Mario Hubert Gangl

Optimierung eines Druckluftsystems in einem Großunternehmen

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Maschinenbau

Semriach, 2010

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Gerhard Kretzschmar
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Robert Niessner

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Danksagung

Im Speziellen möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Gerhard Kretzschmar für die intensive Betreuung und weiterführenden Ideen, die ich in meine Arbeit einfließen lassen konnte, bedanken.

Ein besonderes Dankeschön geht auch an Herrn Dipl.-Ing. Robert Niessner, Abteilungsleiter in der Instandhaltung im Werk sappi Gratkorn, der mich bei meiner Diplomarbeit unterstützte. Er ermöglichte mir, dieses Projekt durchzuführen.

Bibliographische Beschreibung:

Name: Mario Hubert Gangl

Thema: Optimierung eines Druckluftsystems in einem Großunternehmen

Hochschule Mittweida, Fachbereich für Maschinenbau, Diplomarbeit 2008

Referat:

Die Energiekosten für die Drucklufterzeugung werden von vielen Unternehmen unterschätzt. In dieser Arbeit möchte ich anhand eines Beispiels aufzeigen, was ein jahrzehntelanger „Wildwuchs“ der Rohrleitungen in einem Druckluftnetz für Folgen hat und wie man dem Wildwuchs Herr werden könnte. Im Besonderen gehe ich auf die Thematiken: *Leckagen*, *Kompressorwahl* und *Anforderungen an ein übergeordnetes Leitsystem* ein.

Im Bereich *Leckagen* ist über die Entstehung der Leckagen bis zur Beseitigung dieser alles enthalten. Des Weiteren wird in diesem Kapitel die Leckagensuche mit einem Ultraschallmessgerät beschrieben.

Der Abschnitt *Kompressorwahl* enthält wichtige Kriterien, die für die Wahl eines Kompressors entscheidend sind. In meiner Diplomarbeit habe ich alle Themen gemäß den Ansprüchen der Papierfabrik sappi Gratkorn angepasst.

Des Weiteren werden die *Anforderungen an ein übergeordnetes Leitsystem* erörtert. Insbesondere werden alle Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Anbieter von Leitsystemen, sowie alle Anforderungen, die ein großer Industriebetrieb an ein Leitsystem stellt, beleuchtet.

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Semriach 02. 07. 2010

.....

Bearbeitungsort Datum Mario Hubert Gangl

1 Inhaltsverzeichnis

Danksagung 2
1 Inhaltsverzeichnis 5
2 Abbildungsverzeichnis 7
3 Tabellenverzeichnis 8
4 Diagrammverzeichnis 9
5 Abkürzungsverzeichnis 10
6 Einleitung 11
7 Zielsetzung 13
8 Geschichtlicher Verlauf des Werks sappi Gratkorn 14
9 Allgemeine Werksübersicht 15
10 Was ist Druckluft? 17
10.1 Druckluftqualität 18
10.2 Darstellung der Druckluftsituation im Werk 20
10.2.1 Ermittlung des tatsächlichen Luftverbrauches 21
10.3 Fazit 29
10.4 Möglichkeiten Energie einzusparen 30
10.5 Möglichkeiten und Potentiale zur Optimierung 31
11 Kontinuierliche Leckagensuche 32
11.1 Rohrleitungsnetz 33
11.2 Entstehung von Leckagen 35
11.2.1 Alterung der Materialien 35
11.2.2 Verschmutzte bzw. unreine Luft 35
12 Vorbeugung von Leckagen 41
12.1 Ansaugluft 42
12.2 Die Reinigung der Druckluft direkt nach dem Kompressor 44
12.2.1 Vor- und Nachteile der Trockner vor dem Druckluftkessel 45
12.2.2 Vor- und Nachteile der Trockner nach dem Druckluftkessel 46
12.2.3 Aufbereitung im Rohrleitungssystem 47
12.2.4 Aufbereitung vor dem Endverbraucher 48
12.2.5 Unsachgemäße Handhabung 49
12.3 Entdeckung von Leckagen 52
12.3.1 Leckagensuchspray 52
12.3.2 Ultraschall (Sonographie) 53
12.4 Einführung der kontinuierlichen Leckagensuche im Werk 55

12.4.1 Erste Phase ... 55
12.4.2 Zweite Phase ... 56
12.5 Resultate der kontinuierlichen Leckagensuche im Werk ... 61
13 Alternative zu veralteten Kompressoren ... 62
13.1 Allgemeine Beschreibung von Kompressoren ... 62
13.1.1 Kolbenkompressor ... 62
13.1.2 Schraubenkompressor ... 63
13.1.3 Turbokompressor ... 64
14 Im Werk Gratkorn verwendete Kompressoren ... 65
14.1 Kolbenkompressoren 0 bis 3 ... 65
14.2 Schraubenkompressoren 4 bis 7 ... 68
14.3 Turbokompressoren 8 und 9 ... 70
15 Energieeinsparung und Netzsicherheit über neuen Schraubenkompressor ... 71
16 Leitsystem ... 72
16.1 Anforderungen an ein Leitsystem für Druckluft ... 72
16.2 Visualisierung ... 77
16.3 Herstellervergleich ... 78
16.4 Steuerung Atlas Copco ... 78
16.5 Steuerung von Kaeser ... 80
16.6 Stufenplan für die Einführung eines Leitsystems ... 82
16.6.1 Allgemeine Voraussetzungen ... 83
16.6.2 Stufe 1 ... 83
16.6.3 Stufe 2 ... 87
16.6.4 Stufe 3 ... 88
16.6.5 Fazit ... 89
17 Kostenabschätzung einer neuen Hauptleitung ... 90
18 Literaturverzeichnis ... 94
19 Quellen aus dem Internet ... 94
20 Anhangverzeichnis ... 95

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 9-1 Werksübersicht (Kompressoren) 15
Abbildung 9-2 Werksübersicht (Bereiche) 16
Abbildung 10-1 Zusammensetzung der Luft 17
Abbildung 10-2 Orientierung der Kompressoren 20
Abbildung 10-3 Messaufbau 22
Abbildung 10-4 Separate Messung 23
Abbildung 11-1 Rohrleitung Rohrtrasse ZF 33
Abbildung 11-2 Rohrleitung Rohrtrasse ZF 34
Abbildung 11-3 Taupunkt 36
Abbildung 11-4 Teilchenzähler 38
Abbildung 11-5 Psychrometer 39
Abbildung 12-1 Taschenfilter 42
Abbildung 12-2 Oberflächenfilter (Patronen) 43
Abbildung 12-3 Nassluftfilter 43
Abbildung 12-4 Trockner nach Druckluftkessel 44
Abbildung 12-5 Trockner vor dem Druckluftkessel 44
Abbildung 12-6 Trockner vor dem Kompressor 45
Abbildung 12-7 Trockner nach dem Druckluftkessel 46
Abbildung 12-8 Schwanenhals 47
Abbildung 12-9 Wartungseinheit 48
Abbildung 12-10 Druckluftschlauch 49
Abbildung 12-11 Kunststoffeinschrauber 49
Abbildung 12-12 Sicherheits-Schnellkupplung 50
Abbildung 12-13 normale Schnellkupplung 50
Abbildung 12-14 Durchflussdiagramm 51
Abbildung 12-15 Leckagensuchspray 52
Abbildung 12-16 Ultraschallmessung 54
Abbildung 13-1 Kolbenkompressor 62
Abbildung 13-2 Prinzip Schraubenkompressor 63
Abbildung 13-3 Schraubenkompressor 63
Abbildung 13-4 Turbokompressor 64
Abbildung 13-5 Volumenstrom 64
Abbildung 14-1 Kompressor 0 66
Abbildung 14-2 Kompressor 1 und 2 67

Abbildung 14-3 Kompressor 4 bis 7 68
Abbildung 14-4 Kompressor 7 69
Abbildung 14-5 Turbokompressoren 70
Abbildung 16-1 Anforderungen Leitsystem 72
Abbildung 16-2 Steuern und Regeln 73
Abbildung 16-3 Ansaugdrosselung 74
Abbildung 16-4 Abblasregelung 75
Abbildung 16-5 Kaskadensteuerung 75
Abbildung 16-6 Druckbandregeldung 76
Abbildung 16-7 Visualisierung 77
Abbildung 16-8 Atlas Copco Datenblatt 79
Abbildung 16-9 Kaeser Kompressoren 81
Abbildung 16-10 Stufenplan 82
Abbildung 16-11 Leitsystem Stufe 1 83
Abbildung 16-12 Kompressorenlaufzeiten 84
Abbildung 16-13 Leitsystem Stufe2 87
Abbildung 16-14 Leitsystem Stufe 3 88
Abbildung 17-1 Volumenströme bei Ausfall der Turbokompressoren 90

3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Druckübersicht 29
Tabelle 2 Energieeinsparmaßnahmen (EU-Studie) 31
Tabelle 3 Qualitätsklassen nach ISO 8573 40
Tabelle 4 Musterauszug Leckagenprotokoll 57
Tabelle 5 Leckagenmessung 61
Tabelle 6 Kompressorlaufzeiten 84
Tabelle 7 Kosten Stufe 1 86
Tabelle 8 Kosten Stufe 2 87
Tabelle 9 Kosten Stufe 3 89
Tabelle 10 Kostenaufstellung Stunden 92
Tabelle 11 Rohrleitungskosten 93

4 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1 Separate Messung 23
Diagramm 2 Druckeinbruch 24
Diagramm 3 Flussprofil 25
Diagramm 4 Energieverlauf K8 und K9 26
Diagramm 5 Energieverlauf K7 26
Diagramm 6 Energieverlauf Bereich Energie 27
Diagramm 7 Durchflussmessung Ausfall K7 28
Diagramm 8 Druckverlauf Ausfall K7 28
Diagramm 9 Leckagenverlauf 60

5 Abkürzungsverzeichnis

ASD	drehzahlvariable Antriebe
HEM	hocheffiziente Motoren
DLA	Druckluftanlage
IH	Instandhaltung
K0	Kompressor 0
K1	Kompressor 1
K2	Kompressor 2
K3	Kompressor 3
K4	Kompressor 4
K5	Kompressor 5
K6	Kompressor 6
K7	Kompressor 7
K8	Kompressor 8
K9	Kompressor 9
L	Nennlänge
nj	Gesamtanzahl der Wochen im Jahr
pe	Anfangsdruck (Überdruck – Pa)
PL3	Produktionslinie 3 (Papiermaschine 9)
PL4	Produktionslinie 4 (Papiermaschine 11)
PLS	Prozessleitsystem
PM9	Papiermaschine 9
PM11	Papiermaschine 11
PU	Faserlinie (Zellstofferzeugung)
Q	Volumenstrom
RVA	Reststoffverbrennungsanlage
S	Sicherheitsfaktor
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
UT	Energie
ZF	Zellstofffabrik
Δp	Druckverlust
Øhw	durchschnittliche Leerlaufstunden pro Woche
ØPl	durchschnittliche Leerlaufleistung
€kw	Kosten für einen Kilowatt Leistung

6 Einleitung

„In unserer verschmutzten Umwelt wird die Luft langsam sichtbar.“

Norman Mailer

Dieses Zitat beschreibt für mich die Zwiespältigkeit der Drucklufterzeugung. Das erzeugte Medium ist Luft, klar und rein, aber die dafür benötigte Energie bzw. die Begleitumstände ihrer Erzeugung wohl kaum. In den letzten Jahren hat in der Industrie das Thema „Energiekosten“ immer mehr an Bedeutung gewonnen. Es wird in Betrieben verstärkt darüber nachgedacht, wie Energiekosten gesenkt werden können. Durch die ständig steigenden Rohstoff- und Energiepreise und den starken Mitbewerbern, vermehrt aus Fernost, wird die Effizienz der Anlagen bedeutender. Der Emissionshandel in der EU für CO_2 und verschiedene andere, immer strengere Auflagen verschlechtern die Wettbewerbsposition der europäischen Unternehmen noch zusätzlich.

Wie kann man die Emissionen und den Verbrauch der Rohstoffe senken? → *Durch die Senkung des Energieaufwandes.*
Wie wird der Energieaufwand verringert? → *Man steigert die Effizienz der Anlagen.*

Jedes Unternehmen strebt nach ständiger Verbesserung seiner Maschinen und Anlagen. In diesem Fall strebe ich nach einer Verbesserung des Druckluftsystems und der damit verbundenen Einsparung von Energiekosten im Werk sappi Gratorn.

Im Wesentlichen gehe ich in meiner Diplomarbeit auf die Themen *aktueller Luftverbrauch im Werk Gratkorn, Einsparungsmöglichkeiten im Druckluftsystem, Leckagensuche und ein Leitsystem für das Werk Gratkorn* ein. Für diese vier Schwerpunkte habe ich mich nach meiner Projektstudie „Optimierung des werksweiten Druckluftsystems“ entschieden. In der Prioritätenreihung der Verbesserungen, die mit den Faktoren Energieeinsparung, Machbarkeit und Umsetzungskosten gebildet werden, waren diese drei Schwerpunkte gemeinsam mit dem organisatorischen Thema „Verschwendung“ ganz oben anzufinden.

Das Thema *aktueller Luftverbrauch im Werk Gratkorn* bezieht sich auf den tatsächlichen Verbrauch der Druckluft sowie die Verteilung der Druckluft zu den Verbrauchern.

Die Thematik über die Einsparungspotentiale beinhaltet die Ergebnisse des aktuellen Druckluftverbrauches im Werk Gratkorn. Es wird verdeutlicht, welche Potentiale zur Einsparung von Druckluft vorhanden sind.

Im Themengebiet *Leckagen* beschreibe ich die Entstehung, die Entdeckung und die Reparatur von Leckagen, sowie deren Auswirkungen auf die Kosten, die durch die verlorene Druckluft entstehen. Es ist nicht nur wichtig, Leckagen, die bereits existieren, zu beseitigen, sondern die Entstehung von weiteren Leckagen zu verhindern. Bei der Entstehung von Leckagen spielen die Umgebungszustände eine sehr große Rolle. Zum Beispiel geht in schlecht gewarteten Anlagen bis zu 25% der erzeugten Druckluft verloren.

Zitat[1]:
Obwohl in allen Industrieunternehmen Druckluft verwendet wird, sind die energetischen/wirtschaftlichen Fakten offenbar noch nicht richtig in das Bewusstsein der Anwender gedrungen: z.B. aus 100% elektrischer Energie, die in einen Kompressor eingeleitet werden, entsteht überwiegend Wärme und als „Abfallprodukt" weniger als 10% Druckluft.

Mit den Fragen „Welche Vorteile bringt ein Leitsystem?" und „Welche Anforderungen werden an ein Druckluft-Leitsystem gestellt?" beschäftige ich mich im dritten Abschnitt der Diplomarbeit. Es gibt aufgrund der Komplexität nur wenige Hersteller, die ein Druckluft-Leitsystem für Großbetriebe anbieten. Um ein passendes Leitsystem zu finden, müssen zuerst die Rahmenbedingungen, Ist-Zustände und die Anforderungen definiert werden. In diesem Zusammenhang sind die Ziele klar zu fest zu legen.

[1] Karl Heinz Feldmann (2003): Optimale Druckluftverteilung. So spart man Energie und Kosten in Druckluftleitungsnetzen. ISBN 3-8169-2062-4

7 Zielsetzung

Das Ziel meiner Arbeit ist, Maßnahmen zu eruieren, um die im Industriebetrieb erzeugte Druckluft kostengünstiger produzieren zu können; speziell sollen die Energie- und Instandhaltungskosten gesenkt werden.

Wenn man die Lebenszykluskosten eines Kompressors betrachtet, nehmen die Energiekosten rund 70% ein. Eine Reduktion dieser Kosten wird nur durch eine gute Planung und Instandhaltung der Kompressoren und des Rohrsystems erreicht.

Es gilt Potentiale zu finden, die mit wenig Aufwand ein gutes Resultat erbringen (Quick Wins). In der *Leckagensuche* soll eine optimale Symbiose zwischen Aufwand und Nutzen generiert werden. Es gibt einfache Hilfsmittel wie einen Lecksuchspray, mit ihm kann man mit kleinem Aufwand einen großen Nutzen erzielen. Andere Methoden und Hilfsmittel, die eine Leckagensuche bei laufenden Anlagen ermöglichen, sollen gefunden und evaluiert werden.

Meine Diplomarbeit soll darstellen, welche Möglichkeiten im Werk Gratkorn vorhanden sind, um Energie einsparen zu können.

Ein Teil der Diplomarbeit umfasst die Anforderungen an ein Leitsystem für Kompressoren. Der Schwerpunkt ist eine konkrete Auflistung von Fakten, welche die Anforderungen eines modernen und zukunftsorientierten Unternehmens an ein Druckluft-Leitsystem wiederspiegeln. In diesem Zuge möchte ich auf die Möglichkeiten eines Leitsystems genauer eingehen.

8 Geschichtlicher Verlauf des Werks sappi Gratkorn

Am Standort Gratkorn wird seit mehr als 400 Jahren Papier erzeugt. Im Jahre 1793 erwarb Andreas Leykam die Papiermühle und baute sie zur damals wichtigsten Papierfabrik in der Steiermark aus. Weitere Betriebe kamen in den folgenden Jahrzehnten hinzu und ergaben eine bedeutende Unternehmensgruppe, die ab 1870 als „Leykam-Josefsthal Aktiengesellschaft für Papier- und Zellstoffindustrie“ firmierte. Im Jahr 1973 fusionierte die „Leykam Josefsthal“ und die „Mürztaler Holzstoff und Papierfabriks AG Bruck“ zur „Leykam Mürztaler Papier und Zellstoff AG“. Der Mehrheitsaktionär der Gesellschaft war über hundert Jahre lang die Kreditanstalt-Bankverein, welche im Jahr 1988 ihren Anteil an die niederländische KNP verkaufte. Sechs Jahre später erfolgte der Zusammenschluss von Leykam Mürztaler mit den Papieraktivitäten des niederländischen Konzerns, woraus die KNP LEYKAM entstand. KNP LEYKAM wurde mit Beginn des Jahres 1998 durch Sappi übernommen. Im Oktober 2008 hat Sappi die Feinpapierwerke von MReal übernommen und damit auch die Führung beim Marktanteil von Feinpapieren in Europa.

In Gratkorn wurde im Oktober 1997 die Papiermaschine 11 in Betrieb genommen. Mit einer Jahresproduktion von 700.000 Tonnen Papier ist die Produktionslinie PM 11 die leistungsfähigste Produktionsanlage der westlichen Welt. Nicht nur für holzfrei gestrichene Papiere, sondern für alle Papiersorten. Mit der Papiermaschine 9, erbaut im Jahre 1989, hat das Werk Gratkorn eine Kapazität von 1.000.000 Tonnen pro Jahr und ist damit weltweit einer der größten Erzeuger von holzfrei gestrichenen Papieren. Das Sappi-Werk in Gratkorn erzeugt holzfrei gestrichene Papiere in matter und glänzender Oberfläche mit einem Flächengewicht von 80 – 200 g/m2.

Das Werk Gratkorn ist nach Qualitäts- und Umweltnormen zertifiziert. Als erster österreichischer Zellstoff- und Papierproduzent wurde Sappi Gratkorn in das EU-Standortverzeichnis gemäß der EMAS-Verordnung eingetragen. Die umfassende Verantwortung für die Umwelt und die Qualitätssicherung der Produkte sind integrierende Bestandteile der Unternehmenspolitik.

9 Allgemeine Werksübersicht

Die Abbildung 9-1 Werksübersicht verschafft einen Überblick über das Werk und die Aufstellung der Kompressoren - des Weiteren ist eine Zeichnung vom Werk im Format A3 im Anhang angeschlossen.

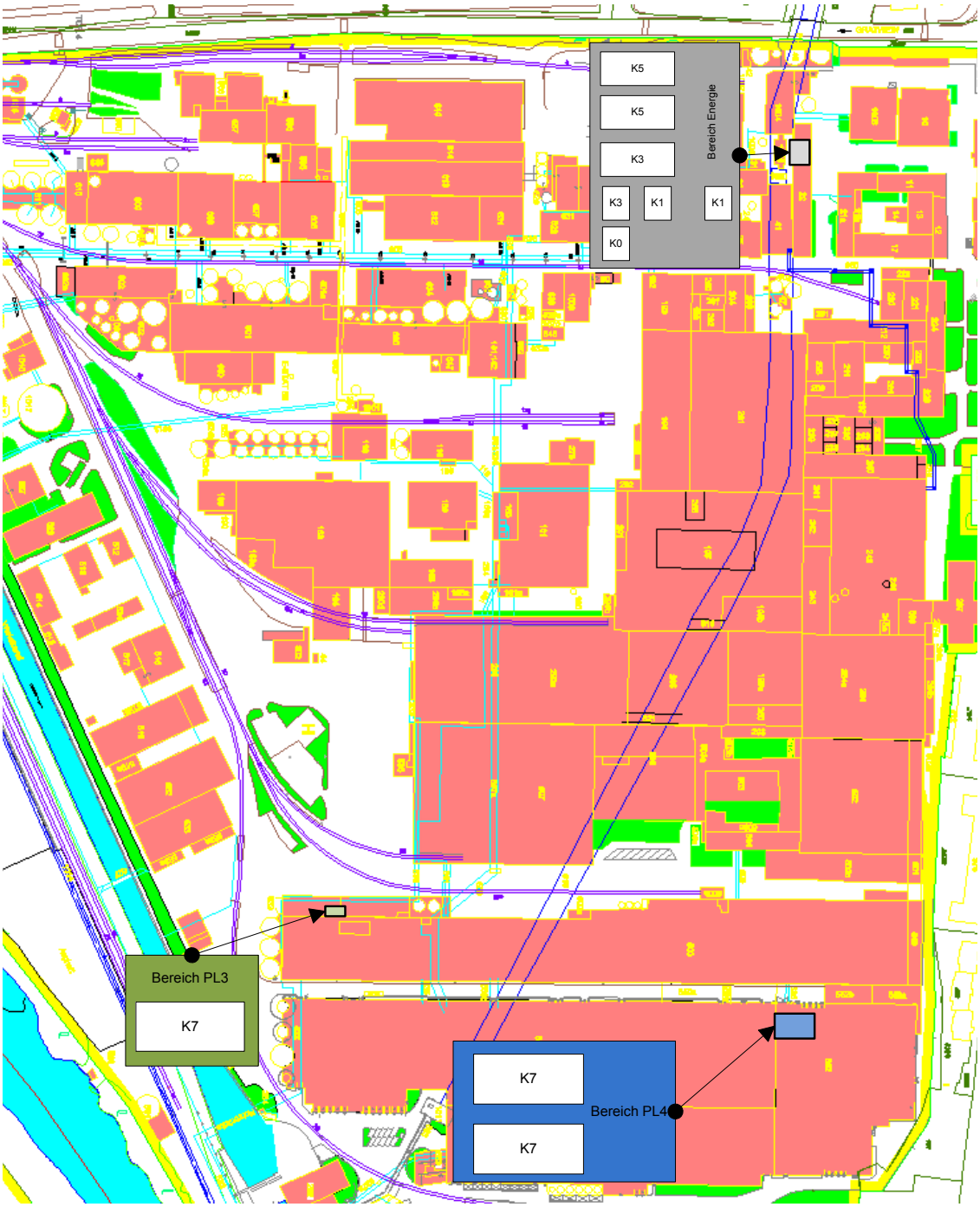


Abbildung 9-1 Werksübersicht (Kompressoren)

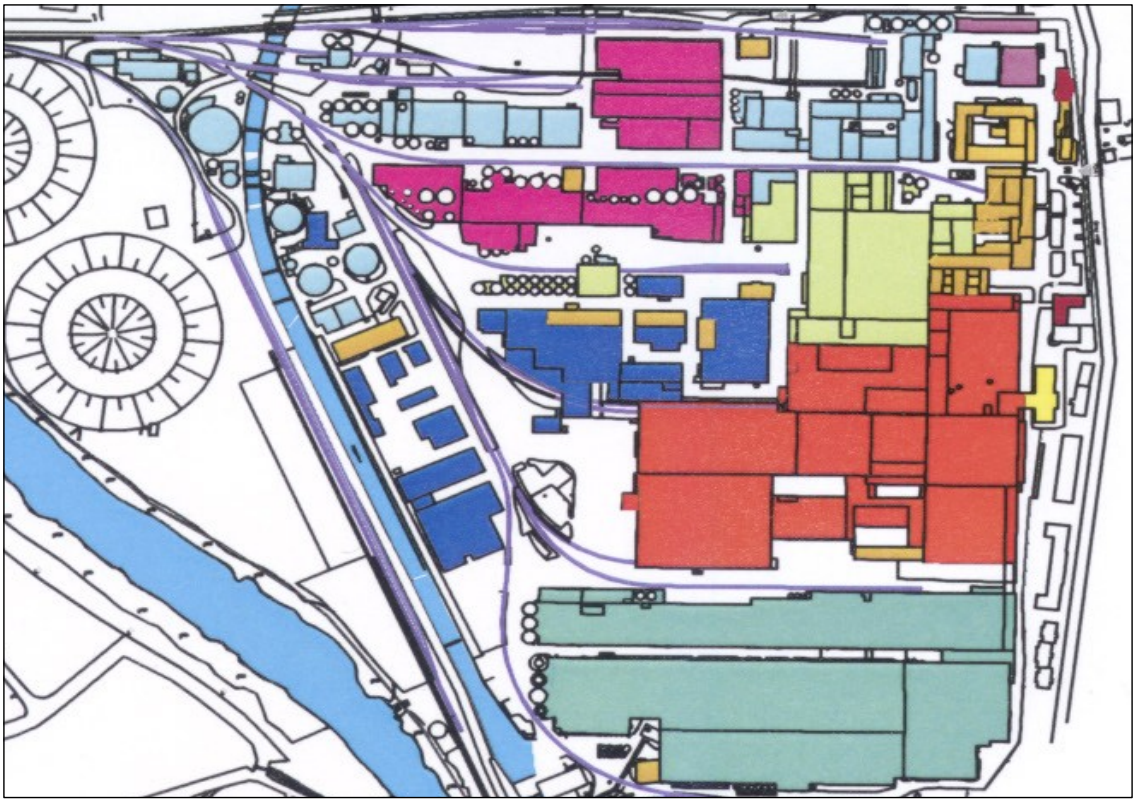


Abbildung 9-2 Werksübersicht (Bereiche)

Das Werk ist in mehrere Bereiche aufgeteilt:

- Energie (hellblau)
- Zellstofferzeugung (rosa)
- Zentrale Werkstätten (blau)
- Ausrüstung (orange)
- Papierproduktion (türkis)

Im hellgelben Bereich befinden sich alte stillgelegte Papiermaschinen. Zum Teil wurden die Gebäude in diesem Bereich bereits abgerissen.

Es gibt im Werk drei Kompressorenräume. Der größte Kompressorenraum mit drei Schraubenkompressoren und vier Kolbenkompressoren befindet sich im Bereich Energie. Die beiden anderen Kompressorenräume mit zwei Turbokompressoren bzw. einem Schraubenkompressor sind in Bereich der Papierfabrik.

10 **Was ist Druckluft?**

Luft besteht aus mehreren Inhaltsstoffen, sie wird aber in drei Hauptbestandteile unterteilt:

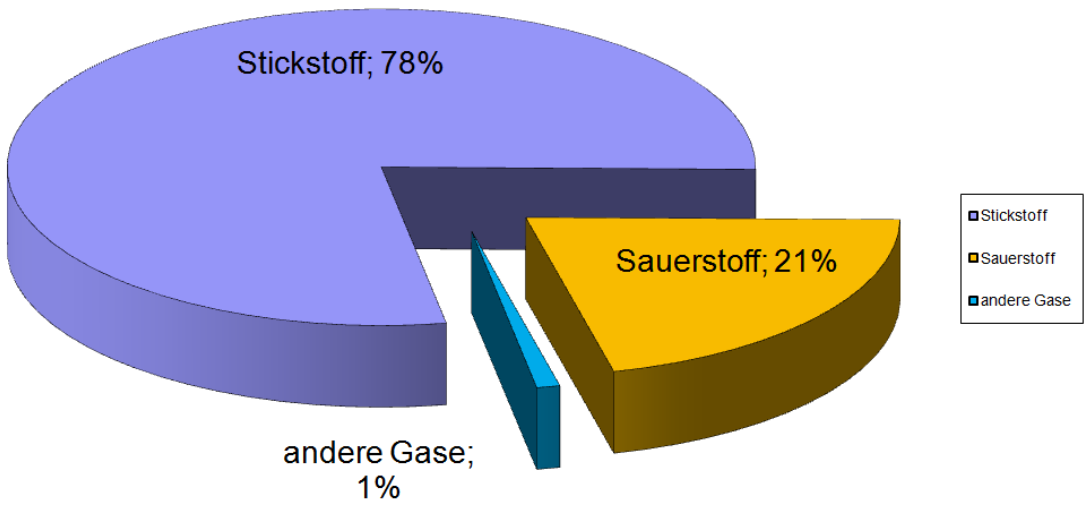


Abbildung 10-1 Zusammensetzung der Luft

Die Hauptbestandteile der Luft sind Stickstoff mit 78%, Sauerstoff mit 21% und andere Gase wie Kohlendioxyd und Argon mit 1%. Luft beinhaltet auch Feststoffe wie Staub oder Ruß. Luft kann je nach Temperatur einen gewissen Prozentanteil an Feuchtigkeit aufnehmen. Wenn die Luft Feuchtigkeit aufnimmt, spricht man von feuchter Luft. Steigt die Temperatur, nimmt auch die Möglichkeit zu, Wasserdampf aufzunehmen.

Der Taupunkt ist in der Drucklufterzeugung ein wichtiges Kriterium. Er gibt an, ab welcher Temperatur die Luft vollständig mit Wasserdampf gesättigt ist.

10.1 Druckluftqualität

Bei Neuanlagen ist die Qualität der Druckluft den Anforderungen des Betriebes anzupassen. Die Druckluftaufbereitung ist kostenintensiv, weshalb eine genaue Evaluierung der Anforderungen an die Druckluft erfolgen muss. Wenn bei der Auslegung der Luftqualität Fehler gemacht werden, kann es in der Produktion unter Umständen zu höheren Ausschussraten führen. Verschmutzungen in der Luft können auch Bauteile im Druckluftsystem beschädigen. Eine gute Qualität der Druckluft trägt maßgeblich zur Vorbeugung von Leckagen bei.

Es werden drei Störfaktoren in der Industrie berücksichtigt:

- Teilchengehalt
- Drucktaupunkt
- Ölkonzentration

Die Druckluft hat nach den Kompressoren meist nicht die benötigte Qualität. Die angesaugte Umgebungsluft ist verunreinigt, zu diesen Verunreinigungen in der Luft kommen noch der Abrieb und das Öl im Kompressor hinzu. Die Verunreinigungen in der Luft vermehren sich auf den Kubikmeter betrachtet nach der Komprimierung um ein Vielfaches.

Nimmt man 8m³ Umgebungsluft mit einem Verschmutzungsgrad von 100 Millionen Schmutzpartikel pro Kubikmeter und verdichtet diese auf 1m³ Druckluft, so entstehen 800 Millionen Schmutzpunkte pro Kubikmeter.

Die Verschmutzungen lassen sich in 3 Gruppen gliedern:

- Feststoffe
- Flüssigkeiten
- gasförmige Stoffe

Ein Teil der Verunreinigungen kann mit dem Ansaugluftfilter entfernen werden, dieser kann jedoch nur einen gewissen Prozentsatz der Verunreinigungen zurückhalten. Die danach im Kompressor entstehenden Schmutzpartikel kommen zu den vorhanden Verunreinigungen von außen noch hinzu. Dadurch ergibt sich folgende Gesamtbelastung:

1. Wasserdampf, Festpartikel, Gase und Flüssigkeiten, die mit der Luft aus der umliegenden Atmosphäre angesaugt werden,
2. Öl, das durch den Kompressor an die Druckluft abgegeben wird,
3. Festpartikel, die durch den Abrieb im Kompressor entstehen,
4. Gase, die im Kompressor erzeugt werden,
5. Feststoffe, die sich aus dem Rohr- und Kühlsystem absetzen.

10.2 Darstellung der Druckluftsituation im Werk

Um eine objektive Aussage über eine Einsparungsmöglichkeit treffen zu können, muss der aktuelle Zustand und Verbrauch der Druckluftanlage dargestellt werden. Dies geschieht in mehreren Schritten: Messung, Auswertung und Aufzeigung von möglichen Lösungen.

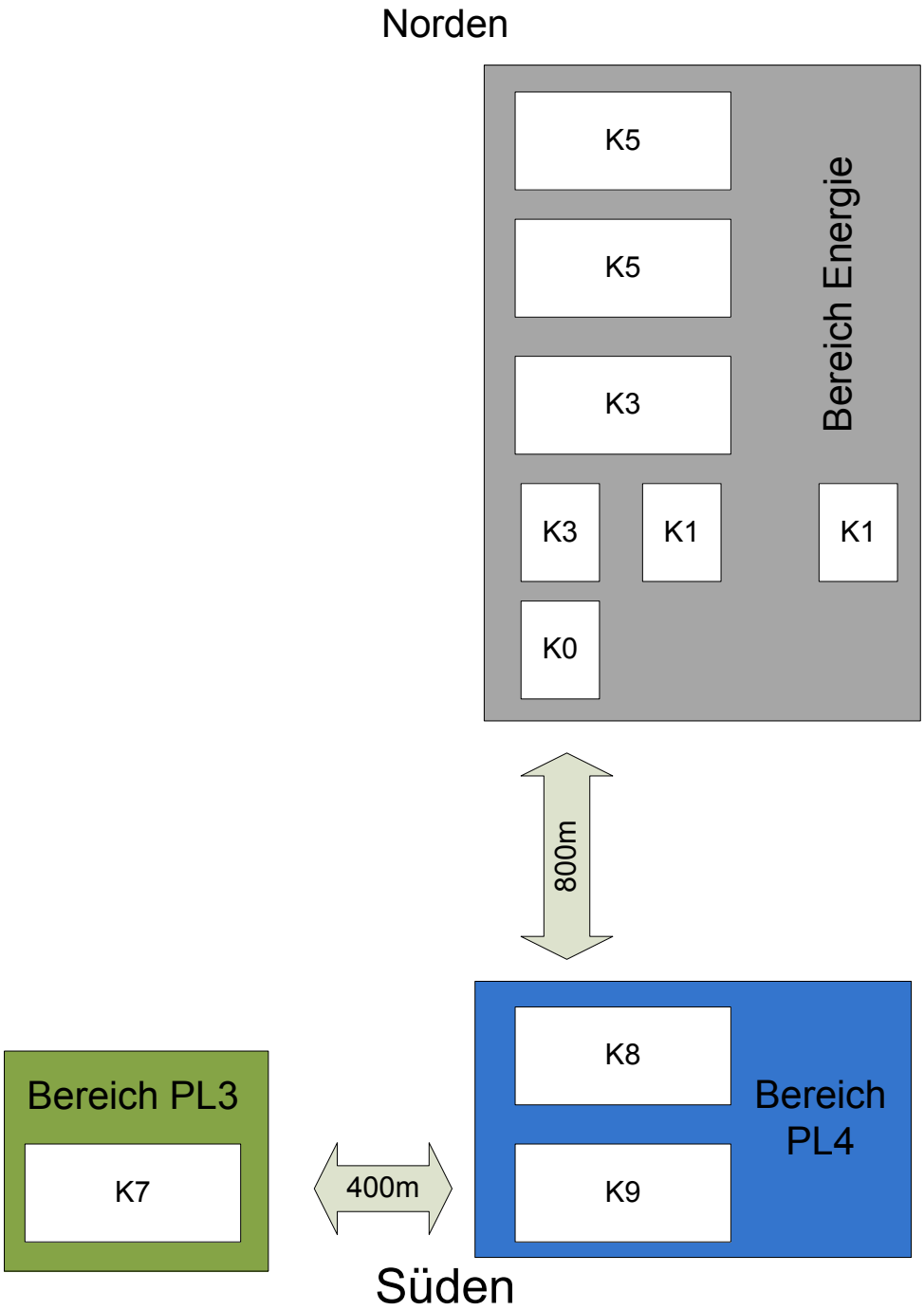


Abbildung 10-2 Orientierung der Kompressoren

10.2.1 Ermittlung des tatsächlichen Luftverbrauches

Der erste Schritt war die Ermittlung des aktuellen Luftverbrauches im gesamten Werk Gratkorn, um den Luftbedarf abschätzen zu können. Ich habe in Zusammenarbeit mit Atlas Copco eine Untersuchung der Drucklufterzeugung im Werk Gratkorn durchgeführt. Für die Erzielung eines aussagekräftigen Ergebnisses wurden alle Kompressoren einzeln gemessen. Der genaue Messaufbau ist im Anhang zu sehen. Auf der umseits angeführten Abbildung 10-3 Messaufbau ist eine verkleinerte Abbildung des Messaufbaus zu sehen. Diese Abbildung dient dazu, einen Überblick über die Messung zu erhalten. Die Dauer der Messungen belief sich auf vier Wochen. In die Messung sollten so viele Betriebszustände im Werk wie nur möglich einfließen. Während der vier Wochen des Messzeitraumes gab es mehrere geplante und ungeplante Papiermaschinenstillstände, auch in anderen Bereichen z.B. der Ausrüstung fanden Anlagenabstellungen statt. Die Abstellungen der Maschinen hatten unterschiedliche Auswirkungen auf unser Druckluftsystem. Kleinere Aggregate wie in der Ausrüstung sind im Verhältnis zu den Papiermaschinen auch bedeutend kleinere Druckluftabnehmer. Sie haben daher nicht so einen starken Einfluss auf das Druckluftsystem wie ein Abriss der Papierbahn auf der Papiermaschine. Nach so einem Abriss muss das Papier wieder durch die Papiermaschine „aufgeführt“ werden. Bei diesem Vorgang wird sehr viel an Druckluft benötigt.

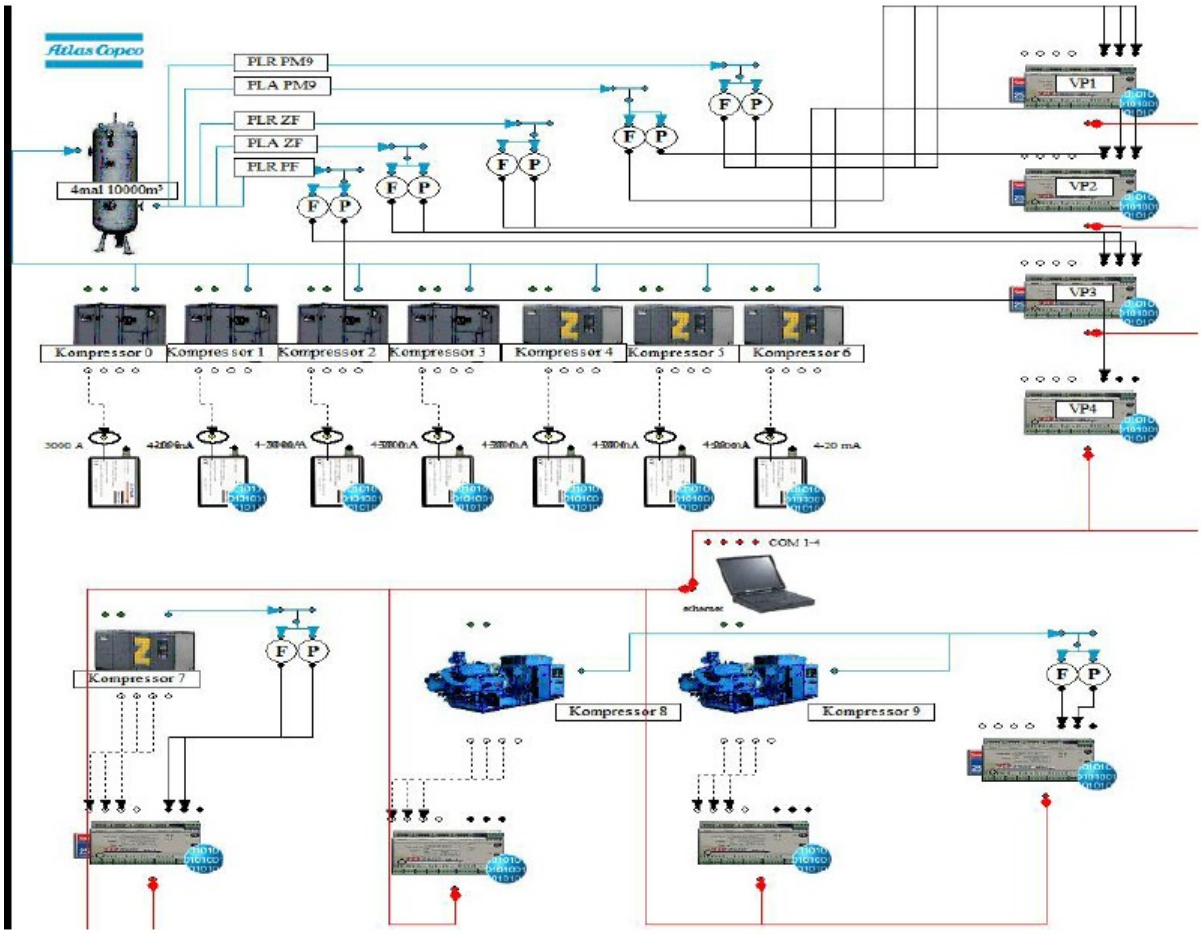


Abbildung 10-3 Messaufbau[2]

Aufgrund der hohen Anzahl von Versorgungsleitungen mussten zwei Leitungen separat gemessen werden (Abbildung 10-4 Separate Messung). Diese Messungen wurden über eine Wochen kontinuierlich durchgeführt, um sicher zu stellen, dass der Verbrauch in diesen Leitungen konstant ist. Es handelte sich bei den durch diese Leitungen versorgten Anlagen im Verhältnis zum Gesamtverbrauch um relativ kleine Verbraucher.

[2] Kreuzer Mario Atlas Copco Compressors; Kompressor System Energie Audit; Messzeitraum 03.07.2008 bis 10.07.2008 durchgeführt bei sappi Gratkorn, Brucker Straße 21

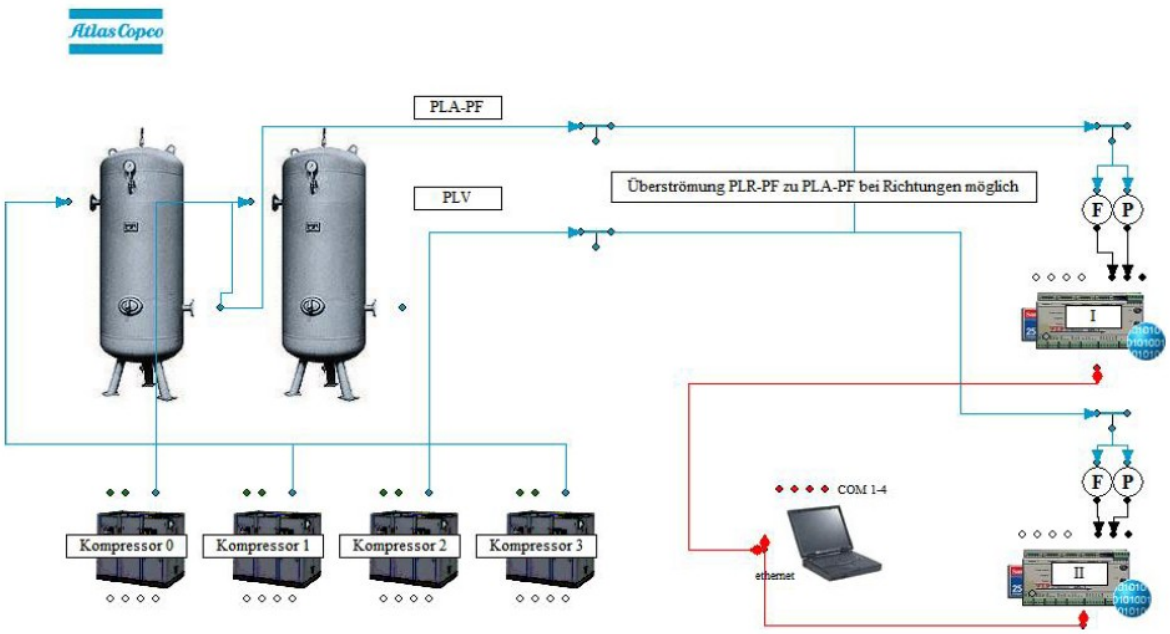


Abbildung 10-4 Separate Messung[3]

Der Verbrauch der separat gemessenen Leitungen lag im Schnitt bei 32,86 l/s Druckluft.

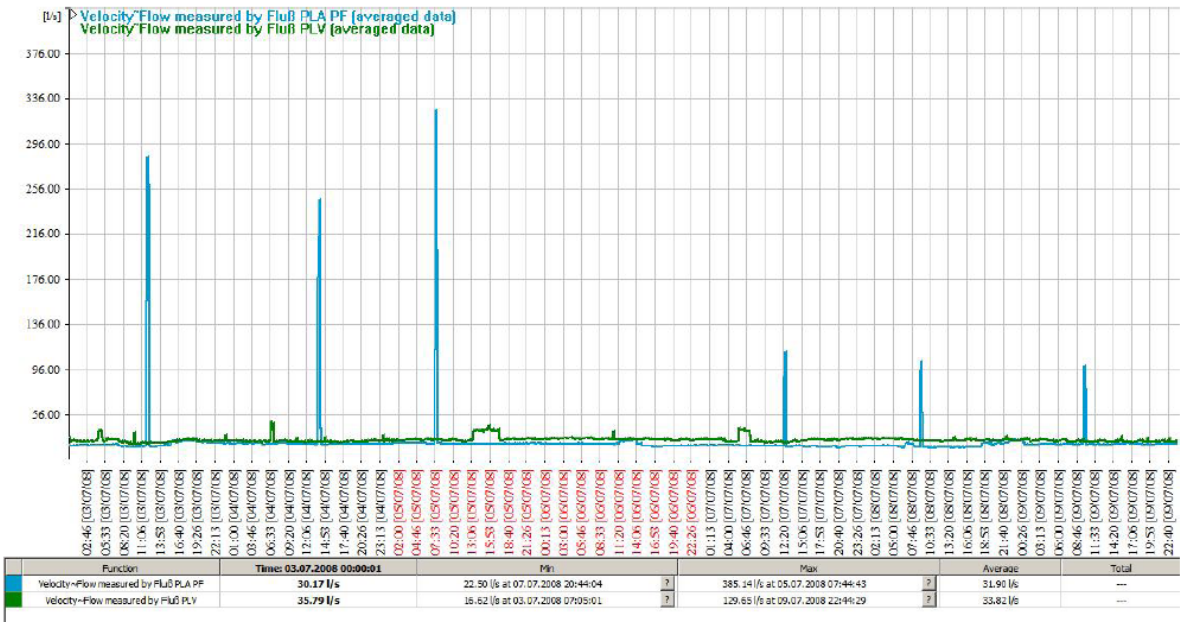
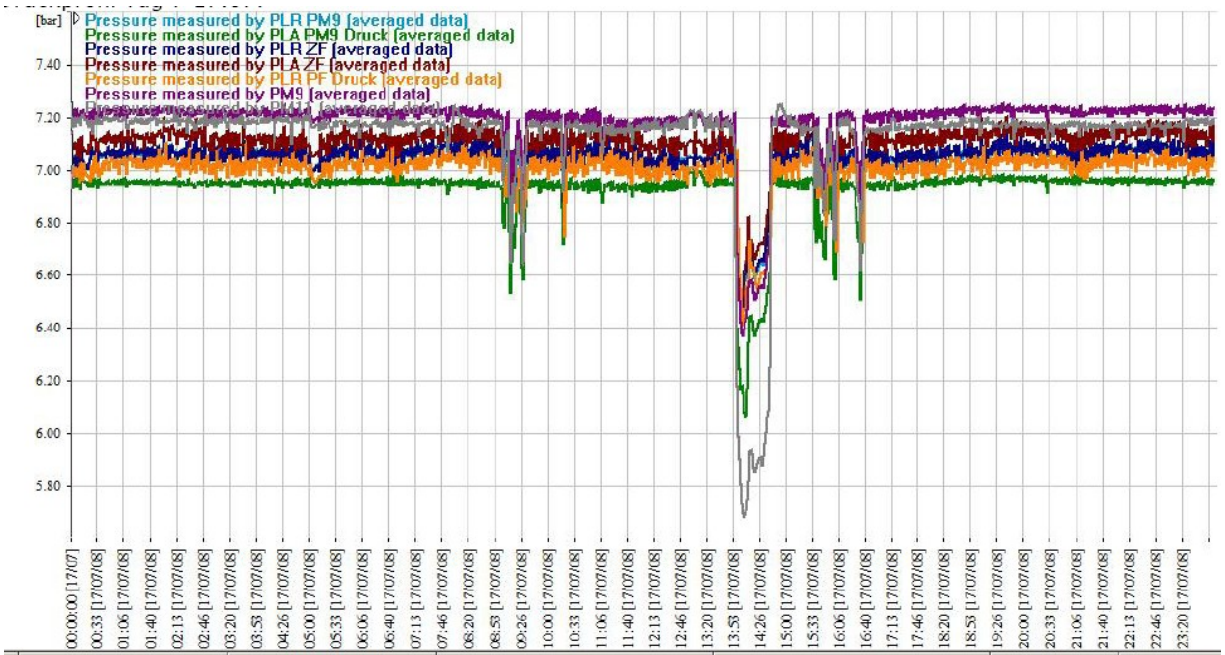


Diagramm 1 Separate Messung

[3] Kreuzer Mario Atlas Copco Compressors; Kompressor System Energie Audit; Messzeitraum 03.07.2008 bis 10.07.2008 durchgeführt bei sappi Gratkorn, Brucker Straße 21

Die spitzen Ausschläge, die im Diagramm 1 Separate Messung zu sehen sind, kamen nur sehr selten vor und hatten dadurch auf den durchschnittlichen Druckluftverbrauch keinen wesentlichen Einfluss.
Beim zweiten Teil der Messung wurde der Verbrauch in allen restlichen Leitungen gemessen. Der Messaufbau beinhaltete sieben „Flow and Pressure“ Transmitter. Der Aufbau ist auf der Abbildung 10-3 Messaufbau zu sehen. Diese Messung wurde über vier Wochen, ohne Unterbrechung, durchgeführt.

Kurz nach dem Start der Aufzeichnung gab es einen Ausfall beider Turbokompressoren. Der Druckeinbruch bei diesem Szenario zeigte uns, dass eine Reduzierung des Betriebsdruckniveaus zwecks Kostenreduktion schwer umsetzbar bzw. sehr riskant wäre, und damit als Lösungsvariante aus diesem Grund nicht mehr in Frage kommt.



Function	Time: 17.07.2008	Min	Max	Average	Total
Pressure measured by PLR PM9	7.14 bar	6.43 bar at 17.07.2008 14:02:41	7.17 bar at 17.07.2008 22:42:29	7.04 bar	---
Pressure measured by PLA PM9 Druck	7.00 bar	6.05 bar at 17.07.2008 14:07:36	7.02 bar at 17.07.2008 19:12:31	6.93 bar	---
Pressure measured by PLR ZF	7.11 bar	6.44 bar at 17.07.2008 14:02:42	7.18 bar at 17.07.2008 18:46:08	7.05 bar	---
Pressure measured by PLA ZF	7.13 bar	6.49 bar at 17.07.2008 14:02:31	7.25 bar at 17.07.2008 18:41:57	7.11 bar	---
Pressure measured by PLR PF Druck	6.99 bar	6.39 bar at 17.07.2008 14:05:03	7.13 bar at 17.07.2008 19:32:18	7.00 bar	---
Pressure measured by PM9	7.26 bar	6.36 bar at 17.07.2008 14:04:39	7.29 bar at 17.07.2008 18:44:32	7.18 bar	---
Pressure measured by PM11	7.20 bar	5.67 bar at 17.07.2008 14:06:44	7.28 bar at 17.07.2008 14:50:32	7.13 bar	---

Diagramm 2 Druckeinbruch

Der Druck im System sackte bei der Messung um 1,6 bar ab, als beide Turbokompressoren ausfielen. Die beiden Turbokompressoren befinden sich im Parterre der Papiermaschine 11; die Kompressoren sind somit im südlichen Bereich des Werks Gratkorn. Der Druckeinbruch war jedoch über das gesamte Druckluftnetz sofort zu erkennen. Der Druckverlust in der Leitung wurde immer geringer, desto weiter man im Druckluftnetz in den nördlichen Bereich des Werks kam. Der Betriebsdruck beträgt bei normalen Bedingungen 7,2 bar. Nach dem Ausfall beider Turbokompressoren fiel der Druck um 1,6 bar, sodass sich der Enddruck auf 5,6 bar einstellte. Die Messstellen befanden sich bei der Messung direkt nach den Erzeugern, aus diesem Grund wurde der Druckverlust in der Leitung noch nicht berücksichtigt.

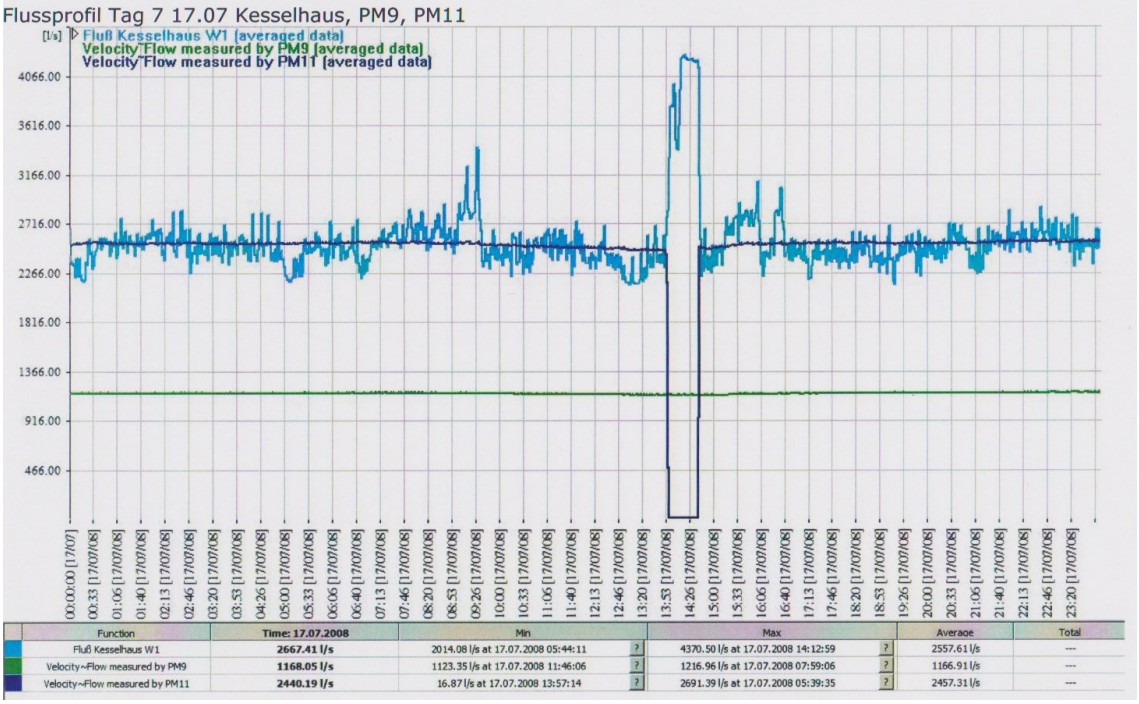


Diagramm 3 Flussprofil

Aufgrund des Ausfalls der Turbokompressoren änderte sich auch das Flussverhalten in den Rohrleitungen. Im normalen Betrieb ist das Flussverhalten in den Rohrleitung relativ konstant; es gibt nur geringe Schwankungen. Nach dem Ausfall war ein deutliches Ansteigen des Durchflusses bei den Kompressoren im Bereich Energie zu erkennen. Interessant war, dass der Kompressor 7 (PM9) keine Schwankungen beim Durchfluss aufwies.

Interessanterweise zeigte sich aber ein Verhalten im Energieverbrauch des Kompressors (Diagramm 5 Energieverlauf K7). Der rote Pfeil im nachstehend eingefügten Diagramm zeigt den Zeitraum, wo die beiden Kompressoren 8 und 9

stillgestanden sind. Die Energieaufnahme nahm in der Zeit des Stillstandes beim Kompressor 7 ab (Diagramm 5 Energieverlauf K7).

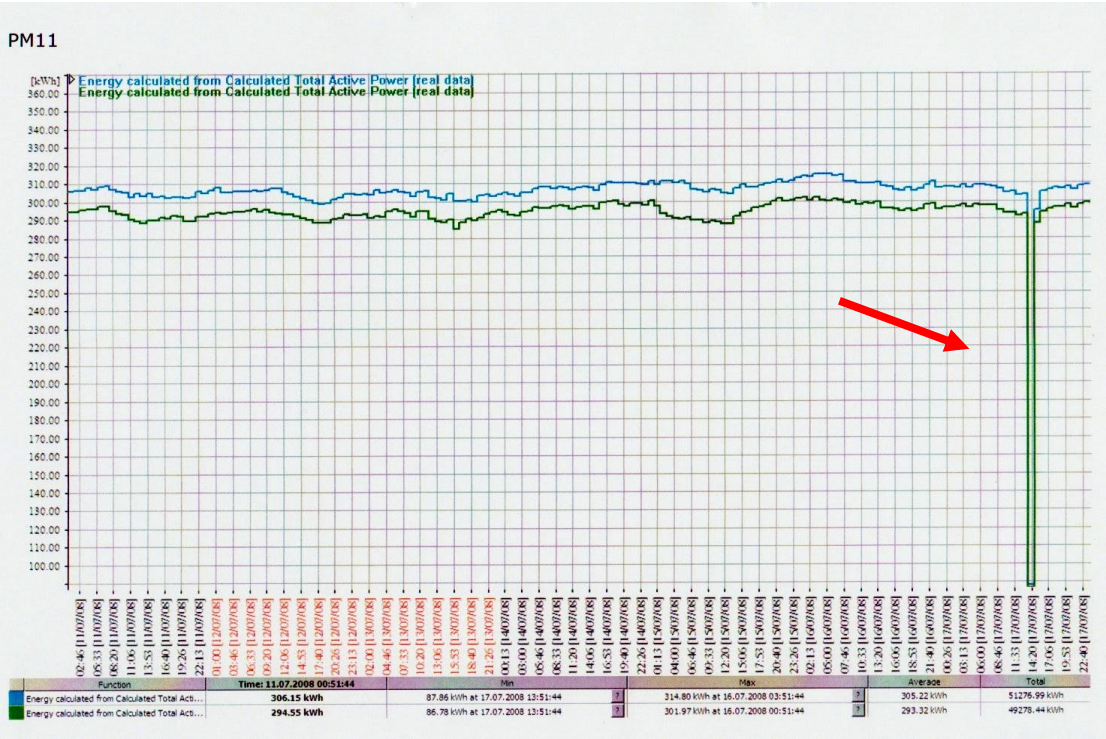


Diagramm 4 Energieverlauf K8 und K9

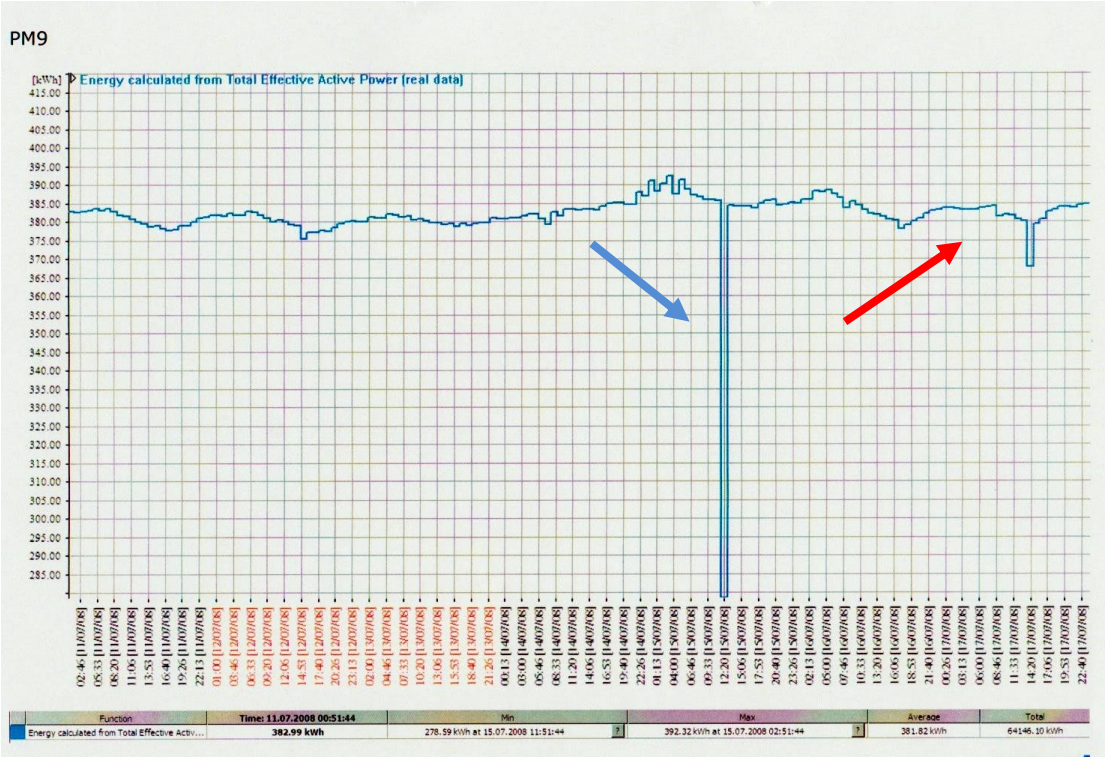


Diagramm 5 Energieverlauf K7

Bei den Kompressoren im Bereich der Energie war es umgekehrt; es stieg bei allen Kompressoren die Leistungsaufnahme und zusätzlich haben sich die Standby-

Kompressoren eins, zwei und drei hinzugeschaltet (Diagramm 6 Energieverlauf Bereich Energie). Leider konnte im Bereich der Energie nicht für jeden Kompressor der Durchfluss gemessen werden. Die Durchflussmessungen wurden nach den Drucklufttanks eingebaut, da es vorher aufgrund der Beruhigungsstrecke, die vor oder nach einem Rohrbogen benötigt wird, keine Möglichkeit gab.

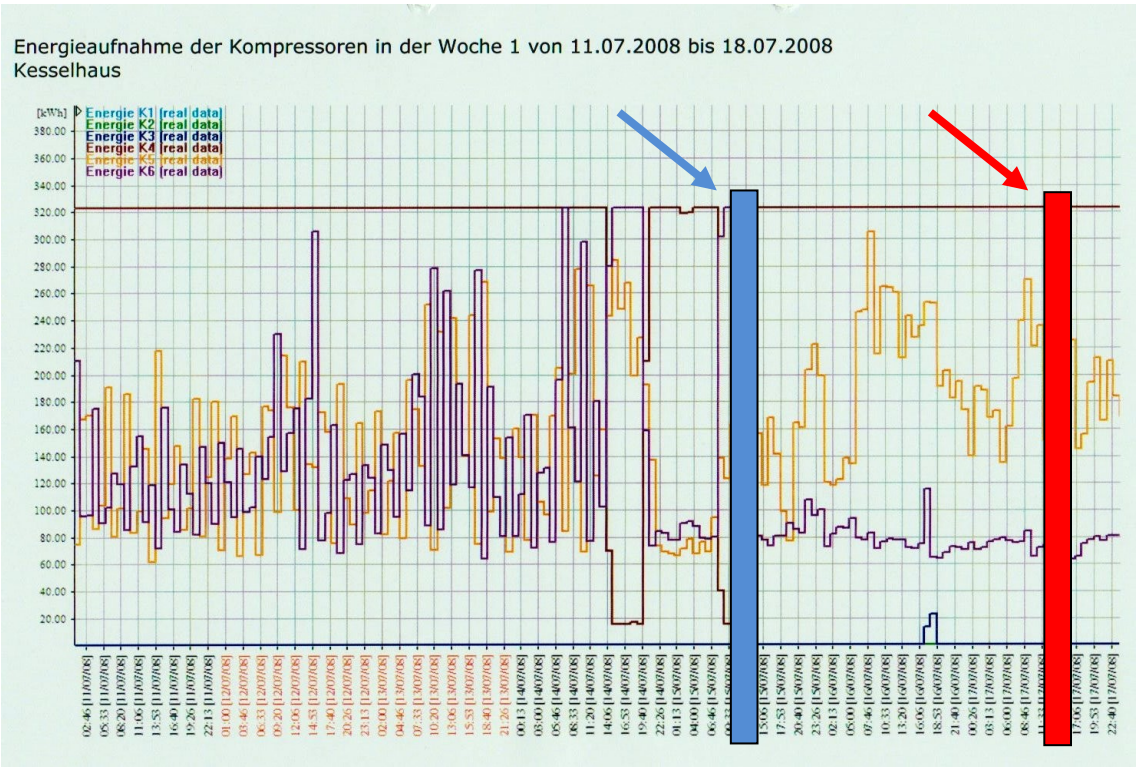


Diagramm 6 Energieverlauf Bereich Energie

Während des Messzeitraums gab es auch den Ausfall des Kompressors 7. Der blaue Pfeil zeigt den Ausfall auf den Diagrammen, Diagramm 5 Energieverlauf K7 und Diagramm 6 Energieverlauf Bereich Energie. Die Annahme, dass nur die Leitung PLA PM9 (Arbeitsluft PM9) und die Leitung PLR PM9 (Regelluft PM9) zur Papiermaschine führen, ist falsch. Der Anstieg des Durchflusses ist in allen Leitungen zu sehen (Diagramm 7 Durchflussmessung Ausfall K7). Nach dem Ausfall konnte am Diagramm abgelesen werden, welche Durchflüsse anstiegen. Sehr auffällig ist, dass der Durchfluss der Turbokompressoren gleich blieb. Beim Druck ist ein anderes Verhalten festzustellen (Diagramm 8 Druckverlauf Ausfall K7). Alle Drücke fielen ab. Am stärksten betroffen waren die Leitungen der PM9 und der PLA PM9. Diese beiden Leitungen fielen auf 6,72 bar und 9,63 bar ab. Bei diesem Ausfall wurden jedoch keine der Standby-Kompressoren gestartet (Diagramm 6 Energieverlauf Bereich Energie).

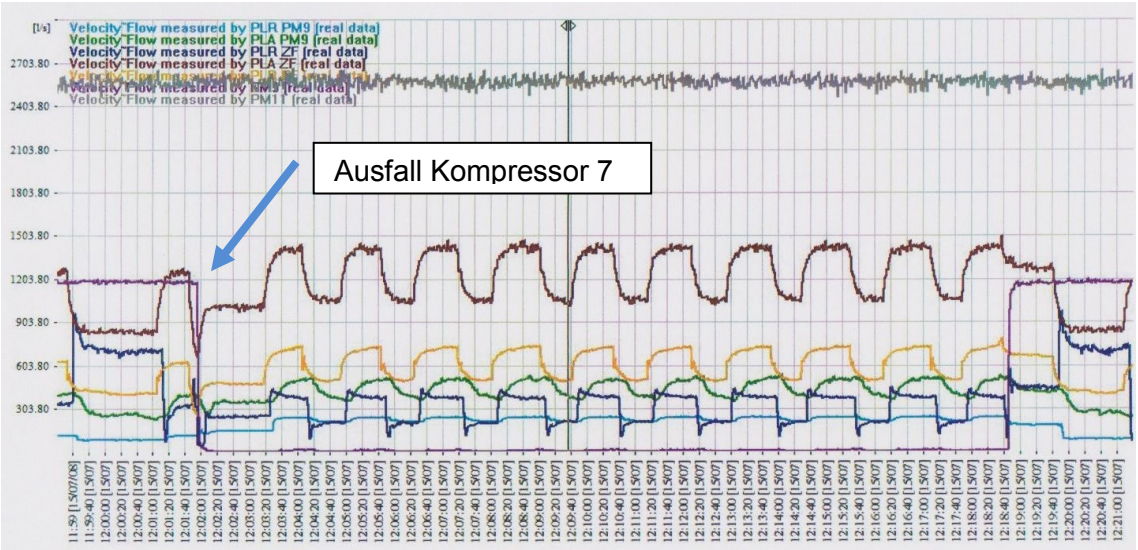


Diagramm 7 Durchflussmessung Ausfall K7

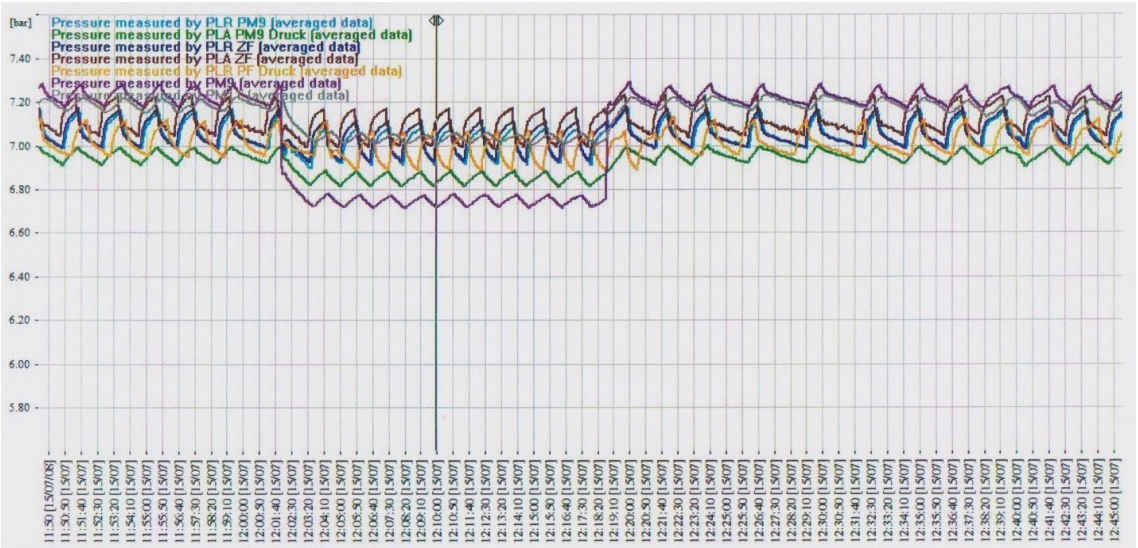


Diagramm 8 Druckverlauf Ausfall K7

10.3 Fazit

Bei der Erfassung des Ist-Zustandes ist zu erkennen, dass die beiden druckstärksten Kompressoren in der PL3 und der PL4 stehen. Somit gilt die Annahme, dass die im Normalfall überschüssige Druckluft von den Papiermaschinen in den nördlichen Bereich (Energie und Zellstofferzeugung) überströmt. Die drei Kompressoren im Bereich der Papiermaschinen liefern in Summe 3667 l/s, wobei die Kompressoren im Bereich Energie 2558 l/s liefern.

	Druck [bar]	Durchfluss [l/s]
PM9	7,21	1160,61
PM11	7,17	2507,12
PLA ZF	7,13	1048,34
PLR PM9	7,08	107,38
PLR ZF	7,08	530,98
PLR PF	7,04	519,5
PLA PM9	6,96	352,77

Tabelle 1 Drucküberſicht

Ein Ausfall der Turbokompressoren hatte den größten Druckverlust im System zur Folge. Die anderen Kompressoren konnten diesen Druckabfall und einen damit verbundenen Ausfall der Anlagen nur sehr knapp verhindern. Sollten in der jetzigen Situation die Turbokompressoren der Papiermaschine 11 ausfallen und diese im gleichen Zeitraum einen Abriss der Papierbahn haben, könnte das dazu führen, dass die Produktion den Betrieb erst wieder herstellen kann, wenn einer der beiden Turbokompressoren in Betrieb ist. Beim Aufführvorgang der Papiermaschinen, wo die Papierbahn wieder durch die Papiermaschinen geführt wird, wird sehr viel Druckluft benötigt.

Der Mindestdruck von diversen Aggregaten ist 4 bar, bevor sich die Sicherheitsventile automatisch schließen. Bei einem ungünstigen Zusammentreffen mehrerer Ereignisse kann eine Notabschaltung von einigen Aggregaten nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund ist bei dem jetzigen Rohrleitungssystem keine Druckabsenkung möglich.

10.4 Möglichkeiten Energie einzusparen

Welche Möglichkeiten können wir aus den erhaltenen Daten ableiten, um Energie in unsere Drucklufterzeugung einzusparen?

- Leckagensuche
- Mitarbeiter auf Drucklufterzeugungskosten sensibilisieren
- Änderung der Kompressorsteuerung
  - Leitsystem
  - Drehzahlregelung
- Planung eines neuen Rohrsystems

Welche Schritte können mit geringem Aufwand sofort ausgeführt werden und welche brauchen Vorbereitung und gewisse Voraussetzungen für die Umsetzung?

Um eine kontinuierliche Leckagensuche umzusetzen, sind keine großen finanziellen Mittel notwendig. Die Anschaffung des dafür benötigten Materials und die Organisation des Personals sind hier in einem relativ kleinen Rahmen mit großer Wirkung.

Um die Mitarbeiter mit dem Umgang von Druckluft zu sensibilisieren (und ihnen die Kosten der Erzeugung bewusst zu machen), müssen sie in einer kurzen Präsentation darauf aufmerksam gemacht werden, was die Erzeugung der Druckluft kostet.

Die Änderung der Steuerungen nimmt mehr Zeit in Anspruch und kann nur unter gewissen Umständen erfolgen. Als Beispiel können die Kompressoren nicht einfach abgestellt werden, um eine neue Steuerung einzubauen. Wie aus dem Bericht zuvor ergeht, wären diese Abstellungen immer mit einem Druckverlust verbunden und müssten deshalb genau geplant werden.

Die Planung eines neuen Rohrsystems ist der aufwendigste Teil in der Energieeinsparung, zumal sie eine umfangreiche Planung und einen werksweiten Stillstand erfordert, um die Rohrleitung an die Kompressoren anzuschließen.

10.5 Möglichkeiten und Potentiale zur Optimierung

In der Tabelle aus der aktuellen EU-Studie zum Thema „Energieeinsparmaßnahmen in Druckluftanlagen“ wird aus den Faktoren „Anwendbarkeit“ und „Effizienzgewinn“ das Gesamtpotential errechnet. Die Tabelle zeigt einen Überblick der Einsparungsmöglichkeiten und den daraus möglicherweise resultierenden Erfolg. Das eindeutig höchste Gesamtpotential hat dabei die Verminderung der Leckagenverluste. Es wird angenommen, dass es bei ca. 80% der Anlagen Verbesserungspotential mit wiederum ca. 20% Effizienzgewinn gibt.

Energieeinsparmaßnahme	**% Anwendbar-keit (1)**	**% Effizienz-gewinn (2)**	**% Gesamtpotential (3)**
Neuanlagen oder Ersatzinvestition			
Verbesserte Antriebe (hocheffiziente Motoren, HEM)	25%	2%	0,5%
Verbesserte Antriebe (drehzahlvariable Antriebe, ASD)	25%	15%	3,8%
Technische Optimierung des Kompressors	30%	7%	2,1%
Einsatz effizienter und übergeordneter Steuerungen	20%	12%	2,4%
Wärmerückgewinnung für Nutzung in anderen Anwendungen	20%	20%	4,0%
Verbesserte Druckluftaufbereitung (Kühlung, Trocknung und Filterung)	10%	5%	0,5%
Gesamtanlagenauslegung inkl. Mehrdruckanlage	50%	9%	4,5%
Verminderung der Druckverluste im Verteilsystem	50%	3%	1,5%
Optimierung von Druckluftgeräten	5%	40%	2,0%
Anlagenbetrieb und Instandhaltung			
Verminderung der Leckagenverluste	80%	20%	16,0%
Häufiger Filterwechsel	40%	2%	0,8%
		Summe (4)	32,9%

Legende: (1) % DLA in denen diese Maßnahme anwendbar und rentabel ist
(2) % Energieeinsparung des jährlichen Energieverbrauchs
(3) Einsparpotenzial = Anwendbarkeit x Effizienzgewinn
(4) Es ist zu beachten, dass die gesamte Einsparung kleiner als die Summe der Einsparungen der einzelnen Maßnahmen ist.[4]

Tabelle 2 Energieeinsparmaßnahmen (EU-Studie)

[4] Karl Heinz Feldmann (2003): Optimale Druckluftverteilung. So spart man Energie und Kosten in Druckluftleitungsnetzen. ISBN 3-8169-2062-4

11 **Kontinuierliche Leckagensuche**

In größeren Betrieben ist eine kontinuierliche Leckagensuche empfehlenswert. In kleinen Betrieben ist es wichtig, die Druckluftverluste nicht zu vernachlässigen. Leckagen machen keine Pause und in Betrieben, die 24 Stunden am Tag produzieren, spürt man das besonders.
Es sollte ein System aufgebaut werden, das die regelmäßige Kontrolle und die nachfolgenden Reparaturen in Form von Wartungsrouten beinhaltet. Ein wichtiger Teil dabei ist die Dokumentation von Leckagen, diese wird benötigt, um einen Überblick über die Gesamtsituation zu bekommen und nachhaltige Verbesserungen zu erzielen. Diese Dokumentation dient auch dazu, Schwachstellen zu entdecken. Entstehen Leckagen wiederkehrend an derselben Stelle, kann man das in einer guten Dokumentation leicht nachvollziehen.

Die Umsetzung der kontinuierlichen Leckagensuche erfolgt in zwei Schritten, Entdeckung und Reparatur.

Nachfolgend wird meine Einführung der kontinuierlichen Leckagensuche im Werk Gratkorn beschrieben. Als Suchmethode für die Leckagensuche kam aufgrund der Größe des Werkes nur ein Ultraschallmessgerät in Frage.
Das Werk Gratkorn ist in fünf Bereiche unterteilt (Abbildung 9-2 Werksübersicht (Bereiche)). Die Bereiche und je nach Größe die Produktionsanlagen selbst sind nochmals in kleinere, überschaubare Abschnitte, in unserem Fall Stockwerke, aufgeteilt. Alle Anlagen auf einmal zu untersuchen wäre sehr zeitaufwändig und nicht zielführend.
In jedem der Bereiche gibt es kontinuierlich geplante Stillstände der Produktionsmaschinen. Diese Stillstände haben einen zyklischen Abstand. Es stehen selten zwei Maschinen geplant zum selben Zeitpunkt still. Die Leckagensuche in einem Abschnitt sollte ungefähr zwei Wochen vor dem geplanten Stillstand der jeweiligen Produktionsanlagen erfolgen. Das gewährleistet, dass eventuell benötigte Teile für den Stillstand rechtzeitig bestellt oder gefertigt werden können.

In den nachfolgenden Kapiteln wird insbesondere die Entstehung von Leckagen, die erforderliche Dokumentation sowie die notwendige Reparatur beschrieben.

11.1 Rohrleitungsnetz

Das Druckluftnetz im Werk Gratkorn wurde in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich erweitert und ausgebaut. Im Laufe der Jahre entstanden auch immer wieder nicht dokumentierte Stichleitungen von der Hauptleitung. Dieser *„Wildwuchs“* der Leitungen im Netz hatte zur Folge, dass es keine lückenlose Dokumentation gibt. Die Abmessungen der einzelnen Leitungen sind zum Großteil auch unbekannt. Wenn Probleme auftreten, ist es erforderlich, die Situation vor Ort zu begutachten.

Die *Abbildung 11-1 Rohrleitung Rohrtrasse ZF* zeigt die verlegten Leitungen auf den Rohrtrassen.

Abbildung 11-1 Rohrleitung Rohrtrasse ZF

Es ist äußerst schwierig, den Überblick in diesem *„Leitungs-Dschungel*“ zu behalten (*Abbildung 11-2 Rohrleitung Rohrtrasse ZF*). Von den Hauptleitungen führen immer wieder Abzweigungen ab, die teilweise nur schwer oder oft gar nicht sichtbar sind.

Nicht erkennbar auf den Bildern ist die teilweise schlechte Ausleuchtung. Die Rohrtrassen sind abschnittsweise nur mit einer Notbeleuchtung versehen. Die schlechte Beleuchtung erschwert eine Routinesichtkontrolle oder Vorortbegutachtung der Leitungen.

Abbildung 11-2 Rohrleitung Rohrtrasse ZF

11.2 Entstehung von Leckagen

Undichtheiten am Druckluftsystem können unterschiedliche Ursachen haben.

11.2.1 Alterung der Materialien

Jedes Bauteil unterliegt einer natürlichen Alterung. Diese natürliche Alterung kann durch äußere Einflüsse wie zum Beispiel Hitze, Feuchtigkeit und UV-Strahlung beschleunigt werden. Nach einem gewissen Grad der Alterung beginnen Materialien zu versagen, was sich in einem Druckluftsystem durch Undichtheiten bemerkbar machen kann. Edelstahl- und Aluminium-Bauteile sind davon nicht so stark betroffen, wie Bauteile aus Kunststoff. Es ist wichtig zu beachten, ob die defekten Teile permanent oder nur sporadisch mit Druck beaufschlagt sind. Teile die 24-Stunden unter Druck stehen, können auch 24 Stunden Druckluft verlieren, deshalb ist der Bereich, der ständig unter Druck steht, genauer zu betrachten, als der Bereich der nur bei Schaltvorgängen mit Druck beaufschlagt wird.

11.2.2 Verschmutzte bzw. unreine Luft

Wird Druckluft schlecht aufbereitet, kann das zu großen Schäden bis hin zu einem Totalausfall bei den Verbrauchern führen. Wird die Luft nicht von Feststoffen und Flüssigkeiten gereinigt, verursacht das einen erhöhten Verschleiß der Bauteile und Leitungen.

Feststoffe:

Feststoffanteile führen zu einem erhöhten Verschleiß in Pneumatikanlagen. Verstärkt wird dieser Effekt, wenn sich zusätzlich Öl oder Fett mit den Feststoffen vermischt. Diese Komponenten bilden eine Art Schleifpaste, die sich in den Bauteilen festsetzt. Wenn sich dieses Gemisch z.B. in einem Druckluftzylinder absetzt, wird die Kolbendichtung einem sehr starken Verschleiß ausgesetzt und es kommt zu einem verfrühten Bauteilausfall. Dieses Problem tritt bei allen beweglichen Teilen auf. Bei Ventilen kann es dazu führen, dass sich die Feststoffe in den Dichtungssitzen ablagern. Dieses Phänomen kommt besonders oft bei Ventilen vor, die eine niedrige Schaltfrequenz haben. Es kann sich daher langsam eine Ablagerung aufbauen ohne durch die Betätigung der Ventile mechanisch gelöst zu werden. Wenn dann wieder ein Schaltvorgang erfolgt, kann das Ventil klemmen, oder wenn es ein Nadelventil ist, nicht mehr ganz schließen. Zusätzlich kommt noch der Effekt von Verwirbelungen im Ventil

hinzu. Dadurch bilden sich in Bereichen, wo durch die Verwirbelung die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt, leichter Ablagerungen.

Flüssigkeiten

In der Druckluft kann es zur Ansammlung von Flüssigkeiten, vor allem von Wasser und Öl, kommen. Die aus der Atmosphäre angesaugte Luft enthält Wasserdampf. Beim Entspannen bzw. Abkühlen der komprimierten Luft kondensiert der Wasserdampf und bleibt in Form von Wasser im System, was zu Korrosion und Vereisung der Bauteile und zu Problemen mit dem Endprodukt führen kann. Auch die Möglichkeit eines Wasserschlages im System besteht.

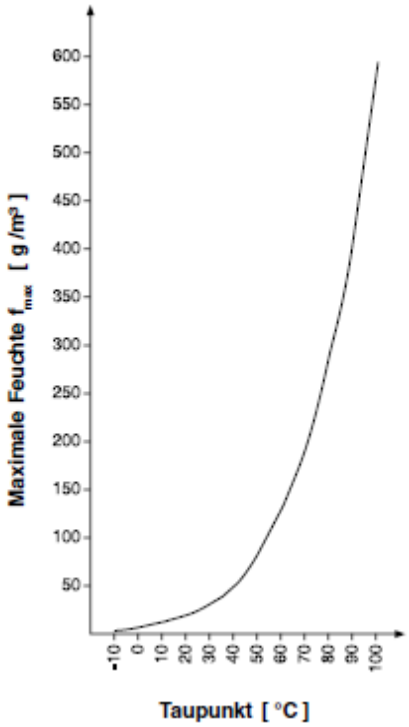


Abbildung 11-3 Taupunkt[5]

[5] Erwin Ruppelt (Hrsg.) 2003. Druckluft Handbuch 4. Auflage. ISBN 3-8027-2548-4

In der Umgebungsluft befinden sich auch Spuren von Öl, wobei der Hauptanteil aus dem Verdichtungsraum von ölgeschmierten Kompressoren stammt. Es ist unvermeidlich, dass die Luft im Verdichtungsraum Öl aufnimmt. Bei ölfreien Kompressoren wird kein Öl im Verdichtungsraum aufgenommen, trotzdem befindet sich Öl in der bereits angesaugten Luft. Je nach Aufstellungsort sind die Belastungen unterschiedlich. In einer Produktionshalle, in der sehr viel mit Kühl- und Schmiermitteln gearbeitet wird z.B. in der Zerspanungstechnik, ist die Belastung durch den Ölnebel, der sich aus dem Schmiermittel bildet, sehr groß. Ein geringer Anteil an Öl beeinträchtigt nicht die Funktion der Bauteile, es können jedoch Fehler beim Endprodukt entstehen.

Messung der Verschmutzung

Gemessen werden:

1. Feststoffe
2. Wasser
3. Öl bzw. Öldampf.

Feststoffanteil in der Luft

Feststoffe können auf verschiedene Arten gemessen werden.

Es gibt z.B. die Möglichkeit eines Kaskadenimpaktors (Abbildung 11-4 Teilchenzähler), welcher bei hohem Druck und hoher Temperatur einsetzbar ist.

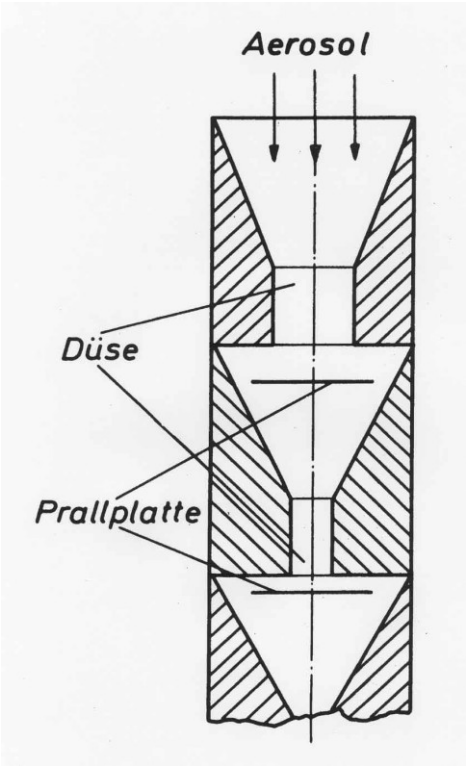


Abbildung 11-4 Teilchenzähler

Zwei weitere Möglichkeiten der Feststoffmessung sind ein Teilchenzähler und ein Lichtdispersionsphotometer. Diese beiden Anwendungen werden im Normalfall nur unter Umgebungsdruck durchgeführt.

Bei den Probenahmen muss darauf geachtet werden, dass sie nur in beruhigten Bereichen der Rohrleitung und mit gleichem Druck und gleicher Strömungsgeschwindigkeit angewendet werden. Man nennt diesen Zustand auch isokinetisch.

Bestimmung des Wassergehaltes

Die Bestimmung von Feuchtigkeit in der Luft erfolgt mit Hilfe eines Psychrometers (Abbildung 11-5 Psychrometer), oder mit Hilfe von elektronischen Feuchtigkeitsmessern nach ISO 7183. Weiters ist es möglich, mit piezoelektrischen Sorptionsluft-Feuchtigkeitsmessern die Feuchtigkeit in der Luft zu bestimmen.

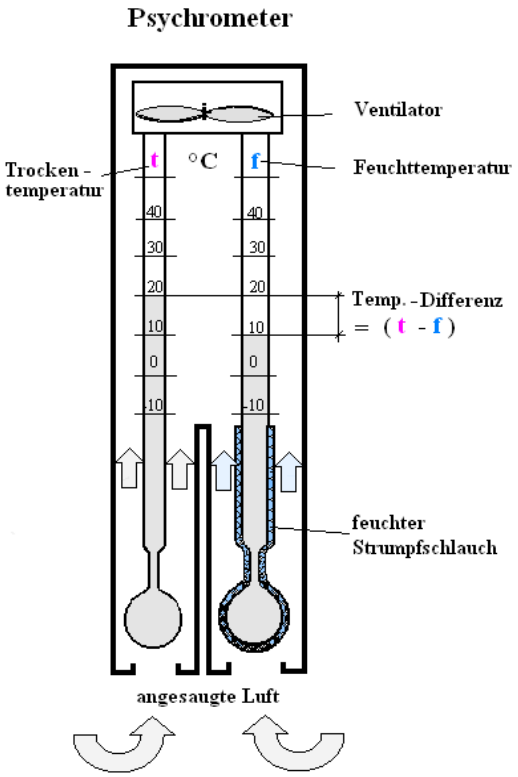


Abbildung 11-5 Psychrometer

Bestimmung des Ölgehaltes

Öl kommt in Form von Dampf, Aerosol oder Flüssigkeit in der Luft vor.

Die Bestimmung des flüssigen Öl-Anteiles in der Luft ist mit der Absorptionsspektroskopie möglich.

Der Öldampfgehalt der Luft kann mit folgenden Methoden gemessen werden:

- Messung mit gasgeladenem Infrarotanalysator
- Messung mit Flammen-Ionisations-Analysator
- Oxidation der Kohlenwasserstoffe zu Kohlendioxid, nach der Oxidation kann man mit den klassischen chemischen Methoden (Gaschromatographie, Infrarotgeräte und Adsorptionsverfahren) bestimmt werden.

Mit diesen Messungen der Verunreinigungen lassen sich die Werte der Luftverschmutzung bestimmen. Mit diesen Werten kann bestimmt werden welche Luftqualität nach ISO 8573-1 vorliegt (siehe Tabelle 3 Qualitätsklassen nach ISO 8573 Norm für Spezifikation der Luftqualität am Anwendungsort).

ISO 8573-1 Klasse	Feststoffe / Staub						Feuchtigkeit	Gesamt-Ölgehalt
	max. Teilchenzahl pro m³ von Partikeln mit d [µm]				µm	mg/m³	Drucktaupunkt/ (x=Wasseranteil in g/m³ flüssig)	mg/m³
	≤ 0,1	0,1< d ≤ 0,5	0,5< d ≤ 1,0	1,0< d ≤ 5,0				
0	nach Betreibervorgabe							
1	-	100	1	0	-	-	≤ -70 °C	≤ 0,01
2	-	100.000	1.000	10	-	-	≤ -40 °C	≤ 0,1
3	-	-	10.000	500	-	-	≤ -20 °C	≤ 1,0
4	-	-	-	1.000	-	-	≤ +3 °C	≤ 5,0
5	-	-	-	20.000	-	-	≤ +7 °C	-
6	-	-	-	-	≤ 5	≤ 5	≤ +10 °C	-
7	-	-	-	-	≤ 40	≤ 10	$x \leq 0,5$	-
8	-	-	-	-	-	-	$0,5 \leq x \leq 5,0$	-
9	-	-	-	-	-	-	$5,0 \leq x \leq 10,0$	-

Tabelle 3 Qualitätsklassen nach ISO 8573[6]

[6] Erwin Ruppelt (Hrsg.) 2003. Druckluft Handbuch 4. Auflage. ISBN 3-8027-2548-4

12 **Vorbeugung von Leckagen**

Um Leckagen vorzubeugen, ist eine gute Luftaufbereitung bzw. Luftreinigung zielführend. Je weniger Feststoffe und Flüssigkeiten in der Luft sind, desto länger ist die Lebensdauer der Bauteile. Die Luftaufbereitung ist somit unumgänglich. Grobe Verschmutzungen können durch eine gute Rohrleitungsführung abgeschieden werden. Die richtige Dimensionierung ist dabei einer der wichtigsten Hauptpunkte. Die Strömungsgeschwindigkeit von Druckluft sollte im Bereich des Kompressorraumes 2 bis 3 m/s nicht überschreiten, das entspricht einem Differenzdruck von 0,01 bar. Die Ringleitung und somit die Hauptleitung sollte einen Druckabfall von 0,03 bar nicht übersteigen. Bei diesen Fließgeschwindigkeiten können sich grobe Verunreinigungen bereits im Leitungssystem absetzen. Mit dem richtigen Gefälle und, Schwanenhälsen bei den Abgängen in der Hauptleitung wird der abgesetzte Schmutz und die sich bildende Feuchtigkeit kontrolliert zu einem Ablassventil befördert, um dort in regelmäßigen Abständen abgelassen zu werden.

Für eine wirklich gut funktionierende Druckluftanlage sind Filtersysteme unverzichtbar.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Luft bzw. Druckluft von Verschmutzungen zu reinigen. Diese Aufbereitung kann in vier Bereiche, je nach Anforderung, durchgeführt werden:

1. vor dem Kompressor (Ansaugluft)
2. direkt nach dem Kompressor (Druckluft)
3. im Rohrleitungssystem (Druckluft)
4. vor dem Verbraucher bzw. am Ende der Leitung (Druckluft)

12.1 Ansaugluft

Die Ansaug- bzw. Kühlluft sollte keine großen Verschmutzungen aufweisen. Der Verschmutzungsgrad der angesaugten Luft trägt maßgeblich zu den Standzeiten der Kompressoren bei. Größere Druckluftanlagen, die in einem eigenen „sauberen“ Kompressorraum stehen, saugen sauberere Luft an, als kleine Kompressoren, die direkt in den Arbeitshallen aufgestellt sind.
In Kompressorräumen wird die Ansaug- und Kühlluft bereits durch Filtermatten in den Kompressorraum gesaugt. Oft werden dafür Taschenfilter (Abbildung 12-1 Taschenfilter) verwendet. Sie sind leicht zu tauschen und haben im Verhältnis zu ihrer Größe eine sehr große Filteroberfläche.

Abbildung 12-1 Taschenfilter

Bei Kompressoren, die direkt in den Arbeitshallen aufgestellt sind, werden sogenannte Ansaugluftfilter eingesetzt, welche für die Luftzufuhr des Kompressors sorgen und die Feststoffe in der angesaugten Luft herausfiltern. Bei Kompressoren, die in einer Produktionshalle stehen, ist es nicht möglich, die Umgebungsluft „sauber“ zu halten. Aus diesem Grund werden die Kompressoren mit einem Wirrfaservlies ausgestattet. Dieses Vlies dient dazu, um die vom Kompressor angesaugte Luft zu reinigen. Der Luftstrom wird durch den gesamten Kompressor gesaugt und dient zur Kühlung des Aggregates. Durch die Verwendung von Ansaugluftfiltern werden die Reinigungsintervalle vergrößert und der Druckluftfilter entlastet.

Die gebräuchlichsten Ansaugluftfilter sind die Oberflächenfilter (Abbildung 12-2 Oberflächenfilter (Patronen)).

Diese Filter sind in unterschiedlichen Formen (rund, rechteckig, oval), Qualitäten und Materialien (Zellulose, Synthetik, Glas- Polyester) erhältlich. Der Einsatzort, die vorhandene Güte der Luft sowie die geforderte Güte der Druckluft bestimmten die Auslegung der Luftfilter. Die Filter werden direkt an der Ansaugöffnung des Kompressors angebracht. Die Montage der Filter ist meistens so ausgeführt, dass kein Werkzeug für den Tausch der Filterpatronen benötigt wird.

Abbildung 12-2 Oberflächenfilter (Patronen)

Nassluftfilter (Abbildung 12-3 Nassluftfilter) kommen bevorzugt bei kleinen Kompressoren zum Einsatz, die nur niedrige Luftqualität liefern müssen. Die Einsätze bestehen meistens aus Metall, sind ölgetränkt und halten aufgrund ihrer Ölschicht den Schmutz zurück. Der Nachteil dieses Filters ist die schnelle Zunahme des Durchflusswiderstandes. Er muss deshalb öfters gereinigt oder getauscht werden. Die Montage erfolgt wie bei den Filterpatronen direkt am Ansaugstutzen.

Abbildung 12-3 Nassluftfilter

12.2 Die Reinigung der Druckluft direkt nach dem Kompressor

Die Reinigung der Druckluft nach dem Kompressor kann durch unterschiedliche Methoden erfolgen. Dies ist jedoch abhängig vom Aufbau der Druckluftanlage. Es gibt Anlagen, wo der Kompressor die Druckluft direkt in den Druckluftkessel fördert. Bei diesem Aufbau können sich im Kessel bereits die größeren Verschmutzungen absetzen. Wenn eine höhere Luftqualität gefordert wird, ist es unumgänglich, direkt nach dem Kompressor einen Filter nachzuschalten. Es besteht auch noch die Möglichkeit, einen Trockner, der bei sehr vielen Anwendungen wie z.B. Papierproduktion erforderlich ist, einzubauen.

Trockner können vor oder nach dem Druckluftkessel eingebaut werden.

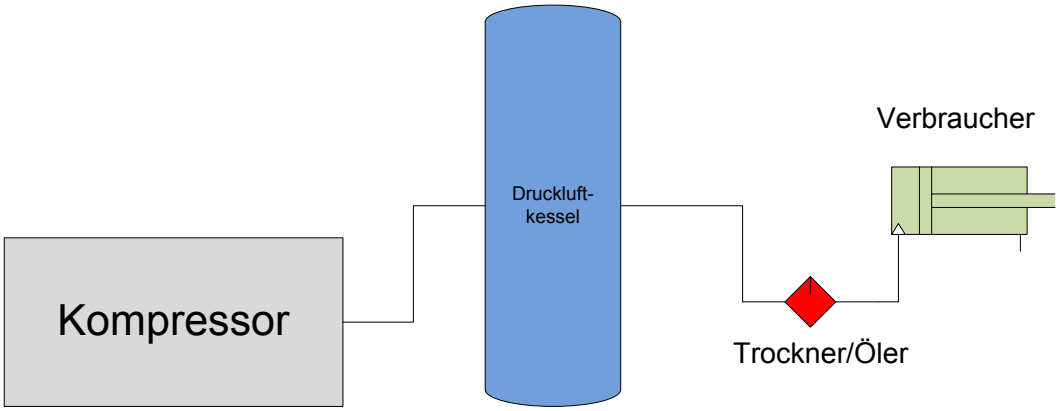


Abbildung 12-4 Trockner nach Druckluftkessel

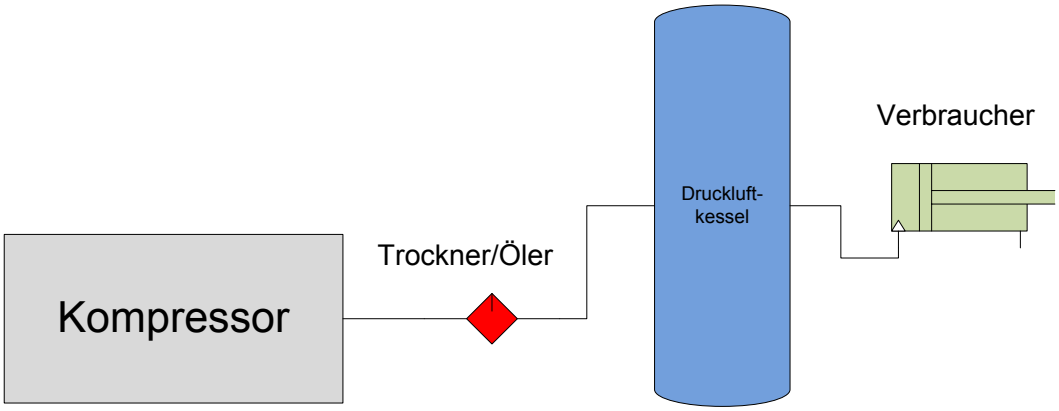


Abbildung 12-5 Trockner vor dem Druckluftkessel

12.2.1 Vor- und Nachteile der Trockner vor dem Druckluftkessel

Vorteile:

- immer gleiche Druckluftqualität
- bei schlagartiger Belastung gibt es keine Engpässe von Druckluft
- im Kessel befindet sich getrocknete Luft

Nachteile:

- gesamte Druckluft muss getrocknet werden
- große Kondensatmengen
- bei Kolbenkompressoren starke Belastung der Trockner (Pulsation)
- große Dimensionierung der Trockner notwendig, da die Anlage für die Gesamtleistung ausgelegt sein muss

Verwendungszweck

Die direkte Nachschaltung eines Trockners nach dem Kompressor wird bevorzugt dort verwendet, wo schlagartig große Mengen abgenommen werden. Die Qualität darf unter Lastschwankungen nicht beeinflusst werden. In der Papierindustrie ist das notwendig, um z.B. bei Papierabrissen den dadurch verursachten schnellen und hohen Verbrauchsanstieg zu kompensieren, ohne dabei Qualitätseinbußen bei der Druckluft zu haben.

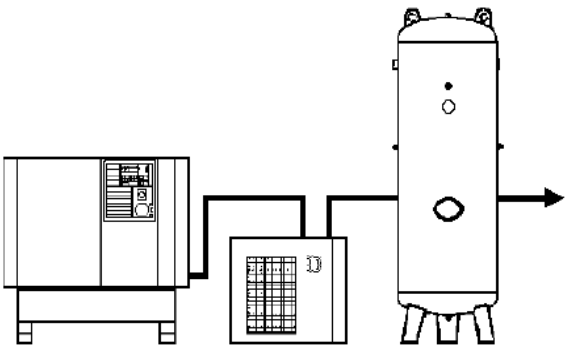


Abbildung 12-6 Trockner vor dem Kompressor

12.2.2 Vor- und Nachteile der Trockner nach dem Druckluftkessel

Der Einbau des Trockners nach dem Druckluftkessel bewirkt, dass sich die Luft im Kessel beruhigen kann. Das bedeutet, die Druckluft kann im Kessel kondensieren und Feststoffteile absetzen.

Vorteile

- Teilstrommenge möglich (günstigere Investitionskosten)
- teilweise Kondensat bereits im Kessel ausgefallen (geringere Belastung für den Trockner)

Nachteile

- bei schlagartiger Belastung bricht der Drucktaupunkt zusammen → Kondensatbildung im restlichen Druckluftsystem
- Kondensat in allen Leitungen und Druckluftbehältern vor dem Trocknen → Korrosion

Wenn nur Teilströme der Druckluft mit höherer Qualität benötigt werden, ist diese Variante ausreichend. Für diese Variante sprechen in erster Linie die niedrigen Investitionskosten.

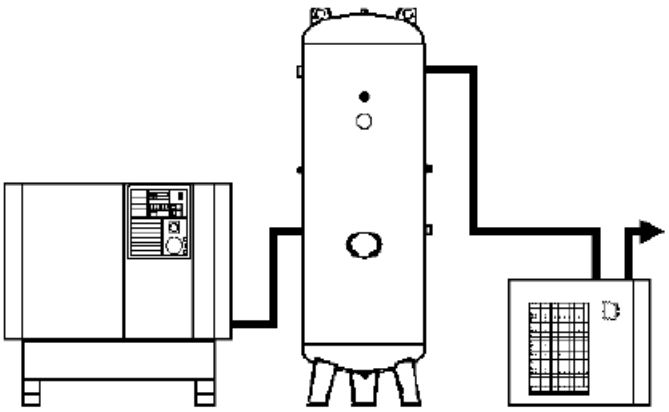


Abbildung 12-7 Trockner nach dem Druckluftkessel

12.2.3 Aufbereitung im Rohrleitungssystem

Bei der Planung und Dimensionierung von Druckluftrohrleitungssystemen können Fehler gemacht werden, die eine Verkürzung der Standzeit der Druckluftanlage verursachen. Es können bei zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten Schmutzpartikel und Kondensat mitgerissen werden. In richtig dimensionierten Druckluftsystemen ohne Trockner werden größere Schmutzpartikel und Kondensat bereits in den Verteilerleitungen ausgeschieden.

Abzweigungen in Druckluftleitungssystemen werden häufig als „Schwanenhals“ (Abbildung 12-8 Schwanenhals) ausgeführt. Diese Variante der Abzweigung dient dazu, dass das Kondensat nicht aus der Verteilerleitung mitgerissen wird.

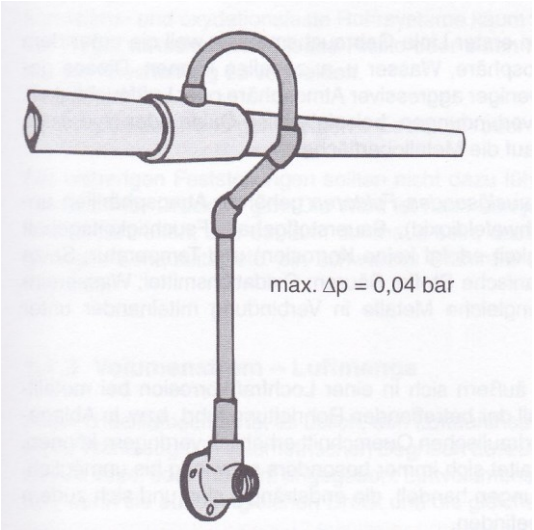


Abbildung 12-8 Schwanenhals

In nicht rostfreien Leitungen ist die Korrosion, die sich durch die Kondensatabscheidung bilden kann, nicht zu vernachlässigen. Es können Gefügeveränderungen entstehen, die unter andrem „anlaufen“ oder den Werkstoff zersetzen. Wenn sich die Zersetzung zu weit fortgebildet hat, besteht das Risiko, dass die Rohrleitung platzen könnte.

Weiters können Korrosionsteilchen mitgerissen werden und Schäden in der Anlage verursachen (z.B. Ablagerungen in Ventilen).

12.2.4 Aufbereitung vor dem Endverbraucher

Jeder Verbraucher hat bestimmte Anforderungen an die Druckluft. Um diese Anforderungen und somit einen einwandfreien Betrieb zu gewährleisten, ist teilweise eine Aufbereitung derselben am Ende des Verteilernetzes unumgänglich. Druckluftwerkzeuge benötigen für einen einwandfreien Betrieb sehr häufig Öl in der Luft. Des Weiteren muss der Druck an der Abnahmestelle so geregelt werden, dass kein Schaden am Verbraucher entsteht. Zu diesem Zweck werden in erster Linie sogenannte Wartungseinheiten (Abbildung 12-9 Wartungseinheit) angewendet.

Abbildung 12-9 Wartungseinheit

Diese Wartungseinheiten bestehen aus einem Wasserabscheider, einem Öler und einem Druckbegrenzer. Hier werden nochmals Wasser und gröbere Verschmutzungen, die sich in der Leitung befunden haben, ausgeschieden; der Öler übernimmt die Schmierung der Druckluftwerkzeuge.

Wartungseinheiten sind sehr anfällig für Leckagen und müssen daher regelmäßig kontrolliert werden.

12.2.5 Unsachgemäße Handhabung

Der Umgang mit Druckluftwerkzeug und den Bauteilen einer Druckluftanlage hat mit Vorsicht und Bedacht zu erfolgen. Einer der häufigsten Gründe für Leckagen ist der unsachgemäße Umgang mit Schläuchen und Werkzeug.

Kupplungen bei Druckluftschläuchen sind auf der männlichen Seite (Druckluftnippel) sehr empfindlich. Wenn sie auf den Boden fallen oder fester abgelegt werden, können sie sich verformen und werden in weiterer Folge undicht. Auf der Abbildung 12-10 Druckluftschlauch ist auf der linken Seite ein männlicher Kupplungsteil zu sehen.

Abbildung 12-10 Druckluftschlauch

Die Qualität des Materials spielt bei der Kupplung eine wesentliche Rolle. Infolge von Abnutzung, die durch den langen oder groben Gebrauch entsteht, kann es zu Leckagenbildung durch Deformierung führen. Weiters ist auch die Bauart und Oberflächengüte für die Lebensdauer und Dichtheit der Kupplungen ausschlaggebend. Es gibt preisgünstige Kupplungen aus Messing. Der Nachteil ist, dass sie sehr leicht deformiert werden können. Kupplungen aus Kunststoff (Abbildung 12-11 Kunststoffeinschrauber) altern schneller als Kupplungen aus Messing oder Stahl. Empfehlenswert sind die etwas teureren Kupplungen aus Stahl, da die Lebensdauer um ein Vielfaches höher ist.

Abbildung 12-11 Kunststoffeinschrauber

Kupplungen aus Stahl haben einen geringeren Druckverlust als Kupplungen aus Messing. Bei Stahlkupplungen werden die Innenflächen bearbeitet und sind diese somit glatter als gegossene unbearbeitete Messingkupplungen.

Die besten Durchflusswerte weisen Sicherheits-Schnellkupplungen (Abbildung 12-12 Sicherheits-Schnellkupplung) auf. Sie haben durchgehende Bohrungen, die keine Querschnittsverengung verursachen.

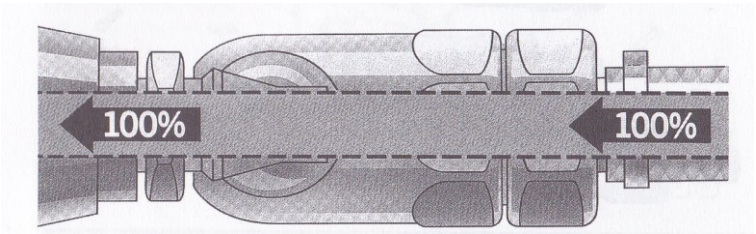


Abbildung 12-12 Sicherheits-Schnellkupplung

Sicherheits-Schnellkupplungen haben eine bis zu dreifach höhere Durchflussmenge als normale Schnellkupplungen (Abbildung 12-13 normale Schnellkupplung).

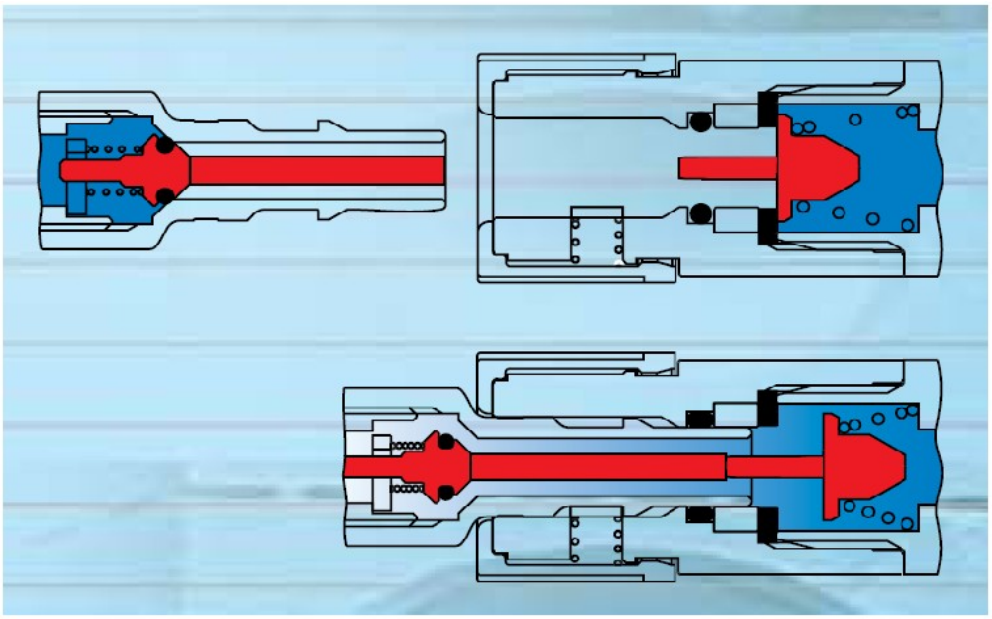


Abbildung 12-13 normale Schnellkupplung

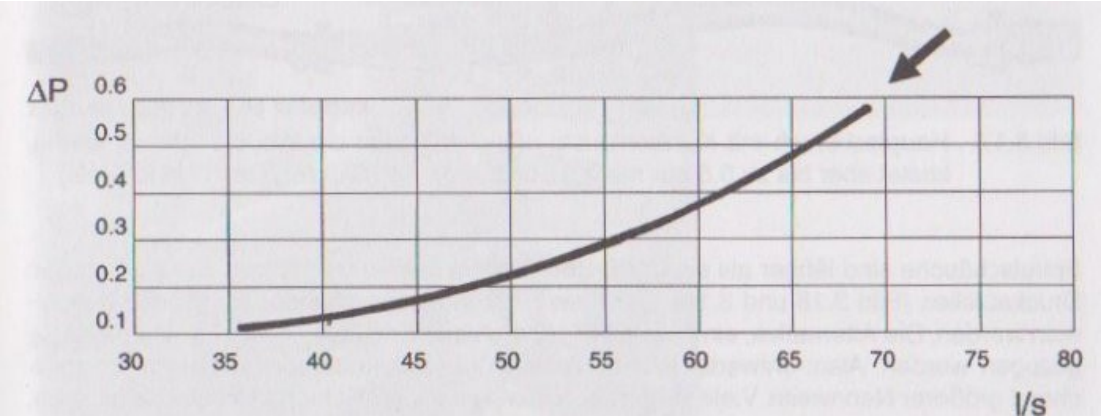


Abbildung 12-14 Durchflussdiagramm

Im oben abgebildeten Diagramm wird die Durchflussmenge einer Sicherheits-schnellkupplung dargestellt. Anzustreben ist ein Druckabfall bei Kupplungen von 0,2 bar bei richtiger Dimensionierung. Im Vergleich dazu würde eine herkömmliche Kupplung bei nur einem Drittel der Luftmenge bereits 0,5 bar Druckverlust erzeugen. Gute Kupplungen sind nicht nur wichtig für die Kostenreduktion der Drucklufterzeugung, sondern auch für Betriebe, die mit Druckluftanlagen arbeiten. Wenn z.B. ein Druckluftschrauber mehr Leistung erbringt, kann damit effizienter gearbeitet werden. Das gilt natürlich für alle Werkzeuge oder Bauteile, die mit einer Stahlkupplung Kupplung angeschlossen werden.

Betrachten wir den konkreten Fall einer undichten Kupplung:

Annahme:

- Die Leckage ist mit einem 1 mm großen Loch vergleichbar.
- Dauer der Leckage: 4 Monate, entspricht 2880 Betriebsstunden bei Durchfahrbetrieb
- Betriebsdruck 6 bar

In diesen vier Monaten ergeben sich Betriebskosten von rund 70€. Diese Kosten hätten sich durch eine neue Schlauchkupplung, welche nur 4€ kostet, vermeiden lassen können. Würde der defekte Anschluss sofort nach dem Entdecken getauscht werden, hätte sich der Tausch nach 165 Stunden Dauerbetrieb rentiert.

12.3 Entdeckung von Leckagen

Undichtheiten in Druckluftsystemen können mit verschiedenen Methoden gefunden werden. In einem gut gewarteten Druckluftnetz dürfen die Leckagen zwischen 5 bis 10 Prozent betragen. Die Leckagen auf null zu reduzieren wäre unwirtschaftlich, denn dabei würde der Aufwand die Einsparung übersteigen.

12.3.1 Leckagensuchspray

Der Leckagensuchspray ist eine sehr günstige Methode für die Leckagensuche (eine Dose kostet rund 6€). Er beinhaltet eine Seifenlösung, die auf der Oberfläche einer Leckage einen Schaum bildet. Wenn jedoch in einem größeren Druckluftsystem permanent mit dem Spray nach Leckagen gesucht wird, sind die laufenden Kosten unrentabel hoch. Es sollte daher auf eine alternative Suchmethode umgestiegen werden.

Die Anwendung des Sprays ist sehr einfach und erfordert keine spezielle Einschulung. Der Bereich, den man mit einem Leckagensuchspray absuchen kann, ist begrenzt. Der Leckagensuchspray wird in erster Linie für eine punktuelle Anwendung, wo Undichtheiten vermutet werden, eingesetzt.

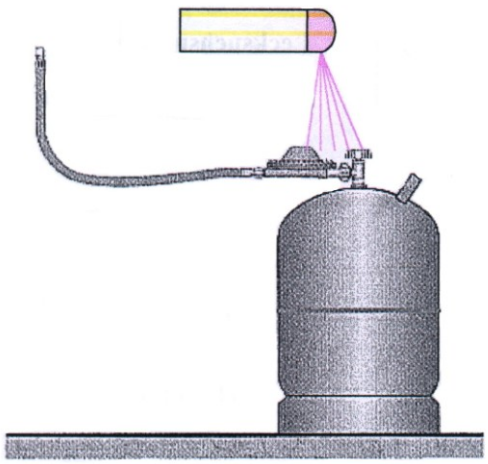


Abbildung 12-15 Leckagensuchspray

Vorteile

- günstig bei seltener Anwendung
- einfache Handhabung
- gut erkennbare Leckagen (Blasenbildung)
- auch bei sehr starkem Lärm können Leckagen gefunden werden (Schallunabhängig)

Nachteil:

- nur punktuell einsetzbar
- bei kontinuierlicher Anwendung teuer
- es können nur äußere Leckagen entdeckt werden
- Seifenlauge auf den Bauteilen nach dem Einsatz (Schmutzbildung)

12.3.2 Ultraschall (Sonographie)

Luft, die aus einem Loch austritt, erzeugt einen Ton im Ultraschallbereich. Dies geschieht, da sich Leckagen wie Düsen verhalten, und die Luft mit Überschallgeschwindigkeit an dieser Stelle austritt.

Bei Ultraschallmessgeräten wird genau dieser Effekt zu Nutze gemacht. Mit diesen Geräten kann auch festgestellt werden, ob ein Ventil im Ventilsitz undicht ist. Für eine effektive Handhabung von Ultraschallmessgeräten ist eine Einschulung zu empfehlen.

Vorteile:

- mehrfach einsetzbar (Leckagen, Armaturen…)
- bei kontinuierlichen Routengängen kostengünstiger
- großflächig anwendbar
- kann auch über mehrere Meter Leckagen orten (Parabolspiegel)
- laute Umgebung stört nicht
- Sensoren sind Wasserdicht (Einsatz im Sprühnebel)

Nachteile:

- es kann zur Störung durch Schallfrequenzen in der Umgebung kommen z.B. (Pulper einer Papiermaschine)
- zu teuer für Gelegenheitssuchen (Leckagenspray)
- Umgang mit Gerät muss gelernt werden

Abbildung 12-16 Ultraschallmessung

12.4 Einführung der kontinuierlichen Leckagensuche im Werk

In einem Werk unserer Größe ist es unumgänglich, eine kontinuierliche Leckagensuche einzuführen, um wirtschaftlich bleiben zu können. Es ist jedoch auch ein logistischer Aufwand, das gesamte Werk in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren.

Am Standort Gratkorn wird die Software SAP / R3 verwendet. Das Softwaretoole wird in der Instandhaltung verwendet um Ersatzteile, Anlagenstrukturen und Arbeitsaufträge zu verwalten. Es gibt natürlich auch die Möglichkeit, sich jederzeit über sämtliche Kosten zu informieren. Da das System ein Echtzeitsystem ist, sind Änderungen sofort erkennbar und nachvollziehbar. Unsere Mitarbeiter in der Instandhaltung müssen nach jedem Arbeitstag ihre Stunden auf sogenannten Arbeitsaufträgen rückmelden. Diese Arbeitsaufträge können je nach Aufwand variieren und unterschiedliche Planarbeitsstunden aufweisen. Weiters werden die Aufträge in verschiedene Kategorien wie z.B. geplante Reparatur oder ungeplante Reparatur unterteilt, um das Nachvollziehen von Kosten einfacher gestalten zu können.

12.4.1 Erste Phase

In der ersten Phase wurde ein Jahresauftrag ausgeschrieben, um alle erforderlichen Tätigkeiten auf diesen Auftrag abwickeln zu können. Ein Jahresauftrag bedeutet, dass die Summer der benötigten Planstunden auf einen Auftrag gesammelt geschrieben werden. Die Mitarbeiter, die die Leckagen suchen, melden ihre Stunden auf diesen Auftrag zurück.

Die Einteilung der Suchbereiche erfolgt ähnlich wie die Einteilung der Bereiche im Werk, die wir auf der Abbildung 9-2 Werksübersicht (Bereiche) sehen können. Zu dieser Unterteilung habe ich noch zusätzlich die Bereiche in Stockwerken und in Maschinenbereiche unterteilt. Das bedeutet, dass es bei der PM9 den Bereich *Keller Papiermaschine* gibt. Dieser Bereich legt fest, welcher Abschnitt kontrolliert werden muss. Diese Art der Unterteilung wurde in allen Bereichen durchgeführt. Leider hat sich nach einem halben Jahr herausgestellt, dass dieses System zu wenig Kontrolle unterlegen ist und schlecht nachvollziehbar war. Aus diesem Grund wurde ein neuer Termin einberufen, um die entdeckten Schwächen zu besprechen und Lösungen dafür auszuarbeiten.

12.4.2 Zweite Phase

Nach einem erneuten Besprechungstermin wurden neue Richtlinien für die Leckagensuche definiert. Diese Richtlinien beinhalteten:

- Arbeitsaufgaben dürfen 8 Stunden nicht überschreiten (normaler Arbeitstag).
- einzelne Aufträge statt Jahresaufträge
- Terminplan wird für jeden Bereich einzeln und vom bereichsverantwortlichen Fachingenieur erstellt
- Werkstättenmeister verwaltet Einzelaufträge, um die reguläre Reparatur nicht zu beeinträchtigen
- Auftrag muss niedrige Priorität haben
- Auftrag muss in einen bestimmten Zeitraum abgearbeitet werden

In diesem Gespräch hat sich herauskristallisiert, dass der Jahresauftrag für den Werkstättenmeister sehr schlecht planbar ist. Die Aufträge werden von unserer Software SAP/R3 automatisch zu den Meistern weitergeleitet, wenn sie von den Arbeitsvorbereitern oder dem System generiert werden. Das Problem bei dem Jahresauftrag war, dass er nur am Anfang des Budgetjahres beim Meister im System erschienen ist und den Rest des Jahres musste der Auftrag manuell abgerufen werden. Die Arbeitseinteilung der Mitarbeiter ging dann in der Hektik der täglichen Arbeit leider unter.

Dies war der Grund, warum beschlossen wurde, die abzusuchenden Bereiche in Arbeitsbereiche aufzuteilen, die maximal 8 Arbeitsstunden dauern. Als Beispiel möchte ich meinen Bereich in der Zellstofferzeugung heranziehen.

Die meisten Leckagen können nur während eines Stillstandes repariert werden, da nur in diesem Zeitraum die Leitungen außer Betrieb gesetzt werden können. Bei zwei Wochen Vorlauf besteht genug Zeit, Ersatzteile vorzubereiten und die Reparaturen einzuplanen. Es wurde auch ein Formular entworfen, um die Kontrollgänge der Leckagensuche zu dokumentieren. Die Rundgänge werden von zwei speziell geschulten Personen mit guten Anlagenkenntnissen durchgeführt. In unserem Fall sind das Rohrschlosser, welche generell in Gratkorn für alle Rohrleitungen verantwortlich sind.

Kleinere Reparaturen, wie das Nachziehen einer Dichtung, können von ihnen sofort durchgeführt werden. Die Fundstelle wird trotzdem im Formular eingetragen, um die Einsparungen nachzuvollziehen.

Im Formular wird genau beschrieben, wo und wie groß die Leckagen sind. Bei komplexen Stellen, wie z.B. einem T-Stück, kann auch eine Skizze gezeichnet werden, um die genaue Stelle zu markieren.

Linie	Papierproduktion
Aggregat	PM9 im Keller
Mitarbeiter	MAX Mustermann

Datum 01.10.2009	
Blatt	von

Nr.	Beschreibung	Skizze	Behebung		Schadensgröße		
	Anlagennummer		Behoben	nicht behoben	1	2	3
				X	X		
1	Die Verschraubung des Ventils ist auf der linken		Rep. Datum				
	Seite undicht.		Mat. Kosten				
			Rep. Zeit				

Nr.	Beschreibung	Skizze	Behebung		Schadensgröße		
			Be hoben	nicht behoben	1	2	3
			Rep. Datum				
			Mat. Kosten				
			Rep. Zeit				

Tabelle 4 Musterauszug Leckagenprotokoll

Im Auszug aus dem Leckageprotokoll (Tabelle 4 Musterauszug Leckagenprotokoll), ist der Aufbau des Protokolls ersichtlich. Ich habe in braun die Positionen ausgefüllt, die der Mitarbeiter bei seiner Kontrollrunde einträgt.

Linie:
Beschreibt den zu kontrollierenden Bereich.

Aggregat:
Genaue Positionsbeschreibung, um das Reparieren der gefundenen Leckagen zu erleichtern.

Mitarbeiter:
Namen der Mitarbeiter, die die Kontrollrunde durchgeführt haben und im Fall von Rückfragen bzw. Unklarheiten kontaktiert werden können.

Nr.:
Fortlaufende Zahl, die die Anzahl der gefunden Leckagen wiedergibt.

Beschreibung:
In der Beschreibung sind die Anlagennummer und die Erläuterung des Problems angeführt. Die Anlagennummer setzt sich aus mehreren Punkten zusammen. Beispiel: GK MP21 01 0003 GK steht für Gratkorn, MP21 wäre die Papiermaschine 9, 01 sind die Hauptanlagenteile und die 0003 steht für den Refiner 3. In der Beschreibung wird ebenfalls die Lage der Leckage kurz beschrieben.

Skizze:
Hier ist es möglich, eine kleine Handskizze anzuführen, um das Finden der Leckage bei der Reparatur zu erleichtern.

Datum:
Datum des Kontrollganges

Behebung:

Bei diesen beiden Feldern kann man zwischen „behoben“ und „nicht behoben“ wählen. Sollten z.B. nur Verschraubungen locker sein, bei denen ein einfaches Nachziehen ausreichend ist, kann die Leckage bereits bei der Kontrollrunde behoben werden. Um eine Nachverfolgung der Einsparungen zu ermöglichen, ist es notwendig, alle Leckagen zu dokumentieren, auch wenn diese sofort behebbar sind.

Schadensgröße:

Bei dem Feld Schadensgröße kreuzt der Mitarbeiter die Größe des Luftverlustes an. Die Zahlen eins, zwei und drei sind die theoretischen Durchmesser der Leckagen. Der größte Anteil bei den gefundenen Leckagen liegt bei ca. einem Millimeter Durchmesser.

Rep. Datum:

Datum der Reparatur

Mat. Kosten:

Die entstandenen Kosten für das Material.

Rep. Zeit:

Die angefallene Zeit für die Reparatur der schadhaften Stelle.

Mit diesem Protokoll ist es möglich, Auswertungen über den Verlauf der erfolgten Leckagensuche durchzuführen. Die Auswertungen können z.B. im Hinblick des zeitlichen Verlaufs die gefundenen Leckagen pro Anlage/Bereich darstellen. Aus dieser Auswertung ist ersichtlich, bei welcher Anzahl der Leckagen keine Verbesserung mit den bisherigen Mitteln mehr zu erzielen ist.

Die Einsparung, die mit der kontinuierlichen Leckagensuche gewonnen wird, ist ebenfalls genau zu erkennen. Es wurde ein Diagramm (Diagramm 9 Leckagenverlauf) angefügt, um ein Beispiel des Verlaufs zu geben. Die verwendeten Daten sind fiktiv, da der Zeitraum nicht ausreichend war, um diese Daten in einem Diagramm darzustellen.

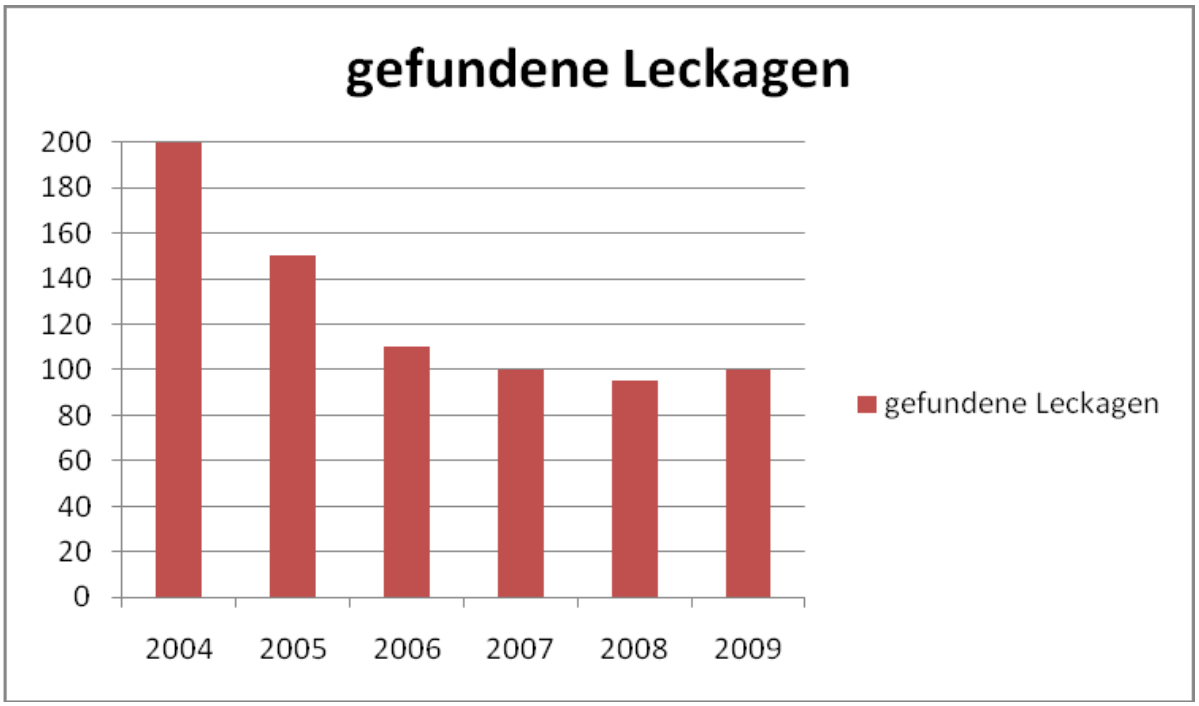


Diagramm 9 Leckagenverlauf

12.5 Resultate der kontinuierlichen Leckagensuche im Werk

Ich habe eine Untersuchunge zwischen einer Fremdfirma und unserem eigenen Instandhaltungspersonal verglichen. Ich möchte mit diesem Vergleich zeigen, welchen Vorteil das eigene Instandhaltungspersonal gegenüber einer Fremdfirma hat. In der Tabelle 5 Leckagenmessung sind die beiden Messungen zum Vergleich dargelegt. Beide Messungen wurden an einem normalen Arbeitstag durchgeführt. Ein Arbeitstag dauert 8 Stunden. Im Vergleich sieht man, dass das eigene Personal mehr Leckagen gefunden hat und auch mehr Leckagen an Ort und Stelle beheben konnte.

Der Stundensatz der Fremdfirma beträgt 70 €/Stunde, der Stundensatz für das Instandhaltungspersonal liegt bei 57 €/Stunde. Wenn die beiden Stundensätze verglichen werden, ergibt sich bei einem Arbeitstag ein Unterschied von 192 €/Tag.

Tabelle 5 Leckagenmessung

		Behebung		Größe		
	gefundene Leckagen	behoben	nicht behoben	gering	mittel	groß
IH sappi	48	11	37	11	25	12
Fremdfirma	36	2	34	5	24	7

Bei diesem Vergleich ist eindeutig zu erkennen, dass das eigene Instandhaltungspersonal im Gegensatz zum Fremdpersonal innerhalb von acht Stunden mehr Leckagen findet und kostengünstiger ist.

13 Alternative zu veralteten Kompressoren

Der Kompressor 0 ist der älteste Kompressor bei uns im Werk Gratkorn. Durch sein Alter und der nicht mehr gegebenen Verfügbarkeit von Ersatzteilen ist es an der Zeit, den Kompressor zu ersetzen. Es gibt verschiedene Typen von Kompressoren. Das Spektrum beginnt bei Kolbenkompressoren, geht über Schraubenkompressoren bis hin zu Turbokompressoren, welche die leistungsstärksten sind.

13.1 Allgemeine Beschreibung von Kompressoren

13.1.1 Kolbenkompressor

Ein Hubkolbenkompressor arbeitet nach dem Verdrängungsprinzip. Bei der Abwärtsbewegung wird Luft durch ein Ventil in den Arbeitsraum gesaugt. Dieses Ventil schließt, sobald sich der Kolben wieder nach oben bewegt. Wenn der Kolben in der Aufwärtsbewegung ist und genug Druck erzeugt hat, öffnet sich das Auslassventil und lässt die komprimierte Luft entweichen. Das Auslassventil ist mit einer Feder vorgespannt.

Bei mehrzylindrigen Kompressoren gibt es zwei Varianten. Bei Variante eins liefern alle Zylinder direkt in den Drucklufttank (große Liefermengen, niedrigere Drücke), bei Variante zwei wird die Luft von einem Zylinder in den nächsten geleitet und dabei immer stärker verdichtet (mehrstufiges Prinzip, geringere Fördermenge, höhere Drücke).

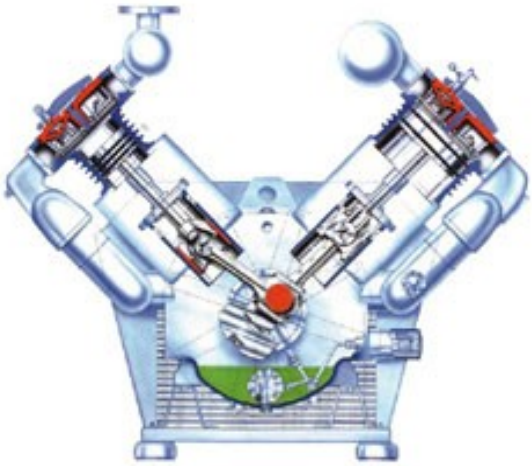


Abbildung 13-1 Kolbenkompressor

13.1.2 Schraubenkompressor

Das Prinzip der Schraubenkompressoren beruht ebenfalls auf Verdrängung. Der Unterschied zum Kolbenkompressor ist, dass es bei der Schraube zu einer stetigen Förderung kommt. Druckschwankungen und impulsartige Schwingungen werden dadurch vermieden. Die Funktion gewährleistet zwei parallele, mit unterschiedlichem Profil versehene Drehkolben, die gegenläufig im Gehäuse arbeiten.

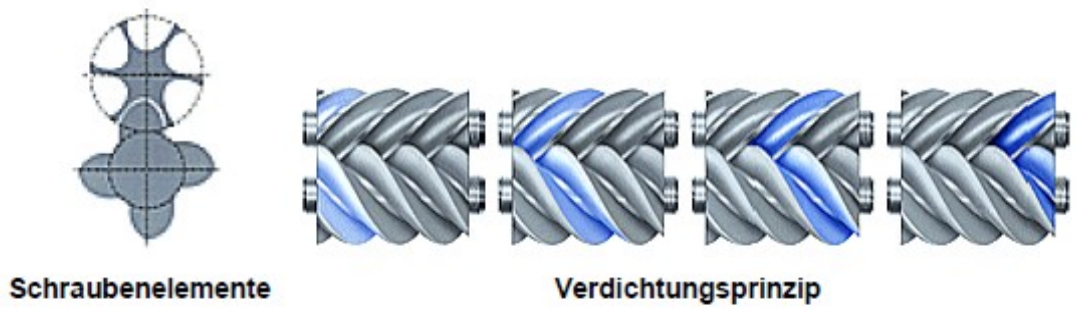
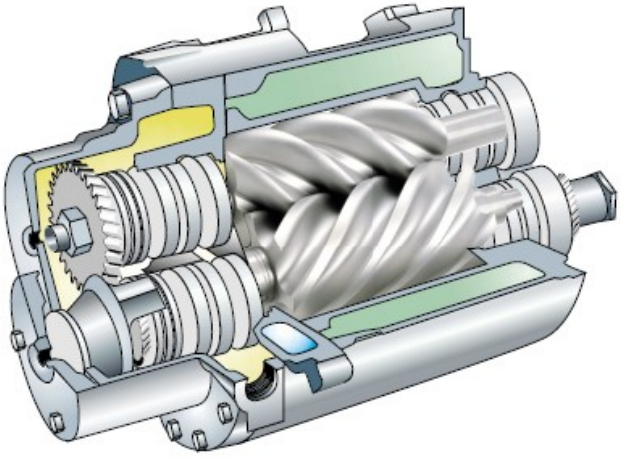


Abbildung 13-2 Prinzip Schraubenkompressor

Es gibt bei den Schraubenkompressoren Ausführungen, wo die Schraube fluidgekühlt ist oder trocken läuft. Wenn die Schrauben ohne Fluidkühlung bzw. Schmierung betrieben werden, spricht man dabei von ölfreien Kompressoren. Das Druckverhältnis bei Schraubenkompressoren ergibt sich aus der Konstruktion. Entscheidend dabei sind Schraubenlänge, Steigung, sowie Position und Form der Austrittsöffnung. Der Wirkungsgrad ist von der Kombination dieser Faktoren und des Betriebsüberdrucks abhängig.



Ölfreies Schraubenelement. Haupt- und Nebenläufer befinden sich in einem wassergekühlten Gehäuse. Der vordere Rotor mit vier Zähnen bildet den Hauptrotor und ist mit dem Getriebe verbunden. Der hintere Rotor mit sechs Zähnen ist der Nebenläufer und wird vom Synchrongetriebe auf der linken Seite angetrieben. Beide Läufer berühren sich nicht.

Abbildung 13-3 Schraubenkompressor

13.1.3 Turbokompressor

Turbokompressoren sind nicht wie Schrauben und Kolbenkompressoren „Verdränger“, sondern arbeiten nach dem dynamischen Prinzip. Ein mit Schaufeln versehenes Laufrad beschleunigt die Luft, um diese zu verdichten. Beim Turbokompressor steht der Druck proportional zur Luftgeschwindigkeit bzw. Drehzahl des Laufrades. Turbo-kompressoren haben eine besondere Charakteristik, nämlich, dass kleine Änderungen im Betriebsdruck große Auswirkungen auf den Volumenstrom haben (Abbildung 13-5 Volumenstrom).

Beim Turbokompressor ist darauf zu achten, dass jede Drehzahl eine obere und untere Volumenstromgrenze hat. Wenn die obere Grenze erreicht ist, hat die Luft die Schallgeschwindigkeit erreicht. Sollte der Volumenstrom so klein werden, dass die untere Grenze erreicht wird, bedeutet das, dass der Gegendruck größer ist, als der vom Kompressor aufgebrachte Druck. Das kann zu Rückströmungen führen, die Pulsationen auslösen, und infolgedessen mechanische Schäden hervorrufen können.

Die Turbokompressoren werden in ihrer Bauart unterschieden. Radialverdichter werden bei Bedarf von höheren Drücken eingesetzt, Axialverdichter gelangen wiederum für die Lieferung von großen Mengen bzw. mehr Volumenstrom zur Anwendung.

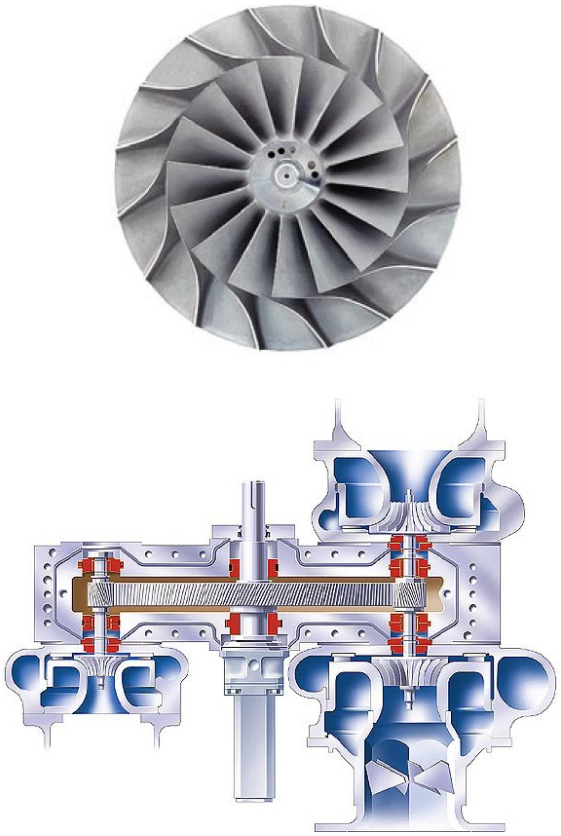


Abbildung 13-4 Turbokompressor

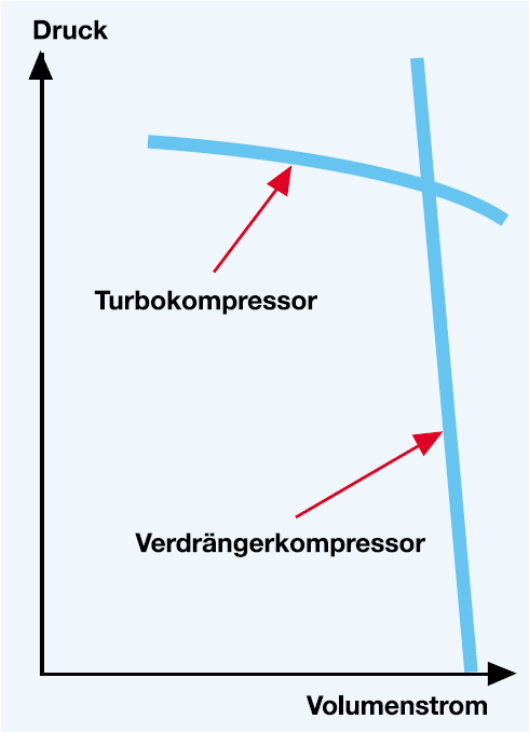


Abbildung 13-5 Volumenstrom

14 Im Werk Gratkorn verwendete Kompressoren

Im Werk Gratkorn werden Kolben-, Turbo- und Schraubenkompressoren verschiedener Hersteller verwendet. Die Leistungsklasse erstreckt sich von kleinen Kolbenkompressoren bis zu Turbokompressoren mit 600kW elektrischer Leistung.

Die Ringleitung wird von folgenden Kompressoren gespeist.

14.1 Kolbenkompressoren 0 bis 3

Es werden vier Kolbenkompressoren der Firma Atlas Copco verwendet. Der K0 ist der leistungsstärkste Kompressor unter ihnen. Dieser Kompressor ist auch derjenige, der meines Erachtens im Werk Gratkorn ersetzt werden sollte.

Abbildung 14-1 Kompressor 0

Leistungsdaten Kompressor 0:

- Type A.C. ER8
- Luftmenge 60 m³/h
- Betriebsspannung 3000 V
- Betriebsdruck 7 bar
- Baujahr 1985
- Betriebsstunden nicht mehr erfasst
- Aufstellungsort Kompressorraum, Bereich Energie

Kompressoren eins bis drei sind baugleich wie der K0, nur mit geringerer Leistung.

Abbildung 14-2 Kompressor 1 und 2

Leistungsdaten Kompressor 1 bis 3:

- Type A.C. ER5
- Luftmenge 23,7 m³/h
- Betriebsspannung 660 V
- Betriebsdruck 7 bar
- Baujahr 1974 – 1975 – 1976
- Betriebsstunden nicht mehr erfasst
- Aufstellungsort Kompressorraum, Bereich Energie

14.2 Schraubenkompressoren 4 bis 7

Ebenso wie die Kolbenkompressoren sind auch die Schraubenkompressoren vom Hersteller Atlas Copco. Im Einsatz befinden sich vier Schraubenkompressoren - die drei leistungsstärksten sind im Bereich Energie im Kompressorraum positioniert. Der vierte (Kompressor 7) ist der leistungsstärkste und steht in der Papierproduktion am linken Ende der Papierproduktion (Abbildung 9-1 Werksübersicht (Kompressoren)).

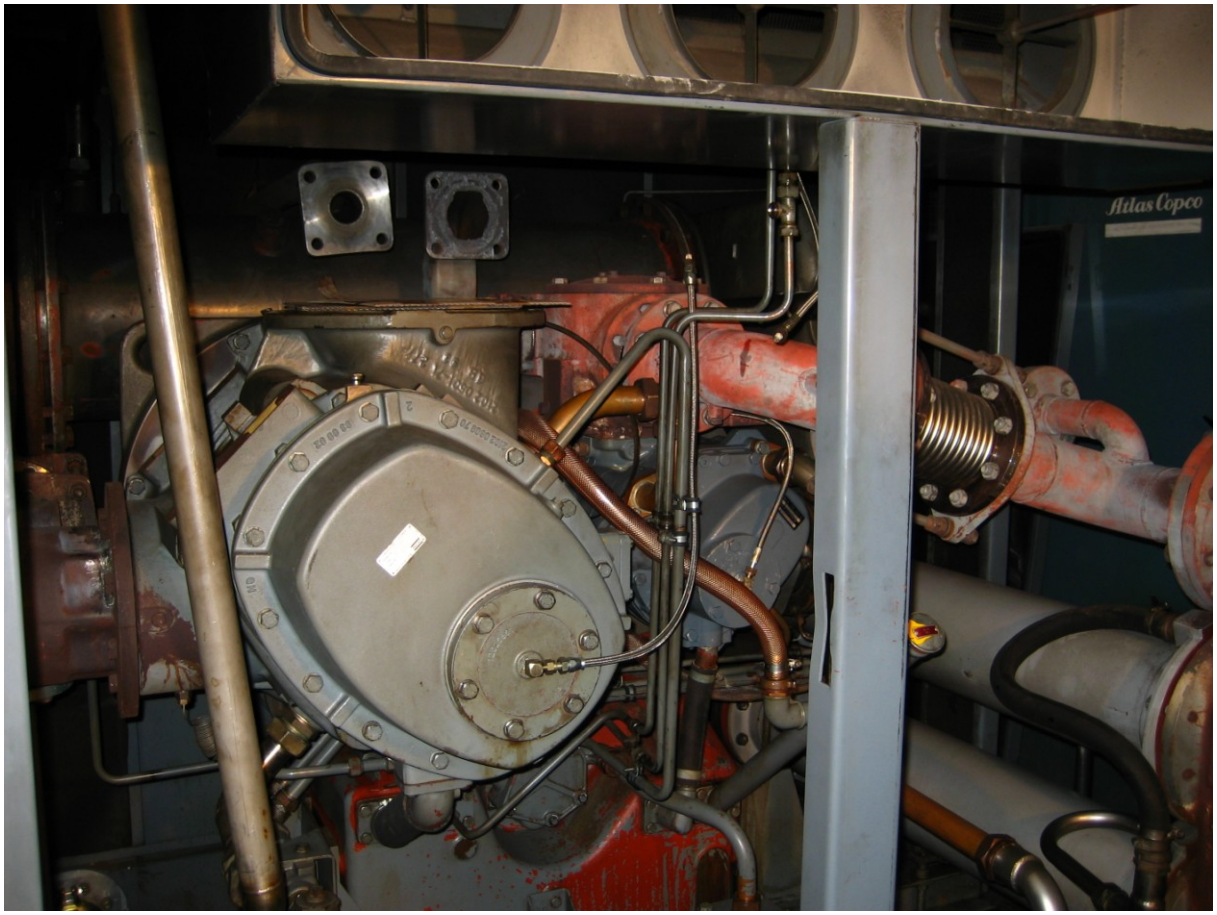


Abbildung 14-3 Kompressor 4 bis 7

Leistungsdaten der Kompressoren 4, 5 und 6:

- Type A.C. ZR5
- Luftmenge 61,2 m³/h
- Betriebsspannung 660 V
- Betriebsdruck 7 bar
- Baujahr 2 Stück 1978, 1987
- Betriebsstunden ---
- Aufstellungsort Energie Kompressorraum

Der Kompressor 7 ist für die Versorgung der PL3 verantwortlich. Er speist dort in die Ringleitung des Werks ein.

Abbildung 14-4 Kompressor 7

Leistungsdaten der Kompressoren 7:

- Type A.C. ZR6
- Luftmenge 79,8 m³/h
- Betriebsspannung 660 V
- Betriebsdruck 7 bar
- Baujahr 1992
- Betriebsstunden ---
- Aufstellungsort Papierfabrik (türkiser Bereich linker Kreis Abbildung 9-2 Werksübersicht (Bereiche))

14.3 Turbokompressoren 8 und 9

Die beiden Turbokompressoren sind das Herz der Ringleitung, sie versorgen die Papierfabrik mit Druckluft.

Abbildung 14-5 Turbokompressoren

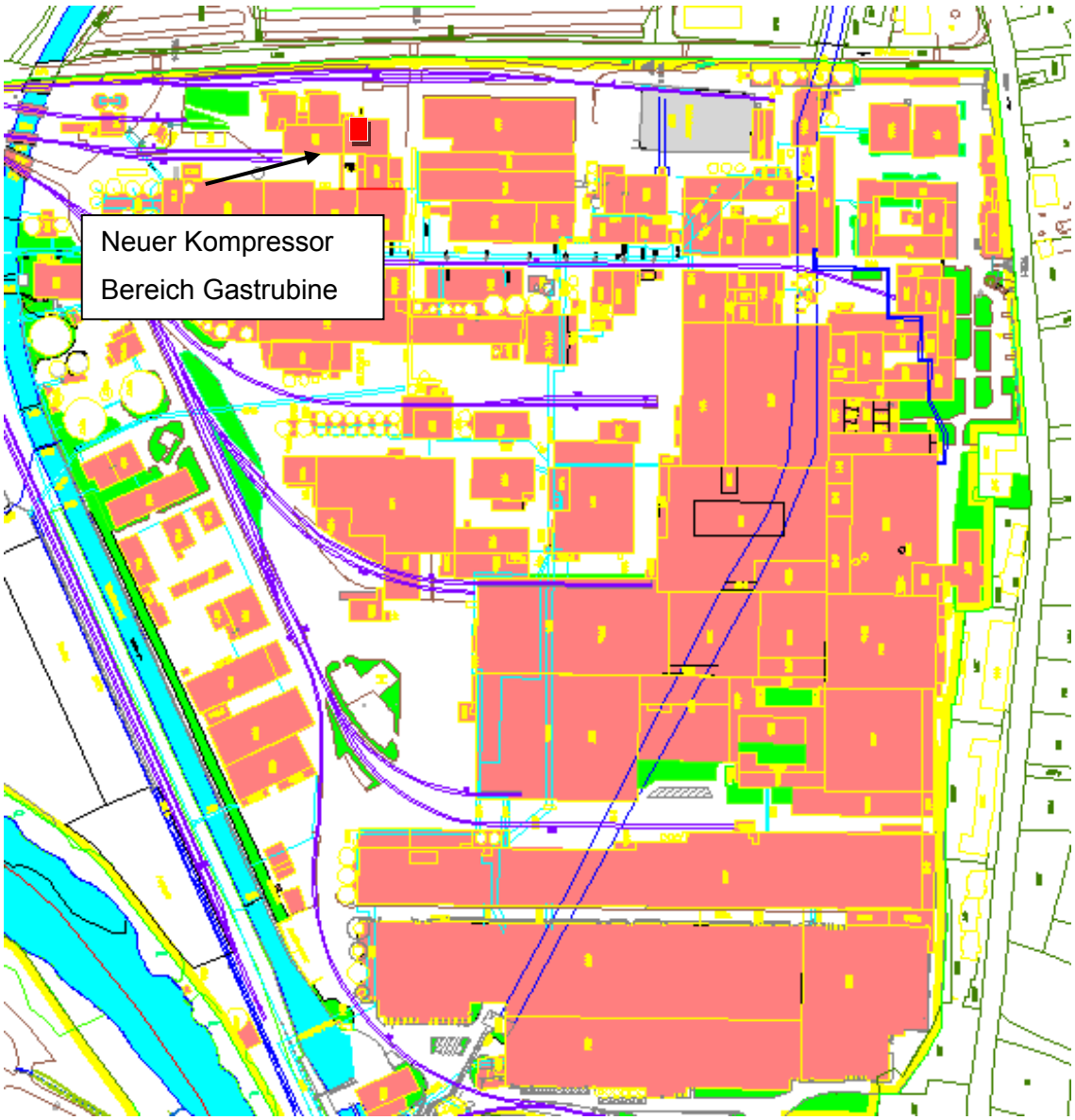
Leistungsdaten der Kompressoren 8 und 9:

- Type C80MX3-2RII
- Luftmenge 80 m³/h
- Betriebsspannung 660 V
- Betriebsdruck 7,4 bar
- Baujahr 1997
- Betriebsstunden ---
- Aufstellungsort Papierfabrik (türkiser Bereich, rechter Kreis Abbildung 9-2 Werksübersicht (Bereiche))

15 Energieeinsparung und Netzsicherheit über neuen Schraubenkompressor

Im Jahr 2008 wurde am Standort Gratkorn ein gebrauchter Kompressor aus einem kürzlich stillgelegten Schwesternwerk zugekauft. Dieser Kompressor wurde ebenfalls von Atlas Copco hergestellt. Seine Leistung ist mit dem Kompressor K7 der PM9 vergleichbar. Dieses Projekt wird gesondert in der Technikabteilung behandelt.

Der Standort des neuen Kompressors ist neben der Gasturbine:



16 Leitsystem

16.1 Anforderungen an ein Leitsystem für Druckluft

Welche Anforderungen werden in unserem Werk an ein Leitsystem gestellt?

Es gilt zuerst zu definieren, was mit einem Leitsystem für die Drucklufterzeugung erreicht werden will. Ein Leitsystem wird in erster Linie dazu eingesetzt, um Kosten in der Drucklufterzeugung zu reduzieren. Das Leitsystem soll ein so enges Druckband wie möglich erzeugen um bei Verbrauchsschwankungen zu halten. Hinzu kommt noch, dass jeder Kompressor in seinem optimalen Betriebsbereich arbeiteten soll. In gut aufgebauten Systemen kann die Druckluftschwankung im Bereich von 0,4 Bar gehalten werden.

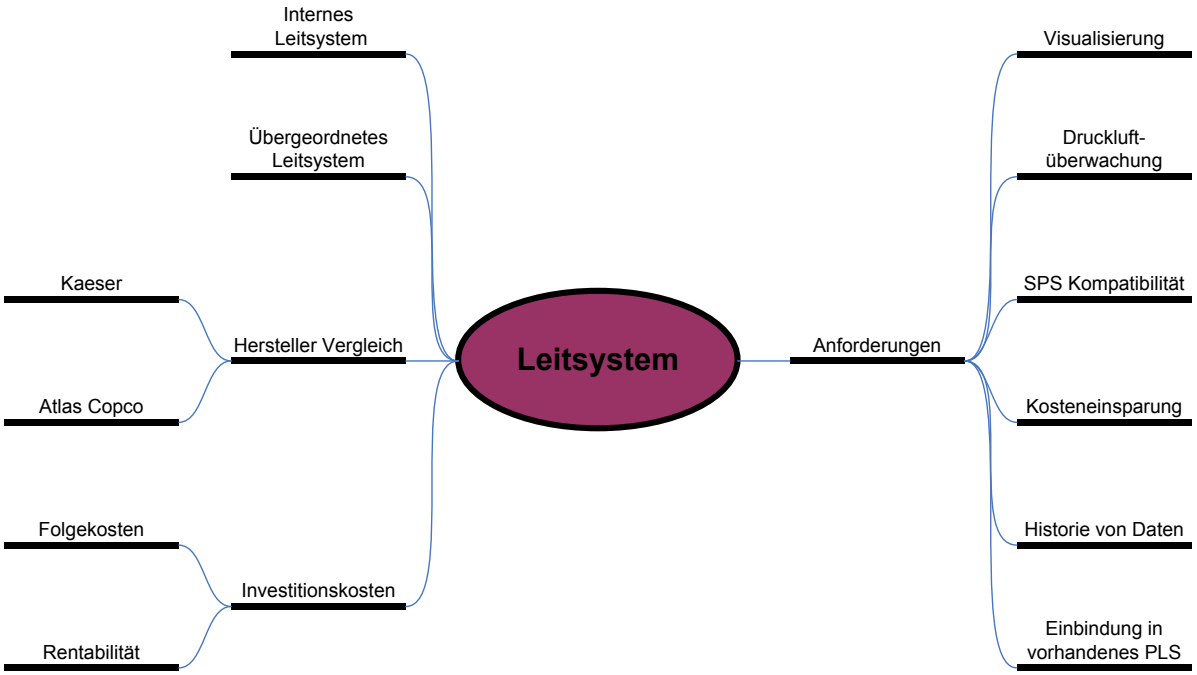


Abbildung 16-1 Anforderungen Leitsystem

Es gibt zwei Ebenen der Regelung und Steuerung von Kompressoren, die interne und die externe, übergeordnete Regelung. Die interne Regelung arbeitet im Kompressor selbst. Die Steuerung regelt die Leistung des Kompressors und ist dafür verantwortlich, die Kompressoreinheit an die Luftverbräuche anzupassen. Die interne Regelung wird noch in zwei weitere Gruppen gesplittet, in die diskontinuierliche und in die kontinuierliche Regelung.

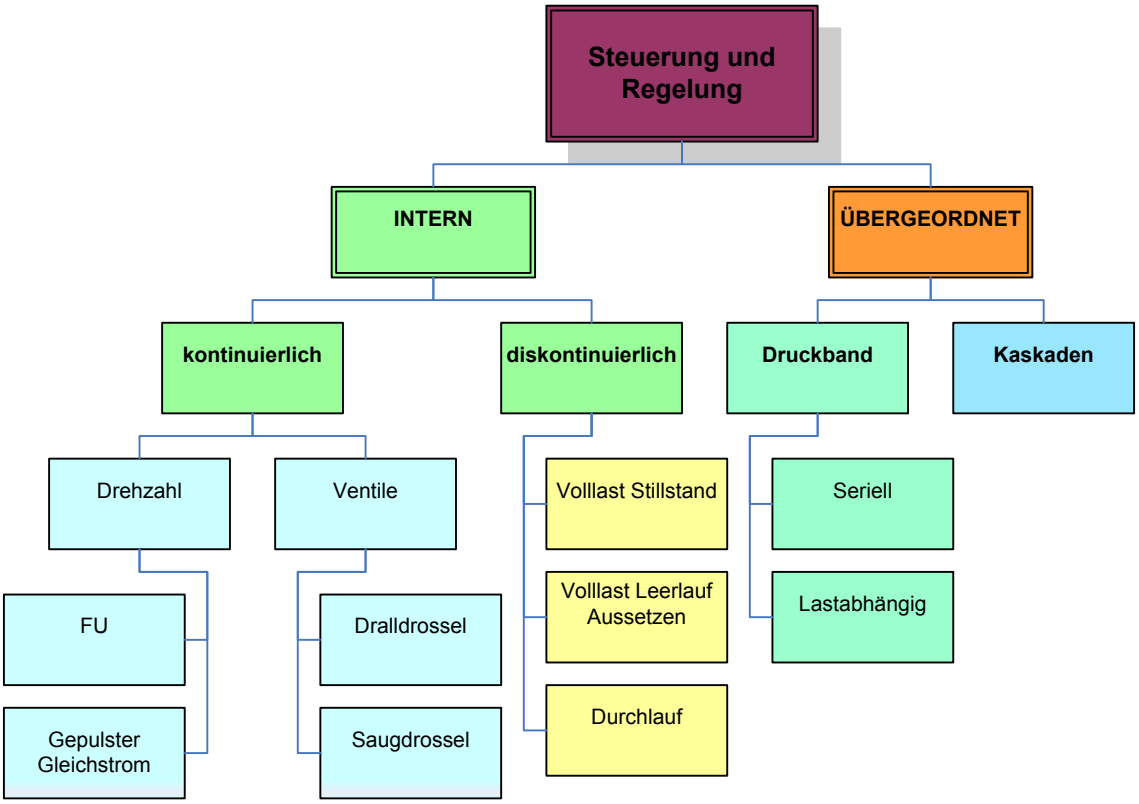


Abbildung 16-2 Steuern und Regeln

Diskontinuierliche Regelung bedeutet, dass der Kompressor einer Aus- und Einschaltsteuerung unterliegt. Gesteuert wird der Kompressor über die Druckgrenzen und die Leerlaufzeit. Wenn die untere Druckgrenze erreicht wird, schaltet sich der Kompressor ein. Bei Erreichen der oberen Druckgrenze schaltet der Kompressor in die Druckentlastung (Leerlauf). Wenn dieser Zustand über eine gewisse Zeit anhält, schaltet sich der Kompressor aus. Dieser Vorgang sollte nicht zu oft wiederholt werden, da Drehstrommotoren einer gewissen Einschalthäufigkeit untergeordnet sind. Werden die Motoren zu oft aus- und eingeschaltet, können sie überhitzen. Im normalen Betrieb schaltet der Kompressor in den Leerlauf, bis die Druckuntergrenze erreicht ist und geht erst danach wieder auf Volllast.

Die kontinuierliche Regelung des Kompressors erfolgt über die Drehzahlregelung des Antriebsmotors oder über die Steuerung von Drosseln. Es gibt zwei Varianten, um

die Drehzahl des Antriebsmotors zu regeln. Frequenzumrichter werden bei Drehstrommotoren zum Regeln der Drehzahl eingesetzt, Gleichstrommotoren werden mit moduliertem Gleichstrom geregelt. Auch bei der kontinuierlichen Regelung gilt, dass der Kompressor bei der unteren Druckgrenze gestartet wird und bei der oberen Druckgrenze in den Leerlauf geht bzw. sich abschaltet. Den Bereich zwischen oberer und unterer Druckgrenze versucht der Kompressor mit Drehzahländerungen oder Drosselventilen zu regeln.

Bei der Ansaugdrosselung und der Ablassregelung wird der Volumenstrom und somit die Leistung des Kompressors gesteuert. Die Ansaugdrosselung wird meist bei Kompressoren verwendet, die mit einer Volllast-Aussetzregelung betrieben werden. Die Drosselregelung arbeitet nur in einem geringen Bereich wirtschaftlich. Auf dem Diagramm (Abbildung 16-3 Ansaugdrosselung) sieht man den Regelbereich der Drosselregelung. Die Leistungsaufnahme ändert sich im Verhältnis zur Liefermenge nur geringfügig.

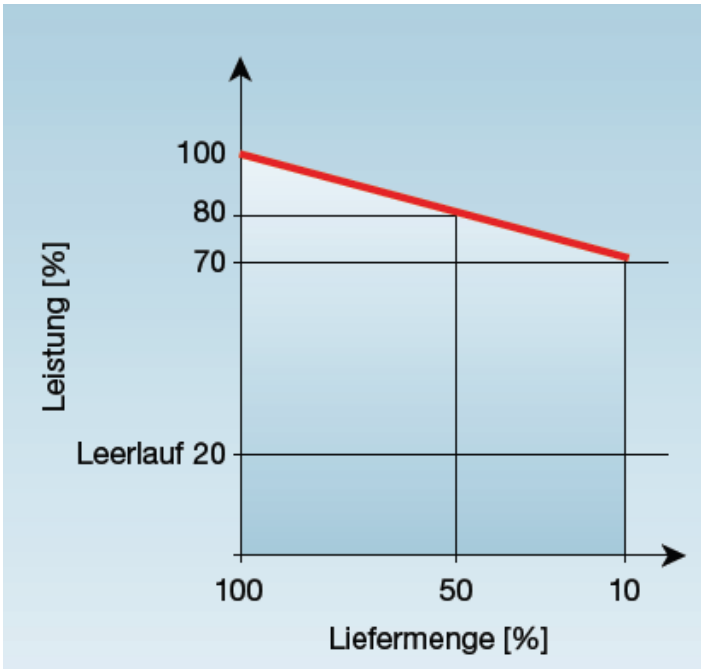


Abbildung 16-3 Ansaugdrosselung

Die Abblasregelung wird bei Niederdrucksystemen oder bei dynamischen Verdichtern verwendet. Die Regelung funktioniert über das Abblasen der überschüssigen Luft in die Atmosphäre. Der größte Nachteil dieser Regelung ist die Energieeffizienz. Die überschüssige Luft wird in die Atmosphäre ohne Nutzen abgeblasen.

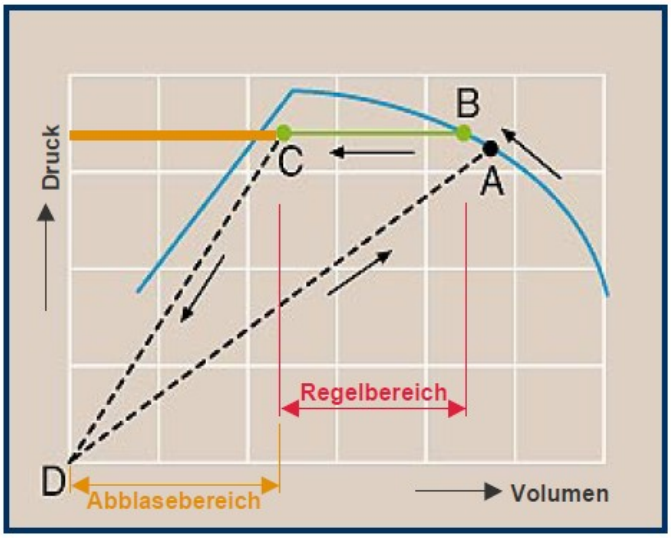


Abbildung 16-4 Abblasregelung

Die übergeordnete Regelung teilt sich in zwei Sparten auf, in die Kaskaden- und in die Druckbandregelung.

Die verbreiteteste Variante ist die Kaskadensteuerung. Bei dieser Steuerung wird jeder Kompressor einer bestimmten Druckstufe zugewiesen. Die Regelung, wann ein Kompressor sich ein- bzw. zuschaltet, übernimmt die der jeweiligen Kompressorsteuerung übergeordnete Kaskadensteuerung. Dieses System empfiehlt sich für maximal vier Kompressoren.

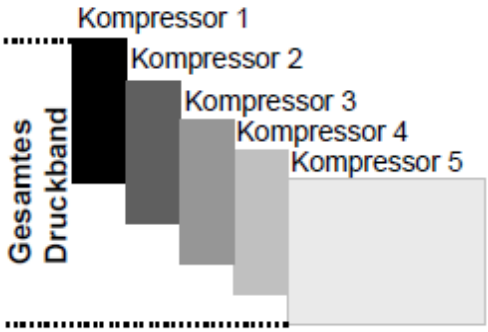


Abbildung 16-5 Kaskadensteuerung

Sind gleich große Kompressoren im Einsatz, werden diese über Zeitschaltungen so gesteuert, dass die Betriebsstunden sich nicht zu sehr unterscheiden. Die Steuerung speichert die Betriebsstunden der einzelnen Kompressoren ab und schaltet automatisch die Kompressoren so ein, dass sich alle auf demselben Level befinden. Bei neuen Anlagen mit Drucksensoren am Stand der Technik können die Druckspreizungen bis auf 0,7 Bar reduziert werden. In älteren Anlagen, die nicht über die neueste Technik verfügen, beträgt bei dieser Regelung die Druckspreizung bis zu

zwei Bar. Diese Spreizung wird benötigt, um die Druckluftanlage stabil laufen zu lassen. Die Spreizung von zwei bar ergibt sich in erster Linie durch veraltete Membrandruckschalter und Kontaktmanometer. Das Ansprechverhalten der Drucksensoren gibt vor, welche Spreizung benötigt wird, um Verbrauchsspitzen abdecken zu können, bzw. mit welcher Druckschwankung zu rechnen ist. Die beste Möglichkeit, eine Druckluftanlage zu regeln, ist die Druckbandregelung, welche jedoch die kostenintensivste bei der Investition ist. Effiziente Anlagen mit diesem System arbeiten mit einer Spreizung von 0,2 bar. Aufgrund der geringen Spreizung kann man den Systemdruck so reduzieren, dass im Rohrsystem gegenüber den Verbrauchern nur ein geringer Überdruck gehalten werden muss, um Druckschwankungen ausgleichen zu können. Die Reduzierung des Systemdruckes erbringt eine erhebliche Kosteneinsparung.

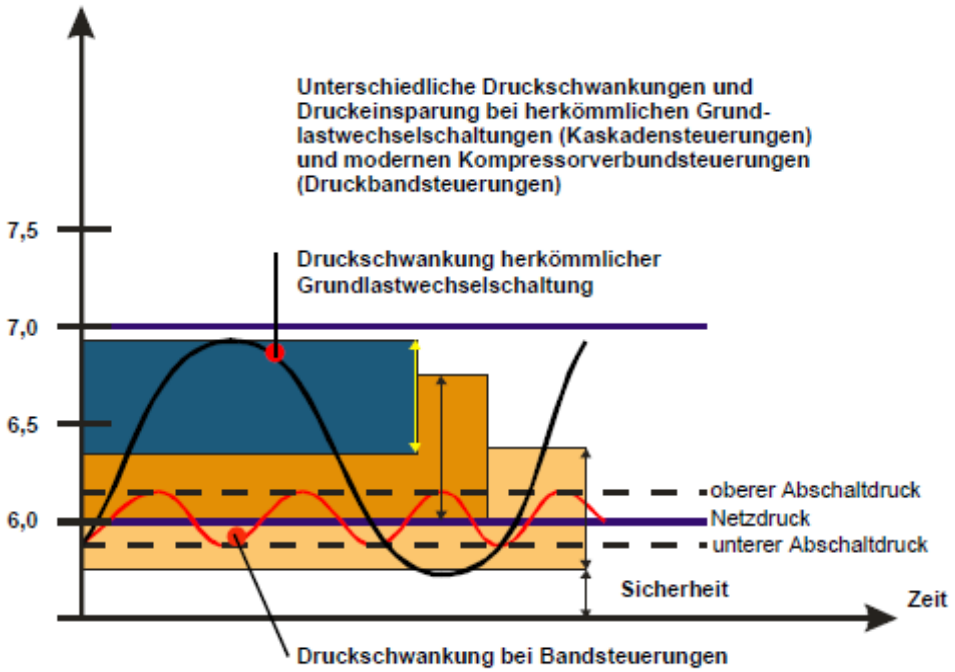


Abbildung 16-6 Druckbandregeldung

Die Druckbandregelung kann frequenzgeregelte Kompressoren und Kompressoren unterschiedlicher Größen so steuern, dass keine Regellöcher entstehen. Regellöcher entstehen bei falscher Schaltung von Kompressoren. Der produzierte Luftstrom ist nicht derselbe, wie der Luftstrom der benötigt wird. Moderne Systeme erfassen auch die Daten der Aufbereitung und leiten diese an ein Prozessleitsystem weiter.

16.2 Visualisierung

Ein notwendiger Bestandteil der Visualisierung ist die Fernüberwachung und die damit verbundenen Alarmmeldungen. Große Anlagen benötigen eine zentrale Verwaltung der Daten, um einen Überblick über den Zustand der Kompressoren zu erhalten. Übergeordnete Steuerungen können auch Trends der Kompressoren in Bezug auf Druckverlauf, Leistungsaufnahme und Durchfluss aufzeichnen und diese anschließend auswerten. Mit Hilfe der Trendaufzeichnungen können Rückschlüsse über den Zustand des Systems gezogen werden.

Die Visualisierung muss auch einzelne Komponenten des Druckluftsystems anzeigen können (Abbildung 16-7 Visualisierung).

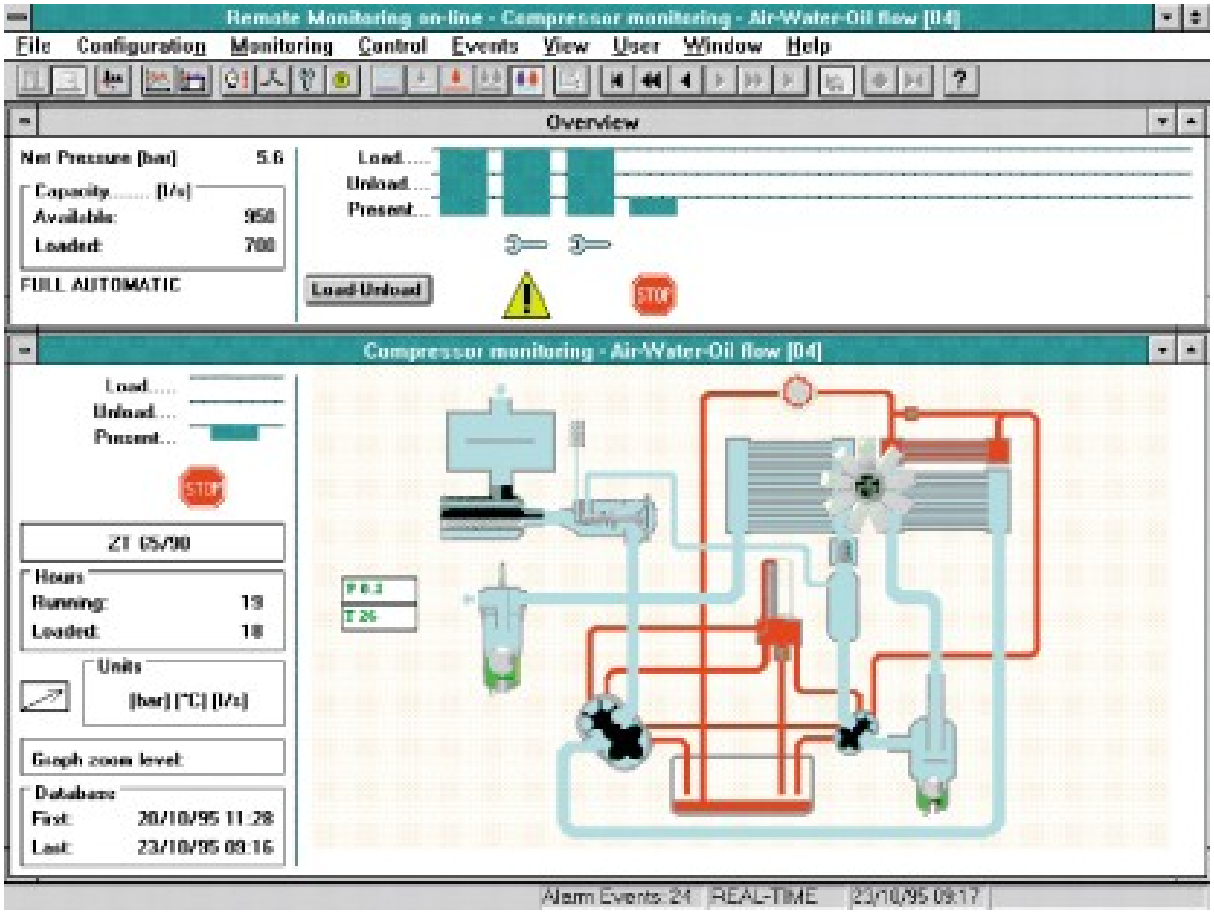


Abbildung 16-7 Visualisierung

16.3 Herstellervergleich

Ich habe zwei Hersteller kontaktiert, die mit einer so komplexen Anlage, wie sie im Werk Gratkorn steht, vertraut sind. Die Auswahl dieser Hersteller wirkte sich auf die Größe des Unternehmens und der Kompressoren, die bei uns im Werk aufgestellt sind, aus. Die Auswahl fiel auf Atlas Copco und auf die Firma Kaeser Kompressoren.

Mit beiden Firmen wurde Kontakt aufgenommen und zu einem Gespräch geladen. Die Firma Atlas Copco unterbreitete ihre Vorstellungen und Anliegen, wie das Druckluftsystem verbessert werden könnte.

Vorgaben an den Hersteller:

- Steuerung von 10 Kompressoren (3 Stück davon sind Kolbenkompressoren, die nur im Notfall betrieben werden)
- Visualisierung im PLS in der Produktionswarte
- Adaptierung der alten Steuerungen
- Steuerung von Kolben, Schrauben und Turbokompressoren
- keine Weitergabe der ausgewerteten Daten an Dritte

16.4 Steuerung Atlas Copco

Atlas Copco bietet in seiner Steuerungsreihe, der ES Serie, vier verschiedene Ausführungen an. Die Steuerungen unterscheiden sich primär durch die Anzahl der zu steuernden Kompressoren. Es steigen auch die Möglichkeiten der Regelung mit zunehmender Anzahl der Kompressoren, denn je höher die Anzahl der Kompressoren ist, desto schmaler kann das Druckband gehalten werden, in dem die Kompressoren betrieben werden.

	ES 4i	ES 6	ES 8	ES 130
Allgemein				
Beschreibung	Kompressorleit-system	Kompressorleit-system	Verbessertes Kom-pressorleitsystem	Ultimative Steuerung
Typ	Integriert	Wandmontage	Wandmontage	Wandmontage
Kapazität der Steuerung				
Max. Anzahl anschließbarer Maschinen	4	6	8	30
Belasten/Entlasten	4	6	8	30
VSD	1	1	8	30
Turbo	0	0	0	30
Vernetzung				
Max. Anzahl der über CAN-Bus vernetzten Maschinen	4	6	8	30
Max. Anzahl der über digitale Ein-/Ausgänge vernetzten Maschinen	0	5	6 (Option)	Nicht verfügbar
Systemfernsteuerung Ein/Aus	Nicht verfügbar	Standard	Option	Nicht verfügbar
Zusätzliche Analogeingänge	0	3	1	4
Hardware				
Display	S/W Text, 4 Zeilen	S/W Text, 4 Zeilen	Farbtouchscreen	10,4-Zoll-Farbtouch-screen
Druckmessung	1 lokal, optional 1 im Netz	1 im Netz	1 im Netz	2 im Netz
Schutzklasse	IP54	IP54	IP54	IP54
Maße, Tiefe x Breite x Höhe (mm)	Nicht zutreffend	150 x 300 x 400	210 x 400 x 400	105 x 432 x 336
Funktionen				
Optimierung des Druckbands	•	•	•	•
Systemabschaltung und Neustart sind zeitgesteuert	•	•	•	•
Duales Druckband, zeitgesteuert	•	•		
Mehrere Druckbänder, zeitgesteuert			•	•
Standby-Aktivierung für kurze Phasen		•	•	•
Abgleich der Betriebsstunden zwischen den ausgewählten Maschinen	•	•	•	•
Einfache Sequenzauswahl, zeitgesteuert		•		
Umfassendes Sequenz- und Prioritätsmanagement, zeitgesteuert			•	
Intelligente Zusammenstellung der Maschinenkombination, je nach Bedarf				•
Verwendung von VSD zum Ausgleich von Strömungsschwankungen	•	•	•	•
Steuerung des VSD-Bereichs			•	•
Steuerung des Turbo-Bereichs				•

Abbildung 16-8 Atlas Copco Datenblatt

Für das Werk Gratkorn ist die Steuerung ES 130 von Atlas Copco empfehlenswert. Diese Steuerung ist die einzige von Atlas Copco, die auch Turbokompressoren regeln kann. Atlas Copco arbeitet mit einer SPS-Firma aus Amerika zusammen. Bei den Steuerungen von Atlas Copco werden die SPS der Firma Phoenix verwendet. Der Werksstandard in Gratkorn sind SPS Steuerungen von Siemens.

Die Systemtechniker vom Werk Gratkorn müssten eine Lösung finden, die Daten von der ES 130, in unser PLS zu übertragen. Ein großer Nachteil der Steuerung von Atlas

Copco ist, dass die Daten für die Steuerung der Kompressoren auf einem externen Server abgelegt werden, was jedoch den Sicherheitsbestimmungen der Firma sappi unterliegt. Aus diesem Grund kommt die vorgenannte Steuerung nicht zur Auswahl.

16.5 Steuerung von Kaeser

Die Steuerung vom Hersteller Kaeser heißt SIGMA AIR MANAGEMENT. Auch diese Steuerung wird in vier verschieden Varianten angeboten. Die Varianten unterscheiden sich auch bei Kaeser in erster Linie durch die Anzahl der zu steuernden Kompressoren. Der große Unterschied zwischen den Steuerungen von Kaeser und Atlas Copco ist, dass Kaeser keinen Unterschied im Bezug auf den Bautyp des Kompressors macht. Über telefonischer Nachfrage bei der Firma Kaeser wurde mir mitgeteilt, dass alle Turbo-, Schrauben- und Kolbenkompressoren mit dem Sigma Air Management geregelt werden können.

Abbildung 16-9 Kaeser Kompressoren

Modell	Druck-regelung	Anschlussmöglichkeiten für Druckluftstation				freie Ausgangssignale		freie Eingangssignale		Visualisierung SIGMA AIR CONTROL durch eingebauten Internet-Server		Kommunikation-Schnittstellen			Abmessungen B x H x T	Gewicht
			über Profibus DP		über potenzialfreie Kontakte											
	Druckband	Insgesamt steuerbare Kompres-soren 1)	Kom-pressoren mit SIGMA CONTROL	Profibus umsetzer 2)	Kompressoren ohne SIGMA CONTROL (auch andere Fabrikate)	digital	analog 0-20 mA	digital 0-20 mA	analog 0-20 mA/ PT 100	basic	plus	RS 232 3)	Ethernet (für firmeneige-nes Computer-Netzwerk) 4)	Profibus DP (Master) 5)	mm	kg
4/4	●	4x	4x	4x	4x (DA)	1x (DA) Wechsler	1x	4x	–	●	○	●	●	●	380 x 500 x 220	15
8/4	●	8x	8x	8x	4x (DA)	1x (DA) Wechsler	1x	4x	–	●	○	●	●	●	380 x 500 x 220	15
8/8	●	8x	8x	8x	8x (2xDA+2xDE)	8x (DA) Wechsler	1x	8x	1x /2x	●	○	●	●	●	500 x 700 x 250	40
16/8	●	16x	16x	8x	8x (2xDA+2xDE)	16x (DA) Wechsler	2x	32x	3x / 4x	●	○	●	●	●	800 x 1200 x 300	150

1) z. B. SIGMA AIR MANAGER 8/4: 8 Kompressoren insgesamt, beispielsweise 6 mit SIGMA CONTROL und 2 ohne SIGMA CONTROL

2) mögliche Profibusumsetzer PBU 4+4, PBU 8, PBU 8R, PBU 8K, PBU 32, PBU 8/4+4K; max. 80 Eingänge

3) RS 232 zum direkten Nutzen der Visualisierung SIGMA AIR CONTROL *basic* und *plus*:
- max. Leistungslänge 15 m
- bei Anschluss eines Schnittstellenumsetzers auf RS 485, max. 800 m

4) zur Nutzung der Visualisierung SIGMA AIR CONTROL *basic* und *plus* im firmeneigenen Computer-Netzwerk

5) zum Anschluss von Schraubenkompressoren mit Sigma Control oder KAESER-Profibusumsetzer

Systemvoraussetzungen zur Nutzung der Visualisierung, SIGMA AIR CONTROL:
PC mit Internet Explorer ab IE 6.0 oder Netscape V4.7 mit installiertem Java-Plug-In

● serienmäßig
○ Option, auch nachrüstbar
\- nicht vorgesehen
DA Digitalausgang
DE Digitaleingang

Von Kaeser würde die Steuerung 16/8 bei uns zum Einsatz kommen. Diese Steuerung kann bis zu 16 Kompressoren steuern. Kaeser arbeitet mit der SPS von Siemens, was sich bei einer Umsetzung in unserem Werk als Vorteil auswirken würde. Kaeser benötigt außerdem keinen Server für die Datenspeicherung außerhalb des Firmengeländes, was der Firmensicherheitsphilosophie von Sappi entsprechen würde. Die Einbindung der Steuerung in das vorhandene PLS würde auch leichter durchzuführen sein, da Kaeser mit Siemens zusammenarbeitet.

16.6 Stufenplan für die Einführung eines Leitsystems

Die Einführung eines Leitsystems im gesamten Werk wäre in einem Schritt sehr kostenintensiv und würde aufgrund der Auswertung und der Ist-Aufnahme im ersten Abschnitt nicht so viele Vorteile bringen, wie eine Umsetzung in Stufen. Ich habe dazu einen Stufenplan erstellt, um die Umsetzung zu erleichtern und die Kosten über einen definierten Zeitraum aufzuteilen.

Nach Analyse des Ist-Zustandes habe ich einen Drei-Stufen-Plan erstellt. Er beinhaltet die Kosten für den Umbau, die theoretische Einsparung der Energiekosten und die Dauer der Umsetzung.

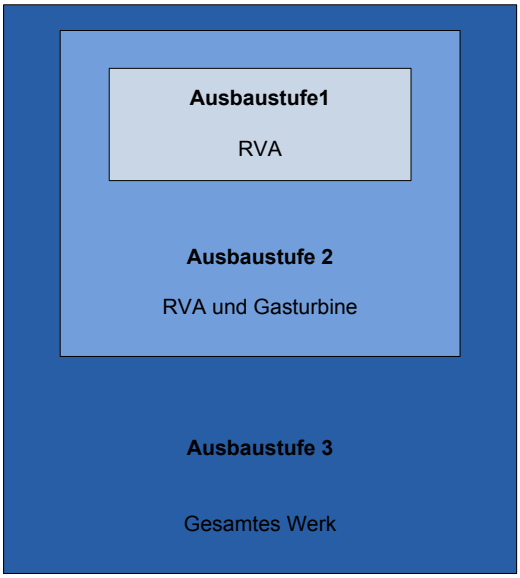


Abbildung 16-10 Stufenplan

16.6.1 Allgemeine Voraussetzungen

Um die Kompressoren an ein Leitsystem anschließen zu können, werden gewisse Voraussetzungen benötigt. Die erste ist die Kommunikation zwischen Kompressor und Leitsystem. Um diese Kommunikation herstellen zu können, müssen die Kompressoren mit einem Profibusumsetzer ausgestattet werden. Dieser ermöglicht die Kommunikation zwischen dem Leitsystem und dem Kompressor. Die zweite Voraussetzung ist, dass der Umgang des Profibussystems mit Hochspannungs-motoren gegeben sein muss. Des Weiteren muss die Steuerungen erweiterbar sein, um die Stufenpläne abarbeiten zu können. Das Leitsystem bietet die Möglichkeit, Daten direkt an unser PLS weiter zu leiten und die Alarmierungen visualisieren zu können.

16.6.2 Stufe 1

Die erste Ausbaustufe beinhaltet alle Kompressoren im Bereich RVA (Energie). Das System besteht aus den drei ZR5 Kompressoren, das sind Kompressoren K4 bis K6 und den drei noch bestehenden ER5 Kolbenkompressoren K1 bis K3. Es gilt diese Kompressoren unter eine gemeinsame Steuerung zu bringen, um den Energieverbrauch und die Auslastung besser regeln zu können.

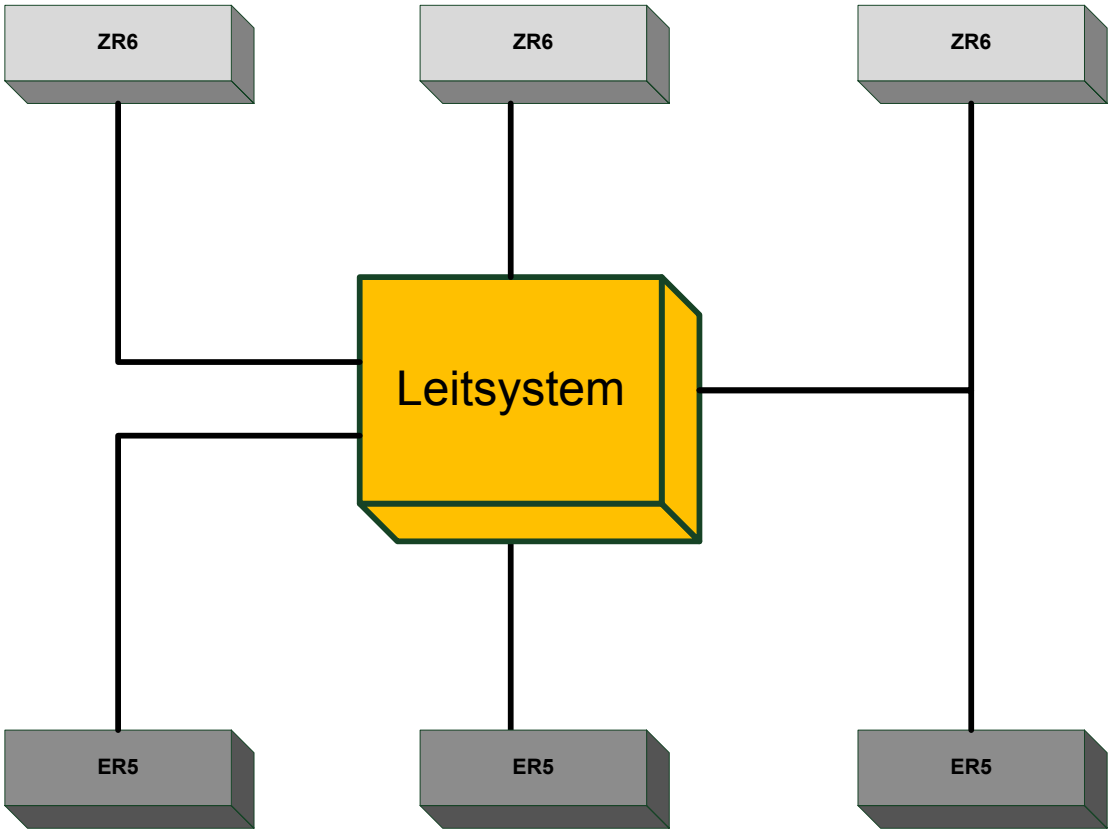


Abbildung 16-11 Leitsystem Stufe 1

Die Ist-Zustandserfassung hat ergeben, dass der Kompressor 4 die größte Auslastung hat. Im Messzeitraum von vier Wochen, das entspricht 672 Stunden, ist der Kompressor 4 654 Stunden im Betrieb gewesen. Die beiden anderen Kompressoren 5 und 6 wurden nur 390,5 und 221,0 Stunden betrieben.

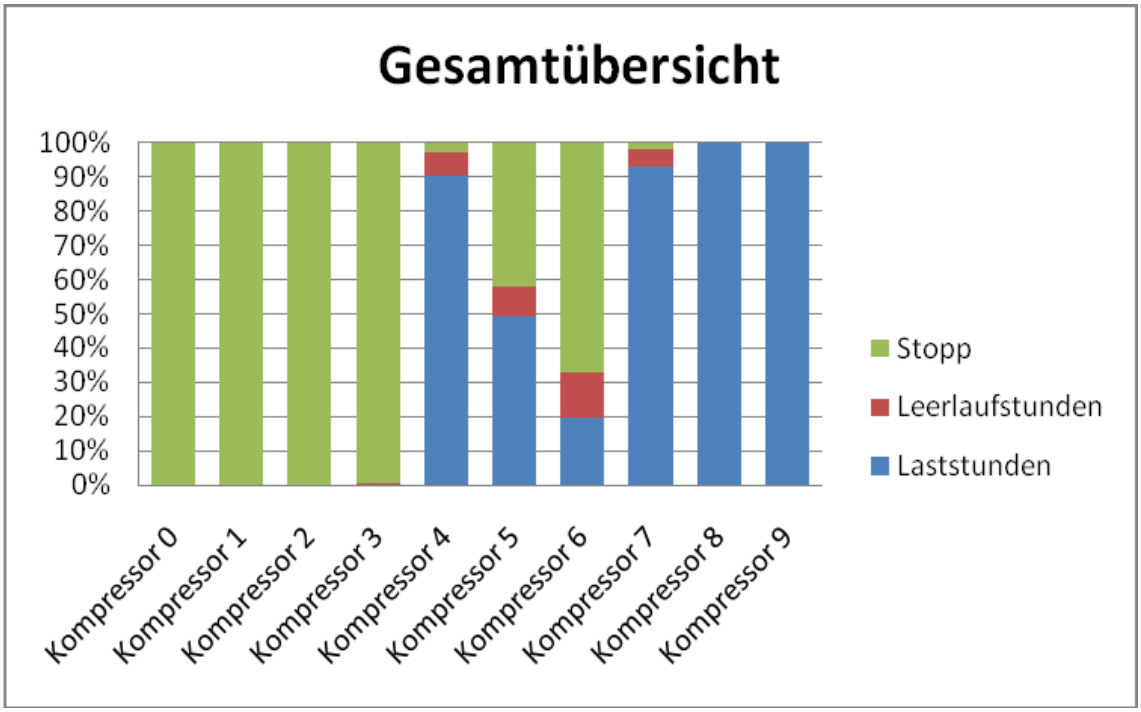


Abbildung 16-12 Kompressorenlaufzeiten

Tabelle 6 Kompressorlaufzeiten

	Laststunden	Leerlaufstunden	Stopp	Gesamt
Kompressor 0	-	-	672,00	672,00
Kompressor 1	0,15	0,01	671,84	672,00
Kompressor 2	0,39	0,03	671,58	672,00
Kompressor 3	0,92	1,48	669,60	672,00
Kompressor 4	608,00	46,00	18,00	672,00
Kompressor 5	331,50	59,00	281,50	672,00
Kompressor 6	132,00	89,00	451,00	672,00
Kompressor 7	625,76	33,00	13,24	672,00
Kompressor 8	671,28	-	0,72	672,00
Kompressor 9	671,32	-	0,68	672,00
SUMME	3.041,32	228,52	3.450,16	6.720,00

Optimal wäre es, wenn die Leerlaufstunden auf null sind und sich die Betriebsstunden zwischen den Kompressoren ausgleichen würden. Mit einem Leitsystem im Bereich der RVA kann der Großteil der Leerlaufstunden minimiert werden.
Wie auf der Tabelle 6 Kompressorlaufzeiten zu sehen ist, sind 85,5% der Leerlaufstunden im Bereich RVA. In Summe würde das eine Reduktion von 195,52 Leerlaufstunden bedeuten. Die Berechnung der Energieeinsparung erfolgt mit dem zurzeit geltenden Strompreis, welcher sich im Werk Gratkorn ständig ändert.

Die Kosten für das System setzen sich wie folgt zusammen:

Øhw	=	durchschnittliche Leerlaufstunden pro Woche	80,88 h
nj	=	Gesamtanzahl der Wochen im Jahr	52
ØPl	=	durchschnittliche Leerlaufleistung	100 kW
€kw	=	Kosten für einen Kilowatt Leistung	0,065 €/kW

$$Leerlaufkosten = Øhw * nj * ØPl * €kw$$

Da die Kompressoren einer maximalen Schalthäufigkeit unterliegen, rechne ich einen Sicherheitsfaktor bei der Einsparung von 50% ein.

S	=	Sicherheitsfaktor	2

$$Leerlaufkosten = (Øhw * nj * ØPl * €kw)/S$$

Das ergibt Kosten für den Leerlauf im Jahr von **€ 12.301**

Zusätzlich soll das Druckband um 0,2 bar im ersten Schritt gesenkt werden. Das erbringt eine weitere Einsparung von rund 3% an Energiekosten. Die Volllaststunden im Bereich RVA belaufen sich auf 13948 Stunden pro Jahr. Die daraus entstehende Einsparung beläuft sich auf € 8454.

In Summer ergibt das eine jährliche Einsparung von **€ 20.755**

Der Umbau für den Bereich RVA stellt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

Tabelle 7 Kosten Stufe 1

Pos.	Beschreibung	Menge	ME	Einzelpreis	Gesamt
1	Steuereinheit inklusive Einbauten	1	ST	€ 7.600,00	€ 7.600,00
2	Druckmessumformer	1	ST	€ 350,00	€ 350,00
3	Profibusumsetzer (Relais)	1	ST	€ 1.135,00	€ 1.135,00
4	Profibusumsetzer (AI+AO)	1	ST	€ 2.575,00	€ 2.575,00
5	Kabel (Lichtwellenleiter)	500	m	€ 3,00	€ 1.500,00
6	Kabel (Profibus)	150	m	€ 2,00	€ 300,00
7	Verlegung der Kabel	160	h	€ 51,00	€ 8.160,00
				Summe	**€ 21.620,00**

$$Rendite = \frac{Umbaukosten}{Einsparungen}$$

Der Umbau der Anlage hätte sich innerhalb von 1,042 Jahren rentiert.

16.6.3 Stufe 2

In der zweiten Stufe wird der neue Kompressor des Herstellers Atlas Copco im Gebäude der Gasturbine eingebunden, um den nördlichen Teil der Drucklufterzeugung stabil zu machen. Bei dieser Erweiterung ist die Distanz zwischen den Kompressoren im Werk die größte Aufgabe, die es zu überwinden gibt. An Anbauteilen wird lediglich ein Profibusumsetzer benötigt. Die Steuerung kann in diesem Fall dieselbe bleiben und muss nicht ersetzt werden. Da dieser Kompressor noch nicht installiert ist, können keine genauen Aussagen über Leerlaufstunden und Auslastung gemacht werden. Aus diesem Grund habe ich lediglich die Kosten der Einbindung aufgelistet.

Tabelle 8 Kosten Stufe 2

Pos.	Beschreibung	Menge	ME	Einzelpreis	Gesamt
1	Profibusumsetzer (Relais)	1	ST	€ 1.135,00	€ 1.135,00
2	Profibusumsetzer (AI+AO)	1	ST	€ 2.575,00	€ 2.575,00
3	Kabel (Lichtwellenleiter)	2000	m	€ 3,00	€ 6.000,00
4	Kabel (Profibus)	50	m	€ 2,00	€ 100,00
5	Verlegung der Kabel	320	h	€ 51,00	€ 16.320,00
				Summe	**€ 26.130,00**

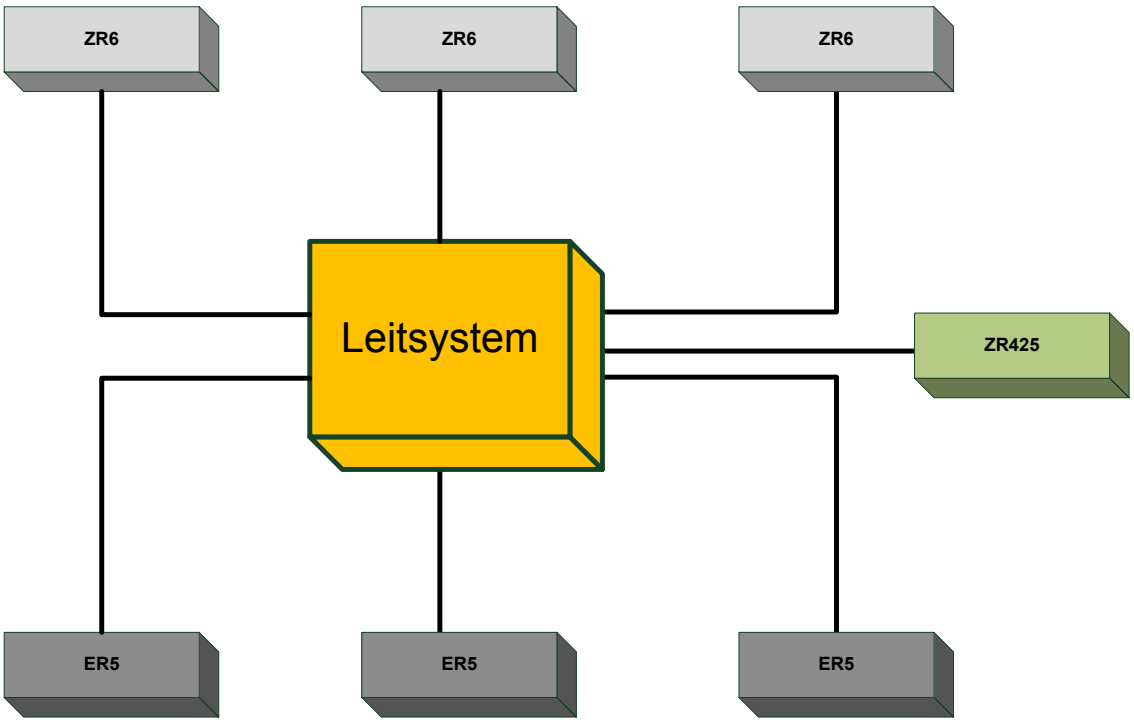


Abbildung 16-13 Leitsystem Stufe2

16.6.4 Stufe 3

Die dritte Stufe beinhaltet die restlichen drei Kompressoren, das sind die Kompressoren K7, K8 und K9. Die große Distanz zwischen dem nördlichen Bereich und den drei Kompressoren in der Papierfabrik ist zu groß, um sie mit normalen Leitungen überbrücken zu können. Des Weiteren laufen diese Kompressoren laut unserer Ist-Zustandsaufnahme beinahe immer unter Volllast. Die Regelung für diese Kompressoren ist daher in unserem Druckluftsystem zweitrangig.

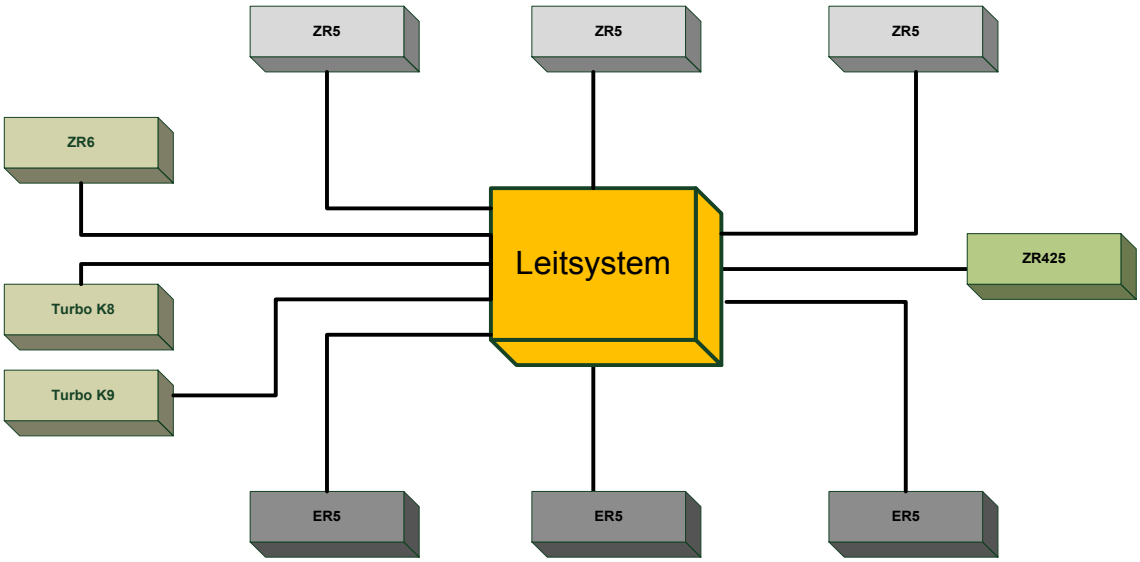


Abbildung 16-14 Leitsystem Stufe 3

In der dritten Stufe sollen alle Kompressoren in das Leitsystem eingebunden werden. In den vier Wochen des Messzeitraums beliefen sich die Leerlaufstunden der Kompressoren K7, K8 und K9 auf 33 Stunden. Diese 33 Stunden waren ausschließlich beim Kompressor 7; die beiden Turbokompressoren K8 und K9 liefen bis auf den Komplettausfall in der ersten Woche durch.

Øhw	=	durchschnittliche Leerlaufstunden pro Woche	8,25 h
nj	=	Gesamtanzahl der Wochen im Jahr	52
ØPl	=	durchschnittliche Leerlaufleistung	380 kW
€kw	=	Kosten für einen Kilowatt Leistung	0,065 €/kW

$$Leerlaufkosten = Øhw * nj * ØPl * €kw$$

Das ergibt Kosten im Wert von **€ 10.596**

Wenn der Sicherheitsfaktor berücksichtigt wird, belaufen sich die Einsparungen auf 5298€/a.

S = Sicherheitsfaktor 2

$$Leerlaufkosten = (Øhw * nj * ØPl * €kw)/S$$

Die Kostenaufstellung für die Einbindung stellt sich zusammen wie folgt:

Tabelle 9 Kosten Stufe 3

Pos.	Beschreibung	Menge	ME	Einzelpreis	Gesamt
1	Steuereinheit inklusive Einbauten	1	ST	€ 18.500,00	€ 18.500,00
2	Druckmessumformer	2	ST	€ 350,00	€ 700,00
3	Profibusumsetzer (Relais)	2	ST	€ 1.135,00	€ 2.270,00
4	Profibusumsetzer (AI+AO)	2	ST	€ 2.575,00	€ 5.150,00
5	Kabel (Lichtwellenleiter)	3000	m	€ 3,00	€ 9.000,00
6	Kabel (Profibus)	300	m	€ 2,00	€ 600,00
7	Verlegung der Kabel	480	h	€ 51,00	€ 24.480,00
				Summe	**€ 60.700,00**

Diese Ausbaustufe benötigt auf Grund der Anzahl von Kompressoren eine neue Steuerung. Die Steuerung von Kaeser für die Stufen 1 und 2 kann maximal 8 Kompressoren verarbeiten.

$$Rendite = \frac{Umbaukosten}{Einsparungen}$$

Es ergibt sich aus diesen Kosten und Nutzen eine Rendite von 11,46 Jahren.

16.6.5 Fazit

Wenn nach meinen Berechnungen die Renditen der Ausbaustufen verglichen werden, ist klar zu erkennen, dass lediglich die Stufe 1 Sinn macht. Mit diesem Umbau kann der Großteil der Leerlaufstunden im Werk Gratkorn reduziert werden. Der Umbau hätte sich in einem Jahr rentiert und wäre mit kleineren finanziellen Mittel durchführbar.

Um über die Stufe 2 exakte Aussagen treffen zu können, muss erst der neue Kompressor der Firma Atlas Copco installiert werden. Dies sollte so schnell als möglich durchgeführt werden.

Für den Ausbau der Stufe 3 ist klar zu erkennen, dass sich dieser Umbau nicht rentiert. Die Kosten für den Umbau überschreiten die Einsparungen bei Weitem.

17 **Kostenabschätzung einer neuen Hauptleitung**

Da über Jahrzehnte die Rohrleitungen im Werk Gratkorn gewachsen sind und die Dimensionen nicht mehr ausreichend groß sind, möchte ich hier eine Grobdimensionierung und Kostenabschätzung abgeben.

Zuerst gilt es den maximalen Durchfluss zu ermitteln. Der größte Durchfluss entsteht nicht im normalen Betrieb, sondern beim Ausfall von Kompressoren. In diesem Fall müssen die anderen Kompressoren die Druckluft für das Werk bereit stellen.

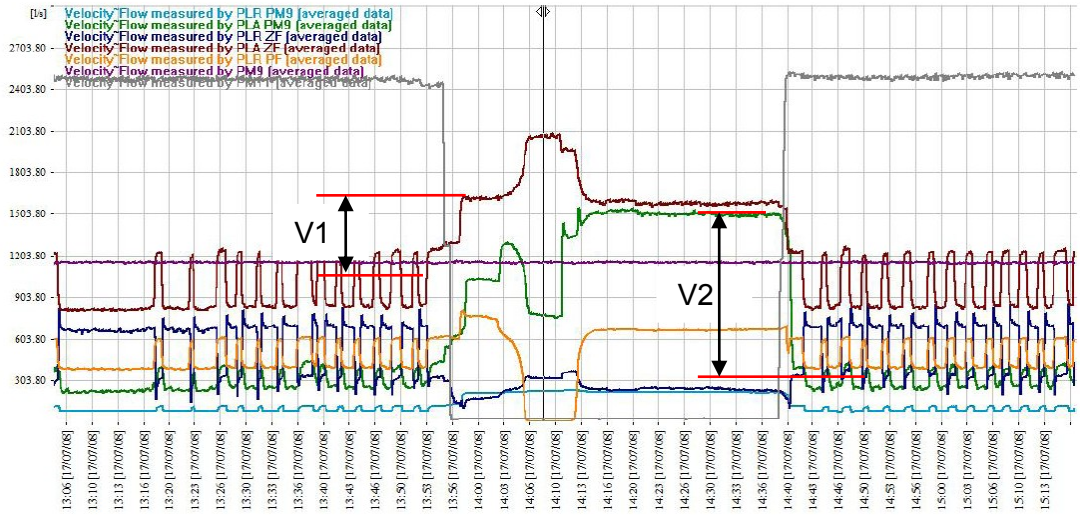


Abbildung 17-1 Volumenströme bei Ausfall der Turbokompressoren

Beim Ausfall der beiden Turbokompressoren sieht man, wie viel Druckluft von der Kompressorstation in der Energie zu den Verbrauchern der Papierproduktion fließen muss. Die Gesamtsumme ergibt sich aus den beiden Teilströmen V1 und V2.

Teilstrom eins	V1 = 650 l/s
Teilstrom zwei	V2 = 1200 l/s
Gesamtvolumenstrom	VG= 1850 l/s

Berechnung des Innendurchmessers mittels einer Näherungsformel

pe = Anfangsdruck (Überdruck – Pa)

L = Nennlänge (m)

Q = Volumenstrom (m³/s)

Δp = Druckverlust (Pa)

$$Innendurchmesser = \sqrt[5]{\frac{1{,}6 * 10^3 * Q^{1{,}85} * L}{\Delta p * pe}}$$

Mit einem Überdruck im System von 7 bar ergibt das einen Anfangsdruck von 6 bar. Die Umrechnung von l/s in m³/s ist einfach. Es ergibt sich ein Volumenstrom von 1,85 m³/s.

Die Länge L habe ich aus dem Werksplan (siehe Anhang) abgemessen. Die größte Distanz, die sich ergeben kann, wurde zur Dimensionierung der Rohrleitung herangezogen. Es ergibt sich aus den Messungen eine Distanz von 890 m. Im Fachbuch „Optimale Druckluftverteilung von Karl Heinz Feldmann“ wird angegeben, dass bei einem normalen System die gemessene Länge mal 1,5 gerechnet werden muss, um Krümmer, T-Stücke und andere Druckabfälle zu berücksichtigen. Das ergibt in Summe eine Länge von 1330 m.

Der Druckverlust Δp in Hauptleitungen sollte 0,03 bar nicht überschreiten. Bei größeren Druckverlusten ergibt sich eine unwirtschaftliche Energiebilanz.

Setzt man diese Werte in die Gleichung ein, ergibt sich ein Innendurchmesser von 330 mm.

In Zusammenarbeit mit einer Stahlbaufirma habe ich eine Kostenabschätzung aufgestellt. Diese Kostenaufstellung habe ich in zwei Tabellen aufgeteilt. Die erste Tabelle beinhaltet die Arbeit für die Herstellung und Installation der gesamten Leitung und das Material für Halterungen. In der zweiten Tabelle ist das benötigte Material für die Rohrleitung zusammengefasst. Der Endpreis ist jedoch immer von den gültigen Stahlpreisen und Stundenlöhnen abhängig. Die Kalkulation darf somit nur als Richtwert angesehen werden und dient lediglich als Stütze bei der Umsetzung.

Tabelle 10 Kostenaufstellung Stunden

Bezeichnung	Menge Stk./lfm/kg	Einzelarbeitsstunden	Gesamtstunden	Stundensatz	Materialkosten	Positionspreis	Bemerkung
Rohr 1.4432 356x3mm	1400	2	2800	€ 42,00		€ 117.600,00	
Form-Verbindungsstücke 1 Naht 356x3mm	20	2,4	48	€ 42,00		€ 2.016,00	
Form-Verbindungsstücke 2 Nähte 356x3mm	80	4,8	384	€ 42,00		€ 16.128,00	
Form-Verbindungsstücke 3 Nähte 356x3mm	10	7,6	76	€ 42,00		€ 3.192,00	
Montage Armaturen DN300	8	5	40	€ 42,00		€ 1.680,00	
Schrauben, Dichtungen DN300 Sätze	20				€ 1.600,00	€ 1.600,00	
Stutzen DN50 inkl. Armaturen	8	3,5	28	€ 42,00		€ 1.176,00	
Halterungen Sekundär CS Stahl	7000	0,15	1050	€ 42,00	€ 12.600,00	€ 56.700,00	
Rohrschuhe Primär SS Stahl	5000	0,18	900	€ 42,00	€ 19.000,00	€ 56.800,00	
Einbindungen Bestand/Kompressor	6	8	48	€ 48,00	€ 500,00	€ 2.804,00	im Stillstand
Druckprobe	1	40	40	€ 48,00	€ 200,00	€ 2.120,00	im Stillstand
Baustelleneinrichtung	1	40	40	€ 42,00	€ 2.000,00	€ 3.680,00	
Gerüstung	1				€ 15.000,00	€ 15.000,00	Schätzung
Hebezeuge, Kräne	1				€ 40.000,00	€ 40.000,00	Schätzung
Aufwand Dokumentation, QS, Safety	1	400	400	€ 48,00		€ 19.200,00	Techniker
Sonstige Zusatzkosten	1				€ 20.000,00	€ 20.000,00	

Gesamtkosten ohne Material (ausg. Halterungen u. Verbindungsteile) exkl. MwSt.: **€ 359.696,00**

Tabelle 11 Rohrleitungskosten

Bezeichnung	Menge Stk./lfm/kg	Materialkosten	Materialkosten Summe	Bemerkung
Rohr 1.4432	1400	€ 50,00	€ 70.000,00	
Form-Verbindungsstücke T-Stück	6	€ 736,00	€ 4.416,00	
Form-Verbindungsstücke Bögen	80	€ 350,00	€ 28.000,00	

Die Kosten exkl. MwSt. für das Rohrmaterial belaufen sich auf **€ 102.416,00**

In Summe belaufen sich die Kosten auf rund **€ 461.700**.

Fazit

Bei einer Installation der Leitung könnte das Druckband reduziert werden. Grund dafür ist der reduzierte Druckverlust über die gesamte Leitung. Des Weiteren würde diese rostfreie Leitung für die Zukunft Leistungsreserven aufweisen und keine Probleme mit Rost und somit Verschmutzungen bereiten.

18 Literaturverzeichnis

- Karl Heinz Feldmann: Optimale Druckluftverteilung. – 2.Aufl. – Renningen: expert Verlag, 2003
- Erwind Ruppelt: Druckluft Handbuch. – 4. Aufl. – Essen: VULKAN-VERLAG, 2003
- Atlas Copco Kompressoren: Handbuch der Drucklufttechnik. – 6. Aufl. – Essen: Atlas Copco Kompressoren und Drucklufttechnik 2003
- Frauenhofer Institut ISI: Druckluft effizient.- Karlsruhe: Frauenhofer Institut ISI 2003
- KAESER Kompressoren: Sigma Air Manager
- Atlas Copco: Bedienungsanleitung ES130. – Atlas Copco 2007
- Europa Lehrmittel: Tabellenbuch Metall. – 41.Aufl. – FS Fachbuch 1999
- Div. Internetseiten
- Hoppenstedt Bonnier: Druckluftkompendium. – 6. Aufl. – Darmstadt 2004

19 Quellen aus dem Internet

- Nassluftfilter: http://images.linx.de/linx/showcases_middle/2904.jpg, Verfügbar am 29. September 2009
- Wartungseinheit: http://www.wartungsgeraet.de/wartungseinheit.gif, Verfügbar am 28. September 2009
- Luftschlauch:http://www.korrosionsschutzshop.de/cms/wp-content/uploads/2009/05/druckluftschlauch-spiralschlauch.jpg, Verfügbar am 30 Juni 2009
- Sonaphone: http://www.sonotec.de/bilder/sonaphone_rd_05_gr.jpg, Verfügbar am 29. September 2009
- Lecksuchspray: http://www.h-schmidt-technik.de/Lecksuchspray.jpg, Verfügbar am 29. September 2009
- Atlas Coco Internetseit: http://www.atlascopco.com/dede/, Verfügbar den gesamten Herbst und Winter 2009
- Kaeser Kompressoren: http://www.kaeser.de/, Verfügbar den gesamten Herbst und Winter 2009
- Taschenfilter: http://filtertechnik.wesco.ch/infoglueDeliverWorking_wesco/digitalAssets/220_2.1.4.1-mit-Holzrahmen.jpg, Verfügbar am 29. September 2009

20 **Anhangverzeichnis**

Anhang 1 Werksübersichtzeichnung

Anhang 2 Messaufbau der Ist-Aufnahme

Anhang 3 Werkszeichnung mit Längenangaben