

---

Projekt

# Untersuchung von Druckluftanlagen in Handwerksbetrieben

---

Bayerisches Landesamt  
für Umweltschutz



**Augsburg, Februar 2004**

**Druckluft im Handwerk**

Bürgermeister-Ulrich-Str. 160  
86179 Augsburg

Tel.: +49-(0)821-9071-5285

Fax: +49-(0)821-9071-5559

Auftragnehmer: Petra Lämmer – Büro für Arbeitssicherheit, Umweltschutz und Energiemanagement

Kooperationspartner: Handwerkskammer für Mittelfranken in Nürnberg  
Kaeser Kompressoren GmbH  
Pressluft-Stölzel KG

Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.

© Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2004

## Inhaltsverzeichnis

1	Projektbeschreibung .....	6
1.1	Einführung.....	6
1.2	Projektpartner.....	6
1.3	Beteiligte Betriebe.....	6
1.4	Projektlauf.....	9
1.5	Zur Verfügung stehende Daten.....	9
2	Energieeinsparpotenziale bei der Druckluftverwendung.....	10
2.1	Kompressor und Trockner .....	10
2.2	Laufzeiten des Kompressors.....	10
2.2.1	Betriebszustand des Kompressors .....	11
2.2.2	Einschaltdauer Kompressor.....	11
2.3	Leckagen.....	11
2.4	Druckhöhe .....	12
2.5	Druckverluste in der Leitung und im Leitungszubehör.....	12
2.6	Wärmerückgewinnung .....	13
2.7	Wartung.....	13
2.8	Umgebungsbedingungen.....	14
2.9	Anwendung.....	14
3	Situation in Handwerksbetrieben .....	14
3.1	Vorgefundene Situation im Überblick.....	14
3.2	Bildung von 3 Kategorien.....	19
3.3	Kompressoren: Situation in Handwerksbetrieben.....	21
3.3.1	Das Alter der Kompressoren.....	22
3.3.2	Gewählte Kompressorgöße im Verhältnis zum Bedarf.....	23
3.4	Trockner: Situation in Handwerksbetrieben.....	24
3.5	Laufzeiten des Kompressors: Situation in Handwerksbetrieben.....	25
3.5.1	Betriebszustand des Kompressors .....	25
3.5.2	Einschaltdauer Kompressor.....	27
3.6	Leckagen: Situation in Handwerksbetrieben .....	28
3.7	Druckhöhe: Situation in Handwerksbetrieben .....	30
3.8	Druckverluste: Situation in Handwerksbetrieben .....	32
3.9	Wärmerückgewinnung: Situation in Handwerksbetrieben .....	38
3.10	Wartung: Situation in Handwerksbetrieben .....	39
3.11	Umgebungsbedingungen: Situation in Handwerksbetrieben .....	42

4	Kosten für die Druckluftherzeugung in Handwerksbetrieben .....	44
5	Übertragung der Ergebnisse auf die Gesamtsituation im Handwerk .....	48
6	Fazit .....	49
7	Handlungsempfehlungen für Handwerksbetriebe mit Druckluftverwendung .....	51
7.1	Energieeinsparpotenziale bei Neubeschaffung/Ersatzinvestitionen .....	51
7.2	Energieeinsparpotenziale bei bestehenden Druckluftanlagen .....	53
8	Anhang: Zur Verfügung stehende Daten .....	55

## Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht „Untersuchung von Druckluftanlagen im Handwerk“ werden im ersten Teil Projektpartner und Projektablauf vorgestellt. Anschließend werden die Optimierungsparameter von Druckluftanlagen kurz allgemein erläutert. Die vorgefundene Situation im Handwerk bezüglich der einzelnen Optimierungsmöglichkeiten wird im Folgenden dargestellt. In 18 Fallbeispielen werden konkrete Problemstellungen erläutert.

Die Handwerksbetriebe mit Druckluftanlagen werden drei Kategorien zugeordnet:

Kategorie 1: Handwerksbetriebe mit sporadischem Druckluftbedarf

Kategorie 2: Handwerksbetriebe mit kontinuierlichem Druckluftbedarf

Kategorie 3: Handwerksbetriebe mit größerem Druckluftbedarf

Die jährlichen Verbräuche in kWh für die Druckluftherzeugung reichten von 100 – 54.000 kWh. Anhand der Fallbeispiele konnte aufgezeigt werden, dass bei den Druckluftanlagen im Handwerk ebenso wie in der Industrie Optimierungspotenziale vorhanden sind. Diese sind häufig ohne Investitionen zu verwirklichen.

Auf Grund der geringen Verbräuche liegen die jährlichen Einsparpotenziale bei Betrieben der Kategorie 1 (Handwerksbetriebe mit sporadischem Druckluftbedarf) oft in dem Bereich von unter 100 € oder wenigen Hundert €. Jedoch können auch hier unerkannte Leckagen (z.B. in den Kompressoren wie in Fallbeispiel 13) zu vermeidbaren Strommehrkosten in der Größenordnung von 1.500 € führen.

Bei Handwerksbetrieben mit größerem Druckluftbedarf (Kategorie 2 und 3) lagen die Einsparpotenziale häufig in der Größenordnung von über 1.000 €.

Anhand von Ergebnissen einer Umfrage bei 1.100 Handwerksbetrieben mit auswertbaren Daten von 160 Betrieben konnte ermittelt werden, dass ca. 15 % der Handwerksbetriebe der Kategorie 3: Handwerksbetriebe mit größerem Druckluftbedarf zuzuordnen sind.

In einer „Lebenszyklus-Kostenanalyse“ werden die Vollkosten pro m<sup>3</sup> Druckluft anhand einiger Beispiele berechnet. Sie liegen je nach Auslastung der Kompressoren und Strompreisen zwischen 1 und 15 Cent pro m<sup>3</sup>.

Weitere Informationsveranstaltungen oder Faltblätter werden als sinnvoll erachtet.

Abschließend werden die Energieeinsparpotenziale für Handwerksbetriebe mit Druckluftverwendung als Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

## 1 Projektbeschreibung

### 1.1 Einführung

Druckluft ist eine Energieform, die auf Grund ihrer vielfältigen Vorteile in der Industrie weit verbreitet ist. In Deutschland werden in der Industrie ca. 7 % der elektrischen Energie zum Betrieb von Druckluftanlagen eingesetzt. Das sind immerhin 14 Milliarden kWh/Jahr. Diese Zahlen werden von einer EU-weiten Studie („Compressed Air Systems in the European Union“) vorgelegt. Druckluft ist jedoch auch eine teure Energieform. Von der dem Kompressor zugeführten Strommenge bleibt nur ein geringer Anteil an mechanischer Arbeit bei der Nutzung der Druckluft übrig. Verschiedenste Verluste (Wärmeverluste bei der Erzeugung, Druckverluste zwischen Erzeugung und Anwendung, Luftverluste durch Leckagen, etc.) mindern den Gesamtwirkungsgrad.

Bei der Druckluftverwendung in Industriebetrieben geht man von Energieeinsparpotenzialen zwischen 25 und 40 % aus.

Über die in den Handwerksbetrieben in Deutschland vorhandenen Kompressoren liegen derzeit keine Auswertungen vor. Hier waren folgende Fragen zu klären:

- In welcher Größenordnung sind Kompressoren im Handwerk vorhanden und wie werden sie betrieben?
- Gibt es Einsparmöglichkeiten (energetisch und wirtschaftlich)?
- In welcher Größenordnung liegen diese Einsparpotenziale und sind sie wirtschaftlich?
- Lohnt sich hier eine Information weiterer Handwerksbetriebe oder sind die dabei möglichen Einsparungen unter Klimaschutzaspekten unter „ferner liefern“ abzuhaken?

Diese Fragen führten zu dem in diesem Bericht dokumentierten Projekt.

### 1.2 Projektpartner

Auftraggeber und gesamtverantwortlich für das Projekt war das Bayerische Landesamt für Umweltschutz unter der Federführung von Frau Dr. Günzl und Herrn Dr. Hensler, angeregt durch Herrn Seidel/ Regierung von Mittelfranken.

Die Auswahl der Betriebe erfolgte durch Herrn Scheuerlein / Handwerkskammer für Mittelfranken.

Durchgeführt wurde das Projekt von Frau Petra Lämmer / Büro für Arbeitssicherheit, Umweltschutz und Energiemanagement.

Die Firmen Kaeser / Herr Engel mit Team und Pressluft-Stölzel / H. Dehne mit Team unterstützten das Projekt durch die Durchführung von kostenlosen Messungen bei den beteiligten Handwerksbetrieben.

Im Folgenden sollen die beteiligten 11 Handwerksbetriebe als „Hauptdarsteller“ vorgestellt werden.

### 1.3 Beteiligte Betriebe

Bei den beteiligten 11 Betrieben handelt es sich überwiegend um Betriebe aus dem Projekt „Qualitäts- und umweltbewusste Handwerksbetriebe“. Man kann also davon ausgehen, dass diese Betriebe überdurchschnittlich ökologisch orientiert und vorgebildet sind. Es wurde ein Querschnitt durch die regionalen Handwerksbranchen (Kfz, Tischler, Bau, Metall, Oberflächenbehandlung) ausgewählt mit Betriebsgrößen von 4 bis 100 Mitarbeitern. Die installierte Kompressorenleistung lag zwischen 3 kW - 38 kW gesamt. Es waren Kompressoren der Baujahre 1972-2001 zu finden.

Bei der Bauart überwogen Kolbenkompressoren bei den kleineren Betrieben, Schraubenkompressoren waren meist bei höheren Verbräuchen zu finden. In der Regel speisten die Kompressoren in ein Netz, historisch bedingt waren aber auch 4 separate Netze mit je einem Kompressor zu finden. Das Verbrauchsprofil reichte von sporadischen Kleinverbrauchern bis zu gleichmäßig durchlaufend.

In der Tabelle 1 sind die wesentlichsten Betriebsparameter der beteiligten Betriebe zusammenfassend dargestellt:

8 Untersuchung von Druckluftanlagen in Handwerksbetrieben

Be- triebs- Nr	Branche	Anzahl Mitar- beiter	Install. Kompr. in kW	Kolben (K)/ Schrau- bekomp. (S)	Bau- jahr	Dauernd oder teilweise eingeschaltet	Druckluftverwendung	Trock- ner vor- handen																																																																																																																								
1	Kraftfahr- zeugtechni- ker	31 / davon 15 in der Werkstatt	4 kW Waschhalle	K	1998	Dauernd eingeschaltet	Autowaschanlage Werkzeuge (Schlagschrauber, Schleifer, Klebepistolen etc.), Reifen- waschanlage, Reifenmontiermaschine, Hebebühne	nein																																																																																																																								
			7,5 kW Werkstatt	K	1991				2	Bau	140 / davon 3 in der Werkstatt mit Druckluft	5,5 kW	K	1994	Abschalten nach 10 h Ar- beitszeit	Nur für KfZ- und Baumaschinenwerkstatthalle; verschiedene Druckluft- werkzeuge wie Meißelhammer, Schlagschrauber, Lackierpistole, pneu- mat.-hydraul. Hebebühne	ja	3	Zweiradme- chaniker	3,5 / davon 2 in der Werkstatt	3 kW	K	1994	Abschalten nach 10,5 h Arbeitszeit	Reifenfüllen, Luftschauber, Schlagschrauber u.a. Druckluftwerkzeuge	nein	4	Tischler	18	4 kW	K	2000	Abschalten nach ca. 11,5 Arbeitszeit	Fast alle Maschinen inkl. Steuerung der Absaugung , Abblasen der Säcke der Absaugung, Korpuspresse	ja	4 kW Reserve	K	1992	5	Bau	80 / davon 3 in der Werkstatt	3 kW	K	1972	Abschalten nach ca. 9 h Arbeitszeit	Befüllen von Öltanks mit Luftkolbenpumpe, diverse Druckluftwerkzeuge zum Testen von reparierten Lufthämmern, zum Befüllen von LKW-Reifen verschiedene mobile Kompressoren für Baustellen	nein	6	Metallbau	30	3 kW	K	1978	Abschalten nach ca. 9 h Arbeitszeit	Lackspritzstand Wenige Druckluftwerkzeuge, Maschinen (Fräser, Sägen, Kantbank)	nein	7	Galvaniseur und Metall- schleifer	75	11 kW	S	1996	Schraube ganze Woche und Wochenende durchlaufend	Steuerung von Ventilen, Regelung, Druckluftzylinder, Abblasen mit Pistole	ja	5,5 kW Reserve	K	1990	n.a. Reserve	K	1988	8	Mühle	100	3 kW Mühle	K	1983	Teilweise werden Kompres- soren ausgeschaltet	Verpackung, mechanische Prozesse, Steuerungen, Filterabreinigung	teilweise	2,4 kW Bäckerei	K	1989	2,4 kW Glutenfreier Versand	K	1995	7,5 kW Müsli	S	2001	9	Bürsten – und Pinsel- macher	50	7,5 kW	S	1983	Nach Arbeitszeit wird Haupt- ventil nach Kompressorstati- on zugemacht	Praktisch für alle Maschinen: Prägen, Tampondruck, Heißprägen, Pinsel biegen	ja	7,5 kW	S	1989	10	Tischler	50 / davon 35 in der Werkstatt	4 kW	S	1999	Abschalten nach 16 h Ar- beitszeit	Lackierstraße (ca. 50%), Zuschnittmaschine CNC-Maschine, Kantenanleimmaschine, Schleifer, Bolzenschussgerät	ja	4 kW	S	1999	7,5 kW	S	1995	7,5 kW	K	1988	15 kW bei Betrieb der Lackieranlage	S	2001	11	Metallbau	80	11 kW	S	1998
2	Bau	140 / davon 3 in der Werkstatt mit Druckluft	5,5 kW	K	1994	Abschalten nach 10 h Ar- beitszeit	Nur für KfZ- und Baumaschinenwerkstatthalle; verschiedene Druckluft- werkzeuge wie Meißelhammer, Schlagschrauber, Lackierpistole, pneu- mat.-hydraul. Hebebühne	ja																																																																																																																								
3	Zweiradme- chaniker	3,5 / davon 2 in der Werkstatt	3 kW	K	1994	Abschalten nach 10,5 h Arbeitszeit	Reifenfüllen, Luftschauber, Schlagschrauber u.a. Druckluftwerkzeuge	nein																																																																																																																								
4	Tischler	18	4 kW	K	2000	Abschalten nach ca. 11,5 Arbeitszeit	Fast alle Maschinen inkl. Steuerung der Absaugung , Abblasen der Säcke der Absaugung, Korpuspresse	ja																																																																																																																								
			4 kW Reserve	K	1992				5	Bau	80 / davon 3 in der Werkstatt	3 kW	K	1972	Abschalten nach ca. 9 h Arbeitszeit	Befüllen von Öltanks mit Luftkolbenpumpe, diverse Druckluftwerkzeuge zum Testen von reparierten Lufthämmern, zum Befüllen von LKW-Reifen verschiedene mobile Kompressoren für Baustellen	nein	6	Metallbau	30	3 kW	K	1978	Abschalten nach ca. 9 h Arbeitszeit	Lackspritzstand Wenige Druckluftwerkzeuge, Maschinen (Fräser, Sägen, Kantbank)	nein	7	Galvaniseur und Metall- schleifer	75	11 kW	S	1996	Schraube ganze Woche und Wochenende durchlaufend	Steuerung von Ventilen, Regelung, Druckluftzylinder, Abblasen mit Pistole	ja	5,5 kW Reserve	K	1990	n.a. Reserve	K	1988	8	Mühle	100	3 kW Mühle	K	1983	Teilweise werden Kompres- soren ausgeschaltet	Verpackung, mechanische Prozesse, Steuerungen, Filterabreinigung	teilweise	2,4 kW Bäckerei	K	1989	2,4 kW Glutenfreier Versand	K	1995	7,5 kW Müsli	S	2001	9	Bürsten – und Pinsel- macher	50	7,5 kW	S	1983	Nach Arbeitszeit wird Haupt- ventil nach Kompressorstati- on zugemacht	Praktisch für alle Maschinen: Prägen, Tampondruck, Heißprägen, Pinsel biegen	ja	7,5 kW	S	1989	10	Tischler	50 / davon 35 in der Werkstatt	4 kW	S	1999	Abschalten nach 16 h Ar- beitszeit	Lackierstraße (ca. 50%), Zuschnittmaschine CNC-Maschine, Kantenanleimmaschine, Schleifer, Bolzenschussgerät	ja	4 kW	S	1999	7,5 kW	S	1995	7,5 kW	K	1988	15 kW bei Betrieb der Lackieranlage	S	2001	11	Metallbau	80	11 kW	S	1998	Durchgängig eingeschaltet	CNC-Maschinen, Pulverlack, Laseranlage, Abkantbänke, Nippelmaschi- ne etc.	ja				11 kW	S	1998																					
5	Bau	80 / davon 3 in der Werkstatt	3 kW	K	1972	Abschalten nach ca. 9 h Arbeitszeit	Befüllen von Öltanks mit Luftkolbenpumpe, diverse Druckluftwerkzeuge zum Testen von reparierten Lufthämmern, zum Befüllen von LKW-Reifen verschiedene mobile Kompressoren für Baustellen	nein																																																																																																																								
6	Metallbau	30	3 kW	K	1978	Abschalten nach ca. 9 h Arbeitszeit	Lackspritzstand Wenige Druckluftwerkzeuge, Maschinen (Fräser, Sägen, Kantbank)	nein																																																																																																																								
7	Galvaniseur und Metall- schleifer	75	11 kW	S	1996	Schraube ganze Woche und Wochenende durchlaufend	Steuerung von Ventilen, Regelung, Druckluftzylinder, Abblasen mit Pistole	ja																																																																																																																								
			5,5 kW Reserve	K	1990																																																																																																																											
			n.a. Reserve	K	1988																																																																																																																											
8	Mühle	100	3 kW Mühle	K	1983	Teilweise werden Kompres- soren ausgeschaltet	Verpackung, mechanische Prozesse, Steuerungen, Filterabreinigung	teilweise																																																																																																																								
			2,4 kW Bäckerei	K	1989																																																																																																																											
			2,4 kW Glutenfreier Versand	K	1995																																																																																																																											
			7,5 kW Müsli	S	2001																																																																																																																											
9	Bürsten – und Pinsel- macher	50	7,5 kW	S	1983	Nach Arbeitszeit wird Haupt- ventil nach Kompressorstati- on zugemacht	Praktisch für alle Maschinen: Prägen, Tampondruck, Heißprägen, Pinsel biegen	ja																																																																																																																								
			7,5 kW	S	1989																																																																																																																											
10	Tischler	50 / davon 35 in der Werkstatt	4 kW	S	1999	Abschalten nach 16 h Ar- beitszeit	Lackierstraße (ca. 50%), Zuschnittmaschine CNC-Maschine, Kantenanleimmaschine, Schleifer, Bolzenschussgerät	ja																																																																																																																								
			4 kW	S	1999																																																																																																																											
			7,5 kW	S	1995																																																																																																																											
			7,5 kW	K	1988																																																																																																																											
			15 kW bei Betrieb der Lackieranlage	S	2001																																																																																																																											
11	Metallbau	80	11 kW	S	1998	Durchgängig eingeschaltet	CNC-Maschinen, Pulverlack, Laseranlage, Abkantbänke, Nippelmaschi- ne etc.	ja																																																																																																																								
			11 kW	S	1998																																																																																																																											

Tab. 1: Übersicht beteiligte Betriebe



## 1.4 Projektablauf

Der Projektablauf gliederte sich in mehrere Phasen:

- 1.) Einführung der beteiligten Betriebe in die Thematik; Zielsetzung des Projektes; Sensibilisierung für das Thema „Druckluft und Kosten“ und Erläuterung der wesentlichsten Einsparpotenziale
- 2.) Besuch der Betriebe und Aufnahme der wesentlichen Daten in Besuchsberichten; wo möglich und sinnvoll Fließdruckmessung
- 3.) Durchführung von Wochenverbrauchsmessungen durch die Firmen Kaeser oder alternativ Pressluft-Stölzel
- 4.) Umfrage per Fragebogen bei über 1100 Handwerksbetrieben zu vorhandenen Kompressoren und deren Betriebsweise im Rahmen der Konjunktumfrage
- 5.) Auswertung der aufgenommenen und gemessenen Daten sowie der Umfrage bei Handwerksbetrieben
- 6.) Präsentation der wesentlichsten Ergebnisse
- 7.) Zusammenstellung der Ergebnisse im Projektbericht

Der Projektzeitraum erstreckte sich von Oktober 2002 – April 2003.

## 1.5 Zur Verfügung stehende Daten

Für die Auswertung der betrieblichen Daten standen folgende Informationen zur Verfügung (Anhang 1 – 4):

Anhang (1): Besuchsberichte

Anhang (2): Wochenverbrauchsmessungen (grafische Auswertung)

Anhang (3): Tabellarische Auswertung durch Fa. Kaeser von Kenngrößen für alle Betriebe außer Betrieb 8

Anhang (4): Ergebnisse der Umfrage zu Druckluftanlagen in Handwerksbetrieben im Rahmen der Konjunktumfrage Anfang 2003:

Für die Größenordnung von Kompressoren im Handwerk und deren Betriebsweise kann neben den Daten der beteiligten 11 Betriebe auf Daten einer Umfrage bei über 1100 Handwerksbetrieben von Mittelfranken (Rücklauf von knapp 300 Betrieben) zurückgegriffen werden.

Von den 300 Betrieben gaben 140 Betriebe an, keine Kompressoren zu besitzen. Es konnte somit Datenmaterial von 160 Betrieben ausgewertet werden.

Im Folgenden werden kurz die allgemeinen Einsparpotenziale bei der Druckluftverwendung erläutert. Der anschließende Teil stellt die tatsächliche Situation in den untersuchten Handwerksbetrieben vor und erläutert sie anhand von Fallbeispielen.

## 2 Energieeinsparpotenziale bei der Druckluftverwendung

Im Wesentlichen finden sich Einsparpotenziale bei Druckluftanlagen bei folgenden Aspekten:

- Auswahl und Auslegung von Kompressor und Trockner
- Laufzeiten des Kompressors
- Leckagen
- Druckhöhe
- Druckverluste in der Leitung und im Leitungszubehör
- Wärmerückgewinnung
- Wartung
- Umgebungsbedingungen
- Anwendung

Diese wesentlichen Parameter sollen Im Folgenden kurz erklärend angerissen werden.

### 2.1 Kompressor und Trockner

Bei den Kompressoren gibt es Unterschiede in der Energieeffizienz (Energiebedarf pro Liefermenge). Hierbei beeinflussen verschiedene Faktoren den Wirkungsgrad:

- Neuere Kompressoren haben einen besseren Wirkungsgrad (Bauartverbesserungen; der Verschleiß beweglicher Teile kann zunehmend den Wirkungsgrad verschlechtern). Auch gibt es Unterschiede in der Energieeffizienz zwischen den Kompressoren verschiedener Hersteller.
- Zu groß gewählte (Schrauben-!)Kompressoren können den Energiebedarf unnötig erhöhen durch Leerlauf mit ca. 30 % Energieverbrauch des Vollastbetriebes.

Bei den Trocknern ist neben der Wahl der richtigen Größe zu beachten, dass geregelte Trockner („Energiespartrockner“) erhältlich sind. Herkömmliche Trockner sind mit einer Durchlaufregelung ausgestattet; dies bedeutet, dass ihre Kälteaggregate ständig laufen. Geregelte Trockner („Energiespartrockner“) verbrauchen im Gegensatz dazu nur dann tatsächlich Energie, wenn Luft darüber gefahren wird. Während der Arbeitspausen, Zeiten geringerer Auslastung und Stillstandszeiten gehen Trockner mit einer Energiesparregelung in den Aussetzbetrieb.

### 2.2 Laufzeiten des Kompressors

Zwei Faktoren sind hierbei entscheidend:

- 1.) In welchem Betriebszustand befindet sich der Kompressor?
- 2.) Wie lange ist der Kompressor eingeschaltet?

### 2.2.1 Betriebszustand des Kompressors

Der eingeschaltete Kompressor kann sich in verschiedenen Betriebszuständen befinden:

Betriebszustand	Liefermenge	Energieverbrauch
Last	Liefermenge 100 %	Energieverbrauch 100 %
Leerlauf	Liefermenge 0 %	Energieverbrauch ca. 30 %
Aus bzw. Stillstand	Liefermenge 0 %	Energieverbrauch 0 %

Tab. 1: Mögliche Betriebszustände und Energieverbräuche

Ein zu groß gewählter **Kolben**kompressor wird nach Auffüllen seines Behälters immer in den Stillstand übergehen (kein Energieverbrauch). **Schrauben**kompressoren haben in der Regel eine variabel einstellbare Nachlaufzeit. Hierbei begrenzt der Leerlauf (eingestellte Nachlaufzeit) die Motorschaltspiele als Überlastungsschutz, benötigt aber ohne Druckluftlieferung ca. 30 % des Volllast-Energieverbrauchs. Es gilt hier, eine sinnvolle, auf die jeweilige betriebliche Situation angepasste Einstellung der Nachlaufzeit zu finden. Zu groß gewählte Schraubenkompressoren haben somit einen unnötig hohen Energieverbrauch durch häufig im Leerlauf laufende Kompressoren.

Für die Begrenzung der Schaltspiele und damit auch für die optimale Einstellung der Leerlaufzeiten ist neben der Größenwahl des Kompressors auch die Größe des Druckluftbehälters sowie die gewählte Schaltdifferenz Einschalt-Druck-Ausschalt-Druck entscheidend. Je größer der Druckluftbehälter und ebenso je größer die Schaltdifferenz gewählt wird, desto länger arbeitet der Kompressor am Stück bzw. desto seltener muss er schalten.

Ein **regelbarer** Kompressor (im Handwerk kaum zu finden) kann sich außerdem im Teillast-Betriebszustand befinden. Hierbei ist die Liefermenge regelbar und der Energieverbrauch sinkt, jedoch nicht unbedingt proportional zur sinkenden Liefermenge. Unter energetischen Gesichtspunkten ist die sogenannte Proportionalregelung oder Drosselklappenregelung abzulehnen, da der Energieverbrauch bei abnehmender Liefermenge nur unwesentlich sinkt. Empfehlung: Drehzahl- oder Frequenzregelung, da hier im sinnvollen Regelbereich der Energieverbrauch zur Liefermenge annähernd proportional sinkt.

### 2.2.2 Einschaltdauer Kompressor

Die Zeiten, in denen der Kompressor eingeschaltet ist, sind auf den notwendigen Verbrauchszeitraum zu beschränken: Selbst wenn kein echter Verbrauch vorhanden ist, arbeitet der Kompressor für die Leckagen. Die Kompressoren sind außerhalb der Betriebszeiten auszuschalten. Sinnvoll kann auch ein Hauptabsperrventil sein. Dieses sollte zu Betriebsbeginn langsam geöffnet werden, damit der Trockner nicht überfahren wird.

### 2.3 Leckagen

Bei der Leckage sind folgende Begriffe zu unterscheiden:

**Leckagemenge:** Verlorene Druckluft in m<sup>3</sup>/min

**Leckagerate oder Leckageverluste in %:** Prozentual auf die erzeugte Druckluft bezogener Anteil des durch Leckagen verlorenen Druckluftvolumens. Hierbei können zwei Bezugsgrößen verwendet werden:

Leckagerate in % bezogen auf die durchschnittlich erzeugte Druckluft **während der Produktionszeit**

Leckagerate in % bezogen auf die durchschnittlich erzeugte Druckluft **über den gesamten Messzeitraum**

Die Leckagen in Druckluftsystemen erreichen oft ungeahnte Größenordnungen und sind somit nicht unwesentliche Energieverschwender und Kostenfaktoren. Den größten Teil machen dabei häufig Undichtigkeiten „im letzten Abschnitt“ aus, also undichte Steckkuppelungen, Schläuche, Armaturen, defekte Werkzeuge, innere Leckagen bei Fertigungsanlagen, etc.. Als Größenordnung gilt, dass die Leckageraten bei kleineren Industrienetzen 5 %, bei größeren 10 % und bei sehr großen Netzen 13-15 % (Prozente bezogen auf den Verbrauch während Produktionszeiten) nicht überschreiten sollten. Darunter liegt der Aufwand zur Beseitigung meist über dem Einsparpotenzial. Diese Prozentzahlen sind auf das Handwerk nur bei Betrieben mit größeren Verbräuchen übertragbar; bei kleineren Betrieben ist der Druckluftbedarf oft so gering, dass prozentual die Leckage auch bei absolut geringen Werten „aus dem Rahmen fällt“.

## 2.4 Druckhöhe

Zu Beginn einige Begriffserläuterungen:

Bei dem Druck unterscheidet man den absoluten Druck vom Überdruck. Bei dem **Überdruck** ( $p_{\bar{u}}$ ) (auch effektiver Druck genannt) handelt es sich um den über dem atmosphärischen Druck liegenden, in der Technik nutzbaren Druck (Manometerdruck).

Der **absolute Druck** ( $p_a$ ) ist die Summe aus dem atmosphärischen Druck (erzeugt durch das Gewicht der Lufthülle, die auf uns ruht) und dem Überdruck.

Wird in der Drucklufttechnik allgemein sowie im Folgenden über Drücke gesprochen, ist – sofern nichts anderes genannt wird – der effektive (Über-)Druck ( $p_{\bar{u}}$ ) gemeint.

Des Weiteren unterscheidet man den Einschaltdruck und den Ausschaltdruck. Der **Einschaltdruck** ( $p_{\min}$ ) ist die Druckhöhe ( $p_{\bar{u}}$  in bar $_{\bar{u}}$ ), bei der sich der Kompressor einschaltet. Der Kompressor fördert jetzt bis zum Erreichen des **Ausschaltdruckes** ( $p_{\max}$ ).

Der Ausschaltdruck sollte so niedrig wie möglich gewählt werden. Jedes Bar Höherverdichtung erhöht den Energieverbrauch um ca. 6 %, durch dadurch steigenden Luftverbrauch für Leckagen kann der Energieverbrauch pro Bar Höherverdichtung um bis 10 % steigen. Die Druckhöhe sollte somit auf das notwendige Minimum (benötigter Druck beim Anwender + Druckverluste in der Aufbereitung und Leitung + Schaltdifferenz) begrenzt werden. Nicht selten wird jedoch mit einem höheren Druck als nötig gefahren (Sicherheitszuschläge, zu hohe Druckverluste im System, angeblich höherer Druckbedarf als tatsächlich nötig).

## 2.5 Druckverluste in der Leitung und im Leitungszubehör

Unnötig hohe Druckverluste im System führen zu unnötig hohem Druck (s.o.) oder zu (meist unerkannten) Leistungseinbußen der Druckluftwerkzeuge. Druckverluste können entstehen durch zugesetzte Filter, zu gering dimensionierte Leitungen oder Schläuche, zu viele Zwischenstücke (Kupplungen), zu lange Schläuche, insbesondere Spiralschläuche, schlechtes Leitungszubehör mit hohem Druckabfall und schlechter Durchflusskapazität, etc. Als Faustregel gilt: Der Druckabfall von der Erzeugung bis zum Verbraucher sollte 1 bar nicht übersteigen.

Abbildung 1 zeigt typische Verursacher von Druckabfällen im Rohrleitungsnetz.

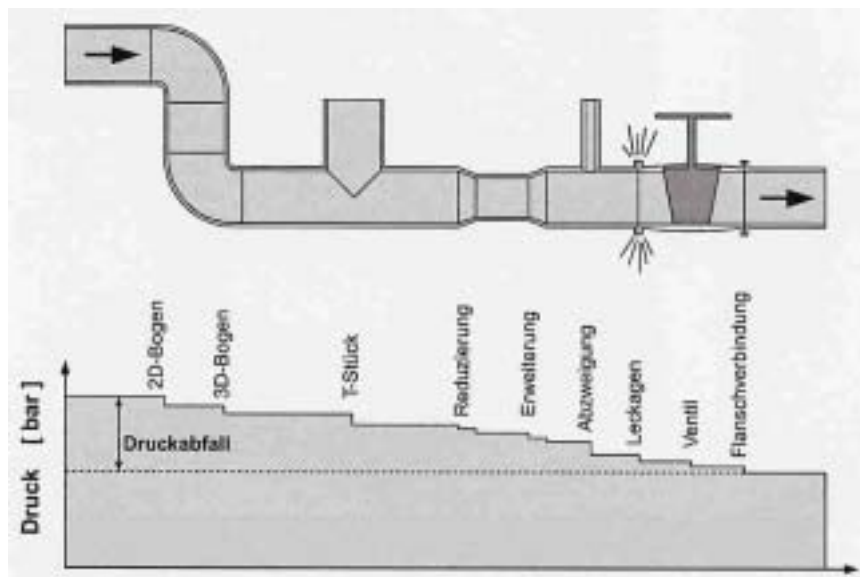


Abb. 1: Druckabfall im Rohrleitungsnetz (aus: Boge Druckluftkompendium)

Zu unterscheiden sind der statische Druck und der Fließdruck:

Unter dem **statischen Druck** (= Staudruck) versteht man den Druck in einem geschlossenen System, aus dem keine Luft entweicht. Entscheidend ist jedoch der „Arbeitsdruck“= **Fließdruck** am Werkzeugeinlass, wenn dieses arbeitet. Die Differenz zwischen dem Staudruck und dem Fließdruck gibt Aufschluss über die Leistungsfähigkeit des Druckluftnetzes bzw. weist auf zu Druckabfällen führende Engpässe hin.

## 2.6 Wärmerückgewinnung

Von der zur Druckluftherzeugung eingesetzten elektrischen Energie sind theoretisch über 90 % als Wärme rückgewinnbar. Deshalb ist Wärmerückgewinnung, wo wirtschaftlich machbar, äußerst sinnvoll. Die rückgewonnene Wärme ist prinzipiell zur Raumluftherwärmung, Warmwasserheizung und Brauchwassererwärmung etc. nutzbar. Im Handwerk ist die Wärmerückgewinnung bei Handwerksbetrieben mit sporadischem Druckluftbedarf vernachlässigbar. Sinnvollste Anwendung im Handwerk ist die Abwärmenutzung zur Raumluftherwärmung.

## 2.7 Wartung

Eine mangelhafte Wartung wirkt sich zum Einen auf eine nicht sichergestellte Betriebssicherheit bis hin zur völligen Funktionsuntüchtigkeit hin aus. Durch eine nicht ausreichende Wartung kann sich des Weiteren der Energiebedarf wesentlich erhöhen. Verantwortlich hierfür sind häufig Druckverluste bei Kühlern, Filtern und Abscheidern.

Durchgeführte regelmäßige Reinigungen, Ölwechsel, etc. senken den Energieverbrauch. Aber auch im Kompressor möglicherweise auftretende (teilweise erhebliche) Leckageverluste durch z.B. defekte Ventile bleiben sonst unerkannt und verringern dadurch deutlich die Liefermenge mit in Folge erhöhter Laufzeit des Kompressors. Die Ventile von Kolbenkompressoren haben eine endliche Lebensdauer. Sie büßen im Laufe der Zeit stetig an Dichtheit ein. Regelmäßige Überprüfungen durch einen Fachmann im Rahmen der vorgeschriebenen Wartungsintervalle sind dringend zu empfehlen.

Bei Keilriemen ist die Spannung regelmäßig zu überprüfen, um Übertragungsverluste gering zu halten.

Manuelle Kondensatableiter sind regelmäßig zu entleeren, automatische Kondensatableiter sind auf ihre Funktionsfähigkeit zu prüfen. Bei vorhandenen Kondensataufbereitungssystemen ist die Funktionsfähigkeit regelmäßig zu prüfen (Trübungskontrolle).

## 2.8 Umgebungsbedingungen

Temperatur:

Als optimale Umgebungsbedingungen für Kompressoren gelten Temperaturen um 10 – 20 °C. Temperaturerhöhungen um 10 °C verschlechtern den Massenstrom um ca. 4 %, Temperaturen über 35 °C können auf Dauer zum Kompressorschaden führen.

Luftqualität:

Die Ansaugluft sollte sauber und frei von aggressiven Bestandteilen (z.B. aggressive Dämpfe aus Galvanikbädern etc.) sein. Eine staubige Ansaugluft führt zu deutlich verkürzten Wartungsintervallen bzw. zu einem erhöhten Energieverbrauch durch schneller zugesetzte Filter etc..

## 2.9 Anwendung

Da Druckluft eine teure Energieform ist, sollte deren Anwendung auf ein sinnvolles Maß (unter Abwägen der Vor- und Nachteile) beschränkt werden. Hier gibt es verschiedene Ansatzpunkte, wie Ersatz durch Hydraulik oder Elektromechanik bei verschiedenen Anwendungen oder Minimierung von Düsendurchmessern etc.. Auf diese soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden, da die Optimierung der Anwendung nicht Gegenstand der Untersuchung war.

# 3 Situation in Handwerksbetrieben

## 3.1 Vorgefundene Situation im Überblick

Im Folgenden soll auf die vorgefundene Situation in den beteiligten Handwerksbetrieben näher eingegangen werden. In den Tabellen 3-5 sind Kosten und die wesentlichen Optimierungsparameter bei den Betrieben zusammengestellt. Für die Berechnung der Kosten etc. siehe Anhang 5. Für den Betrieb 8 Mühle wurden die Daten „händisch“ aus der Grafik grob abgeschätzt.

Wie unter 3.5 erläutert wird, hat das Abschalten der Kompressoren nach Arbeitsende teilweise einen deutlichen Einfluss auf den Druckluftverbrauch und die Energiekosten. Bei der Berechnung der Kosten wird deshalb zwischen den Kosten ohne Abschalten der Kompressoren nach Arbeitsende (auch als Durchlauf bezeichnet) und den Kosten bei Abschalten nach Arbeitsende/Betriebsschluss unterschieden. Erfolgt kein anderer Hinweis, beziehen sich die Kosten/ Verbräuche auf den Betrieb der Kompressoren ohne Abschalten nach Arbeitsende, da das teilweise durchgeführte Abschalten bei einigen Betrieben unregelmäßig erfolgt.

Für die Berechnung der Stromkosten wurden die von den Betrieben angegebenen jeweiligen Strompreise verwendet. Sie differieren stark und liegen im Bereich von 0,058 € bis 0,186 € pro kWh. In der Tabelle 3 sind die jeweiligen Strompreise in €/kWh aufgeführt.

Die in den Tabellen genannten Kategorien 1-3 werden in Kap. 3.2 näher erläutert.

Kategorie	Betriebs Nr	Branche	Install. Kompr. in kW	Kolben / Schraub-komp.	Kompressoren durchgängig eingeschaltet					Abschaltung nach Betriebsschluss	prozentualer Stromverbrauch für DL im Vergleich zum Gesamtstromverbrauch
					Jahresverbrauch in m <sup>3</sup> ohne Abschaltung	Jahresverbrauch kWh bei Durchlauf	Davon Jahresverbrauch in kWh für Leckage	Jahreskosten nur Strom für Druckluft in €	Davon Jahreskosten nur Strom für Leckage in €	Einsparungen nur Strom in € bei Abschaltung nach Betriebsschluss	
1	1	Kraftfahrzeugtechniker	4 kW	K	7.700	1.360	270	170 (0,124€/kWh)	35	22	1,7
			7,5 kW	K							
	2	Bau	5,5 kW	K	4.100	790	610	85 (0,106€/kWh)	65	50	0,6
	3	Zweiradmechaniker	3 kW	K	660.	105	100	15 (0,135€/kWh)	14	9	0,34
	4	Tischler	4 kW	K	11.650	2.300	420	210 (0,091€/kWh)	40	27	2,7
			4 kW	K							
5	Bau	3 kW	K	3.150	610 bei Durchschnittswert	1.530	115 bei Durchschnittswert (0,186€/kWh)	300	n.a.	n.a.	
6	Metallbau	3 kW	K	15.800	2.020 untypische Messwoche	1.990	290 (0,142€/kWh)	282	220	0,7	
2	7	Galvaniseur und Metallschleifer	11 kW	S	202.800	30.000 untypische Messwoche	n.a.	1.720 (0,058€/kWh)	n.a.	Nicht möglich	1,3
			5,5 kW	K							
			n.a.	K							
3	8	Mühle	3 kW	K		48.000	21.100	3.600 (0,075€/kWh)	1.600	1.040	4,8
			2,4 kW	K							
			2,4 kW	K							
			7,5 kW	S							
	9	Bürsten – und Pinselmacher	7,5 kW	S		23.000	4.050	2.150 (0,093€/kWh)	380	270	28,7
			7,5 kW	S							
	10	Tischler	4 kW	S		41.000 inkl. Hochrechnung 15 kW-Kompr.	17.400	4.900 inkl. Hochrechnung 15 kW-Kompr. (0,12€/kWh)	2.100	1.350	11
			4 kW	S							
			7,5 kW	S							
			7,5 kW	K							
	11	Metallbau	11 kW	S		54.000	6.700	3.800 (0,07€/kWh)	470	Nicht möglich	9
11 kW			S								

Tab. 3: Jahresverbräuche und Einsparung Stromkosten bei Abschaltung nach Betriebsschluss

Kategorie	Betriebs Nr	Branche	Verhältnis Leerlaufstunden zu Betriebsstunden in %	Verhältnis Laststunden zu Betriebsstunden in %	Jahresverbrauch in kWh für Leerlauf	Jahreskosten Leerlaufstrom in Euro
1	1	Kraftfahrzeug-techniker	0	100	0	0
	2	Bau	0	100	0	0
	3	Zweiradmechaniker	0	100	0	0
	4	Tischler	0	100	0	0
	5	Bau	0	100	0	0
	6	Metallbau	0	100		
2	7	Galvaniseur und Metallschleifer	15	85	1.300	75
3	8	Mühle	0	100	0	0
			0	100	0	0
			0	100	0	0
			30	70	n.a.	n.a.
	9	Bürsten – und Pinselmacher	27	73	1.650	155
			20	80		
	10	Tischler	40	60	4.450	530
			40	60		
			26	74		
			0	100		
			Mind. 50			
11	Metallbau	79	21	7.600	530	
		54	46			

Tab. 4: Verbräuche und jährliche Kosten für Leerlaufstrom



Kategorie	Betriebs-Nr	Branche	Steuerung / Regelung	Druck in bar p <sub>ü</sub>	Druckverluste	Wärmerückgewinnung	Wartung optimierbar	Umgebungsbedingungen/ Sonstiges
1	1	Kraftfahrzeugtechniker	i.O.	6,5-9,5 i.O.	nicht auffällig	entfällt	Wartung systematisieren und dokumentieren	i.O.
				8,2-11,3 i.O. wg. Hebebühne	nicht auffällig	entfällt	Wartung systematisieren und dokumentieren	i.O. Schlauch am Kondensatablass anbringen
	2	Bau	i.O.	11-15 absenken auf 9-11 bar empfohlen, ca. 20% Energieersparnis	nicht auffällig	-	Wartung systematisieren und dokumentieren	Reihenfolge Trockner -> Behälter tauschen
	3	Zweiradmechaniker	i.O.	7,3-9,5 i.O.	Zu hoch! Druckabfall Luftschrauber von 9,2 auf 7,2 bar; Schlag-schrauber von 9,2 auf 4,2 bar. Ursache: durch schmales Zwischenstück geflickter Schlauch	entfällt	Wartung systematisieren und dokumentieren	i.O. (Lärmbelastung)
	4	Tischler	i.O.	13-15 zu hoch! Realisierte Reduzierung auf 8-10 bringt ca. 25% Ersparnis	nicht auffällig	Durchgang zu Trockenraum	Wartung systematisieren und dokumentieren	i.O.
	5	Bau	i.O.	8-11 i.O. wg. LKW-Reifenbefüllung. Mobile Kompressoren: Hoher Druck ist notwendig, da sich sonst Arbeitszeit verlängert (Fördermenge aus Bohrloch wird geringer)	nicht auffällig	-	Dringend Kompressorwartung durch Fachfirma empfohlen: Zunahme der Leckagerate im Messzeitraum ist evtl. Hinweis auf Leckage im Kompressor	i.O.
2	6	Metallbau	i.O.	5,5-8,0 i.O.	Verschlungene Leitungen	-	Wartung systematisieren und dokumentieren	Etwas zu warm
	7	Galvaniseur und Metallschleifer	Untypische Meßwoche!	7,6-8,7 i.O.	nicht auffällig	Schlamm-trocknung prüfen	Wartung systematisieren und dokumentieren	Zu warm, aggressive Luft, evtl. von außen Luft ansaugen

Kategorie	Betriebs-Nr	Branche	Steuerung / Regelung	Druck in bar p <sub>ü</sub>	Druckverluste	Wärmerückgewinnung	Wartung optimierbar	Umgebungsbedingungen/ Sonstiges
3	8	Mühle	i.O.	6,3-9,2 i.O.	nicht auffällig	-	Dringend Kompressorwartung durch Fachfirma empfohlen, da höhere Stromaufnahme als baugleicher Kompressor	i.O.
			i.O.	7,8-9,8 i.O.	Teilweise verwinkelte Rohrleitungsverlegung	-	Im Rahmen des Projektes durchgeführte Wartung durch Fachfirma brachte ca. 20% Energieersparnis	Staubig
			i.O.	7-9 i.O.	Teilweise verwinkelte Rohrleitungsverlegung	-	Im Rahmen des Projektes durchgeführte Wartung durch Fachfirma: Reparatur defektes Entlastungsventil, Kostenersparnis jährlich 1.500€	Äußerst staubig!!! Trockner nicht angeschlossen!
			i.O.	7,9-9,9	nicht auffällig	Öffnung zum Nebenraum	Dringend Kompressorwartung durch Fachfirma empfohlen: Verschmutzter Ansaugfilter	Trockner überfahren. Gesamtkonzept: Neuplanung einer Gesamtstation sowie eines gemeinsamen Netzes empfehlenswert
9	Bürsten – und Pinselmacher	i.O.	8,5-10 bzw. 8,2-9 tatsächlich Druckhöhe wegen Heißprägen erforderlich? Prüfen, spätestens nach Wegfall Maschine Druckhöhe reduzieren	Teilw. Knoten im Schlauch	Ja mit Sommer-/ Winterregelung	Wartung systematisieren und dokumentieren	Reihenfolge Trockner -> Druckluftbehälter vertauschen	
10	Tischler	Extrem hohe Schaltheufigkeit 15 kW Kompressor, dadurch hoher Verschleiß und Leerlauf. Ggf. an übergeordneter Steuerung anschließen, ggf. größerer Behälter	Druckkaskade 6,0-7,5 i.O.	Beispielmessung: Druckabfall bei Schleifer nach langer Zuleitung und Spiralschlauch von 6,8 auf 5,4 bar fließend zu hoch!	Öffnung zur Werkstatt	Kompressorwartung durch Fachfirma empfohlen: Filter der Station auf Wartungszustand bzw. passende Größe prüfen	Staubig, aber akzeptabel	
11	Metallbau	Zu hohen Leerlauf von 60-70% durch Nachlauf-einstellung optimieren.	6,8-7,1 i.O.	Nicht auffällig	Nein, da Halle durch Lack sehr warm	Wartung systematisieren und dokumentieren	i.O.	

Tab. 5: Übersicht wesentliche Optimierungspotenziale in Betrieben

### 3.2 Bildung von 3 Kategorien

Um übertragbare Aussagen aus den untersuchten Betrieben treffen zu können, wurden drei Kategorien gebildet und die untersuchten Betriebe diesen zugeordnet:

#### Kategorie 1: Handwerksbetriebe mit sporadischem Druckluftbedarf

**Installierte Kompressorengröße:** Ein bis zwei Kompressoren bis 7,5 kW (in der Regel 3-5,5 kW Kolbenkompressoren)

Jährliche Kompressorlaststunden: von 9 bis ca. 700 Laststunden

#### **Verbräuche und Kosten ohne Abschalten der Kompressoren nach Betriebsschluss:**

- Jahresverbrauch in kWh gesamt: von 100 bis 2.300 kWh
- Jahreskosten nur Strom für Druckluft in € von 15 bis ca. 300 €
- Davon Jahreskosten für Leckage in € von 14 bis ca. 285 €

**Einsparung bei Abschaltung nach Betriebsschluss:** von 10 bis 220 €

**Beispielbetriebe:** Werkstätten von Autohäusern (Betrieb 1), Baubetrieben (Betriebe 2 und 5), Zweiradhändlern (Betrieb 3), Schreinereien (Betrieb 4), Werkstatt mit verschiedenen Gewerken für Lichtreklamebau (Betrieb 6)

Einen typischen Druckluftverbrauch an einem Arbeitstag eines Betriebes der Kategorie 1 zeigt die Abbildung 2.

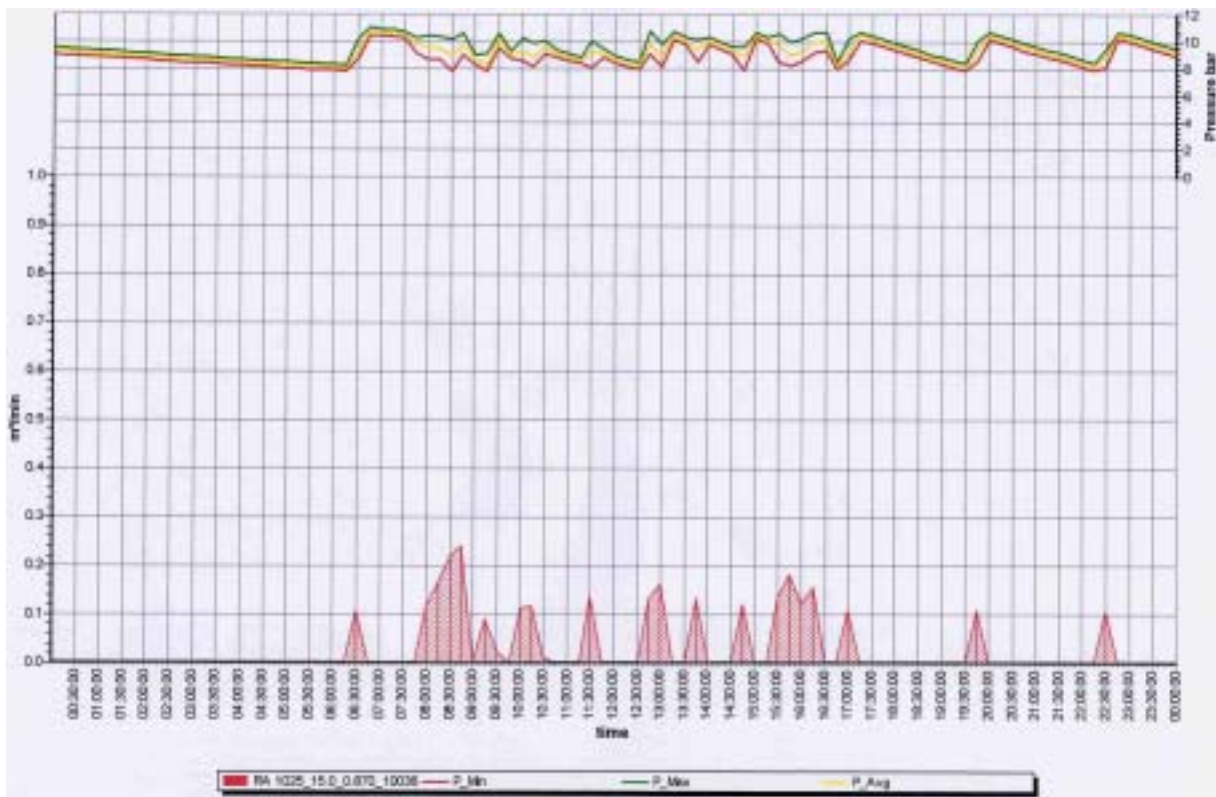


Abb. 2: Typischer Druckluftverbrauch an einem Arbeitstag eines Betriebes der Kategorie 1/Betrieb 1 Werkstatt eines Autohauses

## Kategorie 2: Handwerksbetriebe mit kontinuierlichem Druckluftbedarf

**Installierte Kompressorengröße:** 11 kW

**Jährliche Kompressorbetriebsbereitschaft:** 8.760 Betriebsstunden (Durchlauf auch am Wochenende, kein Betriebsurlaub)

**Jährliche Kompressorlaststunden:** 2.100 h

**Verbräuche und Kosten ohne Abschalten der Kompressoren nach Betriebsschluss:**

- Jahresverbrauch in kWh gesamt: 30.000 kWh (hochgerechnet aus dem Messzeitraum)
- Jahreskosten nur Strom für Druckluft in € von 1.700 € (bis 6.000 € bei voller Auslastung)
- Davon Jahreskosten für Leckage in € nicht angebar

**Einsparung bei Abschaltung nach Betriebsschluss:** keine möglich

**Beispielbetrieb:** Galvanik (Betrieb 7)

Die gemessenen Werte haben nur eingeschränkte Aussagekraft, da die Auslastung zum Messzeitraum (Anlauf nach Weihnachtsferien) evtl. deutlich unter der durchschnittlichen Auslastung lag (Der Jahresdurchschnitt der Betriebsstunden aus dem Betriebsstundenzähler ermittelt läge bei 8000 h?! Vom Messzeitraum hochgerechnet ergeben sich jährliche Laststunden von 2100 bzw. Betriebsstunden von 2400 h.)

Einen typischen Druckluftverbrauch an einem Arbeitstag eines Betriebes der Kategorie 2 zeigt die Abbildung 3.

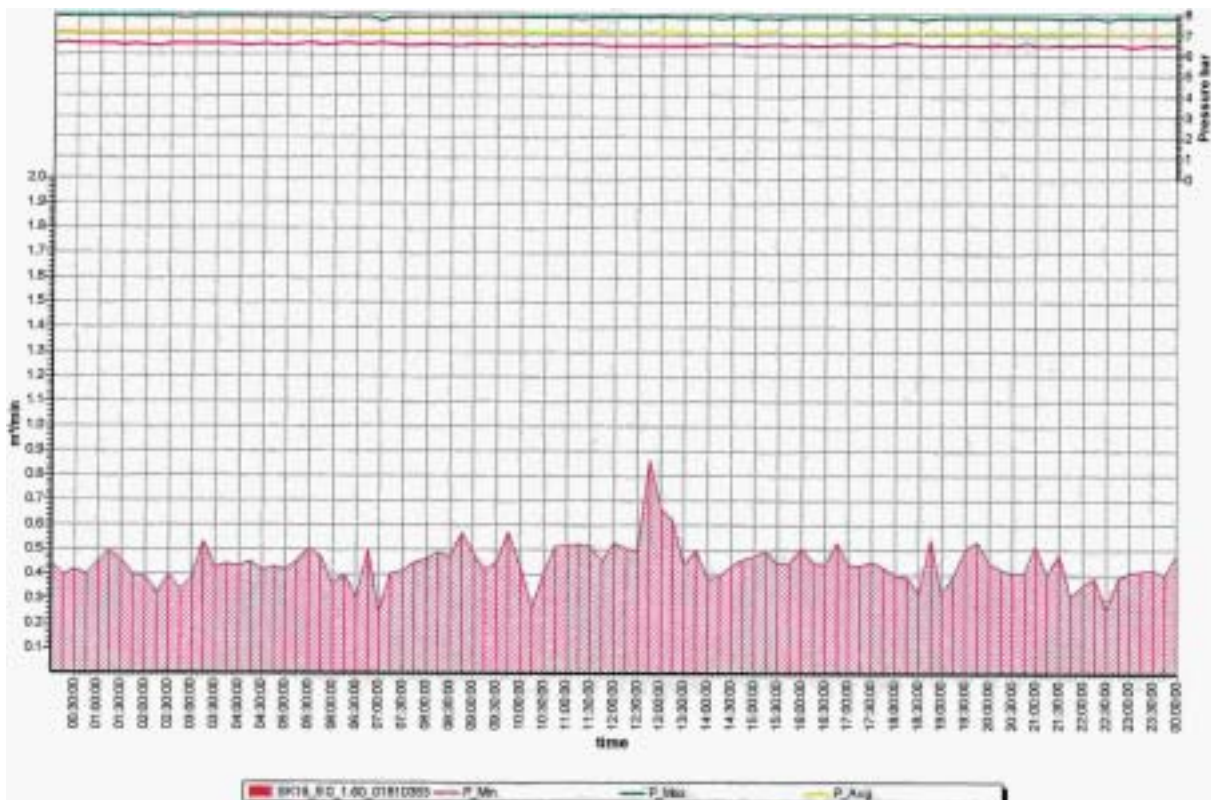


Abb. 3: Typischer Druckluftverbrauch an einem Arbeitstag eines Betriebes der Kategorie 2/Betrieb 7 Galvanik

### Kategorie 3: Handwerksbetriebe mit größerem Druckluftbedarf

**Installierte Kompressorengröße:** mehrere Kompressoren mit einer Gesamtleistung bis 40 kW (Einzelleistung bis 15 kW)

**Jährliche Kompressorlaststunden:** 2.000 – 4.500 Stunden der Grundlastkompressoren ohne Abschaltung

**Verbräuche und Kosten ohne Abschalten der Kompressoren nach Betriebsschluss:**

- Jahresverbrauch in kWh gesamt: 23.000 bis 54.000 kWh
- Jahreskosten nur Strom für Druckluft in € von 2.100 bis ca. 5.000 €
- Davon Jahreskosten für Leckage in € von 380 bis ca. 2.100 €

**Einsparung bei Abschaltung nach Betriebsschluss:** Von 0 bis 1.350 €

**Beispielbetriebe:** Getreideprodukte verarbeitender Betrieb (Betrieb 8), Betrieb zur Pinselherstellung (Betrieb 9), größere Schreinerei (Betrieb 10), Metallbau (Betrieb 11)

Einen typischen Druckluftverbrauch an einem Arbeitstag eines Betriebes der Kategorie 3 zeigt die Abbildung 4.

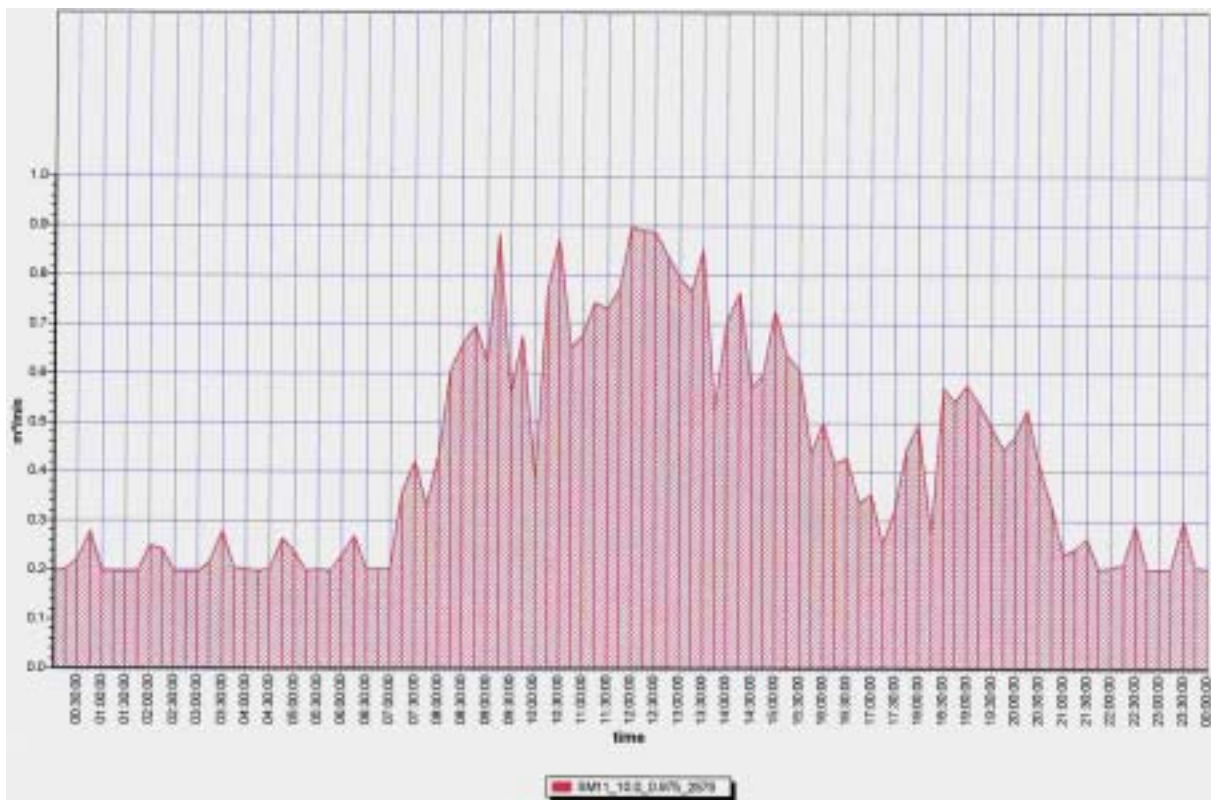


Abb. 4: Typischer Druckluftverbrauch an einem Arbeitstag eines Betriebes der Kategorie 3/Betrieb 8 Getreideprodukte verarbeitender Betrieb

### 3.3 Kompressoren: Situation in Handwerksbetrieben

Bei der Beurteilung des spezifischen Leistungsbedarfs der Kompressoren in den Handwerksbetrieben ist das Alter der Kompressoren sowie die gewählte Kompressorgröße im Verhältnis zum Bedarf zu betrachten:

### 3.3.1 Das Alter der Kompressoren

Teilweise sind im Handwerk sehr alte (30 Jahre und älter) Kompressoren zu finden. Dies bezieht sich sowohl auf die untersuchten Betriebe sowie auf die Ergebnisse der Umfrage. Die Abbildung 5 zeigt die Verteilung der Kompressoren im Handwerk nach dem Alter (Umfrageergebnis).

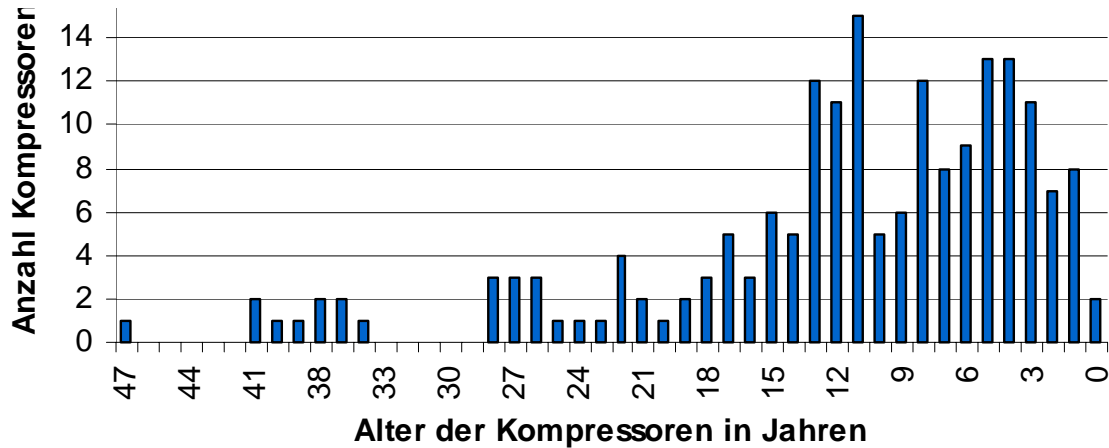


Abb. 5: Verteilung der Kompressoren im Handwerk nach dem Alter/Umfrageergebnis

Prozentual ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 6): Die Hälfte aller Kompressoren sind über 10 Jahre alt, ein Viertel über 15 Jahre.

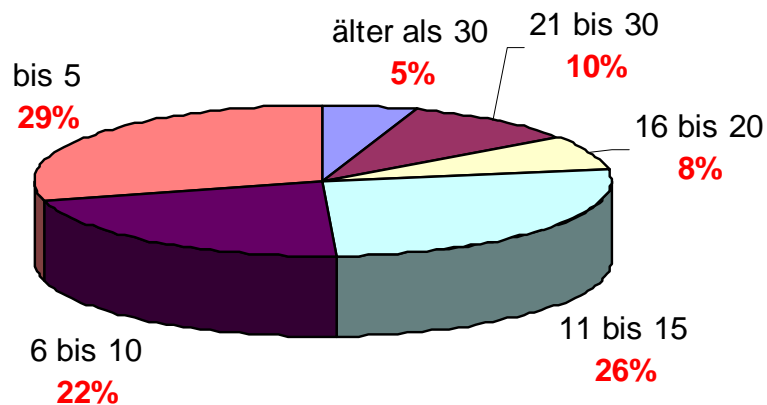


Abb. 6: prozentuale Verteilung der Kompressoren im Handwerk nach dem Alter in Jahren/Umfrageergebnis

Neuere Kompressoren haben in der Regel eine geringere Stromaufnahme bei gleicher Liefermenge. Dies liegt zum einen an durchgeführten Bauartverbesserungen. Zu einem nicht unerheblichen Teil ist hierfür jedoch auch der Verschleiß der beweglichen Bauteile in den Kompressoren verantwortlich, wenn diese einer entsprechenden Beanspruchung unterliegen. Eine sorgfältige Wartung und ggf. Austausch verschiedener Bauteile nach entsprechenden Betriebsstunden durch einen Fachmann sind deshalb empfehlenswert (siehe Kap. 3.10).

**Fallbeispiel 1 (Betrieb 5):**

Der Betrieb 5 benötigt für die Werkstatt seines Baubetriebes nur sporadisch Druckluft. Er betreibt einen über 30 Jahre alten 3 kW-Kolbenkompressor. Innerhalb des Messzeitraumes erhöhte sich die Leckagemenge kontinuierlich, so dass sie am Schluss bei 240 % des durchschnittlichen Verbrauchs des Messzeitraumes lag:

Durchschnittlicher Bedarf 0,006 m<sup>3</sup>/min  
Leckagemenge gegen Ende des Messzeitraumes: 0,015 m<sup>3</sup>/min.

Jährliche Kosten nur Strom bei gleichbleibender Leckage und ohne Abschalten nach Arbeitsende bei 300 € pro Jahr. Mit weiter steigenden Kosten ist zu rechnen!

Diese kontinuierliche Erhöhung der Leckage könnte auf ein Leck innerhalb des Kompressors (z.B. Entlastungsventil) zurückzuführen sein.

**Lösungsvorschlag:**

Kompressorrevision. Aufgrund des hohen Alters evtl. Neubeschaffung.

**Fallbeispiel 2 (Betrieb 8):**

In einem getreideverarbeitenden Betrieb werden zwei baugleiche 2,4 kW Kolbenkompressoren betrieben. Aufgrund des stark verschmutzten Zustandes eines Kompressors wurde vor der Messung bei diesem eine Wartung durchgeführt. Bei annähernd gleichem Abschalt- druck wurde eine um 20 % geringere Stromaufnahme des 6 Jahre jüngeren Kompressors gemessen, der zudem zuvor einer Wartung unterzogen wurde.

**Kompressor 1**

Baujahr 1989  
Keine Wartung

Stromaufnahme Abschalt- druck  
6,1 A

**Kompressor 2**

Baujahr 1995  
Kompressor vor Messung gereinigt; Ölwechsel

Stromaufnahme Abschalt- druck  
5,1 A

**3.3.2 Gewählte Kompressorgröße im Verhältnis zum Bedarf**

Bei den untersuchten Betrieben waren die Kompressoren häufig überdimensioniert, also deutlich zu groß gewählt. Dies rührt zum einen aus der häufig ungenauen Vorstellung über den tatsächlichen Bedarf sowie dem reichlichen „Sicherheitszuschlag“ her.

Diese Überdimensionierung spielt bei **Kolben**kompressoren energetisch keine Rolle. Kolbenkompressoren gehen nach der Befüllung ihres Druckluftbehälters direkt in den Aussetz- zustand über. Sie verbrauchen somit keine unnötige Energie.

**Schrauben**kompressoren weisen bei einer Überdimensionierung evtl. einen deutlich höhe- ren Stromverbrauch durch Nachlauf auf. Dies ist regelungsbedingt (Fallbeispiele und Erläute- rungen siehe Kap. 3.5).



### 3.4 Trockner: Situation in Handwerksbetrieben

Bei den untersuchten Betrieben sind bei 7 von 11 Betrieben Trockner vorhanden. Bei den über die Umfrage erfassten Betriebe besitzen 63 von 160 Betrieben einen Trockner.

In der Regel sind wenig geregelte Kältetrockner (Energiespartrockner) im Einsatz (untersuchte Betriebe: einzelne Trockner der Betriebe 8 und 10). Die geregelten Trockner verbrauchen im Gegensatz zu den herkömmlichen kontinuierlich durchlaufenden Trockner nur Energie, wenn tatsächlich Druckluft verbraucht wird.

Die Betriebsweise der Trockner der untersuchten Betriebe war teilweise nicht ordnungsgemäß. Dies hat zwar nicht unbedingt negative Auswirkungen auf den Energieverbrauch, jedoch auf die Qualität der Druckluft. Es zeigt auch, dass bei manchen Handwerksbetrieben die Druckluftversorgung „einfach so läuft“ und manchmal (wie bei vielen Industriebetrieben) etwas stiefmütterlich behandelt wird.

So war ein Trockner nicht angeschlossen (Abbildung 7) sowie ein anderer über einen Bypass überfahren (Betrieb 8). In zwei Fällen war der Trockner vor den Druckluftbehälter geschaltet (Betrieb 2). Dies führt zu einem höheren Energieverbrauch, da die Luft mit einer höheren Eintrittstemperatur in den Trockner gelangt. Des Weiteren muss der Trockner größer gewählt werden. Diese Reihenfolge empfiehlt sich nur bei einer schlagartig auftretenden großen Luftentnahme aus dem Druckluftbehälter, die zu einer Überlastung des Trockners führen könnte. Dies ist in beiden Fällen jedoch nicht gegeben.



Abb. 7: Nicht angeschlossener Kältetrockner



### 3.5 Laufzeiten des Kompressors: Situation in Handwerksbetrieben

Bei den Laufzeiten der Kompressoren in den Handwerksbetrieben sind folgende Aspekte entscheidend:

- 1.) Betriebszustand des Kompressors: Last/Leerlauf/Aus bzw. Stillstand
- 2.) Zeitraum, in dem der Kompressor eingeschaltet ist

#### 3.5.1 Betriebszustand des Kompressors

Wie bereits im einführenden Teil (Kap. 2.2.1) erläutert, benötigen Kompressoren im Betriebszustand Leerlauf ca. 30 % der Energie, welche sie bei einer Förderung von Druckluft benötigen würden. Es gilt somit, diesen Betriebszustand aus energetischer Sicht zu vermeiden oder gering zu halten.

Die in Handwerksbetrieben vorherrschenden Kolbenkompressoren sind für den Geringverbraucher mit nur zeitweisem Verbrauch hierbei eine gute Wahl. Nach Befüllen des Behälters geht der Kolbenkompressor ohne Leerlauf direkt auf „Aus“. Dadurch entsteht kein zusätzlicher Stromverbrauch über die Lieferzeit hinaus.

In den untersuchten Betrieben der **Kategorie 1: Handwerksbetriebe mit sporadischem Druckluftbedarf** waren sämtlich Kolbenkompressoren zu finden. Es wird hier somit kein Leerlaufstrom verbraucht; die Jahreskosten für Leerlaufstrom sind 0 €.

Für einen gleichmäßigen und/oder höheren Verbrauch sind Schraubenkompressoren eine sinnvolle Alternative. Sie sind für einen Dauerlastbetrieb besser geeignet.

Bei dem Betrieb der **Kategorie 2: Handwerksbetriebe mit kontinuierlichem Druckluftbedarf** lagen die Leerlaufstunden relativ niedrig bei 15 %, die Laststunden bei 85 % und die Jahreskosten für den Leerlaufstrom bei nur 75 €.

Bei der **Kategorie 3: Handwerksbetriebe mit größerem Druckluftbedarf** sind meist Schraubenkompressoren, evtl. in Kombination mit Kolbenkompressoren als Reserve oder Spitzenlast vorhanden.

Die vorhandenen Schraubenkompressoren sind hier teilweise zu groß gewählt. Auch die vorhandenen Möglichkeiten zur Leerlaufminimierung (Einstellung der Regelung) sind zum Teil nicht ausgeschöpft.

Als Folge treten teilweise hohe Leerlaufzeiten mit 30 % Energieverbrauch (von der Leistungsaufnahme bei Vollast) ohne Liefermenge auf.

Bei dem Betrieb 9 lagen die Leerlaufstunden mit 27 % bzw. 20 % im akzeptablen Bereich und verursachten Jahreskosten für den Leerlaufstrom von gesamt 150 €.

Bei etwas größeren Stationen ist teilweise eine übergeordnete Steuerung vorhanden (Betriebe 10 und 11). Auch hier sind die Optimierungspotenziale zeitweise nicht ausgeschöpft.

### **Fallbeispiel 3 (Betrieb 10):**

Der Schreinereibetrieb 10 besitzt 5 Kompressoren: 2 Schraubenkompressoren á 4 kW, die wechselweise die Grundlast übernehmen, einen Schraubenkompressor mit 7,5 kW für die Mittellast sowie einen 7,5 kW Kolbenkompressor für die Spitzenlast. Zusätzlich wurde mit der neuen Lackieranlage ein weiterer Schraubenkompressor angeschafft. Im Betrieb war man der Meinung, es handele sich um einen weiteren 7,5 kW Kompressor. Die Datenaufnahme ergab, dass es sich um einen 15 kW Kompressor handelt.

Die vier älteren Kompressoren waren in eine übergeordnete Steuerung eingebunden; der größte Kompressor mit 15 kW wurde bei der Anschaffung nicht in die übergeordnete Steuerung integriert (5 Kompressoren, 4 Kompressoren können mit der übergeordneten Steuerung betrieben werden). Hier war bei der Neubeschaffung des größten Kompressors nicht an eine sinnvolle Einbindung gedacht worden. Dieser Kompressor lief als Spitzenlastkompressor, der nur bei Betrieb der Lackieranlage eingeschaltet wurde. Die Folge ist ein äußerst hoher Verschleiß durch einen mehrfachen Wechsel/Minute zwischen Last/Leerlauf (ggf. auch aufgrund eines zu geringen Druckluftbehältervolumens).

Auf Grund seiner Größe sollte er bei Betrieb als Grundlastkompressor betrieben werden. Zudem war die Frage, ob der Kompressor nicht zu groß gewählt war. Zum Zeitpunkt der Messung war dieser Kompressor nicht in Betrieb, da auch die Lackieranlage nicht eingesetzt wurde.

Außerdem war der Leerlaufanteil der zwei 4 kW Kompressoren bei 40 %. Bezogen auf alle Kompressoren liegt der Jahresverbrauch in kWh für den Leerlauf bei ca. 4.450 kWh bei einem geschätzten Leerlaufanteil des 15 kW-Kompressors von 50 % (Kann auch deutlich höher liegen!). Die Jahreskosten für den Leerlaufstrom betragen dann über 500 € (bei 0,12 € pro kWh).

#### **Lösungsvorschlag:**

Um eine sinnvolle Einbindung des 15 kW-Kompressors zu ermöglichen, wurde eine Folge-messung vereinbart, die während des Betriebes der Lackieranlage durchgeführt werden soll. Anschließend soll der Kompressor (noch während der Messung) in die Steuerung mit einer breiten Spreizung Einschalt-/Ausschaltdruck eingebunden werden und ein Reserve/Spitzenlast-Kolbenkompressor statt dessen nur über einen entsprechend eingestellten Einschaltdruck gefahren werden.

#### **Kosten/Auswirkungen:**

In diesem Fall entstehen nur geringe Kosten für wenige Meter Kabel. Der Hersteller der Kompressoren übernimmt die Steuerungseinstellung. Auch außerhalb dieses Projektes wäre es im Rahmen der Verhandlungsbasis möglich, die Neueinstellung bei Lieferung eines neuen Kompressors zu verlangen bzw. eine Wochenmessung durchführen zu lassen.

### **Fallbeispiel 4 (Betrieb 11):**

Im metallverarbeitenden Betrieb 11 werden zwei 11 kW-Schraubenkompressoren zur Druck-luftherzeugung rund um die Uhr eingesetzt. Ein Abschalten über Nacht ist nicht möglich, da teilweise nachts produziert wird bzw. bei drucklos-werden die Pulverlackieranlage die Türen auffährt und das Hochfahren am nächsten Tag deutlich mehr Zeit beansprucht.

Bei den Kompressoren lag der Anteil der Leerlaufstunden bei extremen 79 % bzw. 54 %. Jährlich werden hier 7.600 kWh für den Leerlauf verbraucht. Dies entspricht Jahreskosten für den Leerlaufstrom von 530 € (bei 0,07 € pro kWh). Diese hohen Leerlaufanteile dürften an dem Durchlauf der Kompressoren über Nacht bei sehr geringen Verbräuchen liegen.

**Lösungsvorschlag:**

Im Rahmen des Projektes wurde durch den Kompressorenhändler zugesagt, eine kostenlose Optimierung der Einstellung der Nachlaufzeit durchzuführen.

**Kosten/Auswirkungen:**

Eine Minimierung des Leerlaufs durch Einstellung des Nachlaufs müsste hier auch außerhalb des Projektes ohne zusätzlichen oder mit geringem Kostenaufwand z.B. im Rahmen einer jährlichen Kompressorwartung durch die Fachfirma möglich sein. Die tatsächlich erreichte Minimierung der Leerlaufzeiten könnte im Nachgang durch eine Überprüfung (2. Umsetzungsphase) verifiziert werden.

**3.5.2 Einschaltdauer Kompressor**

Bleibt der Kompressor auch nach Arbeitsende an, arbeitet er weiter für die Leckagen. Diese können einen nicht unerheblichen Anteil des Verbrauchs ausmachen (siehe hierzu auch Kap. 3.6).

Bei den über die Umfrage erfassten Betrieben lassen 36 von 160 (22,5 %) die Kompressoren durchgängig eingeschaltet. Eine exakte Aussage, inwieweit dies erforderlich ist durch tatsächliche Verbraucher auch in der Nacht oder am Wochenende, ist so nicht möglich. Stichprobenartige Nachfragen haben ergeben, dass bei diesen Betrieben ein Verbrauch nachts häufig erforderlich zu sein scheint (Rauchanlagen Metzger, 4-Schicht Produktionsbetriebe, z.B. metallverarbeitende Handwerksbetriebe).

Bei den untersuchten Betrieben wiesen 3 von 11 durchgängig angeschaltete Kompressoren auf, wobei bei zwei Betrieben der Durchlauf erforderlich ist.

Ganz grundsätzlich gilt, dass, wo möglich, nachts unbedingt abgeschaltet werden sollte. Dies zeigen die folgenden Zahlen:

**Bei einer Arbeitszeit von 7-16 Uhr und 220 Arbeitstagen lassen sich die Leckageverluste durch Abschalten um 77 % auf nur noch 23 % im Vergleich zum durchgängig eingeschalteten Kompressor senken, bei einer Arbeitszeit von 7-22 Uhr um 62 % auf nur noch 38 %.**

Ohne Abschalten :	Leckagen „arbeiten“ 8760 Stunden/Jahr (100%)
Abschalten nach 16 Uhr:	Leckagen „arbeiten“ 1980 Stunden/Jahr (23 %)
Abschalten nach 22 Uhr:	Leckagen „arbeiten“ 3300 Stunden/Jahr (38 %)

Bei den untersuchten Betrieben der **Kategorie 1: Handwerksbetriebe mit sporadischem Druckluftbedarf** liegen die durch Abschaltung nach Betriebsschluss jährlich möglichen Energieeinsparungen zwischen 70 und 1.550 kWh. Die möglichen Kosteneinsparungen liegen zwischen 10 und 220 €

Die CO<sub>2</sub> –Reduzierungspotenziale durch Abschaltung der Druckluftanlage liegen hier zwischen 40 kg und 1000 kg pro Jahr (Faktor 0,62 kg CO<sub>2</sub> pro kWh).

Bei dem untersuchten Betrieb der **Kategorie 2: Handwerksbetriebe mit kontinuierlichem Druckluftbedarf** ist eine Abschaltung aufgrund des kontinuierlichen Bedarfs nicht möglich.

Bei den untersuchten Betrieben der **Kategorie 3: Handwerksbetriebe mit größerem Druckluftbedarf** liegen die durch Abschaltung nach Betriebsschluss jährlich möglichen Energieeinsparungen zwischen 3.000 und 13.900 kWh. **Die möglichen Kosteneinsparungen liegen zwischen 270 und 1.350 €**

Durch Abschaltung können hier zwischen 1.800 kg und 8.600 kg jährlich an CO<sub>2</sub> eingespart werden.

**Auch wenn bei Kleinverbrauchern die reinen Energiekosten für die Leckagen relativ gering sind, ist das Abschalten nach Arbeitsschluss / am Wochenende eine unbedingt empfehlenswerte Maßnahme: Eine Zunahme von Leckagen wird häufig nicht erkannt (z.B. durch einen verklebten Kondensatableiter, der andauernd Luft abbläst, angeschlossene defekte Werkzeuge, Lecks in Kompressoren selbst etc.).**

Wie bereits erwähnt, werden diese Abschaltungen aber in vielen Fällen durchgeführt. Die Klarstellung der Kosten könnte aber den ein oder anderen Betrieb dazu bewegen, auf deren konsequente Umsetzung zu achten.

Die genannten Beträge beziehen sich auf die gemessene Leckagemenge. Bei zusätzlich auftretenden Leckagen können sich die Beträge deutlich erhöhen. Beispiele hierzu finden sich im folgenden Kapitel 3.6.

### 3.6 Leckagen: Situation in Handwerksbetrieben

Für die Beurteilung der Leckage wird bei Industriebetrieben neben der Leckagemenge in m<sup>3</sup>/min die Leckagerate in % bezogen auf den durchschnittlichen Verbrauch herangezogen (siehe Kap. 2.3).

In den untersuchten Handwerksbetrieben sind gerade bei den Geringverbrauchern die Leckagen als Hauptverbraucher anzusehen, der tatsächliche Verbrauch ist häufig unwesentlich höher. Aussagekräftiger für einen eventuellen Handlungsbedarf ist deshalb eine Beurteilung der Leckage an Hand der Leckagemenge in m<sup>3</sup>/min sowie der dadurch jährlich anfallenden Kosten. Die Leckagerate in % bezogen auf den durchschnittlichen Verbrauch (sowohl bezogen auf die Produktionszeit wie auch auf den gesamten Messzeitraum) dient zur Orientierung und zeigt außerdem deutlich die Wichtigkeit des Abschaltens der Kompressoren außerhalb der Arbeitszeiten.

Bei den untersuchten Betrieben der **Kategorie 1: Handwerksbetriebe mit sporadischem Druckluftbedarf** liegt die Leckagerate bezogen auf die Produktionszeit zwischen 0 % (Betrieb 1 Teilbereich Waschhalle) und über 90 %. Bezogen auf den durchschnittlichen Verbrauch über den gesamten Messzeitraum werden für die Leckagerate Werte zwischen 0 % (Betrieb 1 Waschhalle) und 98 % (Betrieb 3) erreicht. In einem Fall (Betrieb 5) nahm die Leckagemenge während des Messzeitraumes kontinuierlich zu. Dies führte dazu, dass immer mehr Druckluft erzeugt werden musste. Die Leckagerate erreichte am Ende des Messzeitraumes 240 % der durchschnittlich erzeugten Druckluft (siehe hierzu das Fallbeispiel 1 in Kap. 3.3.1).

Die meist sehr hohen Leckageraten der Kleinverbraucher sind nicht auf besonders hohe Leckagemengen zurückzuführen, sondern einfach auf einen äußerst geringen Verbrauch an Druckluft, der weit unter dem „Verbrauch der Leckagen“ liegt. Absolut wurden Leckagemengen zwischen 0 m<sup>3</sup>/min und 0,03 m<sup>3</sup>/min ermittelt.

Die jährlichen Leckagestromkosten ohne Abschalten nach Betriebsschluss lagen bei den Kleinverbrauchern zwischen 15 und 290 €

In dem Fallbeispiel 13 in Kap. 3.10 wurden jedoch deutlich höhere Werte erreicht. Das dort aufgeführte Beispiel ist übertragbar auf Betriebe der Kategorie 1, da das Problem bei einem 3 kW- Kolbenkompressor auftrat. Hier führte ein defektes Entlastungsventil zu deutlichen

kompressorinternen Leckagen in der Größenordnung von 0,2 m<sup>3</sup>/min oder 66 % der Liefermenge des Kompressors. Dadurch entstanden zusätzliche jährliche Stromkosten von ca. 1.500 € bei durchgängig eingeschaltetem Kompressor.

Bei dem untersuchten Betrieb der **Kategorie 2: Handwerksbetriebe mit kontinuierlichem Druckluftbedarf** konnte aufgrund des kontinuierlichen Verbrauchs auch am Wochenende keine Leckagemenge ermittelt werden. Diese müsste während der Betriebsferien ermittelt werden.

Bei den untersuchten Betrieben der **Kategorie 3: Handwerksbetriebe mit größerem Druckluftbedarf** liegt die Leckagerate bezogen auf Produktionszeit zwischen 5 % (Betrieb 9) und 25 % (Betrieb 8). Bezogen auf den durchschnittlichen Verbrauch über den gesamten Messzeitraum werden für die Leckagerate Werte zwischen 15 % (Betrieb 11) und 50 % (Betrieb 8) erreicht.

Absolut wurden Leckagemengen zwischen 0,05 m<sup>3</sup>/min und 0,25 m<sup>3</sup>/min ermittelt. Die jährlichen Leckagestromkosten ohne Abschalten nach Betriebsschluss liegen bei den Handwerksbetrieben mit größerem Druckluftbedarf zwischen 380 (Betrieb 9) und 2.100 € (Betrieb 10).

Die einfachste Maßnahme zur Leckageminimierung ist immer noch das Abschalten der Kompressoren, wenn keine Druckluft benötigt wird. Zu dem Minimieren der Leckageverluste und dadurch Kosteneinsparungen durch Abschalten nach Betriebsschluss siehe Kap. 3.5.2. Ansonsten sind regelmäßig Leckagen zu suchen (Pfeifgeräusche, Lecksuchspray, Ultraschallgerät). Diese Maßnahmen lohnen sich natürlich nur bei größeren Leckagestromkosten. Sobald eine Leckage hörbar ist, sollte das defekte Teil ausgetauscht werden. Die Leckagestromkosten können sonst schnell (unerkannt!) steigen. Eine wichtige Maßnahme ist die Kontrolle der Laufzeiten der Kompressoren. Erhöhen sich diese deutlich (ohne gestiegenen Verbrauch!), ist mit größeren Leckagen zu rechnen (auch: Kompressorrevision). Da verklebte Kondensatableiter häufig eine Leckageursache darstellen, sind elektrisch niveaureguliert Kondensatableiter den anderen Modellen vorzuziehen.

Auch gute Materialien bei Kupplungen (Messing ist zu weich und damit leicht verformbar) sowie bei Schläuchen (elastisch, kein Verspröden) minimieren Leckagen.

### 3.7 Druckhöhe: Situation in Handwerksbetrieben

In den Handwerksbetrieben ist ein breites Spektrum an eingestelltem maximalen Betriebsüberdruck (Ausschaltdruck) zu finden. Das Ergebnis der Umfrage ist in der Abbildung 8 dargestellt.

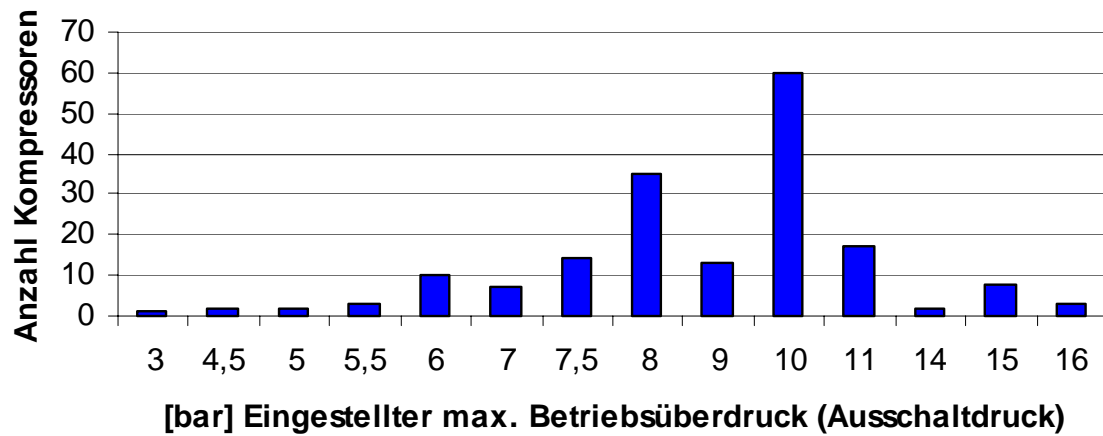


Abb. 8: Eingestellter max. Druck (Ausschaltdruck) - Kompressoren im Handwerk/Umfrageergebnis

Den Schwerpunkt bilden jedoch Ausschalt drücke zwischen 8 und 11 bar. Die im ersten Moment sehr hoch anmutenden Drücke haben ihre Ursache jedoch häufig systembedingt in der weiten Verbreitung der Kolbenkompressoren. Bei Kolbenkompressoren ist eine große Schaltdifferenz zwischen Einschalt- und Ausschalt druck die Regel. Dies ist erforderlich zur Minimierung der Schaltspiele für einen geringen Verschleiß. Die Schaltdifferenz beträgt in der Regel 20 % des Ausschalt druckes, d.h. 2 bar bei 10 bar, 3 bar bei max. 15 bar. Auch der Einschalt druck muss immer noch den notwendigen Druck zuzüglich Druckverluste zur Verfügung stellen.

Bei den untersuchten Betrieben sind in einigen Fällen auch höhere Drücke notwendig. Dies liegt an besonderen Anwendungen wie Hebebühnen (Betriebe 1 und 2), Befüllen von LKW-Reifen (Betrieb 5) etc.. Einen groben Überblick über benötigte Betriebsdrücke von Druckluftgeräten zeigt die Abbildung 9.

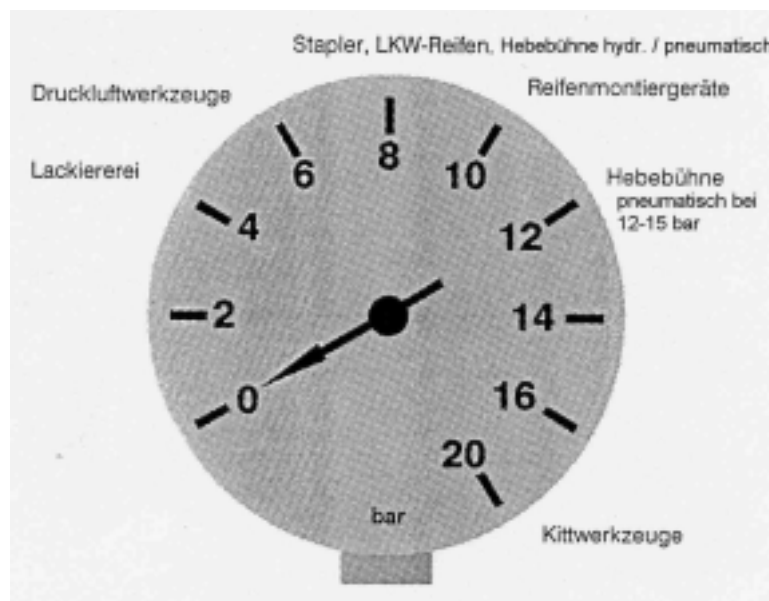


Abb. 9: Druckbedarf für verschiedene Anwendungen; abgeändert nach Kaeser-Seminarunterlagen

Auch bei Schraubenkompressoren kann eine höhere Schaltdifferenz zum Erreichen eines Aussetzbetriebes bzw. verkürzter Nachlaufzeiten sinnvoll sein (Betrieb 6).

Teilweise ist aber durchaus eine Druckreduzierung möglich. Bei den untersuchten Betrieben kann bei zwei Betrieben eine Druckreduzierung erprobt werden:

### **Fallbeispiele aus Betrieben der Kategorie 1: Handwerksbetriebe mit sporadischem Druckluftbedarf**

#### **Fallbeispiel 5 (Betrieb 4):**

Ein Schreinereibetrieb besitzt zwei 4 kW-Kolbenkompressoren (einer davon als Reserve). Für die im Betrieb vorhandenen Druckluftanwender reicht in der Regel ein Druck von 6 bar aus. Lediglich für die im Betrieb vorhandene Korpuspresse wurde ein höherer Druck benötigt. Deshalb wurde der Kompressor mit einem Einschaltdruck von 13 bar und einem Ausschaltdruck von 15 bar gefahren.

#### **Lösungsvorschlag:**

Angeregt durch das Projekt wurde im Messzeitraum nach einer Messwoche der Einschalt- druck von 13 auf 8 bar und der Ausschalt- druck von 15 auf 10 bar gesenkt und eine weitere Woche gemessen. Während des Messzeitraumes gab es keine Beschwerden über einen zu niedrigen Druck an der Korpuspresse.

#### **Kosten/Auswirkungen:**

Es entstehen keine Kosten durch die Maßnahme. Pro bar Druckabsenkung geht man von einer Energieeinsparung um ca. 6 % aus. Es kann somit mit einer Reduzierung des Energie- verbrauchs um ca. 25 - 30 % gerechnet werden. Der Energieverbrauch vermindert sich neben einer verringerten Stromaufnahme auch durch verkürzte Laufzeiten des Kompressors.

Durch die relativ geringen Verbräuche reduzieren sich in Folge dieser Maßnahme die reinen Stromkosten um ca. 50 € jährlich.

#### **Bemerkungen:**

Ob der reduzierte Druck an der Korpuspresse auf Dauer ausreicht, muss eine längere Beobachtung durch den Betrieb bestätigen. Anderenfalls sollte schrittweise getestet werden, bis auf welchen Druck man den Einschalt- druck senken kann.

Als Alternative wäre gegebenenfalls die Bereitstellung eines separaten höheren Drucks an der Korpuspresse möglich. Dies wäre aus wirtschaftlichen Gründen nur durch den vorhandenen Reservekompressor realisierbar.

#### **Fallbeispiel 6 (Betrieb 2):**

In der Kfz- und Baufahrzeuge-Werkstatt eines Baubetriebes wird die Druckluftversorgung durch einen 5,5 kW-Kolbenkompressor sichergestellt. Dieser Kompressor wird mit einem Einschalt- druck von 11 bar sowie einem Ausschalt- druck von 15 bar betrieben.

Die vorhandene Hebebühne ist hydraulisch-pneumatisch und müsste laut Herstellerangaben mit einem Druck von 8 bar auskommen. Zudem ist der Druckminderer dort auf 8 bar eingestellt. Auch für das Befüllen von LKW-Reifen sind in der Regel 8 bar ausreichend.





Bei den Handwerksbetrieben waren häufig Schläuche als Hauptleitungen vorhanden. Hier sollte eine gute Qualität verwendet werden. Schläuche von minderwertiger Qualität werden schnell brüchig und porös und führen dadurch zu unerwünschten Leckagen. Auch auf eine saubere, geradlinige Verlegung sollte geachtet werden. Verschlungen verlegte Schläuche, Knoten in Schläuchen, etc. waren keine Seltenheit und führen zu deutlichen Druckverlusten, insbesondere des Fließdruckes. Einige Beispiele zeigen die Abbildungen 10 und 11.



Abb. 10: Verschlungen verlegter Schlauch 1



Abb. 11: Verschlungen verlegter Schlauch 2

Auch bei den Rohrleitungen sollte darauf geachtet werden, dass scharfe Bögen möglichst vermieden werden. (Abbildung 12). Hier war insbesondere beim Betrieb 8 eine stark verwinkelte Verlegung zu finden.



Abb. 12: Mehrfach verwinkelte Rohrleitungsverlegung

Die wesentlichen Druckverluste treten häufig bei den Abgängen von Hauptleitungen zu den Verbrauchern auf. Auch hier waren die typischen Schwachstellen vorhanden:

- Verschlungen verlegte Schläuche
- Knoten in Schläuchen (Abbildung 13)
- zu lange Spiralschläuche
- mit schmalen Zwischenstücken geflickte Schläuche
- mehrere Kupplungen pro Abgang
- Verteiler mit  $\frac{1}{2}$  Zoll Eingang und  $\frac{1}{2}$  Zoll Ausgängen (Abbildung 14) etc.



Abb. 13: Knoten im Schlauch



Abb. 14: Verteiler mit 1/2 Zoll Eingang und 1/2 Zoll Ausgängen



Bei mehreren Betrieben konnten die statischen Drücke (am Werkzeug anstehend ohne Betrieb) sowie die Fließdrücke (tatsächlicher Arbeitsdruck bei Betrieb des Werkzeuges) gemessen werden. Die Fließdrücke werden neben den Engstellen bis zum Werkzeug auch durch den unterschiedlichen Verbrauch der Druckluftwerkzeuge beeinflusst.

### Beispiele für geringe Druckverluste

#### Fallbeispiel 8:

Im Behälter 6,8-7,1 bar

Statischer Druck: Nach dem Abgang der Leitung in der Werkstatt 6,7 bar anstehend

Fließdruck: Nach dem Anschluss eines Schraubers nur um 0,2 bar gesunken

#### Fallbeispiel 9:

Station 7 bar

Statischer Druck: Reifenfüllstation 6,8 bar

Fließdruck nur knapp darunter bei Anschluss eines Werkzeuges

### Beispiele für höhere Fließdruckverluste

#### Fallbeispiel 10:

Statischer Druck: nach zu langer Zuleitung und Spiralschlauch: 6,8 bar

Fließdruck: Nach Inbetriebnahme eines Schleifers auf 5,4 bar fließend

Siehe hierzu die Abbildung 15.



Abb. 15: Fließdruckmessung nach zu langer Zuleitung und Spiralschlauch

### **Fallbeispiel 11:**

Da der Zuleitungsschlauch gerissen war, wurde er kurzfristig durch Zwischenstecken eines schmalen Zwischenstückes geflickt.

Statischer Druck: 9,2 bar

Fließdruck: Nach Anschluss eines Luftschaubers auf fließend 7,2 bar

Fließdruck: Nach Anschluss eines Schlagschaubers von statisch 9,2 auf fließend 4,2 bar

Dieses Beispiel macht den Einfluss des unterschiedlichen Verbrauchs von Druckluftwerkzeugen auf den Fließdruck deutlich. Durch den höheren Luftverbrauch des Schlagschaubers wirken sich die Engstellen in der Zuleitung deutlich stärker auf den Druckabfall aus.

Als Fließdruck wären in der Regel bei Druckluftwerkzeugen 6,3 bar ideal. Bei Schleifern haben beispielsweise Berechnungen der Fa. Atlas Copco Tools ergeben, dass ein Fließdruck von 5,3 bar statt 6,3 bar bereits einen um 30 % geringeren Materialabtrag oder eine um 40 % längere Arbeitszeit ergeben.

Als **Maßnahmen zur Vermeidung von Druckabfällen** sind zu nennen:

- Entsprechende Wartung der Kompressoren, Trockner und sonstigen Druckluftaufbereitungseinheiten
- Regelmäßiger Wechsel von Filtern, nur unbedingt benötigte Filter einbauen
- Großzügige Auslegung des Rohrleitungsnetzes
- Sämtliche Einbauten an Leitungszubehör auf das nötige Minimum beschränken
- Bei Kupplungen, Kugelhähnen, Filtern etc. gutes Material wählen: auf gute Durchflusskapazität und geringen Druckabfall sowie hohe Festigkeit des Materials achten. Hier rächen sich Preiseinsparungen meist mit einem deutlich höheren Energieverbrauch und einem schnelleren Verschleiß
- Verteiler mit Eingang 1 Zoll und Ausgängen ½ Zoll wählen statt Eingänge und Ausgänge ½ Zoll
- Auch bei Schläuchen auf ausreichenden Querschnitt und gute Materialien achten, die nicht so leicht verspröden und belastbar sind
- Schläuche möglichst kurz (max. 3 m) wählen. Wenn unbedingt längere Schläuche benötigt werden, größere Durchmesser wählen
- Auf saubere Verlegung der Schläuche achten, Knoten, Verschlingungen etc. vermeiden
- Möglichst wenig Spiralschläuche verwenden
- Provisorien vermeiden, da sie meist zu „Pfi's (Provisorien für immer)“ werden.

### **3.9 Wärmerückgewinnung: Situation in Handwerksbetrieben**

Bei unregelmäßigen Kleinverbrauchern (Betriebe der Kategorie 1) ist eine Wärmerückgewinnung vernachlässigbar. Bei größeren Verbrauchern und neueren Stationen war bei den untersuchten Betrieben eine Abwärmenutzung dort vorhanden, wo sie sinnvoll ist. Hierbei werden im einfachsten Fall die anliegenden Räume durch eine Öffnung des Kompressorenraumes erwärmt. Aber auch die komfortablere Lösung (Sommer-/Winterregelung) ist bei Handwerksbetrieben der Kategorie 3 mit einem größeren Druckluftbedarf teilweise vorhanden: Im Winter wird die Abwärme in die Halle geblasen, im Sommer über eine Klappe nach draußen.

Die Abbildung 16 zeigt einen kontrollierten Wärmeabtransport. Die Klappenregelung bzw. die Zuführung zur Raumlüfterwärmung ist auf dem Foto nicht zu sehen.



Abb. 16: kontrollierter Wärmeabtransport

### 3.10 Wartung: Situation in Handwerksbetrieben

Wie bereits im Kap. 3.3.1 erwähnt, hat die Wartung einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und selbstverständlich auch auf die Betriebssicherheit. Da der zunehmende Energiebedarf bzw. auch häufig die zunehmenden Laufzeiten nicht erkannt werden, hat die Wartung bei den Handwerksbetrieben (und häufig auch bei den Industriebetrieben!) einen nur geringen Stellenwert.

Von den untersuchten Betrieben führte praktisch jeder Betrieb zumindest eine Minimal-Wartung durch. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich in der „Wartungstiefe“ und dem Wartungssturnus. Eine systematische Wartung anhand der Betriebsanleitung mit Dokumentation und damit eine gesicherte Regelmäßigkeit und Vollständigkeit war in keinem untersuchten Betrieb zu finden.

Nur ein Teil der Betriebe (5 von 11) lässt eine externe Wartung per Wartungsvertrag durchführen. Die auch hier in der Regel in den Zeiträumen zwischen den externen Wartungen notwendigen, selbst durchzuführenden kleineren Wartungstätigkeiten sollten ebenfalls systematisch durchgeführt und dokumentiert werden.

Aus der Umfrage unter den Handwerksbetrieben ergibt sich folgendes Bild:

Von 160 Betrieben haben 35 (22 %) keine Wartung für ihre Druckluftanlagen, sondern nur bei Reparaturbedarf. 90 Betriebe (56 %) führen eine eigene Wartung durch, 22 Betriebe (14 %) haben einen Wartungsvertrag für ihre Kompressoren.

Folgende Beispiele sollen die Einsparpotenziale aufzeigen:

### Fallbeispiel 12 (Energieagentur NRW):

Sehr häufig ist ein verschmutzter Ansaugfilter zu finden. In einem Berechnungsbeispiel (aus: Energieagentur NRW: Seminarunterlagen Druckluft, Wuppertal) wird aufgezeigt, dass bei einem verschmutzten Ansaugfilter und einem Verdichtungsdruck von 11 bar(a) durch ein deutlich schlechteres Druckverhältnis 13 % mehr Energie aufgewendet werden muss.

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

Abbildung 17: Berechnungsbeispiel Energieagentur NRW verschmutzter Ansaugfilter

Dass die Kompressoren in den Handwerksbetrieben teilweise außerordentlichen Verschmutzungen ausgesetzt sind, belegen eindrücklich die Abbildungen 18 und 19.



Abb. 18: stark verschmutzter Kolbenkompressor





Abb. 19: verschmutzter Kolbenkompressor

### **Fallbeispiel 13 defektes Entlastungsventil (Betrieb 8):**

Ein weiteres eindrucksvolles Beispiel zur mangelnden Wartung war in Betrieb 8 zu finden. Hier lief bei der Datenaufnahme ein 3 kW Kolbenkompressor (Abbildung 18) bei einem gleichbleibenden Druck von ca. 7 bar nahezu durch. Dies entspricht einem Verbrauch von ca. 0,3 m<sup>3</sup>/min. Dieser Kompressor ist hauptsächlich für das Abblasen von Filtersäcken im Einsatz. Hierfür war der Verbrauch zu hoch.

Das Kompressorteam entdeckte ein defektes Entlastungsventil. Nach der Reparatur wurde die Wochenmessung durchgeführt. Hier war der Verbrauch auf 0,1 m<sup>3</sup>/min, also auf ein Drittel gesunken. Die Kompressoren dieses Betriebes stehen verteilt auf dem Betriebsgelände und versorgen jeweils 4 verschiedene Netze. Es gibt keinen Zuständigen für die Kompressoren. Der langsam gestiegene Druckluft“bedarf“ war keinem Mitarbeiter aufgefallen. Die Kompressoren sollen über Nacht ausgeschaltet werden, dies geschieht jedoch unsystematisch und nicht regelmäßig.

### **Lösungsvorschlag:**

Reparatur des defekten Entlastungsventils (erledigt). Anweisung einer Person, die Wartung und das Ausschalten zu systematisieren. Ggf. Gesamtkonzept (1 Netz, 1 Station). Für eine erhöhte Versorgungssicherheit und eine geringere Schmutzbelastung der Kompressoren wäre das eine sinnvolle Lösung.

### **Kosten/Auswirkungen:**

Durch die Reparatur des defekten Entlastungsventils lassen sich die jährlichen Stromkosten bei durchgängig eingeschaltetem Kompressor theoretisch um 1.500 € senken. Außerdem wird der Verschleiß des Kompressors reduziert, wenn die Laufzeit auf ein Drittel gesenkt wird.

### 3.11 Umgebungsbedingungen: Situation in Handwerksbetrieben

Bei den Umgebungs- oder Aufstellungsbedingungen sind die Temperatur und die Qualität der Ansaugluft ausschlaggebend für den Energieverbrauch und die Betriebssicherheit der Kompressoren.

Ganz allgemein ist im Handwerk ein breites Spektrum von Aufstellungsorten zu finden:

- In der Werkstatt direkt; hierbei: saubere Luft bis extreme Staubbelastung
- In Nebenräumen mit eigentlich anderer Hauptfunktion (Abstellraum, Heizung)
- Bis zu eigenen, gut ausgestatteten Kompressorenräumen (bei größeren mit Be- und Entlüftung, Abwärmenutzung, Kondensataufbereitung).

Einen separaten Versorgungsraum bei einem Kleinverbraucher zeigt die Abbildung 20; ein größerer Kompressorraum mit Wärmeabführung und Kondensataufbereitung ist in den Abbildungen 21 und 22 wiedergegeben.



Abb. 20: separater Versorgungsraum auch bei Kleinverbraucher



Abb. 21: Druckluftstation mit Wärmeabführung



Abb. 22: Kondensataufbereitung der Druckluftstation mit Wärmeabführung

Teilweise waren sehr ungünstige Umgebungsbedingungen zu finden:

- Die Kompressoren standen teilweise zu warm (Heizungsraum etc.). Dadurch steigt der Energieverbrauch sowie die Belastung der Kompressoren.
- Bei mehreren Betrieben war eine mittlere (Schreinerei) bis sehr hohe Staubbelastung (Mühle des getreideverarbeitenden Betriebes, siehe Abbildung 18) zu finden. Dies führt zu stark verkürzten Wartungsintervallen bzw. zu steigenden Energieverbräuchen.
- Auch aggressive Luftbeimischungen (Galvanik) traten als ungünstige Umgebungsbedingungen für Kompressoren bzw. Trockner auf. Der Galvanikbetrieb gab an, dass seine Trockner nach wenigen Jahren defekt wären. Eine veranlasste Kondensatuntersuchung soll Aufschluss darüber geben, ob die Luftbeimischungen evtl. Trocknerbestandteile angreifen. Eine mögliche Lösung wäre dann das Ansaugen der Luft zur Druckluftherzeugung von außen.
- Eine direkte Aufstellung der Kompressoren in der Werkstatt, insbesondere der Kolbenkompressoren, führt zu einer Lärmbelastung für die Mitarbeiter.

#### **4 Kosten für die Druckluftherzeugung in Handwerksbetrieben**

Die Grundlage aller Bewertungen von Maßnahmen ist die Frage: Ist die Maßnahme wirtschaftlich bzw. wie sieht die Kosten-Nutzen-Rechnung aus?

Bei den bisherigen Aussagen wurden nur die reinen Stromkosten angeführt. Geringere Verbräuche und dadurch geringere Laufzeiten oder die Reduzierung von Schaltspielen verringern die Abnutzung der Kompressoren und erhöhen die Lebensdauer.

Für Industriekompressoren geht man davon aus, dass die Energiekosten einen Großteil der Vollkosten (mind. 70 %) ausmachen. Das liegt natürlich auch an den hohen Laufzeiten der Kompressoren. Man geht dort außerdem davon aus, dass man für einen Kubikmeter Druckluft mit Vollkosten von ca. 1 - 2,5 Cent rechnen muss.

Um eine entsprechende Aussage über das Handwerk machen zu können, wurden Beispiele aus den drei Kategorien durchgerechnet.

Für die Rechnung wurde das Berechnungsprogramm „life-cycle-tool“ der Kampagne „Druckluft effizient“ verwendet. „Druckluft effizient“ ist eine bundesweite Kampagne der Deutschen Energie-Agentur, dem Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung und dem VDMA, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Nähere Informationen sind im Internet unter [www.druckluft-effizient.de](http://www.druckluft-effizient.de) zu finden.

Erwähnenswert ist bei dem „life-cycle-tool“, dass nur die reinen Kompressorkosten in die Investitionskosten eingehen. Investitionskosten für die Aufbereitung sowie die Rohrleitungen werden nicht berücksichtigt. Unberücksichtigt bleiben auch die Energieverbräuche für vorhandene Trockner, Raumkosten etc. Für die grobe Abschätzung ist dieses Instrument jedoch durchaus sinnvoll.

Für die Berechnung wurden die Energiekosten/Verbräuche bei durchgängig eingeschaltetem Kompressor verwendet. Als Abschreibungszeitraum wurden 10 Jahre gewählt. Für die Stromkosten wurden die jeweiligen betrieblichen Strompreise eingesetzt. Wenn die Beschaffungskosten für die Kompressoren bekannt waren, wurden Originalwerte eingesetzt. Ansonsten macht das Programm eine grobe Kostenabschätzung. Es wurden nur die Investitionskosten für einen Kompressor eingesetzt. Redundanzen wurden nicht berücksichtigt.

**Kategorie 1: Handwerksbetriebe mit sporadischem Druckluftbedarf**

**Fallbeispiel 14 Betrieb 1 Autohaus Werkstatt:**

7,5 kW Kolbenkompressor  
 108 Betriebsstunden pro Jahr  
 Volllast 100 %  
 Leerlauf 0 %  
 Durchschnittlicher Strompreis 0,124 €/kWh  
 Abschreibung 10 Jahre  
 Jahresverbrauch 7.421 m<sup>3</sup>

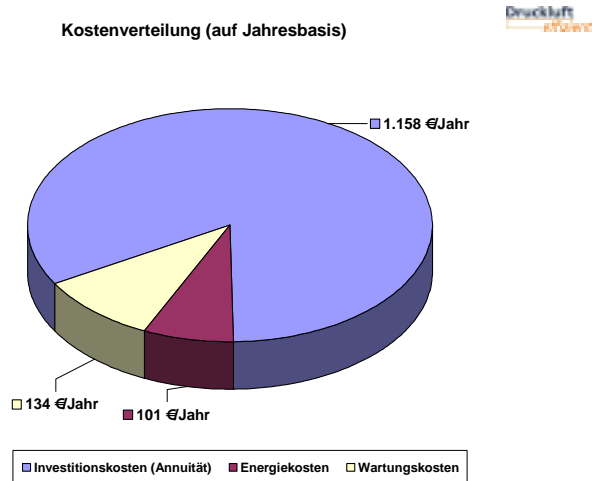


Abb. 23: Lebenszyklus-Kosten Betrieb 1

**Es ergibt sich somit ein Preis von 15 Cent pro m<sup>3</sup> Druckluft.**

**Fallbeispiel 15 Betrieb 4 Schreinerei:**

4 kW Kolbenkompressor  
 158 Betriebsstunden pro Jahr  
 Volllast 100 %  
 Leerlauf 0 %  
 Durchschnittlicher Strompreis 0,0906 €/kWh  
 Abschreibung 10 Jahre  
 Jahresverbrauch 11.651 m<sup>3</sup>

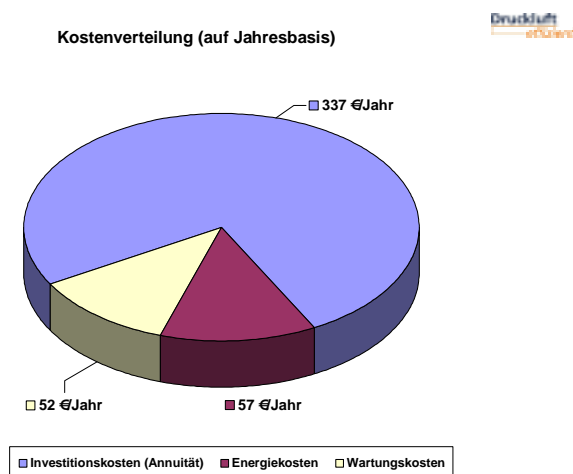


Abb. 24: Lebenszyklus-Kosten Betrieb 4

**Es ergibt sich somit ein Preis von 4 Cent pro m<sup>3</sup> Druckluft.**

**Kategorie 2: Handwerksbetriebe mit kontinuierlichem Druckluftbedarf**

**Fallbeispiel 16 Betrieb 7 Galvanikbetrieb:**

11 kW Schraubenkompressor  
 2428 Betriebsstunden pro Jahr  
 Volllast 85 %  
 Leerlauf 15 %  
 Durchschnittlicher Strompreis 0,058 €/kWh  
 Abschreibung 10 Jahre  
 Jahresverbrauch 202.794 m<sup>3</sup>

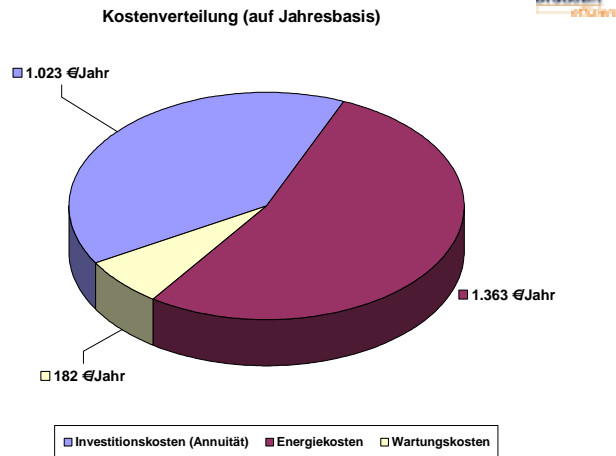


Abb. 25: Lebenszyklus-Kosten Betrieb 7

**Es ergibt sich somit ein Preis von 1,3 Cent pro m<sup>3</sup> Druckluft.**

**Kategorie 3: Handwerksbetriebe mit größerem Druckluftbedarf**

**Fallbeispiel 17 Betrieb 9 Pinselmacher:**

7,5 kW Schraubenkompressor  
 2553 Betriebsstunden pro Jahr  
 Volllast 73%  
 Leerlauf 27 %  
 Durchschnittlicher Strompreis 0,093 €/kWh  
 Abschreibung 10 Jahre  
 Jahresverbrauch 117.735 m<sup>3</sup>

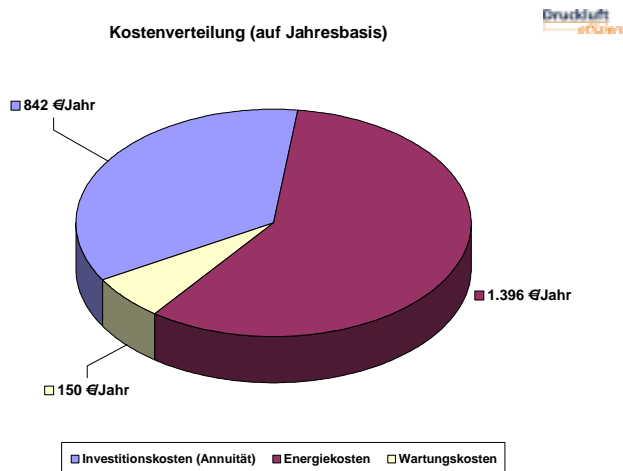


Abb. 26: Lebenszyklus-Kosten Betrieb 9

**Es ergibt sich somit ein Preis von 2 Cent pro m<sup>3</sup> Druckluft.**



**Fallbeispiel 18 Betrieb 11 Metallbau:**

11 kW Schraubenkompressor  
 5112 Betriebsstunden pro Jahr  
 Volllast 47%  
 Leerlauf 53 %  
 Durchschnittlicher Strompreis 0,07 €/kWh  
 Abschreibung 10 Jahre  
 Jahresverbrauch 349.524 m<sup>3</sup>

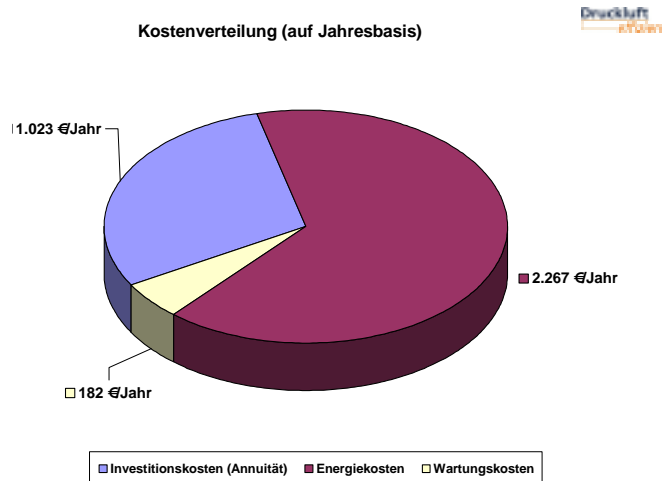


Abb. 27: Lebenszyklus-Kosten Betrieb 11

**Es ergibt sich somit ein Preis von 1 Cent pro m<sup>3</sup> Druckluft.**

Die ermittelten Kosten pro Kubikmeter Druckluft sind stark abhängig von den jährlichen Verbräuchen sowie von den stark differierenden Strompreisen. Bei den kleineren Betrieben mit nur sporadischem Druckluftverbrauch sind natürlich höhere Kosten pro m<sup>3</sup> Druckluft anzusetzen (in unseren Fällen 4 bzw. 15 Cent pro m<sup>3</sup>). Hier wirken sich auch die Investitionskosten mit über 75 % deutlicher aus. Der Energiekostenanteil lag bei den berechneten Beispielen unter 15 %.

Bei den größeren Handwerksbetrieben mit einer deutlich höheren Auslastung der Kompressoren kommt man in den Bereich der für die Industrie angesetzten Kosten pro m<sup>3</sup> (hier 1 bzw. 1,3 bzw. 2 Cent pro m<sup>3</sup>). Hier liegt auch der prozentuale Anteil der Energiekosten in unseren Fällen bei 47-65 %. Der Kauf von energiesparenden Kompressoren bzw. die Durchführung von Energiesparmaßnahmen kann sich hier durchaus auszahlen.

## 5 Übertragung der Ergebnisse auf die Gesamtsituation im Handwerk

Bei der Umfrage erhielten wir folgende Verteilung an **Gesamtleistung** der vorhandenen Kompressoren pro Betrieb:

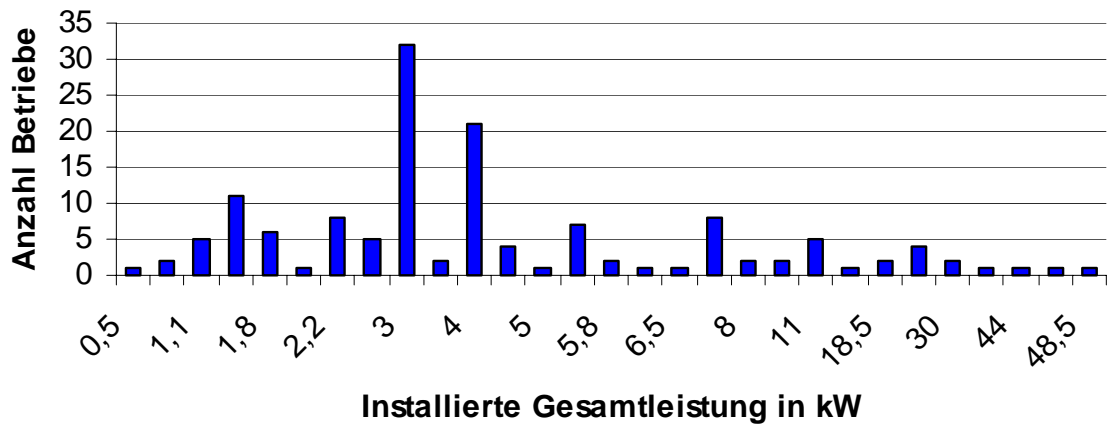


Abb. 28: Installierte Gesamtleistung Kompressoren im Handwerk / Umfrageergebnis

Die prozentuale Aufteilung zeigt die Abbildung 29.

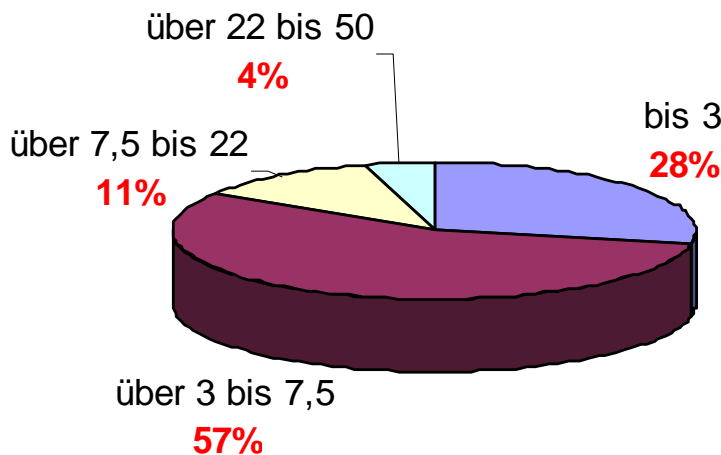


Abb. 29: Installierte Gesamtleistung in kW im Handwerk prozentual / Umfrageergebnis

Dementsprechend sind 85 % der Kategorie Kleinverbraucher mit sporadischem oder geringerem Druckluftverbrauch zuzuordnen. Die Größenordnung der jährlichen Stromkosten für die Druckluftherzeugung lag bei den untersuchten Betrieben in der Größenordnung von 15 bis 300 €. Energiesparmaßnahmen lohnen sich hier nur in Einzelfällen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass gerade im Bereich der Wartung hier einiges „im Argen ist“. Dies kann sich dann schnell – wie das Fallbeispiel 13 zeigt, in deutlich höheren Leckagen bzw. geringeren Liefermengen der Kompressoren niederschlagen. Wartungsmaßnahmen werden hier dann auch wirtschaftlich und sind zur Aufrechterhaltung des Betriebes der Kompressoren unerlässlich.

Ca. 15 % der Betriebe im Handwerk sind unseren Kategorien 2 und 3 mit einem höheren Druckluftbedarf zuzuordnen. Hier sind Energiesparmaßnahmen häufig wirtschaftlich (und ökologisch sinnvoll!). Die jährlichen Stromverbräuche für die Druckluftherzeugung lagen hier bei 23.000 bis 54.000 kWh bzw. die Stromkosten bei 2.100 bis 5.000 €



Interessant ist hierbei auch die Betrachtung der prozentualen Stromverbräuche für die Druckluftherzeugung vom Gesamtstromverbrauch der Betriebe.

Bei den untersuchten Betrieben der **Kategorie 1: Handwerksbetriebe mit sporadischem Druckluftbedarf** lagen die prozentualen Anteile für die Druckluft vom Gesamtstromverbrauch zwischen 1 und 3 %.

Bei dem untersuchten Betrieb der **Kategorie 2: Handwerksbetriebe mit kontinuierlichem Druckluftbedarf** lag der prozentuale Anteil für die Druckluft vom Gesamtstromverbrauch bei 1,6 %. Allerdings war hier der Grad der Auslastung des Betriebes zum Zeitpunkt der Messung nicht bekannt.

Bei den untersuchten Betrieben **der Kategorie 3: Handwerksbetriebe mit größerem Druckluftbedarf** lagen die prozentualen Anteile für die Druckluft vom Gesamtstromverbrauch zwischen 5 und 29 %. Auch dies zeigt deutlich, dass hier Maßnahmen zur Energiereduzierung durchaus vorangetrieben werden sollten.

## 6 Fazit

Die ausgewählten Betriebe sind überdurchschnittlich gut („handverlesene ökologisch orientierte und vorgebildete Betriebe“ mit einem hohen Umweltschutz-Interesse und Bewusstsein), insbesondere bei kleineren Betrieben mit persönlicher Verantwortungszuweisung. Dennoch sind Optimierungsmöglichkeiten bei der Druckluftverwendung vorhanden. Dies gilt insbesondere für größere Handwerksbetriebe, bei denen die Druckluft wie auch in vielen Industriebetrieben manchmal etwas „stiefmütterlich behandelt“ wird.

### Kompressoren

- Ca. die Hälfte aller Kompressoren im Handwerk sind über 10 Jahre alt, ein Viertel über 15 Jahre. Neuere Kompressoren haben in der Regel eine geringere Stromaufnahme bei gleicher Liefermenge (Bauartverbesserungen, Verschleiß beweglicher Bauteile). Die Beschaffung neuer energieeffizienter Kompressoren kann hier den Stromverbrauch der Handwerksbetriebe senken.
- Häufig sind überdimensionierte Kompressoren zu finden. Dies führt auf Grund der Regelung (Nachlauf mit ca. 30 % des Energieverbrauchs ohne Druckluftförderung) jedoch nur bei Schraubenkompressoren zu einem unnötigen Energieverbrauch.
- Kolbenkompressoren sind durch den Aussetzbetrieb i.d.R. optimal geregelt, das heißt sie gehen nach dem Erreichen des Ausschaltdruckes sofort in den Betriebszustand „Aus“ bzw. „Stillstand“ ohne Energieverbrauch über.
- Bei Schraubenkompressoren und größeren Stationen bestehen häufig Optimierungspotenziale (Einstellung der Nachlaufzeiten, Einbindung in das Gesamtkonzept). Hier befanden sich teilweise Kompressoren über 50 % bis zu 79 % ihrer Laufzeit im Betriebszustand Leerlauf mit ca. 30 % des Energieverbrauchs ohne Druckluftförderung.
- Die Abschaltung der Kompressoren über Nacht/am Wochenende ist auf Grund der Leckage- und der Verschleißminimierung dringend zu empfehlen. Die Abschaltung wird bei den meisten untersuchten Handwerksbetrieben, bei denen in der Nacht kein Druckluftbedarf besteht, prinzipiell durchgeführt- wenn auch nicht immer konsequent.

### **Trockner**

- Es sind bisher nur vereinzelt geregelte Trockner (Energiespartrockner) im Einsatz. Sie verbrauchen im Gegensatz zu den standardmäßig vorhandenen kontinuierlich durchlaufenden Trocknern nur dann Energie, wenn Druckluft verbraucht wird.
- Teilweise wird die Drucklufttrocknung nicht ordnungsgemäß durchgeführt: Vorhandene Trockner werden überfahren oder sind gar nicht erst angeschlossen. Bei fehlendem Trockner ist teilweise Kondensat in den Schläuchen sichtbar (tiefer hängende Stellen).

### **Leckagen**

- Die absoluten Werte der Leckagemenge sind häufig gering (da in der Regel kleine Netze vorhanden sind). Bei steigender Netzgröße nimmt auch die Leckage zu. Die ermittelten Leckagemengen lagen zwischen 0 und 0,25 m<sup>3</sup>/min.
- Gerade bei Kleinverbrauchern arbeitet der Kompressor häufig hauptsächlich für Leckagen, so dass diese einen hohen prozentualen Anteil von teils über 80 % der erzeugten Druckluft ausmachen.
- Auf Grund geringer Mengen sind dies bei kleineren Kompressoren (2 - 7,5 kW) in der Regel nur geringe Leckagekosten (reine Stromkosten teilweise deutlich unter 100 € pro Jahr).
- In Kompressoren / bei Kondensatablässen etc. auftretende Leckagen bleiben häufig unerkannt.
- Bei größeren Leckagen können die jährlichen Stromkosten für Leckagen auch bei Geringverbrauchern mehrere Hundert € bis über 1.500 € betragen.

### **Druckhöhe**

- Das Druckniveau ist bei Kolbenkompressoren durch die größere Spreizung von Einschalt-/Ausschalt-/Druck systembedingt höher.
- Nur in einigen Fällen ist eine Druckreduzierung möglich.

### **Druckverluste**

- Druckverluste durch zu lange Schläuche, Engstellen, Knoten etc. sind häufig zu finden. Hier wurden teilweise Druckabfälle von mehreren Bar von dem am Werkzeug anstehenden statischen Druck zu dem Arbeitsdruck (Fließdruck am Werkzeugeinlass, wenn dieses arbeitet) gemessen.

### **Wärmerückgewinnung**

- Häufig sind im Handwerk Betriebe mit kleineren Kompressoren und einem sporadischen Druckluftbedarf zu finden. Hier ist eine Wärmerückgewinnung vernachlässigbar. Bei den untersuchten Betrieben mit einem größeren Druckluftbedarf war dort eine Wärmerückgewinnung realisiert, wo sie sinnvoll ist. Dies ist in der Regel ein Einblasen der Abwärme in anliegende Räume, teils mit Sommer-/Winteregulierung.

## Wartung

- Häufig sind Wartung und Dokumentation mangelhaft: Praktisch in keinem untersuchten Handwerksbetrieb war eine systematische und dokumentierte Wartung zu finden. Eine regelmäßige Wartung mit Dokumentation ist empfehlenswert (Energieeinsparungen von 20 – 50 % und in Einzelfällen mehr sind möglich).
- Der externe Service sollte sich – über die eigentliche Kompressorwartung hinaus - verstärkt auch um „Betreiberpflichten“ kümmern: Abprüfen der Last- und Leerlaufzeiten, Überprüfen der eingestellten Nachlaufzeit, ggf. Optimieren der Einstellungen. Ebenso sollte er die Höhe des Betriebsüberdruckes auf Notwendigkeit prüfen.

## Umgebungsbedingungen

- Teilweise sind die Kompressoren sehr ungünstigen Umgebungsbedingungen ausgesetzt (produktionsbedingter Staub, zu warm, etc.). Dies ist teilweise die Folge „gewachsener Strukturen“. Diese ungünstigen Umgebungsbedingungen können durch zugesetzte Filter etc. zu einem deutlich erhöhten Energieverbrauch führen.

## Information

- Informationsveranstaltungen, vor allem für größere Handwerksbetriebe mit einem entsprechend größeren Druckluftbedarf, zur Optimierung von Druckluftanlagen sind sinnvoll. Hier sollten konkrete Fallbeispiele vorgestellt werden. Gleichzeitig könnte eine Produktschau energieoptimierter Bestandteile des Gesamtsystems Druckluft bis zur Anwendung stattfinden.
- Bei Fachhändlern könnte evtl. auf einem kurzen Faltblatt auf energieoptimierte Bestandteile des Gesamtsystems Druckluft bis zur Anwendung von neutraler Seite hingewiesen werden.

## Auswertung angeregter Verbesserungen

- Die bei dem Projekt angeregten Verbesserungen sollten in einer zweiten Umsetzungsphase bei ausgewählten Betrieben begleitet und ausgewertet werden. So könnten konkrete Daten über tatsächlich erreichte Verbesserungen insbesondere zur Nachlauf- und Steuerungsoptimierung ausgewertet werden.

## 7 Handlungsempfehlungen für Handwerksbetriebe mit Druckluftverwendung

### 7.1 Energieeinsparpotenziale bei Neubeschaffung/Ersatzinvestitionen

#### Druckluftherzeugung

##### Kompressor

- ✓ Bei der Beschaffung neuer Kompressoren auf **gute Energieeffizienz** (geringer Energiebedarf pro Liefermenge) achten. Dies gilt insbesondere für Betriebe mit einem höheren Druckluftbedarf bzw. einer höheren Auslastung der Kompressoren (Betriebsstunden über 2000 h), da hier die Energiekosten über den gesamten Lebenszyklus betrachtet deutlich über den Investitionskosten liegen und sich dadurch ein evtl. höherer Kaufpreis schnell amortisiert.

- ✓ **Kompressorbauart** entsprechend den Anforderungen wählen: Kolbenkompressoren bei eher nur sporadischem Bedarf, Schraubenkompressoren bei eher kontinuierlichem Bedarf
- ✓ Insbesondere bei Schraubenkompressoren auf eine nicht zu große **Auslegung** achten. Gegebenenfalls zuvor Wochenverbrauchsmessung durchführen lassen oder rechnerisch Bedarf abschätzen.

### **Trockner**

- ✓ Bei Neu- oder Ersatzinvestition Energiespartrockner beschaffen. Richtige Größenwahl beachten

### **Übergeordnete Steuerung**

- ✓ Bei größeren Handwerksbetrieben mit mehreren Kompressoren prüfen, ob sich eine übergeordnete Steuerung rechnet

### **Kondensatableitung**

- ✓ Elektronisch niveauregulierte Kondensatableiter bevorzugen

### **Wärmerückgewinnung**

- ✓ Kompressorabwärme zur Wärmerückgewinnung nutzen. Bei Handwerksbetrieben mit größerem Druckluftbedarf sinnvollerweise zur Raumluftherwärmung anliegender Räume. Bei Handwerksbetrieben mit sporadischem Druckluftbedarf vernachlässigbar.

### **Umgebungsbedingungen**

- ✓ Für gute Umgebungsbedingungen sorgen. Kompressoren staubgeschützt und nicht zu warm aufstellen. Gute Raumbelüftung sicherstellen.

### **Druckluftverteilung**

#### **Leitungen und Schläuche**

- ✓ Leitungen und Schläuche mit ausreichendem Durchmesser wählen. Bei Schläuchen auf gute Materialien achten, die nicht so leicht verspröden und belastbar sind. Schlauchlänge so kurz wie möglich wählen.
- ✓ Leitungen und gegebenenfalls Schläuche möglichst geradlinig verlegen. Druckabfälle auf Grund abrupter Richtungswechsel, Knoten in den Schläuchen etc. vermeiden. Statt Knie- und T-Stücken besser Hosenstücke und Bögen verwenden.
- ✓ Spiralschläuche nur dort, wo nötig und dann so kurz wie möglich

#### **Leitungszubehör**

- ✓ Gutes Leitungszubehör mit geringem Druckabfall und hoher Durchflusskapazität wählen
- ✓ Verteiler mit Eingang 1 Zoll und Ausgängen ½ Zoll wählen statt Eingänge und Ausgänge ½ Zoll
- ✓ Sämtliche Einbauten an Leitungszubehör auf das nötige Minimum beschränken

## 7.2 Energieeinsparpotenziale bei bestehenden Druckluftanlagen

### Verantwortung zuordnen

- ✓ Kompressorverantwortlichen benennen, der regelmäßig anfallende Tätigkeiten übernimmt oder organisiert

### Laufzeiten des Kompressors

- ✓ Kompressor außerhalb der Betriebszeiten ausschalten. Hierfür gegebenenfalls Druckhalteventil (Anfahrvorrichtung) einbauen, um eine Überlastung der Druckluftaufbereitungseinheiten beim Anfahren gegen ein leeres Netz zu vermeiden. Ist ein Ausschalten des Kompressors in der Betriebsruhe nicht möglich, Hauptstränge absperren.
- ✓ Bei Schraubenkompressoren Leerlaufzeit auf Optimierungsmöglichkeiten überprüfen. Hierzu Leerlaufzeit ermitteln und diese ins Verhältnis setzen zur Gesamtlaufzeit (Lastzeit und Leerlaufzeit): Dies ist nur möglich bei zusätzlich zum Betriebsstundenzähler (zählt Lastzeit und Leerlaufzeit) vorhandenen Laststundenzählern (zählt reine Lieferzeit des Kompressors). Die Leerlaufzeit berechnet sich aus der Differenz der Betriebsstunden und der Laststunden. Bei Werten über ca. 30 % der Leerlaufstunden im Verhältnis zu Betriebsstunden Einstellung des Nachlaufs prüfen (gegebenenfalls durch den Fachmann bei externer Wartung). Klären lassen, ob das Volumen des Druckluftbehälters ausreicht, da ein zu geringes Volumen zu einer hohen Schalzhäufigkeit zwischen Last und Leerlauf führt.

### Leckageminimierung

- ✓ Absperreinrichtungen vor Entnahmestellen einbauen
- ✓ Größere Leckagen, die sich durch Zischen bemerkbar machen, sofort beseitigen
- ✓ Betriebsstundenzähler monatlich ablesen. Ursachen für gestiegene Verbräuche suchen und beseitigen
- ✓ Bei größeren Handwerksbetrieben mindestens einmal jährlich systematische Leckagesuche und –beseitigung

### Druckhöhe

- ✓ Ausschaltdruck auf das notwendige Minimum beschränken

### Druckverluste

- ✓ Druckabfälle vermeiden: Leitungen und Schläuche auf möglichst geradlinige Verlegung überprüfen. Knoten, Verschlingungen, etc. lösen. Zu lange Spiralschläuche kürzen. Unnötige Einbauten an Leitungszubehör (nicht benötigte Kupplungen, Filter, Wartungseinheiten) entfernen.
- ✓ Für eine regelmäßige Wartung der Filter und Wartungseinheiten sorgen

### Wärmerückgewinnung

- ✓ Kompressorabwärme zur Wärmerückgewinnung nutzen. Bei Handwerksbetrieben mit größerem Druckluftbedarf sinnvollerweise zur Raumluft erwärmung anliegender Räume. Bei Handwerksbetrieben mit sporadischem Druckluftbedarf vernachlässigbar.

### **Wartung**

- ✓ Regelmäßige Wartungen und Funktionskontrollen gemäß Herstellerempfehlung durchführen. (Wartung Kompressor und Trockner, Wartung Filter, Kondensatablass betätigen bzw. Kondensatableiter auf ordnungsgemäße Funktionsweise überprüfen; Kondensataufbereitung überwachen). Hierbei eigene Betriebsbedingungen berücksichtigen (starke Staubbelastung verkürzt Wartungsintervalle). Wartungen entsprechend dokumentieren. Neben selbst durchführbaren Wartungen beachten, dass bestimmte (notwendige!!) Tätigkeiten nur durch den Fachmann ausgeführt werden können.

### **Umgebungsbedingungen**

- ✓ Umgebungsbedingungen überprüfen. Kompressoren sollten staubgeschützt und nicht zu warm aufgestellt sein. Gute Raumbelüftung sicherstellen.

### **Druckluftanwendung**

- ✓ Druckluft energiebewusst einsetzen. Prüfen, ob bei Anwendern zu lange oder über zu große Öffnungen Druckluft abgeblasen wird. Druckluftwerkzeuge nur dort einsetzen, wo ihre Vorteile gegenüber den (energetischen) Vorteilen von Elektrowerkzeugen überwiegen.

## 8 Anhang: Zur Verfügung stehende Daten

Für die Auswertung der betrieblichen Daten standen folgende Informationen zur Verfügung (Anhang 1 – 4):

Anhang (1): Besuchsberichte

Anhang (2): Wochenverbrauchsmessungen (grafische Auswertung)

Anhang (3): Tabellarische Auswertung durch Fa. Kaeser von Kenngrößen für alle Betriebe außer Betrieb 8

Anhang (4): Ergebnisse der Umfrage zu Druckluftanlagen in Handwerksbetrieben im Rahmen der Konjunkturumfrage Anfang 2003

Anhang (5): überschlägig berechnete wesentliche Kenndaten der beteiligten Betriebe (außer Betrieb 8)

Anhang (6): Quellenverzeichnis

### Erläuterungen zu Anhang (2):

Bei den Wochenverbrauchsmessungen der **Kolben**kompressoren ist das Messprotokoll irreführend. Für die jeweilige Laufzeit zur Behälterbefüllung ist jeweils eine halbe Stunde eingezeichnet, auch bei meist nur wenigen Minuten Laufzeit. Auch die Höhe des „peaks“ stimmt nicht mit der Liefermenge überein. Dies ist systembedingt. Deshalb wurde die Leckagemenge durch Auszählen der peaks während der verbrauchsfreien Zeit und Berechnung der Laufzeiten (Formel siehe Tabelle) ermittelt.

### Erläuterungen zu Anhang (3) und (5):

**FAD (m<sup>3</sup>/min):** berechnete Liefermenge des Kompressors bei eingestelltem max. Betriebsüberdruck

**Aufnahme bei P<sub>nenn</sub>:** berechnete kW-Aufnahme bei eingestelltem max. Betriebsüberdruck

**Produziert gesamt m<sup>3</sup>:** Im Messzeitraum produzierte Gesamtdruckluftmenge in m<sup>3</sup>. Für Hochrechnungen muss berücksichtigt werden, inwieweit in den Messzeitraum Wochenenden gefallen sind bzw. ob die Kompressoren im Messzeitraum zeitweise ausgeschaltet waren.

**Stunden Messung:** Gesamtdauer der Messung in Stunden

**Aufgenommen kWh gesamt:** Im Messzeitraum berechnete aufgenommene kWh gesamt für die produzierte Liefermenge Druckluft. **Zusätzlicher Stromverbrauch für Leerlauf bei Schraubenkompressoren ist hier unberücksichtigt!!**

**Durchschnitt m<sup>3</sup>/min:** Im Messzeitraum durchschnittlich verbrauchte m<sup>3</sup> Druckluft pro Minute (Ohne Berücksichtigung des Wochenendes sowie ggf. zwischenzeitlich ausgeschalteter Kompressoren)

**Durchschnitt kWh: Im Messzeitraum durchschnittlich verbrauchte kWh**

In der Datenauswertung wurden die Liefermengen der Kompressoren (Angabe immer für Maximaldruck) durch die Fa. Kaeser rechnerisch angepasst an den Ausschaltdruck. Ebenso wurde in die Lastaufnahme der Wirkungsgrad einberechnet.

Die Werte sind überschlägig berechnet. Die tatsächlichen Werte können etwas abweichen, da bei den Berechnungen die Durchschnittswerte des Messzeitraumes verwendet wurden.

Die Anzahl der Arbeitstage zu den produktionsfreien Tagen blieb unberücksichtigt. Auch teilweise während der Messung über Nacht ausgeschaltete Kompressoren verfälschen etwas den Durchschnittswert.

Bei den Daten der Firma 1 hat sich in der Auswertung der Firma Kaeser ein Zahlendreher zwischen den zwei Kompressoren eingeschlichen. Für die Berechnung der Daten wurde deshalb der Zahlendreher berücksichtigt und die entsprechenden Daten händisch ermittelt.

Bei dem Betrieb 5 liegen die Leckagewerte deutlich über den durchschnittlichen Verbrauchswerten. Das liegt an der deutlichen Zunahme der Leckage im Messzeitraum, die auf eine zunehmende Leckage (wahrscheinlich im Kompressor selbst, z.B. Ventile) zurückzuführen ist. **Die anhand von Formeln berechneten Werte im Anhang (5) sind deshalb größtenteils nicht zu verwenden!** Die derzeitigen tatsächlichen Kosten für die Druckluftherzeugung liegen deutlich über den errechneten Kosten, da für die Berechnung die durchschnittlichen Kosten verwendet werden.

Bei der Firma 6 mussten die in der tabellarischen Auswertung der Firma Kaeser enthaltenen Werte korrigiert werden, da hier für die Stunden der Messung ein falscher Wert angegeben war. Dennoch liegt die ermittelte Leckagemenge knapp über dem ermittelten Durchschnittswert der Druckluftherzeugung. Verantwortlich hierfür sind Messunsicherheiten. Tatsächlich sind die Leckagemenge und der Durchschnittswert im Messzeitraum nahezu gleich, da fast kein Verbrauch zu verzeichnen war (Kurzarbeit). Für eine sinnvolle Berechnung wurde deshalb der Durchschnittswert in  $\text{m}^3/\text{min}$  um 5 % über die ermittelte Leckagemenge gesetzt.

Bei dem Betrieb 7 können keine aussagekräftigen Werte berechnet werden. Hier erfolgte die Messung zu einem Zeitpunkt der nicht vollen Auslastung des Betriebes (kurz nach den Weihnachtsferien).

Von der Firma 8 liegt diese Form der Auswertung nicht vor. Soweit möglich, wurden hier Daten grafisch anhand der Messkurven ausgewertet.

Für die Firma 10 liegt vom größten Kompressor kein Messergebnis vor, da dieser nur zu Betriebszeiten der Lackieranlage eingeschaltet wird. Dann schaltet er allerdings extrem häufig zwischen Last und Leerlauf hin und her. Für eine grob überschlägige Berechnung wurden in einer zweiten Version (AV2) die bekannten jährlichen Betriebsstunden verwendet und das Verhältnis Last/Leerlauf 1:1 gesetzt.

Prozentuale Leckagerate: Die in der tabellarischen Auswertung (Anhang 5) berechnete prozentuale Leckagerate bezieht sich auf den gesamten Messzeitraum. Der angegebene Wert ist somit wesentlich höher als der aus der Grafik ermittelte Wert, der sich auf den **prozentualen Anteil zu Produktionszeiten** bezieht.

## **Anhang (6): Quellenverzeichnis**

Energieagentur NRW: Seminarunterlagen Druckluft, Wuppertal

Bierbaum, U. und Freitag, G.: Druckluft-Kompodium. Boge-Kompressoren Bielefeld, 2001.

Kaeser: Druckluft-Seminarunterlagen, Coburg