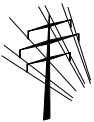




**Bundesamt für Energie**  
**Office fédéral de l'énergie**  
**Ufficio federale dell'energia**  
**Swiss Federal Office of Energy**

---

**Forschungsprogramm *Elektrizität***  
**Pilot- und Demonstrationsanlagen**



# **Druckluftoptimierung in der Verpackungsindustrie**

ausgearbeitet durch  
**Kurt Frei Ing. HTL**  
**A-Z Planung AG**  
**Obergiessenstr. 15 b**  
**9444 Diepoldsau**

im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energie**

Vertragsnummer: 67062  
Projektnummer: 27245

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

Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern  
Fax 031 325 50 58

---

Form. 805.089.4 d

## Zusammenfassung

### Ziel

Die Druckluftanlage der Firma Sandherr AG, 9444 Diepoldsau soll energetisch optimiert werden. Ziel dieses Projektes ist es, die Druckluftanlage zu messen und aufgrund der Resultate gezielt die Schwachstellen zu beheben, um Energie einzusparen.

### Lösungsweg

Durch Aufteilung in ein Hoch- und ein Niederdrucknetz, durch eine bedarfsabhängige Regelung und durch Netzabdichtungen soll eine wesentliche Energieeinsparung erreicht werden.

### Hauptergebnisse

Folgende Einsparungen konnten erreicht werden:

- Einsparung durch Einbau einer lastabhängigen Regelung und durch Netztrennung in Hoch- und Niederdrucknetz	18.3 %
- Einsparung durch Abdichtung im Netz und an den Maschinen	8.5 %
- Einsparung durch Leistungsverbesserungen an den Kompressoren	6.6 %
<b>Total Einsparungen</b>	<b>33.4 %</b>

## Summary

### Target

The compressed air system of Sandherr AG, CH-9444 Diepoldsau is supposed to be optimised concerning the energy consumption. The target of this project is to measure the compressed air system. On grounds of the results, the weak points will be removed in order to save energy.

### Way of Solution

By dividing the compressed air system into a high and a low pressure system, by installing a new control system and by sealing the piping and the machines should the target be reached.

### Main Results

The following energy-savings are to be reached:

- Savings by a new control system and by dividing the compressed air system into a high and a low pressure system	18.3 %
- Savings by sealing piping and machines	8.5 %
- Savings by increasing the performance of the compressors	6.6 %
<b>Total Savings</b>	<b>33.4 %</b>

## **Inhaltsverzeichnis**

- 1. Ausgangslage**
  - 1.1 Stärken und Schwächen der Anlage**
  - 1.2 Unsicherheit der Betreiber betreffend Betriebssicherheit**
  - 1.3 Leistungsfähigkeit, Wirkungsgrad**
  
- 2. Energiemessung der bestehenden Anlage**
  
- 3. Grösste Schwachstellen**
  - 3.1 Leerlaufzeiten**
  - 3.2 Mangel an Druckluft**
  - 3.3 Netzverluste**
  - 3.4 Leckverluste in den einzelnen Maschinen**
  - 3.5 Dauerbläser**
  - 3.6 Leistungsvermögen der Kompressoren**
  - 3.7 Wartung**
  
- 4. Sanierungsprojekt**
  - 4.1 Idee**
    - 4.1.1 Netzdruck**
    - 4.1.2 Einzellösungen**
    - 4.1.3 Bedarfsabhängiger Betrieb der Kompressoren**
  - 4.2 Ziele**
    - 4.2.1 Reduktion Investitionskosten für zusätzliche Kompressoren**
    - 4.2.2 Reduktion Druckluftverbrauch**
    - 4.2.3 Reduktion der Druckluftkosten**
  - 4.3 Umsetzung**
    - 4.3.1 Ausgangslage**
    - 4.3.2 Vorgehensweise**
  
- 5. Messungen**
  - 5.1 Allgemeines**
  - 5.2 Leckmengenmessungen im Leitungsnetz**
    - 5.2.1 Leckmengenmessungen im Niederdrucknetz**
    - 5.2.2 Leckmengenmessungen im Hochdrucknetz**
  - 5.3 Leckmengenmessungen an de Produktionsmaschinen**
    - 5.3.1 Leckagen an den Produktionsmaschinen im Niederdrucknetz**
    - 5.3.2 Leckagen an den Produktionsmaschinen im Hochdrucknetz**
  - 5.4 Stromverbrauchsmessungen**
    - 5.4.1 Messung gesamter Stromverbrauch nach Einbau von Verteiler und Regelung im Niederdrucknetz**
    - 5.4.2 Messung des spez. Stromverbrauchs der einzelnen Kompressoren**
    - 5.4.3 Ueberprüfung der Liefermenge**
  - 5.5 Vergleich der Resultate mit der Planung**
    - 5.5.1 Gesamter Stromverbrauch**
    - 5.5.2 Energieeinsparung durch Druckabsenkung und lastabhängige Regelung**
    - 5.5.3 Energieeinsparung durch Abdichtung**

- 6. Diskussion der Resultate**
  - 6.1 Was ist gelungen**
    - 6.1.1 Leckverluste
    - 6.1.2 Liefermenge
    - 6.1.3 Lastabhängige Regelung
  - 6.2 Was kann in anderen Unternehmen auch umgesetzt werden?**
    - 6.2.1 Leckverluste
    - 6.2.2 Drucksenkung
    - 6.2.3 Wartung
  - 6.3 Wo sind weitere Verbesserungen möglich**
    - 6.3.1 Leckverluste
    - 6.3.2 Liefermenge
    - 6.3.3 Kompressoren
    - 6.3.4 Luftzuführung
    - 6.3.5 Verbraucher
  - 6.4 Was hat sich bewährt?**
    - 6.4.1 Messungen
    - 6.4.2 Wartung
  - 6.5 Was hat sich nicht bewährt?**
    - 6.5.1 Blindes Vertrauen
- 7. Rückschau: Daten**
  - 7.1 Technische Daten im Ueberblick**
  - 7.2 Energieeinsparung**
    - 7.2.1 Energieeinsparung durch lastabhängige Regelung und Drucksenkung
    - 7.2.2 Spez. Stromverbrauch pro m<sup>3</sup> Luft
    - 7.2.3 Gesamtenergieeinsparung
    - 7.2.4 Investitionskosten
    - 7.2.5 Pay-Back-Zeit
- 8. Ausblick**
- 9. Symbolverzeichnis**

## **1. Ausgangslage**

### **1.1 Stärken und Schwächen der Anlage**

Die bestehende Druckluftanlage besteht aus 10 Kompressoren mit je 55 kW Motorleistung. 8 Kompressoren sind für Netzdruck 6 bar und 2 Kompressoren sind für Netzdruck 8 bar gebaut. Die Druckluftanlage ist mit dem Betrieb gewachsen. D.h. ausgehend von der Kapazität bei Inbetriebnahme der Produktionsanlage mit passender Druckluftanlage ist der Betrieb ausgebaut worden. Der Ausbau erfolgte, den Bedürfnissen entsprechend, mit optimierten Investitionskosten. D.h. es sind zum Teil Einzellösungen für die Versorgung von einzelnen oder von Maschinengruppen gebaut worden. Dies führte dazu, dass verschiedene Netze im gleichen Betrieb aufgebaut worden sind. Einzelne Netze sind mit anderen kurzgeschlossen worden.

Die Gesamtanlage ist durch diese Umstände unübersichtlich geworden. Die Uebersicht über die Gesamtanlage ist verloren gegangen. Aus diesem Grunde sind auch bei reduzierter Produktion alle 10 Kompressoren gelaufen, obwohl bei minimalem Verbrauch 1 Kompressor genügt hätte.

### **1.2 Unsicherheit der Betreiber betreffend Betriebssicherheit**

Grosse Unsicherheit bestand bei der Verfügbarkeit der verschiedenen Netze. Beim Ausfall eines Kompressors war die Gefahr von Produktionsausfällen gross, obwohl die Leistung aller Kompressoren, als Total, den Bedarf immer gedeckt hätte.

### **1.3 Leistungsfähigkeit, Wirkungsgrad**

Die Betreiber hatten volles Vertrauen zum Lieferanten und zum Service-Unternehmen. Es war kein Anlass vorhanden zu bezweifeln, dass die Nominalleistung der Kompressoren nach all den Betriebsjahren immer noch erbracht wird. Es ist auch davon ausgegangen worden, dass die einzelnen Kompressoren mit optimalem Wirkungsgrad laufen. Der Betreiber wusste jedoch, dass die Anlagen zwangsweise zuviel und zu lange im Leerlauf drehten.

## 2. Energiemessung der bestehenden Anlage

Bevor die Anlage umgebaut worden ist, ist der Stromverbrauch der gesamten Druckluftanlage gemessen worden. Das Druckluft-Bedarfsprofil konnte zu diesem Zeitpunkt noch nicht aufgenommen werden, da noch keine Durchflussmengen-Messgeräte eingebaut waren.

Gemessen wurde von Mittwoch, 13.05.98, 0.00 Uhr bis Donnerstag, 14.05.98, 24.00 Uhr.

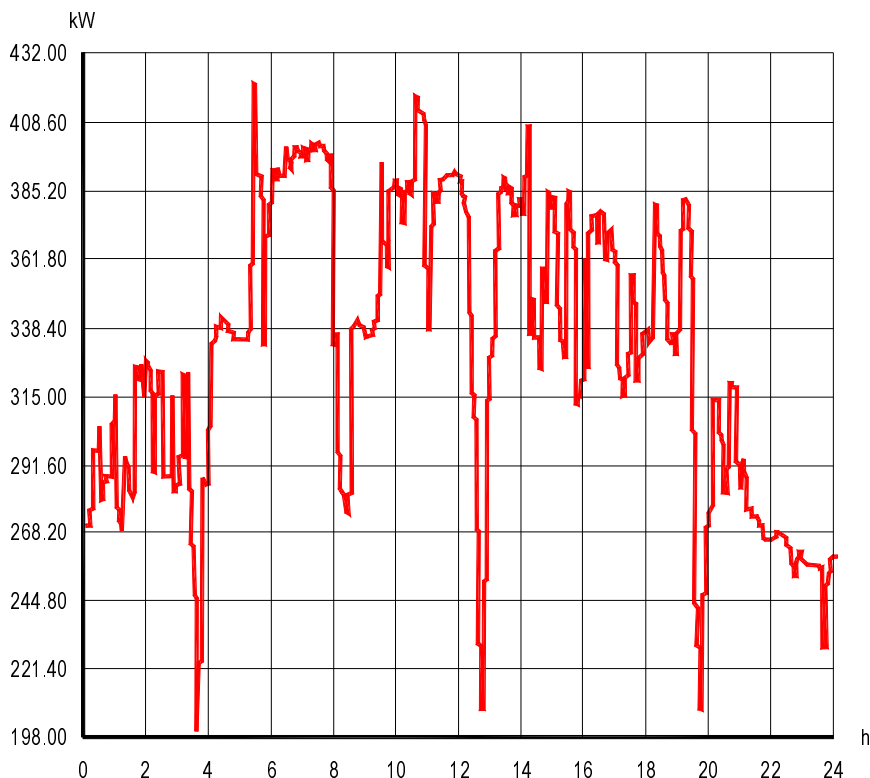
Folgende Messresultate sind ermittelt worden:

Maximaler Leistungsbedarf	:	421.9 kW
Minimaler Leistungsbedarf	:	76.5 kW
Durchschnittlicher Leistungsbedarf	:	327.7 kW

### Beispiel Tagesgang des Stromverbrauchs der Druckluftanlagen

Wirk-Energie während der Auswerteperiode: 7947.42 kWh

Maximum:	421.90 kW	Mi 13.05.98 05,25,00	(Kanal 1 Pt)
Minimum:	199.50 kW	Mi 13.05.98 03,40,00	(Kanal 1 Pt)



Auf den Aufzeichnungen sind die Schichtwechsel um 04.00 Uhr, am Mittag und um 20.00 Uhr sehr gut ersichtlich. Auch die Pause zwischen 08.00 Uhr und 09.00 Uhr ist deutlich erkennbar.



### **3. Grösste Schwachstellen**

#### **3.1 Leerlaufzeiten**

Vor Beginn der Messungen war bekannt, dass die Kompressoren zu lange Leerlaufzeiten hatten.

#### **3.2 Mangel an Druckluft**

Im Betrieb hatten sich die unterschiedlichen Druckverhältnisse bei den Verbrauchern bemerkbar gemacht. Das Druckluftnetz bestand aus verschiedenen kleinen Netzen. Es ist sehr oft vorgekommen, dass in einzelnen Netzen zu wenig Luft zur Verfügung stand. Verschiedene Kompressoren, die andere Netze versorgten, sind zu gleicher Zeit im Leerlauf gelaufen.

#### **3.3 Netzverluste**

Vor Beginn der Messungen wurde vermutet, dass das Druckluftnetz Verluste von weit mehr als 5 % aufweist. Diese Tatsache wurde nicht bestätigt, wie die Messresultate zeigen.

#### **3.4 Leckverluste in den einzelnen Maschinen**

Vor Beginn der Messungen ist vermutet worden, dass die Maschinen grosse Luftverluste aufweisen. Dass die Verluste 20 % der gesamten Druckluftproduktion (d.h. des momentanen Verbrauchs) erreichten, hat trotzdem überrascht.

#### **3.5 Dauerbläser**

Dauerbläser sind Düsen, die Luft zu Transportzwecken des Produktes verbrauchen. Der grosse Anteil dieser Elemente am Gesamtverbrauch hat überrascht.

#### **3.6 Leistungsvermögen der Kompressoren**

Es ist immer davon ausgegangen worden, dass die Kompressoren die Nennleistung fördern. Es sind wesentliche Abweichungen festgestellt worden. Objektiv betrachtet kann jedoch davon ausgegangen werden, dass nach einigen Betriebsjahren die Leistung sinkt.

#### **3.7 Wartung**

Die Wartung der Druckluftanlage der Firma Sandherr AG wird einerseits durch internes, andererseits durch externes Personal ausgeführt. Die Wartung ist gut organisiert. Es treten keine ausserordentlichen Schäden auf. Für alle Beteiligten war es interessant zu sehen, wie wichtig die Wartung ist. So konnte z.B. durch rechtzeitigen Filterwechsel auf der Saugseite der Kompressoren eine wesentliche Wirkungsgradverbesserung erzielt werden.

#### **3.8 Energetische und finanzielle Auswirkungen**

Abschätzungen vor Realisierung des Projektes sind davon ausgegangen, dass mit geeigneten Massnahmen in den Bereichen Regelung, Druckabsenkung und Abdichtung mit Energieeinsparungen von ca. 1'100'000 kWh/a gerechnet werden kann.

Gemäss dieser Rechnung betrug die Energiekosteneinsparung ca. Fr. 129'000.--/a.

## **4. Sanierungsprojekt**

### **4.1 Idee**

#### **4.1.1 Netzdruck**

Alle Kompressoren sind bisher auf dem höchst möglichen Druck gelaufen, obwohl viele Verbraucher mit niedrigerem Druck auskommen würden. Dadurch wurde unnötig viel Energie verbraucht.

Dieser Umstand sollte durch den Aufbau eines neuen, dichten Hochdrucknetzes korrigiert werden. Das bestehende Netz sollte weiterhin als Niederdrucknetz verwendet werden.

Damit wurde es möglich, ca. 70 % des Luftverbrauchs auf dem niedrigen Druck aufzubereiten. Damit können Verluste im Netz und an den Maschinen reduziert, Energie und Kosten gespart werden.

#### **4.1.2 Einzellösungen**

Das gesamte Druckluftnetz ist aus dem Aufbau verschiedener kleiner Netze entstanden. Praktisch alle Kompressoren waren immer inbetrieb. Dies verursachte unnötige Leerlaufzeiten. Eine Optimierung der Betriebszeiten der Kompressoren war nicht möglich.

Durch den Aufbau eines gemeinsamen Verteilers sollten die Kompressoren zusammengeschaltet werden. Damit wurde die Grundlage für den Einbau einer bedarfsabhängigen Regelung geschaffen.

#### **4.1.3 Bedarfsabhängiger Betrieb der Kompressoren**

Alle Kompressoren sind bisher durch Druckschalter gesteuert worden. Bedingt durch die grosse Anzahl Kompressoren und die notwendigen Schaltdifferenzen liefen die Kompressoren nicht bedarfsabhängig. Es waren immer alle in Betrieb. Sie schalteten wild durcheinander vom Normalbetrieb in den Leerlauf und umgekehrt.

Eine bedarfsabhängige Regelung sollte diese Arbeitsweise korrigieren. Durch eindeutige Prioritätszuordnung, mit Prioritätsumschaltung in Abhängigkeit der Laufzeit, sollten die Leerlaufzeiten minimiert werden.

## 4.2 Ziele

Folgende Ziele wurden angestrebt:

### 4.2.1 Reduktion Investitionskosten für zusätzliche Kompressoren

Vor Beginn des Projektes waren die verschiedenen unabhängigen Netze zeitweise überlastet. Eine Gleichzeitigkeit konnte nicht ausgenutzt werden. In allen kleinen Netzen musste die Höchstlast bereitgestellt werden. Verschiedene Stellen in der Gesamtanlage verlangten nach zusätzlichen Kompressoren. Durch das Zusammenschalten der Anlagen sollte eine Gleichzeitigkeit und die Leistungsreserve verschiedener Kompressoren ausgenutzt werden. Es sollte verhindert werden, dass zusätzliche Druckluftherzeuger eingebaut werden müssen.

### 4.2.2 Reduktion Druckluftverbrauch

Es war vorgesehen, den Luftverbrauch durch folgende Massnahmen zu reduzieren:

- Abdichtungen im Netz und an den Maschinen.
- Bisher ist im gesamten Netz immer mit dem höchst möglichen Druck gearbeitet worden. Durch den Aufbau eines Hochdrucknetzes für ca. 20 % der Verbraucher, sollte es möglich sein, den Druck für die übrigen Nutzer zu reduzieren. Damit werden im Niederdrucknetz die Verluste kleiner. Ausserdem ist die verbrauchte Luftmenge pro Arbeitsgang (z.B. pro Kolbenhub) geringer.

### 4.2.3 Reduktion der Druckluftkosten

Ein wichtiges Ziel des Projektes war die Reduktion der Druckluftkosten. Dafür waren folgende Massnahmen vorgesehen:

- Reduktion der Verluste.
- Reduktion des Verbrauchs.
- Verbesserung der Kompressorenleistung.

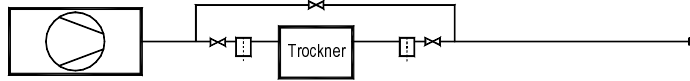
## 4.3 Umsetzung

### 4.3.1 Ausgangslage

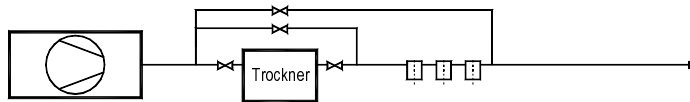
Die bestehende Anlage hat aus 10 voneinander unabhängig gesteuerten Anlagen bestanden:

Prinzipschema vor Ausbau

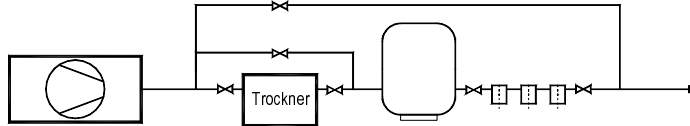
Leistung 8,22 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 7 bar  
55 kW



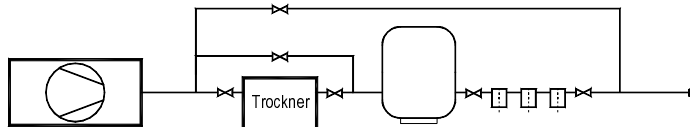
Leistung 8,5 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 7 bar  
55 kW



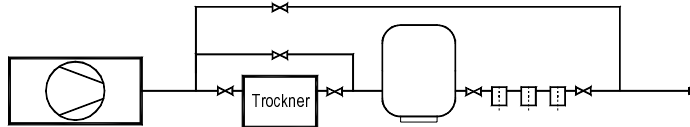
Leistung 8,5 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 7 bar  
55 kW



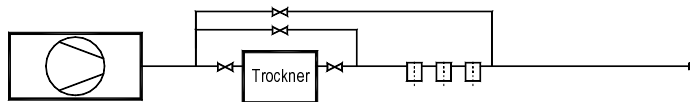
Leistung 8,5 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 7 bar  
55 kW



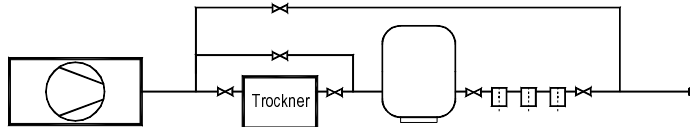
Leistung 8,5 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 7 bar  
55 kW



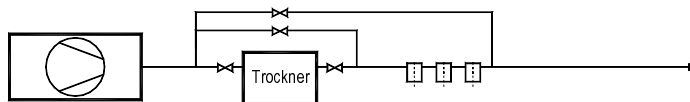
Leistung 8,5 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 7 bar  
55 kW



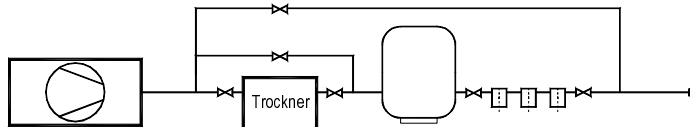
Leistung 8,5 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 7 bar  
55 kW



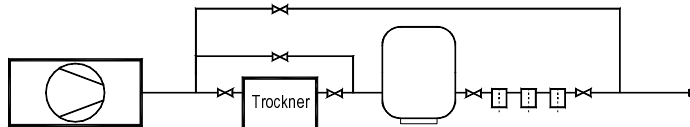
Leistung 4,1 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 8 bar  
30 kW



Leistung 7,5 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 9 bar  
55 kW



Leistung 7,5 m<sup>3</sup>/min  
max. Druck 9 bar  
55 kW



### 4.3.2 Vorgehensweise

Die Realisierung ist schrittweise durchgeführt worden:

Schritt 1:

Das Hochdrucknetz ist aufgebaut worden.

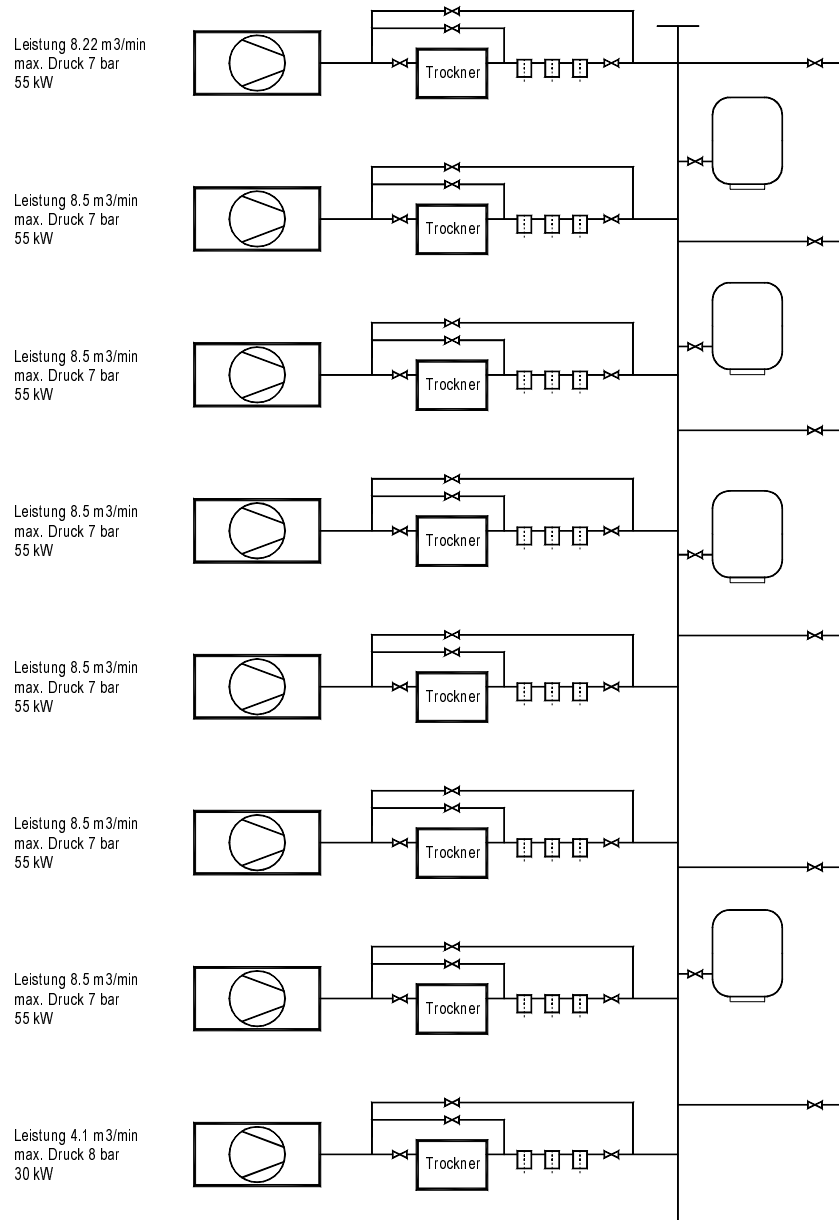
Schritt 2:

Im Niederdrucknetz wurde der gemeinsame Luftverteiler installiert. Ausserdem ist die bedarfsabhängige Regelung eingebaut worden.

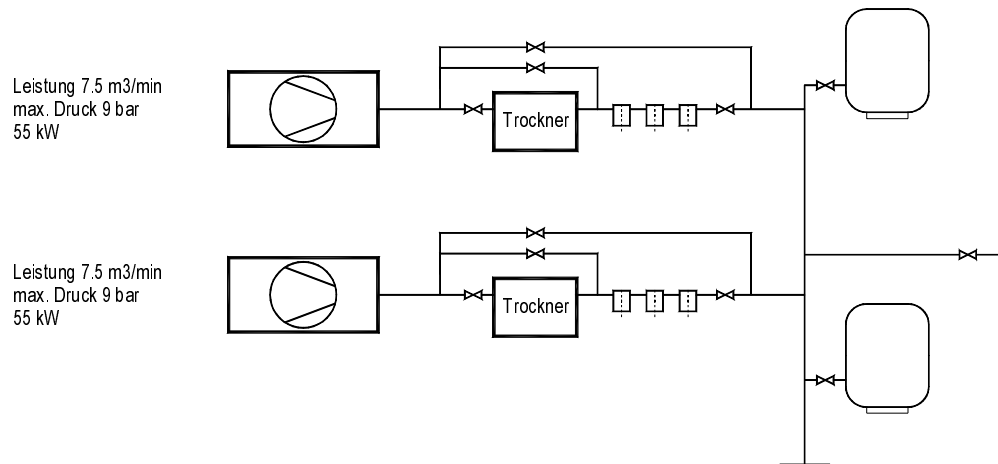
Schritt 3:

Im Hochdruckbereich wurde der gemeinsame Luftverteiler installiert. Auch hier wurde die bedarfsabhängige Regelung installiert.

Prinzipschema 6 bar-Netz nach Ausbau



Prinzipschema 9 bar-Netz nach Ausbau



## 5. Messungen

### 5.1 Allgemeines

Die Messungen sind bei stillgelegter Produktion am Samstag und Sonntag gemacht worden.

### 5.2 Leckmengenmessungen im Leitungsnetz

#### 5.2.1 Leckmengenmessungen im Niederdrucknetz

Im Leitungsnetz sind bereits bei der Messung des Ist-Zustands keine wesentlichen Verluste gemessen worden:

Netzverlust gemäss Messung vom 20./21.02.99 0.18 m3/min

Bei einer Sollluftmenge aller Kompressoren von 63.32 m3/min betrug der Netzverlust 0.3 %

Leckagen im Druckluftnetz können mit dem Gehör recht gut geortet werden. Eine Kontrolle bei stillgelegter Anlage zeigte, dass im Netz keine Leckagen lokalisiert werden können.

Nach Ausbau der Anlage wurde der Netzverlust überprüft. Gemäss Messung vom 25.07.99 betrug er 0.13 m3/min

Bei einer Sollluftmenge aller Kompressoren von 63.32 m3/min beträgt der Netzverlust 0.2 %

#### 5.2.2 Leckmengenmessungen im Hochdrucknetz

Das Hochdrucknetz ist neu aufgebaut worden. Messgeräte, Druckluftverteiler und verbrauchsabhängige Regelung sind gemeinsam realisiert worden.

Bei der Messung der Luftverluste im Netz konnten keine Leckagen festgestellt werden. Selbst nach 18 h Messzeit konnte an den Zählern kein Verbrauch abgelesen werden.

### 5.3 Leckmengenmessungen an den Produktionsmaschinen

#### 5.3.1 Leckagen an den Produktionsmaschinen im Niederdrucknetz

Die Messung des Ist-Zustands brachte überraschende Erkenntnisse zu Tage. Die Verluste an Verschraubungen, Armaturen, Formstücken waren wesentlich grösser als erwartet.

##### Messung vor Sanierung

Verluste an den Produktionsmaschinen gemäss Messung vom 21.02.99 8.20 m3/min

Bei einer Sollluftmenge aller Kompressoren von 63.32 m3/min betrug die Maschinenverluste 13.0 %

##### Messung nach Sanierung

Die Verluste an den Produktionsmaschinen waren so gross, dass während und ausserhalb der Arbeitszeit notwendige Reparaturen gemacht worden sind.

Messung der Verluste am 25.07.99 nach Sanierung 1.69 m3/min

Bei einer Sollluftmenge aller Kompressoren von 63.32 m3/min betrug die Maschinenverluste 2.7 %

Relativ gross waren die Leckverluste an Kompressor Nr. 4 0.72 m3/min

Damit konnten die Verluste wesentlich eingedämmt werden.

##### Dauerbläser

Zum Zeitpunkt der Leckagenmessungen ist auch der Aufwand für die Dauerbläser (Düsen zu Transportzwecken des Produktes) gemessen worden. Ihr Anteil beträgt 5.45 m3/min

Bei einer Sollluftmenge aller Kompressoren von 63.32 m3/min beträgt der Verbrauch der Dauerbläser 8.6 %

#### 5.3.2 Leckagen an den Produktionsmaschinen im Hochdrucknetz

Sobald die ersten Resultate im Niederdrucknetz bekannt waren, ist im Hoch- und Niederdrucknetz saniert worden. Der Ist-Zustand vor Sanierung konnte darum nicht mehr gemessen werden.

Nach Sanierung sind folgende Verluste festgestellt worden 0.76 m3/min

Bei einer Sollluftmenge der 2 Kompressoren von 15 m3/min betrug die Maschinenverluste 5.1 %



## 5.4 Stromverbrauchsmessungen

### 5.4.1 Messung gesamter Stromverbrauch nach Einbau von Verteiler und Regelung im Niederdrucknetz

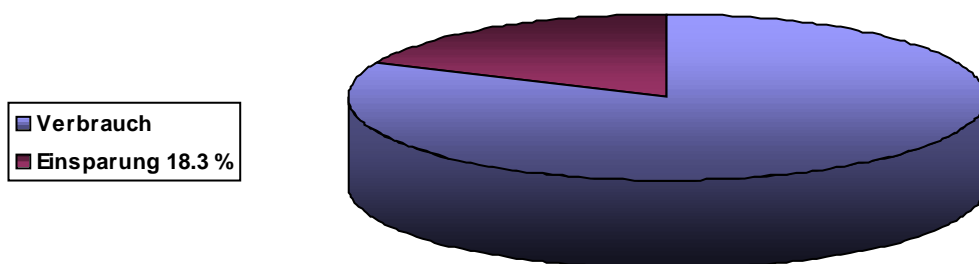
Während einer Woche ist die elektrische Leistungsaufnahme, der Strombedarf und die erzeugte Druckluftmenge gemessen worden. Die Messung dauerte von Mittwoch 28.10.98, 08.00 Uhr bis Dienstag 03.11.98, 17.00 Uhr.

Während den Werktagen sind folgende Ergebnisse festgestellt worden:

Durchschnittliche Leistungsaufnahme vor Einbau von Verteiler und Regelung	327.7		kW
Leistungsmaximum	409.4		kW
Leistungsminimum	96.1		kW
Gesamter Stromverbrauch während der Messperiode	28.7	$\times 10^3$	kWh
Gesamter Stromverbrauch an den Arbeitstagen Mittwoch, Donnerstag, Freitag, Montag, Dienstag (104 Std.)	27.8	$\times 10^3$	kWh
Durchschnittliche Leistungsaufnahme nach Einbau von Verteiler und Regelung	267.7		kW (-18.3 %)
Geförderte Luftmenge	142.0	$\times 10^3$	m <sup>3</sup>
Spez. Energieverbrauch	0.202		kWh/m <sup>3</sup>

Die durchschnittliche Leistung konnte um 18.3 % reduziert werden, obwohl mehr Druckluftverbraucher installiert worden sind!

Einsparung durch Regelung 18.3 %

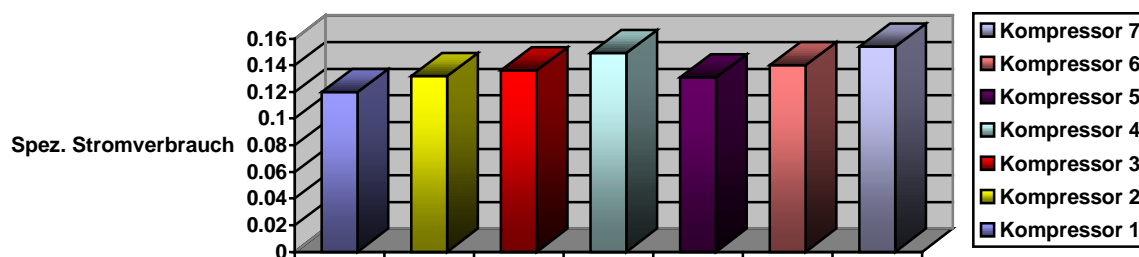


### 5.4.2 Messung des spez. Stromverbrauchs der einzelnen Kompressoren

Jeder Kompressor ist durch die Prioritätsschaltung voll belastet worden. Während einer definierten Zeit (ca. 24 Std.) sind die el. Leistungsaufnahme und die Druckluftmenge gemessen worden. Folgende Werte sind erreicht worden:

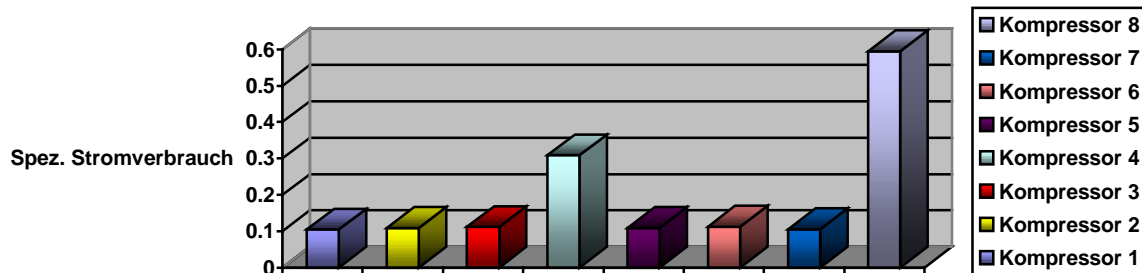
**Vor Sanierung** (Messung vom 09.11.98 bis 19.11.98)

Kompressoren Nr.	Gemessene Zeit	Stromverbrauch	Spez. Stromverbrauch pro m <sup>3</sup> Druckluft
Niederdrucknetz			
Kompressor 1	24 h 11 min	1354.3 kWh	0.120 kWh/m <sup>3</sup>
Kompressor 2	23 h 47 min	1367.5 kWh	0.132 kWh/m <sup>3</sup>
Kompressor 3	23 h 57 min	1377.1 kWh	0.136 kWh/m <sup>3</sup>
Kompressor 4	24 h 02 min	1357.9 kWh	0.149 kWh/m <sup>3</sup>
Kompressor 5	28 h 00 min	1512.1 kWh	0.131 kWh/m <sup>3</sup>
Kompressor 6	26 h 10 min	1426.1 kWh	0.140 kWh/m <sup>3</sup>
Kompressor 7	23 h 11 min	1367.8 kWh	0.154 kWh/m <sup>3</sup>
Kompressor 8	-	-	falsche Messung



**Nach Sanierung** (Messung vom 11.08.99 bis 02.09.99)

Kompressoren Nr.	Gemessene Zeit	Stromverbrauch	Spez. Stromverbrauch pro m <sup>3</sup> Druckluft	Veränderung durch Sanierung
<b>Niederdrucknetz</b>				
Kompressor 1	24 h 00 min	1188.0 kWh	0.105 kWh/m <sup>3</sup>	- 0.015 (- 12.5 %)
Kompressor 2	24 h 00 min	1231.0 kWh	0.109 kWh/m <sup>3</sup>	- 0.023 (- 17.4 %)
Kompressor 3	11 h 00 min	544.5 kWh	0.112 kWh/m <sup>3</sup>	- 0.024 (- 17.6 %)
Kompressor 4	24 h 00 min	991.2 kWh	0.309 kWh/m <sup>3</sup>	+ 0.160 (+51.8 %)
Kompressor 5	30 h 00 min	1500.0 kWh	0.109 kWh/m <sup>3</sup>	- 0.022 (- 16.8 %)
Kompressor 6	15 h 30 min	795.15 kWh	0.113 kWh/m <sup>3</sup>	- 0.270 (- 19.3 %)
Kompressor 7	7 h 30 min	412.5 kWh	0.106 kWh/m <sup>3</sup>	- 0.048 (- 31.2 %)
Kompressor 8	15 h 30 min	418.5 kWh	0.595 kWh/m <sup>3</sup>	keine Vergleichsmessung
<b>Hochdrucknetz</b>				
Kompressor 1	24 h 00 min	1200.0 kWh	0.175 kWh/m <sup>3</sup>	keine Vergleichsmessung
Kompressor 2	24 h 00 min	1152.0 kWh	0.159 kWh/m <sup>3</sup>	keine Vergleichsmessung



### 5.4.3 Ueberprüfung der Liefermenge der Kompressoren

Aus der Sicht des Betreibers ist der Soll-Ist-Vergleich der Liefermenge eine interessante Grösse. Vor allem bei überlasteter Druckluftanlage sollte die Liefermenge der Kompressoren überprüft werden, bevor zusätzliche Verdichter installiert werden.

Beim vorliegenden Projekt ist die Liefermenge überprüft worden. Ueberraschenderweise sind wesentliche Abweichungen vom Sollwert festgestellt worden:

Kompressoren Nr.	Sollwert m3/min	Ist-Wert vor Sanierung		Ist-Wert nach Sanierung		Verbesserung
		m3/min	in % des Sollwertes	M3/min	in % des Sollwertes	
<b>Niederdrucknetz</b>						
Kompressor 1	8.22	7.76	94 %	7.826	95 %	+ 1 %
Kompressor 2	8.50	7.24	85 %	7.847	92 %	+ 7 %
Kompressor 3	8.50	7.08	83 %	7.363	87 %	+ 4 %
Kompressor 4	8.50	6.32	74 %	2.231	26 %	- 48 %
Kompressor 5	8.50	6.89	81 %	7.617	90 %	+ 9 %
Kompressor 6	8.50	6.51	77 %	7.599	89 %	+ 12 %
Kompressor 7	8.50	6.39	75 %	8.633	102 %	+ 27 %
Kompressor 8	4.10	3.82	93 %	0.756	18 %	- 75 %
<b>Hochdrucknetz</b>						
Kompressor 1	7.50	4.774			64 %	keine Vergleichsmessung
Kompressor 2	7.50	5.042			67 %	keine Vergleichsmessung

## 5.5 Vergleich der Resultate mit der Planung

### 5.5.1 Gesamter Stromverbrauch

Die Messungen haben gezeigt, dass der gesamte Stromverbrauch der Druckluftanlagen wesentlich geringer ist als angenommen. Für 6'000 Betriebsstunden sind folgende Werte errechnet worden:

Angenommener Stromverbrauch vor Sanierung	3'726'000 kWh (100 %)
Gemessener Stromverbrauch vor Sanierung	1'966'200 kWh ( 53 %)

Diese Fehleinschätzung ist vorwiegend dem unübersichtlichen Betrieb zuzuschreiben gewesen. Es machte den Anschein, als ob immer alle Kompressoren gelaufen wären. In Wirklichkeit waren einige im Leerlauf in Betrieb.

### 5.5.2 Energieeinsparung durch Druckabsenkung und lastabhängige Regelung

Mit dem Einbau der lastabhängigen Regelung ist gleichzeitig auch die Druckabsenkung realisiert worden. Bei den Messungen konnte darum nicht unterschieden werden, wie gross der Erfolg durch Druckabsenkung und durch die lastabhängige Regelung war.

In der Zeit zwischen der Messung vor Sanierung und der Messung nach Sanierung sind zusätzlich mehrere Produktionsmaschinen eingebaut worden. Der Druckluftverbrauch ist darum gestiegen. Trotzdem sind folgende Einsparungen festgestellt worden:

	Erwartung vor Sanierung	Messwert nach Sanierung
Energieeinsparung durch Druckabsenkung	11.0 %	)
Energieeinsparung durch lastabhängige Regelung	14.3 %	) 18.3 %
Total	<u>26.3 %</u>	<u>18.3 %</u>

### 5.5.3 Energieeinsparung durch Abdichtung

Durch Abdichtung sind folgende Einsparungen festgestellt worden:

	Erwartung vor Sanierung	Messwert nach Sanierung
Einsparung von Verlusten im Leitungsnetz	1.0 %	(0.3 - 0.2) = 0.1 %
Einsparung von Verlusten an den Produktionsmaschinen	4.0 %	(13 - 2.7 %) = 10.3 %
Total	<u>5.0 %</u>	<u>10.4 %</u>

Durch Abdichtung sind wesentlich grössere Einsparungen realisiert worden als erwartet.

## **6. Diskussion der Resultate**

### **6.1 Was ist gelungen**

#### **6.1.1 Leckverluste**

Die Untersuchung der Leckverluste brachte die überraschende Erkenntnis zu Tage, dass die Hoch- und Niederdruck-Leitungsnetze nur sehr geringe Verluste aufweisen.

Ebenso überraschend war die Höhe der Maschinenverluste. Die Information der Verantwortlichen über diese Tatsache wirkte sehr motivierend. Alle Beteiligten leiteten mit Erfolg entsprechende Sanierungsmassnahmen ein.

#### **6.1.2 Liefermenge**

Der Betreiber ist davon ausgegangen, dass bei allen Kompressoren die Liefermenge dem Sollwert gemäss Maschinenangaben entspricht.

Gross war die Überraschung als wesentlich kleinere Leistungen festgestellt worden sind. Bereits der Einsatz von neuen Filtern an der Ansaugstelle brachte eine wesentliche Erhöhung der Liefermenge.

Eine weitere Ursache ist im Verschleiss zu suchen. Die drehenden Teile sind Alterung und Verschleiss unterworfen.

#### **6.1.3 Lastabhängige Regelung**

Der Einbau eines gemeinsamen Verteilers und der lastabhängigen Regelung brachte den grössten Erfolg dieses Projektes.

Bisher ist im Niederdrucknetz immer ein Leistungsmanko und Störungen durch Druckschwankungen an den Produktionsmaschinen festgestellt worden. Durch den Einbau des Verteilers und der neuen Regelung sind diese Probleme behoben worden. Sehr oft stehen 2-4 Kompressoren still. Es ist damit eine wesentlich höhere Versorgungssicherheit erreicht worden. Die Investition eines zusätzlichen Verdichters im Niederdrucknetz konnte für längere Zeit zurückgestellt werden.

### **6.2 Was kann in anderen Unternehmen auch umgesetzt werden?**

#### **6.2.1 Leckverluste**

Namhafte Leckverluste können mit dem Gehör detektiert werden. Voraussetzung ist, dass die Produktion still steht. Unnötiger Betriebslärm ist während der Lecksuche zu eliminieren.

Die Leckstellen sind abzudichten bis die Zischgeräusche nicht mehr hörbar sind. Eine bessere Kontrolle der Leckverluste ist der Einbau von Durchflussmessern, die die Leckverluste messen und dokumentieren.

#### **6.2.2 Drucksenkung**

Jeder Betrieb sollte seriös abklären, wie hoch der minimale Netzdruck sein darf. Bei niedrigem Druck wird weniger Energie für die Kompression benötigt. Zur Füllung der Zylinder an den Verbrauchern muss bei niedrigem Druck weniger Umgebungsluft komprimiert werden, als bei hohem Druck. Es kann gleich 2x gespart werden.

Die Angaben der Maschinenhersteller sind oft mit beachtlichen Sicherheitsmargen aufgerechnet. Ein Versuch, den Netzdruck in kleinen Schritten zu senken, lohnt sich auf jeden Fall. Selbstverständlich sind die Auswirkungen laufend zu überprüfen.

### 6.2.3 Wartung

Der Wartung der Kompressoren ist grosse Bedeutung beizumessen. Die Filter auf der Saug- und auf der Druckseite beeinflussen sowohl den spez. Stromverbrauch als auch die Liefermenge. Zur Ueberprüfung dieser Kennzahlen sind Messgeräte für Mengenmessung und Stromverbrauch wichtig. Nur damit können vergleichbare Zahlen ermittelt werden.

## 6.3 Wo sind weitere Verbesserungen möglich

### 6.3.1 Leckverluste

#### Kompressoren

Bisher sind die Leckverluste nur bei den Produktionsmaschinen gesucht worden. Bei näherer Betrachtung der Messresultate haben wir festgestellt, dass die stillstehenden Kompressoren negative Lieferzahlen aufweisen. D.h. sie haben Luft verloren. Diese Tatsache hat sofort auch das Augenmerk auf die Wartung der Kompressoren gelenkt.

Die letzte Messung von Kompressor 4 zeigte unerfreulich schlechte Resultate. Die Ursache war ein Leck im Kompressor. Diese Erfahrung zeigte uns, dass sich eine periodische Ueberwachung und Messung lohnt. Nur so können plötzlich auftretende Probleme im Bereich Leckverluste und Wartung festgestellt werden.

#### Maschinen / Netz

Im Laufe dieser Arbeit ist festgestellt worden, dass viele Leckstellen abgedichtet werden. Gleichzeitig entstanden immer wieder neue Leckstellen an anderen Orten. In diesem Bereich sind immer Verbesserungen möglich und nötig. Die Leckstellen sind mit unermüdlichem Einsatz abzudichten.

### 6.3.2 Liefermenge

Der Verschleiss an den Verdichtern wird in der Firma Sandherr ein wichtiges Thema sein. Durch den Ersatz wichtiger Verschleissteile soll die Liefermenge wieder dem Neuzustand angeglichen werden.

Auch die Wartung der Filter auf der Saugseite der Kompressoren ist wichtig. Bei grossem Widerstand an der Ansaugstelle wird der Liefergrad negativ beeinflusst.

### 6.3.3 Kompressoren

Kompressor 4 hat offensichtlich intern Leckstellen, die den spez. Stromverbrauch ansteigen und die Liefermenge sinken lässt.

Kompressor 8 weist sehr schlechte spezifische Zahlen aus.

Die Kompressoren im Hochdruckbereich haben einen hohen spez. Stromverbrauch und eine zu kleine Liefermenge.

Im Bereich der Kompressoren können durch gezielte Wartung weitere Energiekosten gespart werden.

### 6.3.4 Luftzuführung

Die Kompressoren saugen die Luft aus der Druckluftzentrale ab. Vor allem im Sommer ist diese Luft sehr warm. Warme Luft hat eine geringere Dichte als kalte Luft. Die Kompressoren brauchen darum bei hoher Lufttemperatur mehr Energie zur Verdichtung als bei kalter Luft.

Es wäre ein grosser Vorteil, wenn möglichst kühle Luft aus dem Freien angesaugt werden könnte.

### **6.3.5 Verbraucher**

Ein weiteres Potential zur Einsparung von Druckluft und Energie liegt im Betrieb. Durch systematische Analyse der Verbraucher auf die Notwendigkeit der Anwendung von Druckluft als Energieträger kann der Druckluftverbrauch vermutlich wesentlich reduziert werden. Nachstehend 2 Beispiele:

- Transportvorgänge mit Druckluft als Fördermedium sind mit grosser Wahrscheinlichkeit unwirtschaftlich. Es ist allgemein bekannt, dass zur Verrichtung von 1 kWh Arbeit mit Druckluft ca. 10 kWh Primärenergie aufgewendet werden muss.
- Reinigungsvorgänge mit Druckluft sind oft unsinnig, da der Schmutz nicht entfernt, sondern nur verlagert wird. Ausserdem sind die Reinigungskosten mit Druckluft beachtlich.

## **6.4 Was hat sich bewährt?**

### **6.4.1 Messungen**

Der Einbau der Messgeräte und die Durchführung der Messungen hat sich als ausserordentlich informativ erwiesen. Ohne diese Messungen können weder Verluste noch Produktions- und Verbrauchszahlen festgestellt werden.

Der Wirkungsgrad der Kompressoren und die Verluste von Netz, Maschinen und Kompressoren können im Normalbetrieb nicht festgestellt werden. Erst die Messresultate fördern die Schwachstellen zu Tage.

### **6.4.2 Wartung**

Regelmässige Ueberprüfung und Wartung der Verdichter, des Druckluftnetzes und der Produktionsmaschinen macht sich bezahlt. Wichtig ist, dass die Kontrollen bei stillstehendem Produktionsbetrieb gemacht werden. Zu diesem Zeitpunkt können die Leckstellen gehört werden.

Auch der Filterwartung ist eine hohe Priorität zuzuordnen. Liefergrad und Kosten der Druckluftherzeugung werden dadurch wesentlich beeinflusst.

## **6.5 Was hat sich nicht bewährt?**

### **6.5.1 Blindes Vertrauen**

Blindes Vertrauen in Angaben von Herstellern (Kompressordaten, theoretische Verbrauchszahlen etc.) und in die Dichtheit der Anlage und der Kompressoren hat sich nicht bewährt.

Eine Druckluftanlage ist dynamisch. Sowohl beim Druckluftherzeuger als auch bei den Verbrauchern tritt Verschleiss auf. Aus diesem Grunde sind immer Verluste vorhanden, die aufgespürt und abgedichtet werden müssen.



## 7. Rückschau: Daten

### 7.1 Technische Daten im Ueberblick

Kompressoren Niederdrucknetz 6 bar

Kompressoren Nr.	Nenn-Liefermenge	Motorenleistung
Kompressor 1	8.22 m <sup>3</sup> /min	55 kW
Kompressor 2	8.50 m <sup>3</sup> /min	55 kW
Kompressor 3	8.50 m <sup>3</sup> /min	55 kW
Kompressor 4	8.50 m <sup>3</sup> /min	55 kW
Kompressor 5	8.50 m <sup>3</sup> /min	55 kW
Kompressor 6	8.50 m <sup>3</sup> /min	55 kW
Kompressor 7	8.50 m <sup>3</sup> /min	55 kW
Kompressor 8	4.10 m <sup>3</sup> /min	30 kW

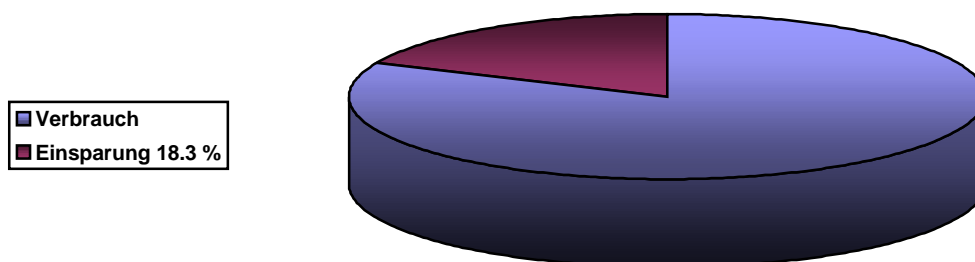
Kompressoren Hochdrucknetz 8 bar

Kompressoren Nr.	Nenn-Liefermenge	Motorenleistung
Kompressor 1	7.50 m <sup>3</sup> /min	55 kW
Kompressor 2	7.50 m <sup>3</sup> /min	55 kW

### 7.2 Energieeinsparung

#### 7.2.1 Energieeinsparung durch lastabhängige Regelung und Drucksenkung

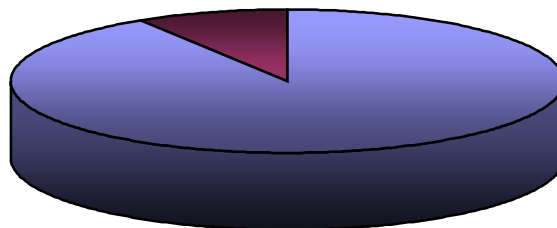
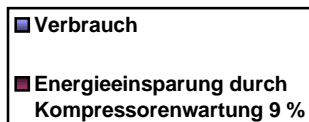
Bei erhöhtem Druckluftverbrauch konnte durch die Druckabsenkung und die lastabhängige Regelung die el. Leistung um 18.3 % reduziert werden.



### 7.2.2 Spez. Stromverbrauch pro m<sup>3</sup> Luft

Kompressoren Nr.	Spez. Stromverbrauch pro m <sup>3</sup> Druckluft		Einsparung
	Vor Sanierung	Nach Sanierung	
<b>Niederdrucknetz</b>			
Kompressor 1	0.120 kWh/ m <sup>3</sup>	0.105 kWh/ m <sup>3</sup>	- 0.015 kWh/ m <sup>3</sup> (- 12.5 %)
Kompressor 2	0.132 kWh/ m <sup>3</sup>	0.109 kWh/ m <sup>3</sup>	- 0.023 kWh/ m <sup>3</sup> (- 17.4 %)
Kompressor 3	0.136 kWh/ m <sup>3</sup>	0.112 kWh/ m <sup>3</sup>	- 0.024 kWh/ m <sup>3</sup> (- 17.6 %)
Kompressor 4	0.149 kWh/ m <sup>3</sup>	0.309 kWh/ m <sup>3</sup>	+ 0.160 kWh/ m <sup>3</sup> (+ 51.8 %)
Kompressor 5	0.131 kWh/ m <sup>3</sup>	0.109 kWh/ m <sup>3</sup>	- 0.022 kWh/ m <sup>3</sup> (- 16.8 %)
Kompressor 6	0.140 kWh/ m <sup>3</sup>	0.113 kWh/ m <sup>3</sup>	- 0.027 kWh/ m <sup>3</sup> (- 19.3 %)
Kompressor 7	0.154 kWh/ m <sup>3</sup>	0.106 kWh/ m <sup>3</sup>	- 0.048 kWh/ m <sup>3</sup> (- 31.2 %)
Kompressor 8	-	0.595 kWh/ m <sup>3</sup>	keine Vergleichsmessung
<b>Hochdrucknetz</b>			
Kompressor 1	-	0.175 kWh/ m <sup>3</sup>	keine Vergleichsmessung
Kompressor 2	-	0.159 kWh/ m <sup>3</sup>	keine Vergleichsmessung

Die durchschnittliche Energieeinsparung der 7 vergleichbaren Kompressoren pro m<sup>3</sup> Luft beträgt 9 %. Diese Einsparung ist durch die Wartung (Filter) realisiert worden.

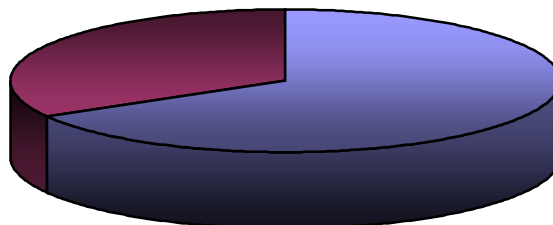
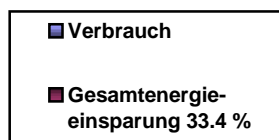


### 7.2.3 Gesamtenergieeinsparung

Die Energieeinsparung setzt sich aus verschiedenen Massnahmen zusammen. Ausgehend von einem durchschnittlichen Leistungsbedarf von 327.7 kW vor Sanierung sind folgende Werte erreicht worden:

Energiebedarf während 6'000 Betriebsstunden pro Jahr:	6'000 x 327.7 kW	1'966'200 kWh/a	100 %
Einsparung durch Einbau von Verteiler und lastabhängiger Regelung sowie Netztrennung Hoch- und Niederdruck	18.3 % von 1'966'200 kWh	<u>359'815 kWh/a</u>	18.3 %
		1'606'385 kWh/a	
Einsparung durch Netzabdichtung d.h. Abdichtungen an den Maschinen	10.4 % von 1'606'385 kWh	<u>167'064 kWh/a</u>	8.5 %
		1'439'321 kWh/a	
Einsparung durch Leistungsverbesserungen an den Kompressoren (Spez. Strombedarf pro m <sup>3</sup> Luft)	9.0 % von 1'439'321 kWh	<u>129'539 kWh/a</u>	6.6 %
		<u>1'309'782 kWh/a</u>	66.6 %

Obwohl noch Verbesserungspotential vorhanden ist, sind Energieeinsparungen von 656'418 kWh/a oder 33.4 % erzielt worden.



### 7.2.4 Investitionskosten

Folgende Investitionen sind ausgelöst worden:

Investitionen in Leitungen	Fr.	130'695.65
Investitionen in Messgeräte	Fr.	28'795.--
Investitionen in Apparate (Regelung)	Fr.	29'648.15
Planung, Messaufwand, Messbericht, Nebenkosten	Fr.	84'270.--
Total	Fr.	<u>273'408.80</u>

### 7.2.5 Pay-Back-Zeit

Investitionskosten	Fr.	273'408.80
Stromkosten (Jahresmittelpreis)	Rp.	13.15
Energieeinsparung 656'418 kWh à 13.15 Rp/kWh	Fr.	86'319.--

Pay-Back-Zeit	$\frac{273'408.80}{86'319.00}$	=	3.2 Jahre
---------------	--------------------------------	---	-----------

## **8. Ausblick**

### **Pay-Back verbessern**

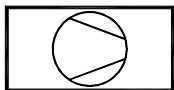
Durch die Messungen ist festgestellt worden, dass immer noch Schwachstellen vorhanden sind, die die Pay-Back-Zeit weiter verbessern lassen.

- Mit wenig Aufwand könnten die Kompressoren im Hochdrucknetz auf eine bessere Liefermenge eingestellt werden.
- Die Kompressoren 4 und 8 im Niederdrucknetz werden kontrolliert und gewartet. Durch die Wartungsarbeiten kann hier eine bedeutende Verbesserung der Pay-Back-Zeit erwartet werden.

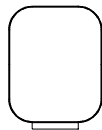
### **Kontrolle**

Die periodische Kontrolle der Anlage soll institutionalisiert werden. Durch automatische Aufzeichnungen und periodische Kontrollen sollen Abweichungen vom Normalbetrieb festgestellt werden.

## 9. Symbolverzeichnis



Kompressor



Druckluft-Speicher



Absperrorgan



Filter



Trockner