franken und spart über seine Lebensdauer ein mehrfaches an Stromkosten ein. Oft ist aber kein passender Platz vorhanden und Druckbehälter ab 300 Liter Inhalt müssen regelmässig von einer Überwachungsstelle geprüft werden, was viele Betreiber abschreckt.

Druckluftspeicher Kondensatablass

Wenn der Druckluftspeicher direkt nach dem Kompressor installiert ist, fällt viel Kondensat an. Bei manuellem Ablass ist dieser täglich zu betätigen, bei automatischen Systemen ist die Funktion regelmässig zu überprüfen.

3.3. Drucklufterzeugung

Für Anbieter und Anwender haben die Kompressoren die höchste Bedeutung in einer Druckluftanlage. Es sind die teuersten und empfindlichsten Systembestandteile neben den Apparaten und es sind die Kompressoren, welche den Strom „verbrauchen“. In einer durchschnittlichen Anlage liegen im Kompressor aber nur 10% der Energiesparmöglichkeiten. Auch ein drehzahl geregelter Kompressor „merkt“ nicht, dass er einen zu hohen Systemdruck fährt, Lecks versorgt oder dass die Anwendungen leer laufen.

Anlagenkonzept

Je nach Anlagengrösse und Anwendungen ist eine zentrale oder dezentrale Druckluftversorgung oder eine Kombination besser. Wenn zum Beispiel in der Nachtschicht nur ein Bearbeitungsautomat Druckluft benötigt, so kann dieser mit einem eigenen Kompressor ausgerüstet werden und die grosse Druckluftanlage wird abgeschaltet. Bei grossen Druckluftverbrauchern auf tiefem Druckniveau ist eine Aufteilung in verschiedene Druckluftnetze sinnvoll. Zum Beispiel ein 8 bar Netz für die Werkstatt und ein 4 bar Netz für eine grosse Reinigungsmaschine.

Kompressorgrösse

Ein grosser Kompressor hat den bessern Wirkungsgrad als ein kleiner, aber nur wenn er ausgelastet ist. Für jeden Start/Stopvorgang wird ein Quantum Energie benötigt, welches nicht in Druckluftenergie umgewandelt wird. Je grösser der Kompressor ist, desto grösser ist dieser Wert. Damit der Antriebsmotor nicht wegen häufigen Schaltspielen zu heiss wird, hat der Kompressor eine Nachlaufzeit in der er etwa 30% der Nennleistung aufnimmt, aber keine Druckluft komprimiert. Ein Kompressor, bei dem die Laststunden weniger als die Hälfte der Betriebsstunden ausmachen, ist zu gross.

Bei zeitlich sehr unterschiedlichem Druckluftbedarf ist nebst den Möglichkeiten mit Druckluftspeicher eine angepasste Kombination von verschiedenen Kompressoren sinnvoll. Häufig trifft man aber Anlagen, welche wegen der Versorgungssicherheit bei einem Ausfall, mit 2 identischen zu grossen Kompressoren ausgerüstet sind.

Ein kleinerer Kompressor ist bei der Anschaffung und im Betrieb günstiger. Der alte grosse Kompressor kann als Reserve beibehalten werden.

Kompressor Produktwahl

Bei unregelmässigem Druckluftbedarf ist ein Kolbenkompressor meistens die bessere Wahl als ein Schraubenkompressor. Daneben gibt es noch andere Systeme wie Rotationsverdichter, Scrollverdichter, Turboverdichter und Kompressoren, welche mit drehzahlvariablen Antrieben die Luftfördermenge bis auf 20% reduzieren können.

Ungeachtet der umfangreichen Argumente für oder gegen ein Produkt sollte folgende Zielsetzung nicht vergessen werden: Der Kompressor muss weder mehr Druck noch mehr Luft als erforderlich liefern. Zur Überprüfung des Wirkungsgrades wird das Verhältnis von Kompressorleistung (kW) zu Luftfördermenge (m³/min) gebildet. Bei einem Netzdruck von 8 bar Überdruck ist ein Wert von 6 kW/m³/min ein guter Wert. Im folgenden Diagramm (Abb. 3) sind die Werte in verschiedene Bereiche eingeteilt. Als untere Grenze wird die Leistung für eine verlustfreie isothermische Verdichtung angenommen.

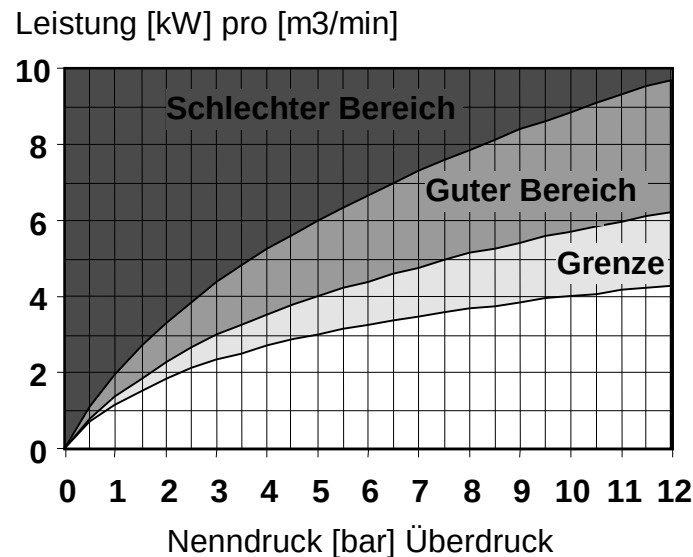


Abb. 3) Beurteilung des Wirkungsgrades von Druckluftkompressoren.

Kompressor Zustand

Kompressoren haben bewegliche Teile, welche verschleissen. Vor allem bei Anlagen mit mehreren Kompressoren kann es vorkommen, dass ein Kompressor unbemerkt gar keine Luft mehr liefert, obwohl er läuft. Eine einfache Methode die Kompressorleistung zu überprüfen besteht in der Messung der Luftfördermenge. Dabei wird die Zeit gemessen, die der Kompressor braucht den Druck im Speicher um zum Beispiel 1 bar zu erhöhen. Das übrige Druckluftnetz sollte dabei abgesperrt sein und die Druckmessung im Bereich des Nenndruckes liegen. Aus der untenstehenden Formel kann die Luftfördermenge errechnet werden. Dieser regelmässig ermittelte Wert sollte mit der Kompressorspezifikation oder den letzten Messwerten verglichen werden. Bei einer Leistungseinbusse von mehr als 15% sollte der Kompressor revidiert werden.

$$\text{Luftfördermenge (Liter pro Sekunde)} = \frac{\text{Speichervolumen (Liter/bar)} * \text{Druckdifferenz (bar)}}{\text{Fülldauer (Sekunden)}}$$

Formel 1) Berechnung der Luftfördermenge.

Kompressor Ansaugfilter

Die erforderliche Leistung für die Verdichterarbeit ist abhängig vom Verhältnis Ausgangsdruck zu Eingangsdruck. Wenn sich über dem Ansaugfilter der Druckabfall erhöht, so verschlechtert sich der Wirkungsgrad. Der Ansaugfilter ist regelmässig zu überprüfen und gegebenenfalls zu ersetzen.

Steuerung Konzept

Für komplexere Druckluftanlagen mit mehreren Kompressoren hatte bisher die Steuerung dafür zu sorgen, dass die Kompressoren abwechselungsweise betrieben werden, damit der Kompressorservice bei allen gleichzeitig durchgeführt werden kann. Neue Steuerung messen anhand des Druckabfalls die Druckluftnachfrage und schalten zum richtigen Zeitpunkt die entsprechenden Kompressoren ein oder aus. Durch dieses kluge Management lassen sich gegenüber den alten Steuerungen über 10% Stromkosten einsparen.

Steuerung Laufzeit

In den meisten Druckluftanlagen hat es Lecks, welche die Laufzeit des Kompressors erhöhen. Die einfachste Massnahme zur Vermeidung unnötiger Laufzeit des Kompressors ist das Abschalten der Anlage ausserhalb der Betriebszeit der Druckluftverbraucher. Bei regelmässigen Betriebszeiten kann der Kompressor über eine Schaltuhr angeschlossen werden, in den andern Fällen ist dafür zu sorgen, dass der Kompressorschalter möglichst bequem erreichbar ist.

Steuerung Druckeinstellung

Je tiefer der Nenndruck eingestellt ist, desto geringer ist der Leistungsbedarf des Kompressors. Bei tiefem Nenndruck ist auch eine Reduktion der Kompressordrehzahl zu prüfen. Jede Druckdifferenz zwischen Kompressor und Anwendung ist Verlust. Auch wenn die Verteilung nur einen geringen Druckverlust hat, muss der überflüssige Druck im Druckreduzierventil vernichtet werden.

Mit einer grossen Differenz zwischen Ein- und Ausschalt Druck für den Kompressor kann zwar das nutzbare Puffervolumen im Druckluftspeicher erhöht werden. Der erhöhte Leistungsbedarf des Kompressors und die höheren Leckverluste im Netz wiegen den Vorteil der geringeren Lastspiele des Kompressors nicht in jedem Fall auf. Der optimale Wert für die Druckdifferenz liegt im Bereich von 1 bar.

Infrastruktur Ansaugluft

Je kälter die Ansaugluft des Kompressors ist, desto besser ist sein Wirkungsgrad. In einem geschlossenen Kompressorraum staut sich die Kompressorabwärme. Es ist daher auf eine ausreichende Frischluftzufuhr und Abwärmeabfuhr zu achten. Damit die Strömung optimal funktioniert, sollte der Raum über zwei Öffnungen verfügen. Eine untere für die Frischluft und eine obere für die Abluft.

Infrastruktur Abwärmenutzung

In Druckluftkompressoren wird 100% der aufgenommen elektrischen Energie in Wärme umgewandelt. Davon sind etwa 80% auf einem brauchbaren Temperaturniveau nutzbar. Zum einen kann die warme Abluft aus dem Kompressorraum durch zu beheizende Räume geleitet werden. In der warmen Jahreszeit kann die Abwärme über Klappen direkt nach aussen geführt werden. Zum andern gibt es Kompressoren mit eingebauten Wärmetauscher, welche Warmwasser auf einem Temperaturniveau von 80 °C abgeben.

3.4. Zusammenstellung der Einflussfaktoren

Die bisher genannten Energiesparmöglichkeiten werden in der folgenden Tabelle (Tab. 2) als Anlagenfehler beschrieben. Es wird angegeben, ob die Fehler einen Luftverlust und oder Druckverlust verursachen, was weitere Konsequenzen sind und wie gross das Potential einer Stromeinsparung ist. Danach wird untersucht, wie diese Fehler festgestellt werden könnten und wie gross die Wahrscheinlichkeit der Feststellung ist. Im letzten Bereich wird dann überlegt, wer die Fehler korrigieren kann, was zu tun ist und wie es mit der Wirtschaftlichkeit aussieht.

Problem		Konsequenz				Feststellung			Massnahme				
Komponente	Fehler	Luftverlust	Druckverlust	Funktion	Strom-einsparung	Unterhalt	Feststellung	Wahrscheinlichkeit d.	Betreiber	Installateur	Spezialist	Was	Wirtschaftlichkeit
Apparat	Systemwahl	x		tiefe Geräte-kosten, Gewicht	++		Anwendungs-erfahrung	-			x	Substitution	+
	Einsatz-dauer	x		tiefe Steuerungs-kosten	++		Anwendungs-erfahrung	-	x	x	x	Automati-sierung	+
	Einstellung	x		Verschleiss, Bequemlichkeit	++		Anwendungs-erfahrung	--	x		x	Optimierung	++
	Leck	x	x	evt. Leistungs-einbusse	+	x	Lärm, Produktivität	+	x		x	Reparatur	o
Anschluss	kleiner Querschnitt		x	hoher Systemdruck	+		Leistungs-einbusse	o		x		Ersatz	+
	Leck	x			+	x	Lärm	+	x			Reparatur	+
Rohr-leitung	kleiner Querschnitt		x	hoher Systemdruck	+		Manometer schlägt aus	-		x		neue Rohrleitung	o
	Stossver-brauer		x	hoher Systemdruck	+		Manometer schlägt aus	o		x	x	lokaler Speicher	o
	keine Hauptventil	x		keine Bedienung nötig	+		Anlagen-analyse	-		x	x	Ventile einbauen	+
Luftauf-berereitung	Systemwahl		x	nichtoptimale Luftqualität	+/-		Anforderungs-prüfung	-/+			x	Ersatz	o
	kleiner Querschnitt		x	hoher Systemdruck	+		Anlagen-analyse	o		x	x	Ersatz	+
	Filterzustand		x	geringerer Netzdruck	+	x	Differenz-druck	o	x			Wartung, Ersatz	o
Druckluft-trockner	Systemwahl	x	x	nichtoptimale Luftqualität	++/-		Anforderungs-prüfung	-/+			x	Ersatz, Ausbau	++
	Funktion	x	x	nichtoptimale Luftqualität	+/-	x	Luftanalyse, Störungen	-/+	x	x	x	Wartung	+
	Dauerbetrieb bei KT			keine Bedienung nötig	+		Anlagen-analyse	o	x	x		Schaltuhr	+
Druckluft-speicher	zu klein	x	x	Leerlaufverluste, Druckbereich	+		Anlagen-analyse	o		x	x	Ausbau	o
	Wasser-ablass	x			+		Beobachtung	o	x			Wartung	+
Kom-pressor	Konzept			nichtoptimale Anlage	+		Anlagena-nalyse	+			x	Sanierung	++
	zu gross	x		grosse Reserve	+		Betriebs-statistik	+			x	Ersatz	+
	Produktewahl			Wirkungsgrad Kompressor	+		Anlagen-analyse	++			x	Ersatz	+
	defekt	x	x	Verschleiss, Wirkungsgrad	++	x	Leistungstest, Statistik	o			x	Reparatur	++
	Ansaugfilter		x	Verschleiss, Wirkungsgrad	+	x	Kontrolle	+	x			Ersatz	+
Steuerung	Konzept		x	Verschleiss, Wirkungsgrad	++		Anlagen-analyse	++			x	Ersatz	++
	Laufzeit	x		keine Bedienung nötig	+		Anlagen-analyse	+		x		Schaltuhr	++
	Druckein-stellung	x	x	keine System-optimierung	++		Anlagen-analyse	+	x			Einstellung	++
Infra-struktur	Ansaugluft		x	Verschleiss, Wirkungsgrad	+		Leistungstest, Filter	o	x	x		Umbau Raum	+
	Abwärmennutz-ung			Nichtnutzung von Abwärme	(++)		Energie-analyse	+		x	x	Installation	o

Tab. 2) Fehler und Verbesserungsmassnahmen bei Druckluftanlagen.

4. Druckluftanlagen in der Schweiz

In der Schweiz gibt es etwa 150'000 Druckluftanlagen, die jährlich rund 750 GWh Elektrizität konsumieren (1,5% des nationalen Stromverbrauchs). Um diese Zahlen herzuleiten und die Marktmechanismen zu beschreiben wird folgende Gliederung gewählt:

- **Statistik** über Druckluftanlagen
- **Branchenzuordnung** der Druckluftanlagen
- **Marktmechanismen** und Marktteilnehmer

4.1. Statistik über Druckluftanlagen

Dem Verfasser ist keine zuverlässige Erfassung von Stromanwendungen in der Schweiz bekannt. Basierend auf bekannten statistischen Daten und Erfahrungswerten wird hier versucht, den landesweiten Umfang von Druckluftverbraucher abzuschätzen.

Untersuchung des Branchenverbandes

Die detaillierte Marktumfrage [7] für das Jahr 1998 der GOP (Gesellschaft für Oelhydraulik und Pneumatik) bei 7 namhaften von 25 relevanten Anbieter weist bei 2500 verkauften Kompressoren eine totale Leistung von 30 MW aus. Mit den Verkäufen der übrigen Anbieter lässt sich eine Leistung von etwa 60 MW pro Jahr abschätzen.

Kompressor- leistung	Ölfreie Kompressoren			Kolben- kompressoren		Schrauben- kompressoren		Summe	
	<i>kW</i>	2-4 bar	4-10 bar	> 10 bar	< 11 bar	>11 bar	< 5 bar	5-13 bar	Stück <i>kW</i>
1.5			20		333	10		13	376 564
2.2			28		158	7		40	233 513
3			7		244	24		3	278 834
4			20		91	148		50	309 1236
5.5			8	1	89	5		146	249 1370
7.5			13	5	55	9		234	316 2370
11			12		23	1		153	189 2079
15			9		18			125	152 2280
18.5			4					59	63 1166
22			5					74	79 1738
30			4					56	60 1800
37			3					59	62 2294
45			2		1			29	32 1440
55		1	2					25	28 1540
75		1	3	1				27	32 2400
90			3		1			4	8 720
110			3					4	7 770
132		1	1					6	8 1056
160		1	1					1	3 480
200			1					11	12 2400
250			3					4	7 1750
Summe		4	152	7	1013	204	0	1123	2503 30799

Tab. 3) Zusammenstellung der im Jahr 1998 von 7 grossen Anbieter verkaufte Kompressoren.

Ausgehend von einer mittleren Lebensdauer von 15 Jahren ergibt das bei 60 MW/a eine in der Schweiz installierte Kompressorleistung von 900 MW. Noch nicht eingerechnet sind

hier sehr grosse Druckluftanlagen (Schwerindustrie, Verfahrenstechnik) mit mehr als 500 kW Leistung, die Druckluftanlagen in elektrisch betriebenen Verkehrsmitteln (Trolleybus, Tram und Bahn) und der Hobbymarkt. Gerundet ergibt das eine installierte Kompressorleistung von 1 GW. Mit einer durchschnittlichen Laufdauer von 750 Stunden pro Jahr errechnet sich ein Stromverbrauch von 750 GWh/a, was 1,5 % des Stromverbrauchs der Schweiz ausmacht.

Offizielle Statistiken

In der Zollstatistik der Schweiz werden Druckluftkompressoren nicht speziell aufgeführt. Sie sind wahrscheinlich unter den Zollpositionen 8414.8010 und 8414.8020 „Luftpumpen“ eingeordnet. Kompressoren für Kälteanlagen und auf Fahrgestellen sind separat aufgeführt. Im Jahre 1998 wurden 3160 Tonnen „Luftpumpen“ für 82 Millionen Franken importiert. Rund ein Drittel davon hatte ein Gewicht unter 100 kg (Zollposition 8414.8020).

Ein anderer Ansatz zum Abschätzen des Energieverbrauch von Druckluftanlagen basiert auf dem Erfahrungswert, dass Druckluft 1 bis 20% des Stromverbrauchs in verarbeitenden Betrieben ausmacht. Bei einem Durchschnittswert von 4% ergibt das bei einem Anteil von einem Drittel Industriestrom in der Schweiz einen Druckluftanteil von etwa 1,3%. Zusammen mit dem Druckluftanlagen der übrigen Branchen (Verkehr, Infrastruktur usw.) lässt sich ein Anteil von 1,5% am nationalen Stromverbrauch abschätzen.

Studien [8] in den USA schätzen den Elektrizitätsverbrauch der Druckluft auf 90 TWh/a. Bei 3500 TWh/a Gesamtstromverbrauch in den USA ergibt das den hohen Anteil von 2,5% für Druckluftanlagen.

4.2. Branchenzuordnung

Um eine Übersicht zu gewinnen werden die Druckluftanlagen und die Branchen in verschiedene Kategorien unterteilt und dann in einer Tabelle dargestellt.

Unterteilung in Druckluftkategorien

Druckluftanlagen liessen sich in viele Kategorien unterteilen: Druckniveau, Kompressorart, Luftqualität, Kompressorenanzahl. Für den Stromverbrauch ist die installierte Kompressorleistung pro Anlage am geeignetsten, denn da lassen sich auch typische Betriebszeiten und somit Stromverbrauchswerte zuordnen. Einzelne Druckluftanlagen können erheblich vom Durchschnittswert abweichen, aber die sollten sich gegenseitig aufheben.

Kategorie	Kompressorleistung	Betriebsdauer	Stromverbrauch	Beispiele
Kleinanlagen	kleiner 3 kW	100 h/a	0,1 MWh/a	Handwerker, Hobbybereich (mobil)
Gewerbeanlagen	3 bis 15 kW	600 h/a	5 MWh/a	Schreinerei, Garage, Zahnarztpraxis
Industrieanlagen	18 bis 90 kW	1000 h/a	50 MWh/a	Möbelfabrik, Industrielackierer, Granitwerk
Grossanlagen	grösser 90 kW	2000 h/a	250 MWh/a	Chemie, Kunststoffwerk, Giesserei

Tab. 4) Druckluftanlagen werden hier in 4 Kategorien unterteilt.

Zuordnung der Branchen

Um keine neue Unterteilung zu erfinden und auf vorhandenes statistisches Material abzustützen, wurde die Branchenstruktur aus dem Statistischen Jahrbuch [8] übernommen.

Schweiz	Statistik			Installierte Druckluftanlagen				Druckluftenergie in GWh/a					
NOGA - Systematik	1995	1997	1998	Kompressorleistung in kW				Anlage in MWh/a				Branche	
Wirtschaftszweig	Betriebe	Beschäftigte	GWh/a	< 3	3 - 15	18 - 90	> 90	0.1	5	50	250	alle	Anteil
Landwirtschaft	55'000	175'000	1'000	5'000	200			1	1	0	0	2	0.2%
Fischerei	510	1'000	2	300				0	0	0	0	0	1.5%
Energiegewinnung	12	140	1		10			0	0	0	0	0	5.0%
Steingewinnung	352	5'500	80	100	250	150	5	0	1	8	1	10	12.5%
Nahrungsmittel	2'865	63'000	378	1'000	600	300	30	0	3	15	8	26	6.8%
Textilindustrie	2'052	30'000	533	1'000	300	300	10	0	2	15	3	19	3.6%
Lederwaren	352	4'000	40	200	70	20		0	0	1	0	1	3.4%
Holzindustrie	6'748	39'000	400	4'000	2'500	300	10	0	13	15	3	30	7.6%
Papierindustrie	4'954	75'000	1'243	2'000	800	500	20	0	4	25	5	34	2.8%
Petrochemie	19	1'000	30			10		0	0	1	0	1	1.7%
Chemie	807	64'000	2'255	500	400	500	200	0	2	25	50	77	3.4%
Kunststoffindustrie	822	22'000	500	200	400	300	50	0	2	15	13	30	5.9%
Mineralien	1'399	18'000	423	500	500	200	40	0	3	10	10	23	5.3%
Metallindustrie	7'707	100'000	3'700	3'000	2'800	1'200	100	0	14	60	25	99	2.7%
Maschinenbau	3'692	105'000	2'622	500	2'500	1'100	200	0	13	55	50	118	4.5%
Apparatebau	5'159	125'000	2'400	1'500	3'000	1'000	100	0	15	50	25	90	3.8%
Fahrzeugbau	580	13'000	200	300	200	100	5	0	1	5	1	7	3.6%
Herstellung	4'332	31'000	300	2'000	2'000	400	5	0	10	20	1	31	10.5%
Versorgung	223	24'000	300	500	500	100	5	0	3	5	1	9	2.9%
Baugewerbe	32'383	296'000	1'000	20'000	3'000	300	10	2	15	15	3	35	3.5%
Handel	73'988	648'000	3'000	10'000	4'000	500		1	20	25	0	46	1.5%
Gastgewerbe	23'600	233'000	2'500					0	0	0	0	0	0.0%
Verkehr	10'254	248'000	4'000	1'000	4'500	100		0	23	5	0	28	0.7%
Finanzdienste	3'539	205'000	1'000					0	0	0	0	0	0.0%
Geschäftsdienste	56'154	349'000	1'800					0	0	0	0	0	0.0%
Staatsadministration	159	152'000	600	1'000	200	10		0	1	1	0	2	0.3%
Unterrichtswesen	4'171	224'000	500	400	20	10		0	0	1	0	1	0.1%
Gesundheitswesen	20'381	376'000	3'500	3'000	750	100		0	4	5	0	9	0.3%
Publikumsdienste	21'467	145'000	700	2'000	500	500	10	0	3	25	3	30	4.3%
Haushalte		31'000	15'000	50'000				5	0	0	0	5	0.0%
Summe	343'681	3'802'640	50'007	110'000	30'000	8'000	800	11	150	400	200	761	1.5%

Tab. 5) Zuordnung von Druckluftanlagen an die Branchen

Erklärungen zur Tabelle 5

1. Spalte: [6] Seite 11 Die Bezeichnung der Wirtschaftszweige aus der NOGA (Nomenclature Générale des Activités économiques) Systematik wurde zu einer Branchenbezeichnung aus einem einzelnen Wort abgeändert. Die NOGA Branchenunterteilung ist für die energetische Betrachtung nicht optimal. So sind zum Beispiel unter Publikumsdienste Coiffeure, Museen, Kläranlagen usw. zu finden.
2. Spalte: [6] Seite 163 Hier sind nur privatwirtschaftliche Unternehmen aufgezählt. Wegen der Übersichtlichkeit wurde hier die Unterteilung in 6 Unternehmensgrößen weggelassen. Bei der Zuordnung der 4 Kategorien von Druckluftanlagen wurden diese Zahlen aber berücksichtigt.
3. Spalte: [6] Seite 111 Bei den Beschäftigten sind auch die im öffentlichen Dienst mitgezählt. Dadurch liesse ein Vergleich mit der 2. Spalte teilweise auf sehr grosse Unternehmen schliessen.
4. Spalte: [5] Seite 25 Die Hochrechnung des BfE für den Stromverbrauch von 8 Branchen wurde dort übernommen, wo ungerade Werte eingesetzt sind. Die übrigen Werte wurden aus der Erfahrung des Verfassers abgeschätzt (Stromverbrauch pro Betrieb und Beschäftigten).

5. Marktmechanismen

Die Hauptakteure um Druckluftanlagen sind neben dem Anwender die Kompressorlieferanten, Installateure, Armaturenhändler und Maschinenlieferanten. Diese Akteure lassen sich in der gleichen Reihenfolgen den einzelnen Anlagenbereichen: Erzeugung, Verteilung und Anwendung zuordnen.

Drucklufterzeugung und Marktvolumen

In der Schweiz hat es etwa 25 Anbieter, welche auf industrielle Druckluftanlagen spezialisiert sind und die Hälfte des Marktes abdecken. Viele weitere Unternehmen wie Installationsfirmen sind auch in diesem Bereich tätig, die meisten Komponenten beziehen sie aber von den grossen Anbietern. Darüber hinaus gibt es den Bau- und Hobbymarkt, welcher grosse Stückzahlen im unteren Leistungsbereich absetzt.

Zusammen mit den Komponenten zur Druckluftaufbereitung und Speicherung sowie den Serviceeinnahmen kann von einem jährlichen Umsatz von rund 100 Millionen Franken ausgegangen werden. Dieser Betrag wurde in Gesprächen mit Vertretern von namhaften Kompressoranbieter genannt. Aus diesen 100 Millionen Franken können zwei weitere Grössen abgeleitet werden:

- 300 Druckluftspezialisten (Verkäufer und Techniker) welche in der Schweiz tätig sind, wenn von rund 30% Lohnkostenanteil ausgegangen wird.
- 150 Millionen Franken jährliche Stromkosten (750 GWh), denn bei Druckluftanlagen machen diese etwa 60% aus, der Rest sind diese 100 Millionen Franken.

Druckluftverteilung und Planung

Die Druckluftverteilung wird meistens bei der Erstellung eines Gebäudes installiert. Wie bei Bauprojekten üblich, wird die Planung an die Fachspezialisten übertragen. Wegen der Ähnlichkeit mit Wasserrohren landen Druckluftprojekte (Erzeugung und Verteilung) meistens beim Sanitärplaner und werden dann vom Sanitärinstallateur ausgeführt. Bei einfachen Anlagen wird oft die Standardkonfiguration gewählt, welche der Sanitärplaner schon während seiner Ausbildung verwendet hat. Bei komplexeren Anlagen lässt sich der Sanitärplaner von einem Kompressorlieferanten beraten und verfasst dann eine Ausschreibung um den günstigsten Anbieter zu finden. Was dann wirklich installiert wird, ist selten die Empfehlung des Spezialisten und bleibt oft bis zum Abbruch des Gebäudes bestehen. Einzig der Kompressor und Kältetrockner wird nach einer Betriebsdauer von 10 bis 20 Jahren ersetzt.

Wenn der Planungsauftrag direkt an einen Kompressorlieferanten vergeben wird, hat der Bauherr keinen Preisvergleich und keinen unabhängigen Planer für die Kontrolle. Ideal wäre ein in Druckluftanlagen kompetenter Planer, welcher mit einem Leistungsauftrag ausschreibt und so die Lösungsvorschläge der Kompressoranbieter berücksichtigt.

Druckluftverbraucher

Bei Investitionsentscheidungen werden die Produktivität und die Anschaffungskosten berücksichtigt. Betriebskosten sind oft kein Thema und Druckluft ist ja vorhanden. Maschinen- und Anlagenlieferanten sind einem harten internationalen Preiskampf ausgesetzt.

Druckluftapparate sind meistens günstiger als energieeffizientere Alternativen und intelligente Steuerungen zur Energieeinsparung verteuern die Anlage.

Zum einen wären für innovative Maschinenlieferanten tiefe Betriebskosten ein gutes Verkaufsargument, zum andern sollte der Anwender die Betriebskosten berücksichtigen. Eine gute Maschine sollte einen tiefen Nenndruck haben und möglichst wenig Druckluft brauchen.

Zusammenfassung der Marktmechanismen

Es gibt viele Druckluftanlagen welche für die durchschnittlich zu erwartende Anwendungen gebaut wurden. Solange alles läuft, wird nichts geändert, wenn der Druck zusammenfällt (zuwenig Druckluft vorhanden ist), wird ein grösserer oder weiterer Kompressor installiert. Wenn der Kompressor ausfällt, muss sofort ein neuer installiert werden, es bleibt keine Zeit für eine Optimierung.

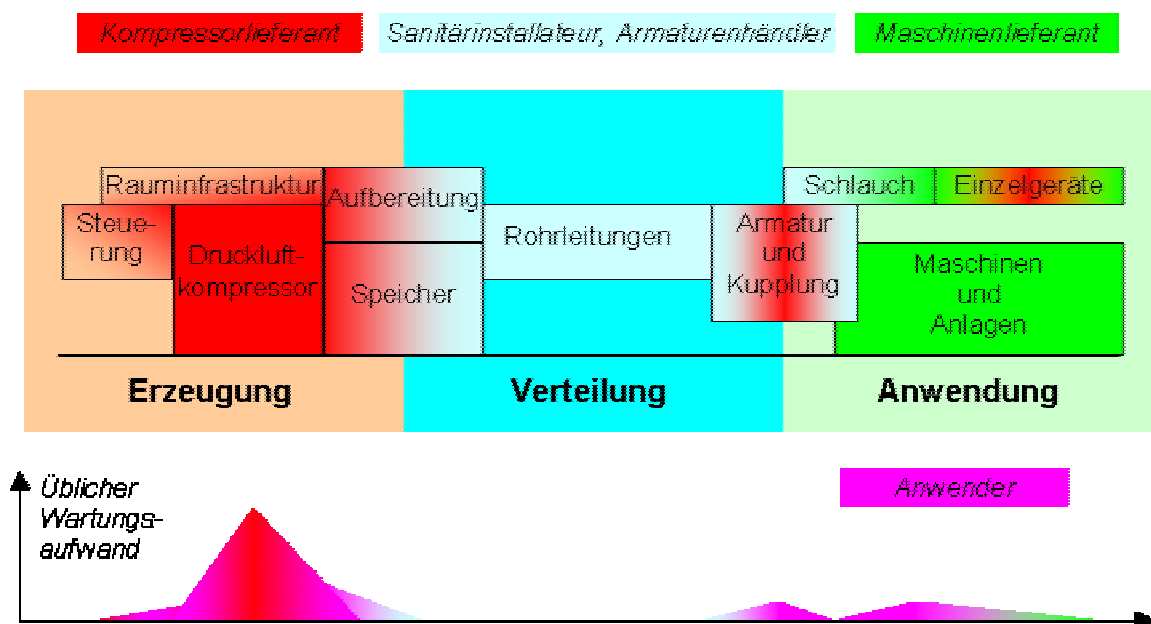


Abb. 4) Eine Druckluftanlage, die Akteure und der Wartungsaufwand.

Marktmöglichkeiten zu energieeffizienten Druckluftanlagen sind:

- Maschinenbeschaffung unter Berücksichtigung der Betriebskosten. Druckluft ist nicht ja oder nein sondern kostet 20 Rappen pro m³ [1].
- Anlagenplanung durch einen Spezialisten mit Leistungsgarantie. Ein Sanitärplaner hat meistens zuwenig Erfahrung und übernimmt keine Garantie.
- Der Kompressorservice könnte zu einem Anlagenservice ausgebaut werden. Zusätzlich könnte alle 5 Jahre die Anlage analysiert werden und konkrete Verbesserungsmöglichkeiten offeriert werden. Eine solche Spezifikation könnte dann auch beim Ausfall einer Komponente den Ersatz mit einer besseren Lösung ermöglichen.

6. Massnahmen

Die Massnahmen zur Energieeinsparung bei Druckluftanlagen lassen sich in die folgenden 3 Kategorien unterteilen:

- **Grundlagen** (Kompetenzzentrum, Dokumentation)
- **Umsetzung** (Checkliste, Analyse, Label, Gute Beispiele, Contracting)
- **Förderung** (Komponenten, Analyse, Einsparerfolge)

6.1. Grundlagen

Dem Verfasser ist keine unabhängige schweizerische Institution bekannt, welche sich systematisch mit Druckluftanlagen auseinandersetzt. In der Praxis nützt es einem Anwender zum Beispiel wenig, wenn er weiss, dass sein Druckluftspeicher zu klein ist. Er möchte wissen, wie gross dieser sein sollte, was er kostet und wie viel er dadurch einsparen kann.

Auf der Anbieterseite (Installateur, Kompressor- oder Werkzeuglieferant) ist viel nützliches Wissen vorhanden, aber es werden nur Teilaspekte zur Verkaufsunterstützung eingesetzt. Der in Druckluft unerfahrene Anwender kann oft nicht abschätzen, ob sich eine Investition in Energiesparmassnahmen wirklich lohnt.

Kompetenzzentrum Druckluft

Druckluft ist ein Dauerthema, es kann nicht in einem Projekt endgültig abgehandelt werden. Laufend werden neue Komponenten auf den Markt gebracht und es werden immer wieder neue Anlagen gebaut. Für eine technische Fachhochschule wäre eine Spezialisierung auf Druckluftanlagen eine interessante Profilierung. In Zusammenarbeit mit Anbieter und Anwender können viele Teilaspekte professionell untersucht werden. Es gibt dann eine Anlaufstelle, welche sich mit der Materie Druckluft auskennt und sich den Bedürfnissen des Marktes anpasst.

Ein Kompetenzzentrum mit der Einbindung einer Begleitgruppe aus dem Bereich der Anbieter wäre auch in der Lage, Komponenten zu prüfen, mit einer Empfehlung (Label) zu versehen und Experten auszubilden.

Dokumentation Druckluft

Informationen über energieeffiziente Druckluftanlagen könnten in eine Internet-Site zum Beispiel mit untenstehendem Inhalt systematisch gesammelt und aktualisiert werden.

Thema	Beschreibung
Auslegung	Grundlagen für die Dimensionierung (Speichergrösse, Querschnitte, Kompressoren ...)
Muster	Beschreibung von Musteranlagen für verschiedene Branchen
Analyse	Checklisten, Messverfahren, Durchschnittswerte, Zielgrössen
Tips	Solldruck, Betriebszeiten, Schliessventile, Umbauanleitungen
Katalog	Datenbank von Anlagenkomponenten und Alternativen mit Beurteilung
Adressen	Berater, Planer, Installateure, Lieferanten

Tab. 6) Elemente einer Druckluftdokumentation

Die Dokumentation sollte für folgende Gruppen nützlich sein:

- Berater und Planer im Bereich Haustechnik und Anlagenbau
- Anwender aus dem Bereich Betriebsmittel und Unterhalt
- Konstrukteure aus dem Bereich Maschinen- und Anlagenbau
- Ausbilder und Schüler in Berufs- und Fachhochschulen
- Lieferanten und Installateure der Druckluftbranche

6.2. Umsetzung

Das Wissen über Energiesparmöglichkeiten bei Druckluftanlagen muss in die Anwendungen einfließen und umgesetzt werden. Dazu gibt es verschiedene sich ergänzende Möglichkeiten zur Umsetzung.

Checklisten Druckluft

Eine einfache Checkliste soll den Anwender oder Berater systematisch durch die Druckluftanlage führen und die Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz aufdecken. In einer einfachen Begleitdokumentation sind auch Vorschläge für das weitere Vorgehen enthalten. Die Checkliste sollte in mindestens 2 Versionen ausgeführt werden:

- Standardanlagen mit einem Kompressor
- Komplexe Anlagen mit mehreren Kompressoren

Für bestimmte Branchen (Zahnärzte, Tankstellen ...) sind auch spezifische Checklisten in Zusammenarbeit mit Fachverbänden und Anbieter sinnvoll.

Analyse von Druckluftanlagen

Viele Anwender sind vor allem bei komplexen Druckluftanlagen mit der Beurteilung (Checkliste) der eigenen Anlage überfordert oder können wegen der unvermeidbaren Betriebsblindheit gewisse Möglichkeiten nicht erkennen. Ein externer Spezialist (Berater, Planer, Anbieter, Servicemann) kann das oft besser. Am besten würde eine solche Prüfung mit der Checkliste durchgeführt und der Anwender sollte am Schluss wissen, ob er eine gute Anlage hat und was er mit welcher Wirtschaftlichkeit verbessern kann.

Die systematische Analyse einer einfachen Druckluftanlage erfordert einen Zeitaufwand von 2 bis 3 Stunden was mindestens 300 Franken kostet. Eine 5,5 kW Druckluftanlage verbraucht im Jahr für rund 3000 kWh (etwa 600 Franken) Strom und hat ein wirtschaftliches Sparpotential von optimistischen 25% (150 Franken) im Jahr. Das Verhältnis Analysekosten zu möglicher Energiekosteneinsparung wird erst bei grossen Anlagen für den Anwender attraktiv.

Label für Energieeffizienz

Energieeffiziente Komponenten von Druckluftanlagen (Kupplungen, Filter, Kompressoren, Steuerungen ...) könnten mit einem Label versehen werden. Es besteht aber die Gefahr, dass je nach Anlagenumgebung derart ausgezeichnete Komponenten keinen grossen Nutzen erbringen. So ist zum Beispiel ein zu grosser Kompressor mit Label für die Energieeffizienz einer Druckluftanlage schlechter als ein kleiner Kompressor ohne Label. Auf der anderen Seite ist festzustellen, dass Fehldimensionierungen, wenn auch weniger häufig, unvermeidlich bleiben. Auch in diesen Fällen sollte eine Komponente mit Label besser sein, als eine ohne.

Gute Beispiele von Druckluftanlagen

Über erfolgreich umgesetzten Massnahmen werden kurze Fachartikel verfasst. Diese Artikel werden regelmässig in den entsprechenden Medien (Zeitung, Schreinerzeitung, Maschinenmarkt ...) mit dem Hinweis auf eine Anlaufstelle platziert. Die Anwender können sich so mit bestimmten Situationen identifizieren und werden zur Umsetzung animiert.

Einsparcontracting bei Druckluftanlagen

Anlagencontracting wäre für Kompressoranbieter und Installateure eine Geschäftsmöglichkeit. Je nach Ausgestaltung der Abrechnungsbasis (Fixpreis oder Luftmenge) beschränken sich die Energiesparmassnahmen auf die Druckluftherzeugung. Grundbedingung für die Energieeffizienz wäre, dass die Stromkosten für die Druckluftanlage auf das Konto des Contractors gehen.

6.3. Förderbeiträge

Wirtschaftliche Energiesparmöglichkeiten (Rückzahldauer unter 3 Jahren) sollten theoretisch ohne Förderung umgesetzt werden. Praktisch ist der Renditefaktor nur ein Element für die Auslösung von Massnahmen. Die Möglichkeiten der Kosteneinsparung bei der Druckluftanlage muss in Relation zu andern betrieblichen Optimierungsmassnahmen gesehen werden. Der Anlagenbetreiber braucht Zeit und Interesse für das Thema Druckluft, welches in Konkurrenz zu vielen andern Themen ist.

Mit Förderbeiträgen könnten vor allem die Anbieter von Leistungen um Druckluftanlagen zu Aktivitäten Richtung Energieeffizienz motiviert werden. Für den Anlagenbetreiber bedeuten Förderbeiträge je nach Höhe eine staatliche Werbeaktion oder ein Geldtopf, an dem man sich bedienen kann.

Förderbeiträge für Komponenten

Administrativ wäre es am Einfachsten, wenn ausgesuchte gute Druckluftkomponenten (Label) mit einem prozentualen Förderbeitrag verbilligt würden. Anbieter und Anwender würden sich über diese Subventionen freuen. Am meisten Geld würden aber die grossen Anlagen erhalten, bei denen Energiesparmassnahmen sonst schon rentabel sind.

Förderbeiträge für Anlagenanalysen

Um auch die Betreiber von kleineren Druckluftanlagen (ab 3 kW) zu erreichen wäre die Ausrichtung von fixen Beiträgen an eine Analyse förderlich, zum Beispiel 100 Franken für eine Kopie der ausgefüllten Checkliste.

Förderbeiträge für Einsparerfolge

Die Meldung über umgesetzte Massnahmen könnte mit einem Formular erfolgen. Zum Beispiel würden Einsparungen ab 25% Druckluftenergie (mindestens 1000 kWh/Jahr) mit einem Förderbeitrag von 200 bis 1000 Franken honoriert werden. Die interessantesten Meldungen würden zudem veröffentlicht.

6.4. Zusammenstellung der Massnahmen

In der folgenden Zusammenstellung wird versucht, für die einzelnen Massnahmen den Aufwand und Ertrag abzuschätzen.

Massnahme		Aufwand	Grund-investition	Jahreskosten	Einsparung pro Jahr
Grundlagen	Kompetenzzentrum	Ausschreibung eines Auftrages für Fachhochschulen	Fr. 150'000	Fr. 150'000	
	Dokumentation				
Umsetzung	Checklisten	Ausarbeitung von Checklisten	Fr. 60'000	Fr. 20'000	1,0 GWh/a
	Analysen	Spezialisten mit Checkliste	Fr. 40'000		3,0 GWh/a
	Label	50% durch Anbieter bezahlt	Fr. 50'000	Fr. 50'000	1,0 GWh/a
	Beispiele	Schreiben von 10 Artikeln		Fr. 20'000	0,1 GWh/a
Förderung	Komponenten	Förderschlüssel, Formulare, Abrechnungssystem und Kontrollinstrumente	Fr. 100'000	Fr. 400'000	2,0 GWh/a
	Anlagenanalysen			Fr. 100'000	2,0 GWh/a
	Einsparerfolge			Fr. 30'000	0,5 GWh/a

Tab. 7) Zusammenstellung der Massnahmen.

Bei den geschätzten jährlichen Stromeinsparungen ist wegen Sättigungserscheinungen mit einer jährlichen Abnahme von 5 bis 15% zu rechnen.

Viele der aufgezeigten Massnahmen lassen sich nicht isoliert betrachten und müssen gegeneinander abgewogen werden. So wird bei der Ausarbeitung der Checklisten davon ausgegangen, dass diese von den unabhängigen Spezialisten im Kompetenzzentrum zusammen mit den Anbieter erstellt wird, und dass zuvor eine erste Dokumentation über Druckluftanlagen erstellt wurde.

Je nach der Entwicklung im Ausland im Bereich der Energieeffizienz von Druckluftanlagen sollte möglichst früh eine Koordination der Aktivitäten gesucht werden, vor allem wenn ein Label eingeführt werden soll.

Das Thema Förderbeiträge wäre aktuell, wenn eine gesetzliche Grundlage für die entsprechenden Mittel vorhanden ist und der politische Druck zum Geldrückfluss in die Industrie. Bei der Förderung von guten Komponenten ist zu berücksichtigen, dass ohne Förderbeiträge vielleicht die Hälfte der Kaufentscheidungen auch sonst zugunsten der guten Produkten ausfallen würde. Die relativ hohe Stromeinsparung bei der Rückmeldung von rund 25 Einsparerfolgen basiert auf angenommen rund 600 subventionierten Anlagenanalysen.

Optimistisch gesehen könnten über 15 Jahre Energiesparbemühungen etwa die Hälfte der relevanten Druckluftanlagen beeinflusst werden. Bei einer durchschnittlichen Einsparung von 25% könnte somit der Stromverbrauch der Druckluftanlagen in der Schweiz um 12% (100 GWh) gesenkt werden, bei einem theoretischen Potential von 40% (300 GWh).

7. Schlussfolgerungen

Die energetisch gewichtigen Druckluftanlagen sind meistens unerlässliche Bestandteile von komplexen industriellen Prozessen. Die Spezialisten auf der Druckluftseite sind die Kompressoranbieter, welche sich gegenseitig konkurrenzieren. Als Energieingenieur kenne ich mich zuwenig in den Tiefen der Druckluftmaterie aus, um die Verkaufsargumente und Kompetenz dieser Spezialisten zu beurteilen.

Aus meiner Sicht ist eine aktive Mitwirkung in diesem wichtigsten Anwendungsbereich dann erfolgreich, wenn es gelingt, Anwender und Anbieter mit technischer Kompetenz in konkreten Problemstellungen zu überzeugen. Ein Weg dazu ist die Schaffung eines Kompetenzzentrum für Druckluftanlagen. Mit einem festen Forschungsauftrag zur Erstellung und Pflege einer Dokumentation wäre eine tragfähige Grundaustattung für die Spezialisierung einer Fachhochschule gegeben.

Eine andere Schlussfolgerung (als Projektmitarbeiter) aus einem Entwurf dieses Schlussberichts wird von Ruedi Messmer (K.M. Marketing, Winterthur) gezogen:

Um ein wirkungsvolles Massnahmenpaket zu schnüren, müsste als nächster Schritt

- eine Arbeit gestartet werden, die sich ausschliesslich den organisatorischen und betriebswirtschaftlichen Aspekten der Druckluftanlagen aus der Sicht der Käufer und Anwender widmet.
- Zudem kann ich mir vorstellen, dass bei den Grossanlagen nur eine kleine Zahl von Anbietern im Markt aktiv ist. Eine Verbesserung der Situation kann meiner Meinung nach nur mit diesen gemeinsam angegangen werden. Ich bin deshalb der Meinung, dass ein Gemeinschaftsprojekt der Branche gestartet werden sollte: Mit welchen wirtschaftlich interessanten Massnahmen können die Beratungs- und Service-Leistung der Branche mit den vorhandenen Verkaufs- und Service-Strukturen bzw. deren vorhandenen personellen Ressourcen verbessert werden.

Der Vollständigkeit halber versuche ich mein Zukunftsszenario zu beschreiben, wenn im Bereich Druckluftanlagen in der Schweiz keine Massnahmen ergriffen werden:

- Die Anbieter operieren von sich aus mit Energiesparargumenten und installieren zu grosse Kompressoren mit besserem Wirkungsgrad, intelligentere Steuerungen und teilweise energieeffizienter Komponenten wie Kupplungen, Blasdüsen usw.
- Die Anzahl der Anwender wird abnehmen (Strukturwandel), die Verbleibenden konzentrieren sich auf den Energiebezug beim billigsten Stromlieferanten.

Auch ohne staatliche Massnahmen wird bei Druckluftanlagen in der Schweiz Energie eingespart. Mit den richtigen Massnahmen könnte aber mehr eingespart werden.

8. Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
a	Jahr
BfE	Bundesamt für Energie
BfK	Bundesamt für Konjunkturfragen
EDMZ	Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale
Fr.	Schweizer Franken
GOP	Gesellschaft für Ölhydraulik und Pneumatik, AT Treuhand, Zürich
Infel	Informationsstelle für Elektrizitätsanwendungen, Zürich
NOGA	Internationale Systematik der Wirtschaftszweige (1995)
RAVEL	Impulsprogramm für rationelle Verwendung von Elektrizität (BfK 1990 bis 1995)
SEV	Schweizerischer elektrotechnischer Verband, Zürich
VSE	Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, Zürich

Symbol	Einheit	Bezeichnung
p	Pa	Druck absolut (1 Pa = 1 N/m ²)
	bar	Druck (1 bar = 100'000 Pa)
$\dot{V}$	m ³ /s	Volumenstrom (ohne Index bei Atmosphärendruck)
V	m ³	Luftvolumen (ohne Index bei Atmosphärendruck)
	l	Liter (1 m ³ = 1000 l)
P	W	Leistung (1 MW = 1000 kW = 1'000'000 W)
W	J	Energie (1 J = 1 Ws)
	kWh	Kilowattstunde (1 kWh = 3,6 MJ)
	GWh	Gigawattstunde (1 GWh = 1000 MWh = 1'000'000 kWh)

Bei den Stromkosten wurde ein Durchschnittspreis von rund 20 Rp./kWh angenommen.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Wirkungsgradoptimierung der Drucklufterzeugung und –verteilung (Materialien zu RAVEL), Franz Müntst, EDMZ 724.397.21.54 D, BfK 1992
- [2] Energetischer Vergleich pneumatischer, hydraulischer und elektromechanischer Antriebs- und Werkzeugsysteme (Materialien zu RAVEL), Joachim E. Albrecht, EDMZ 724.397.12.56 D, BfK 1993
- [3] Energieeffizienz in Gewerbe- und industriellen Kleinbetrieben, Infel, Zürich 1999
- [4] Schweizerische Elektrizitätsstatistik 1998, BfE 3.22 d/f/99, Sonderdruck aus Bulletin SEV/VSE Nr. 8/1999
- [5] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1998, BfE 3.34 d/f/99, Sonderdruck aus Bulletin SEV/VSE Nr. 16/1999
- [6] Statistisches Jahrbuch der Schweiz 1999, Bundesamt für Statistik, Verlag Neue Zürcher Zeitung
- [7] Marktumfrage 1998 bei 7 grossen Anbieter von Druckluftanlagen, internes Dokument der GOP (Gesellschaft für Oelhydraulik und Pneumatik), AC-Treuhand AG, Zürich
- [8] Compressed Air Challenge, <http://www.knowpressure.org> (Energy Center of Wisconsin, Madison USA, 1999)
- [9] MDI Vehicles, Zero Pollution Motors Inc., <http://www.zeropollution.com>
deutschsprachiger Artikel unter <http://www.s-line.de/homepages/keppler/luftauto.htm>