

Schlussbericht **September 2005**

# Optimierung der Steuerluft - Versorgung bei der Valorec Services AG

ausgearbeitet durch

Ralf Dott

Thomas Afjei

Institut für Energie - Fachhochschule beider Basel

St. Jakobs Strasse 84

4132 Muttenz

[www.fhbb.ch/energie](http://www.fhbb.ch/energie)



**Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie, der Valorec Services AG und dem Amt für Umwelt und Energie - Basel-Stadt entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.**

**Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:**

[www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum.....</b>	<b>2</b>
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Ausgangslage, Vorgehen .....</b>	<b>6</b>
1.1 Bedeutung	6
1.2 Projektpartner	6
1.3 Projektziele	6
1.4 Vorgehen	7
<b>2. Technik.....</b>	<b>8</b>
2.1 IST-Zustand	8
2.2 Messdaten und Kennzahlen	12
2.3 Verdichter-Steuerung im Werk Klybeck	15
<b>3. Markt und Akteure.....</b>	<b>17</b>
3.1 Anbieter, Planer	17
3.2 Know-how	18
<b>4. Einspar-Möglichkeiten und -Potenziale .....</b>	<b>19</b>
4.1 Analyse IST-Zustand	19
4.2 Vergleichswerte	23
4.3 Potenzialabschätzung	25
<b>5. Umsetzungsmöglichkeiten.....</b>	<b>27</b>
5.1 Druckniveau	27
5.2 Zwei Zentralen	27
5.3 Verlegung Luftansaugung zu Aussenluft	27
5.4 Verbundsteuerung	28
5.5 Teilerneuerung	29
5.6 Bewertung durch Vergleich mit Neuanlagen	32
<b>6. Zusammenfassung .....</b>	<b>33</b>
6.1 Empfohlene Massnahmen	33
6.2 Realisierungsvorhaben	33
6.3 Ausblick	33
<b>7. Quellenverzeichnis .....</b>	<b>34</b>
<b>8. Anhang.....</b>	<b>35</b>
8.1 Potenzialabschätzung Werk Rosental	35
8.2 Vollkostenaufstellung der Optimierungsvarianten WKL	36

## Impressum

### Auftraggeber:

Bundesamt für Energie  
Roland Brüniger  
Zwillikerstr. 8  
CH-8913 Ottenbach  
roland.brueeniger@r-brueeniger-ag.ch

Leiter Programm Elektrizität  
Tel: +41-(0)1-760 00 66  
Fax: +41-(0)1-760 00 68

Valorec Services AG  
Hans Koller  
Postfach 118  
4019 Basel  
hans.koller@valorec.com

COO Energien  
Tel: +41-(0)61-468 85 48  
Fax: +41-(0)61-468 85 47

Amt für Umwelt und Energie - Basel-Stadt  
Ruedi Jegge  
Kohlenberggasse 7  
4051 Basel  
rudolf.jegge@bs.ch

Abteilungsleiter  
Tel: +41-(0)61-225 97 32  
Fax: +41-(0)61-225 97 31

### Beauftragter:

Institut für Energie – FHBB  
Ralf Dott  
Thomas Afjei  
St. Jakobs Strasse 84  
CH-4132 Muttenz  
ralf.dott@fhbb.ch

Projektleiter  
stellv. Projektleiter  
Tel: +41-(0)61-467 45 74  
Fax: +41-(0)61-467 45 43

### Projektgruppe:

Valorec Services AG  
Erich Strub  
Hanspeter Gorrengourt

Meister EVS WKL/WRO  
Leiter Elektro/Automation EVS WKL/WRO

HTA Luzern  
Bruno Stadelmann  
Technikumstrasse 21  
CH-6048 Horw  
bstadelmann@hta.fhz.ch

Leiter Druckluftkompetenzzentrum  
Tel: +41-(0)41-349 32 69  
Fax: +41-(0)41-349

Fraunhofer - ISI  
Peter Radgen  
Breslauer Strasse 48  
D-76139 Karlsruhe  
p.radgen@isi.fraunhofer.de

Druckluft-Effizient  
Tel: +49-(0)721-6809 295  
Fax: +49-(0)721-6809 272

### Beteiligte Firmen:

Ingersoll-Rand  
Reinhold Schiffmann  
Markus Altmann

Kundenbetreuung Direct, AfterSales  
Gebietsleiter Süd-West und Schweiz

Reis Engineering  
Peter A. Reis

Geschäftsleiter

Kaeser Kompressoren AG  
Franco Cairella  
Peter Häni

Verkaufsleiter/Innendienst  
Technischer Berater

## Zusammenfassung

Das Projekt „Optimierung der Steuerluft - Versorgung bei der Valorec Services AG“ umfasst Ziele auf 3 Ebenen, zum einen die Optimierung der Steuerluftherzeugung bei der Valorec Services AG im Werk Klybeck in Basel, zum zweiten die Reduzierung von Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen im Basler Stadtbereich und zum dritten die Aktivierung des hohen Energieeinsparpotenzials im Bereich Druckluft. Diese 3 Ebenen sind repräsentiert durch die drei Auftraggeber Bundesamt für Energie, Valorec Services AG und Kanton Basel-Stadt.

Steuerluft bedeutet hier Druckluft mit 6.5bar<sub>ü</sub> beim Anwender mit den Qualitätsanforderungen ölfrei und Drucktaupunkt < -23 °C. Als Sicherheitsenergie muss die Verfügbarkeit an 365 Tagen im Jahr rund um die Uhr gewährleistet sein. Zur Erzeugung der Steuerluft werden 3 Turboverdichter der Grösse 2400Nm<sup>3</sup>/h bis 3000Nm<sup>3</sup>/h aus den Jahren 1976 bis 1995 und ein ölfreier Schraubenverdichter mit 2000Nm<sup>3</sup>/h von 1969 eingesetzt. Die Aufbereitung erfolgt wegen der hohen Anforderungen mit extern warm regenerierten Adsorptionstrocknern. Die Erzeugung befindet sich an zwei Standorten in dem ca. 4.5 km langen Steuerluftnetz, von wo aus jeweils die Hälfte des Bedarfs gedeckt wird. Zwei der jeweils autark arbeitenden Verdichtersteuerungen müssen in Kürze ausgetauscht werden.

Die Analyse des IST-Zustandes ergibt eine Jahreslieferungsmenge von rund 40 Mio.Nm<sup>3</sup>/a mit leicht fallender Tendenz bei einem Strombedarf von 6'500 MWh/a. Die spezifischen Kennzahlen weisen einen Energiebedarf zur Druckluftherzeugung von 0.160 kWh/Nm<sup>3</sup> und Kosten von 1.99 Rp./Nm<sup>3</sup> aus. Der Bedarf liegt zu 70% zwischen 4500 & 5500 Nm<sup>3</sup>/h bei einem Spitzenbedarf von 8000 Nm<sup>3</sup>/h. Vergleichswerte für die chemische Industrie aus der Kampagne Druckluft-Effizient (D) weisen für den spezifischen Energiebedarf 0.085...0.170 kWh/Nm<sup>3</sup> und für die spezifischen Kosten 0.77...1.90 Rp./Nm<sup>3</sup> aus. Diese Vergleichswerte basieren auf einem weiten Spektrum von Druckluftanlagen in der chemischen Industrie in Deutschland. Sie sind jedoch für die Branche nur bedingt anwendbar. Eine Neuanlage mit den Randbedingungen der Steuerluftherzeugung im Werk Klybeck erreicht einen spezifischen Energiebedarf von 0.115 kWh/Nm<sup>3</sup>. Die niedrigeren Werte aus dem Branchenvergleich können nur bei geringerem Druckniveau erreicht werden. Das Druckniveau kann in Anwendungen in der chemischen Industrie zwischen 2.5 bar<sub>ü</sub> bis zu 10 bar<sub>ü</sub> liegen. Ein Vergleich innerhalb der Branche ist nur für Anlagen gleicher Grösse, gleichem Druckniveau und gleichen Qualitätsanforderungen sinnvoll.

Aus dem unteren Grenzwert des Energiebedarfs für eine Neuanlage von 0.115 kWh/Nm<sup>3</sup> ergibt sich das maximale Potenzial der Energieeinsparung von 1'800 MWh/a oder 28% vom aktuellen Energiebedarf. Für die Anlage im Werk Klybeck können 2/3 des Potenzials mit einfachen Rückzahl dauern zwischen 1 und 4 Jahren erreicht werden. Hierfür ist eine Teilerneuerung der Verdichter mit dem Ziel einer besseren Teillasteffizienz notwendig, kombiniert mit der Realisierung einer Verbundsteuerung, welche die vorhandenen Verdichter entsprechend ihren Möglichkeiten mit maximaler Effizienz betreibt. Die Energieeinsparung beträgt dabei bis etwa 1'200 MWh/a oder 19%. Eine Verbundsteuerung alleine könnte über eine leichte Absenkung des mittleren Druckniveaus in der Erzeugung und die optimale Auslastung der Verdichter den Energiebedarf um 4% oder 260 MWh/a reduzieren.

## Résumé

Le projet « Optimisation de l'approvisionnement en air comprimé du système de commande pneumatique des installations de Valorec Services SA » poursuit des objectifs qui se situent sur trois plans distincts. Il s'agit 1° d'optimiser la production de l'air comprimé dans l'usine Klybeck de cette entreprise à Bâle, 2° de réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> en ville de Bâle, et 3° d'apporter une réponse concrète aux économies considérables d'énergie qui sont possibles dans le secteur de l'air comprimé. A ces trois centres d'intérêt correspondent les trois mandants du projet : l'Office fédéral de l'énergie, Valorec Services SA et le Canton de Bâle-Ville.

En l'espèce, l'air comprimé utilisé pour les commandes pneumatiques doit avoir une pression utile de 6.5 bar par rapport à la pression atmosphérique et un point de rosée inférieur à -23 °C. Il doit être exempt de traces d'huile. Comme c'est une énergie intervenant dans les systèmes de sécurité, cet air doit être disponible 365 jours par année, 24 heures sur 24. Il est produit actuellement par trois turbocompresseurs datant de 1976 à 1995, au rythme de 2'400 Nm<sup>3</sup>/h à 3'000 Nm<sup>3</sup>/h selon la machine, ainsi que par un compresseur à vis de 1969 exempt d'huile, capable de délivrer 2'000 Nm<sup>3</sup>/h. Vu les exigences élevées, l'air comprimé est traité à l'aide d'appareils de séchage à adsorption pouvant être régénérés à chaud. La production a lieu à deux emplacements du réseau de distribution, qui totalise 4.5 km de conduites. La couverture des besoins se répartit à parts égales entre ces deux emplacements. Les compresseurs ont chacun leur propre commande, entièrement autonome. Deux de ces commandes doivent être remplacées dans un proche avenir.

L'analyse de la situation actuelle fait apparaître une quantité totale délivrée d'environ 40 millions de Nm<sup>3</sup>/a, avec une légère tendance à la baisse. La consommation correspondante d'électricité se monte à 6'500 MWh/a. Il en résulte une consommation spécifique de 0.160 kWh/Nm<sup>3</sup> et un prix de revient unitaire de 1.99 ct./Nm<sup>3</sup>. Pendant 70% du temps, les besoins se situent entre 4'500 et 5'500 Nm<sup>3</sup>/h, avec des pointes allant jusqu'à 8'000 Nm<sup>3</sup>/h. A titre de comparaison, la campagne « Efficacité de l'air comprimé » effectuée auprès de l'industrie chimique allemande a révélé une consommation spécifique variant de 0.085 à 0.170 kWh/Nm<sup>3</sup> et un prix de revient unitaire de 0.77 à 1.90 ct./Nm<sup>3</sup> selon l'installation. Les installations d'air comprimé considérées au cours de cette campagne étaient de types très divers. La généralisation de ces résultats à la branche entière n'est cependant pas possible sans autre. Dans l'usine de Klybeck, une installation nouvelle répondant aux exigences de l'air comprimé destiné aux commandes pneumatiques atteint la valeur de 0.115 kWh/Nm<sup>3</sup>. Les valeurs plus basses enregistrées lors de la campagne allemande ne peuvent être obtenues qu'avec une pression de service inférieure. Or, dans les applications de l'industrie chimique, la pression peut se situer entre 2.5 et 10 bar. C'est pourquoi toute comparaison d'une entreprise à l'autre doit se faire entre installations de même taille, de même niveau de pression et répondant aux mêmes exigences de qualité de l'air produit.

Si l'on admet qu'une installation nouvelle aura une consommation d'au moins 0.115 kWh/Nm<sup>3</sup>, la plus grande économie d'énergie possible se monte à 1'800 MWh/a, soit 28% des besoins actuels. Dans l'installation de l'usine de Klybeck, il est possible de concrétiser les 2/3 de ces économies potentielles par des mesures pouvant être amorties sur des périodes de 1 à 4 ans. Dans ce but, il faudra remplacer partiellement les compresseurs de manière à obtenir un meilleur rendement à charge partielle. En même temps, il faudra introduire une commande commune qui optimise l'utilisation de l'ensemble des compresseurs en fonction des meilleures performances possibles pour chacun d'eux. On économisera ainsi environ 1'200 MWh/a ou 19%. Si, au contraire, on introduisait seulement la commande commune en conservant tous les compresseurs actuels, l'économie réalisée serait de 4% ou 260 MWh/a, par le biais d'une légère réduction de la pression moyenne à la production et d'une meilleure mise à contribution des équipements de compression.

## Abstract

The project "Optimization of control air - supply with the Valorec Services AG" covers goals on 3 levels, on the one hand the optimization of the control air production with the Valorec services AG in the premises Klybeck in Basel, to second the reduction of energy consumption and CO<sub>2</sub>-emissions in the city of Basel and to third the activation of the high energy savings potential within the applications of compressed air. These 3 levels are represented in the three principals Swiss Federal Office of Energy, Valorec Services AG and canton Basel-Stadt.

Control air means here compressed air with 6.5 bar<sub>i</sub> at the user with the quality requirements oil-free and pressure dew point <-23 °C. As safety energy the availability must be ensured on 365 days in the year around the clock. The control air is produced with 3 turbo compressor of the quantity 2400Nm<sup>3</sup>/h to 3000Nm<sup>3</sup>/h from the years 1976 to 1995 and one oil-free rotary screw compressor with 2000Nm<sup>3</sup>/h of 1969. The processing takes place with externally warm regenerated adsorption driers because of the high requirements. The production is at two locations in a control air net of approximately 4.5 km, of where from in each case half of the need is covered. Two of the self-sufficient working compressor controls must be exchanged soon.

The analysis of the actual situation results in a yearly delivery volume of approximately 40 mio.Nm<sup>3</sup>/a with easily falling tendency and an electricity demand of 6'500 MWh/a. Specific characteristic numbers point out a power requirement for the compressed air supply of 0.160 kWh/Nm<sup>3</sup> and costs of 1.99 Rp./Nm<sup>3</sup>. The need lies to 70% between 4500 & 5500 Nm<sup>3</sup>/h with a peak demand of 8000Nm<sup>3</sup>/h. Comparative values for the chemical industry from the campaign Druckluft-Effizient (D) point out 0.085...0.170 kWh/Nm<sup>3</sup> for the specific power demand and 0.77...1.90 Rp./Nm<sup>3</sup> for the specific costs. These reference values are based on a spectrum of compressed air units in the chemical industry in Germany. However they are applicable for the chemical industry only conditionally. A new installation with the boundary conditions of the control air production in the premises Klybeck achieves a specific power requirement of 0.115 kWh/Nm<sup>3</sup>. The lower values from the industry comparison can be achieved only with smaller pressure level which can lie in applications in the chemical industry between 2.5 bar<sub>i</sub> up to 10 bar<sub>i</sub>. A comparison within the industry is only useful for plants of same size, same pressure level and quality requirements.

The maximum potential of the energy saving with 1'800 MWh/a or 28% results from the lower limit value of the power requirement for a new installation of 0.115 kWh/Nm<sup>3</sup>. For the plant in the premises Klybeck 2/3 of the potential can be achieved with pay back times between 1 and 4 years. For this a partial renewal of the compressors with the goal of better partial load efficiency is necessary, combined with the realization of a superior control, which operates the existing compressors according to its possibilities with maximum efficiency. The energy conservation amounts thereby up to 1'200 MWh/a or 19%. A superior control alone would reduce the power demand by around 4% or 260 MWh/a over an easy sinking of the middle pressure level in the production and the optimal extent of utilization of the compressors.

# 1. Ausgangslage, Vorgehen

## 1.1 Bedeutung

In diesem Projekt soll die Steuerlufterzeugung der Fa. Valorec Services AG optimiert werden, welche im Werk Klybeck in Basel verschiedene chemische Industriebetriebe mit Druckluft versorgt. Die ehemalige Novartis Services wurde 1998 als Tochter der 1996 aus dem Merger von Ciba und Sandoz entstandenen Novartis gegründet und die Betriebe für Energie und Abfall per Januar 2001 von Veolia Environment (zu dieser Zeit unter dem Namen "Vivendi") als Valorec Services AG übernommen.

Die Valorec Services AG erzeugt für das Werk Klybeck jährlich ca. 40 Mio. Nm<sup>3</sup> Druckluft mit einem Nenndruck von 6.5 bar zur Steuerung pneumatischer Regelorgane. Die dafür verwendete Druckluft wird als "Steuerluft" bezeichnet. Der gesamte Strombedarf zur Erzeugung der Steuerluft beläuft sich bei einer tatsächlichen spezifischen Effizienz von 0.160 kWh/Nm<sup>3</sup> auf rund 6'400 MWh/a. Eine gute Neuanlage könnte eine spezifische Effizienz von 0.115 kWh/Nm<sup>3</sup> erreichen, was einer Einsparung von 1'800 MWh/a (28%) entspricht.

## 1.2 Projektpartner

Das Projekt erfolgt in Zusammenarbeit mit der Valorec Services AG und dem Druckluftkompetenzzentrum der HTA Luzern sowie Herstellern und Lieferanten von Komponenten aus dem Bereich Drucklufterzeugung. Das Projekt erfolgt in Koordination und Abstimmung mit der im Aufbau befindlichen Kampagne „Druckluft - Schweiz“, eine Schweizer Fortsetzung der deutschen Kampagne „Druckluft - Effizient“ mit Dr. P. Radgen, Fraunhofer ISI, Deutschland. Finanziert wird das Projekt von dem Programm Elektrizität im Bundesamt für Energie, der Valorec Services AG und dem Amt für Umwelt und Energie, Basel-Stadt.

## 1.3 Projektziele

Das Projekt umfasst verschiedene Schritte von der Bestimmung des IST-Zustands über die Analyse für Optimierungsmassnahmen bis hin zum Massnahmenplan für die Optimierung. Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Komponenten für Steuerlufterzeugung, Trocknungsanlage und Luftfilterkammer. Des weiteren sollen ein Benchmarking für die chemische Industrie erstellt und die von Valorec Services AG betriebenen Anlagen positioniert werden. Das Institut für Energie der FHBB will mit diesem Projekt eine Branchenlösung mit Potenzialabschätzung, einen Benchmark für die chemische Industrie und den Anstoss einer konkreten Umsetzungsaktion beitragen.

Die Ziele des Projekts liegen:

- in der Optimierung der Druckluftversorgung bei der Valorec Services AG,
- in der Reduktion des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Kanton Basel-Stadt,
- sowie im Aktivieren des hohen Energie-Einsparpotenzials im Bereich Druckluftanwendungen und Erarbeiten einer Benchmark für die chemische Industrie.



## 1.4 Vorgehen

Zuerst sollen im Rahmen einer Literaturrecherche Energieverbrauch, Einsparpotenziale und Benchmarking für die chemische Industrie untersucht und daraus das mögliche Einsparpotenzial in der Schweizer Chemieindustrie abgeleitet werden.

In einem zweiten Schritt soll der Energieaufwand für die Verdichteranlagen zur Erzeugung von Steuerluft erfasst und mittels einer ABC-Analyse Optimierungspotenziale im Werk Klybeck aufgezeigt werden. Ein Schwerpunkt wird dabei auf verbesserte Regelkonzepte für die bedarfsabhängige Erzeugung der Steuerluft unter Einhaltung der Sicherheitsanforderungen gelegt. Im Weiteren wird auch die Effizienz der Trocknungsanlagen und der zentralen Luftfilterkammer analysiert. Ein konkreter Massnahmenplan und in Zusammenarbeit mit der Valorec Services AG getroffene Zielvorgaben hinsichtlich Energieeinsparung, Investitionskosten, Betriebskosten, Energiekosten und Amortisationszeit (ROI) bilden eine Entscheidungsgrundlage für die Optimierung.

In einem dritten Schritt wird eine Benchmark ermittelt, die sich spezifisch an der chemischen Industrie und den dort verwendeten Technologien orientiert. Dabei ist die Positionierung der Valorec Services AG von besonderem Interesse.

Die betrachteten Bilanzgrenzen sind jeweils aussen um die Geräte, d.h. inklusive aller Nebenaggregate, gewählt. Die Volumenstrom- beziehungsweise Liefermengenangaben im Text verstehen sich als Normkubikmeter pro Stunde ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ) nach DIN 1343 „Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte“ Ausgabe 1990-01 (0°C, 0%r.F., 1.01325 bar absolut). Die Angaben zu Drücken sind, wenn nicht anders angegeben, als Überdruck in bar ( $\text{bar}_\text{ü}$ ) zu verstehen.

## 2. Technik

### 2.1 IST-Zustand

#### Steuerluftversorgung Werk Klybeck

Die Erzeugung der Druckluft auf Druckniveau 6 bar, genannt Steuerluft, erfolgt im Werk Klybeck in zwei Zentralen in den Gebäuden WKL-170 und WKL-973. Im WKL-170 befinden sich drei parallel arbeitende Verdichter (s. Abb. 1: VT05, VT06, VS08) mit zwei nachgeschalteten parallelen Adsorptionstrocknern (s. Abb. 2: T501...T503), im WKL-973 ein Verdichter (s. Abb. 1: VT07) mit einem nachgeschalteten Adsorptionstrockner (s. Abb. 3: T505, T506). Die Ansaugung erfolgt im WKL-973 aus dem Maschinenraum und im WKL-170 aus dem Freien via Filterkammer. Die Verteilung auf dem Areal, siehe Abb. 1, erfolgt durch geschweisste und lackierte Schwarzstahlrohre in den unterirdischen Medienschächten.

Die Versorgungssicherheit des Mediums Steuerluft als Notenergie ist gewährleistet, indem selbst bei Ausfall der grössten Einheit die Versorgung aufrechterhalten werden kann.

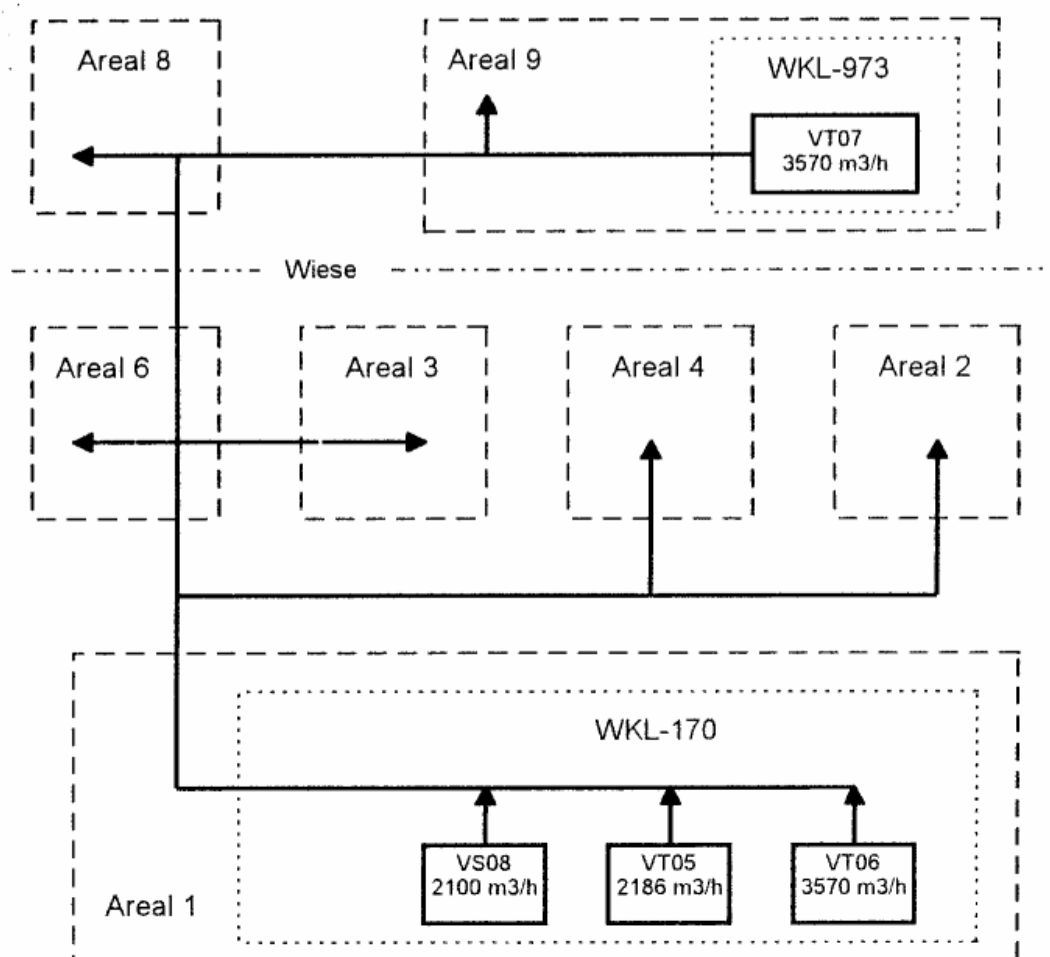


Abb. 1: Prinzipschema der Steuerluftversorgung im Werk Klybeck

Zentralen WKL170 – WKL973

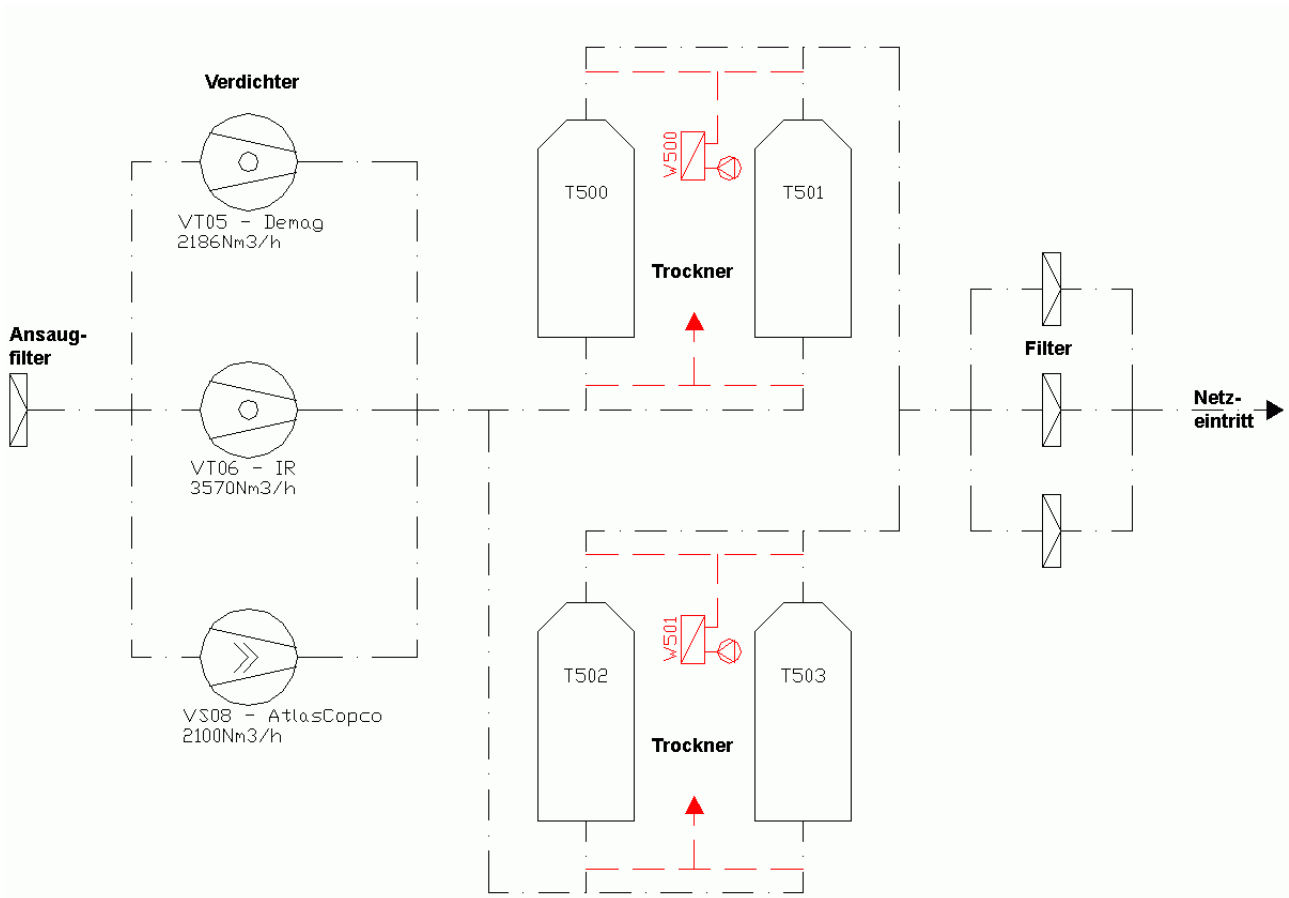


Abb. 2: RI-Schema der Druckluftherzeugung im WKL170

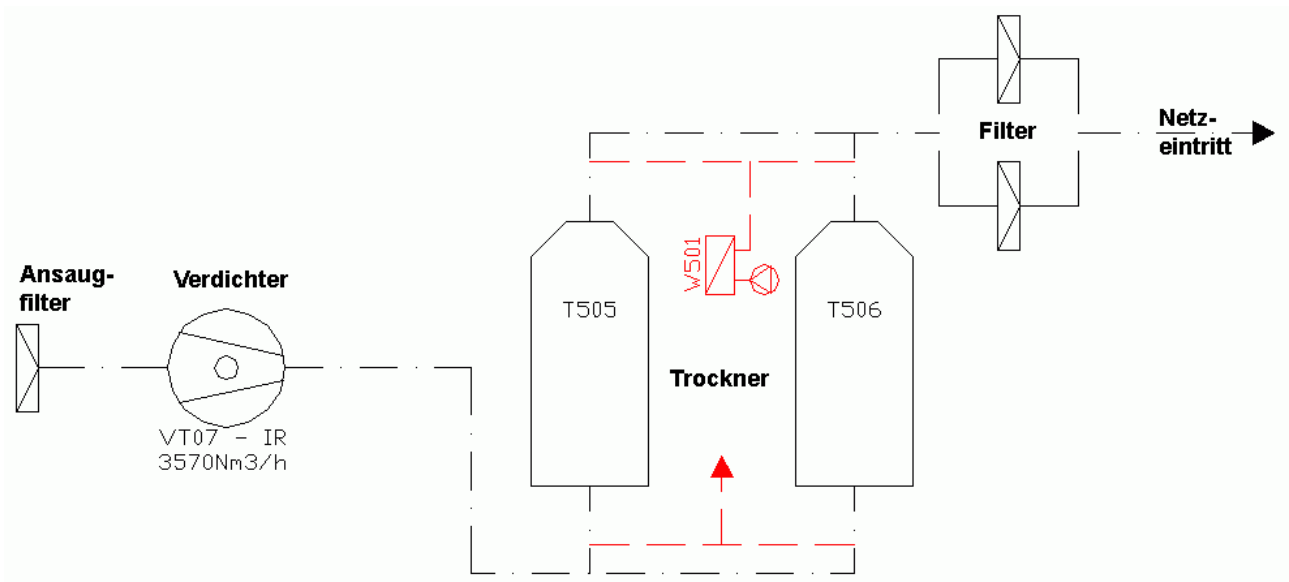


Abb. 3: RI-Schema der Druckluftherzeugung im WKL973

## Verdichter

Im Gebäude WKL-170 arbeiten die zwei Turboverdichter VT05 und VT06 sowie der Schraubenverdichter VS08, im Gebäude WKL-973 der Turboverdichter VT07. Tab. 1 beschreibt die Verdichter anhand ihrer Kenndaten. In den beiden Zentralen läuft im Normalfall jeweils ein Verdichter zur Deckung des Grundbedarfs. Das sind die Verdichter VT05 im Gebäude WKL-170 und VT07 im Gebäude WKL-973. Zur Spitzenabdeckung kommt der Verdichter VS08 hinzu. Der zweite Turboverdichter VT06 im WKL-170 ist alternierend mit dem VT07 im WKL973 im Betrieb. Die Abwärme der Verdichter wird über aufbereitetes Flusswasser vollumfänglich als Vorwärmung für nachgeschaltete Prozesse genutzt.

Die beiden Verdichter VT05 & VT07 laufen mit über 7000 Betriebsstunden mehr als 80% des Jahres. Die Verdichter VT06 und VT08 kommen gemäss Ihrer Bestimmung weniger zum Einsatz, wobei VT06 etwa 1000 Betriebsstunden oder 10-15% des Jahres als Reserveverdichter und VS08 mit rund 500 Betriebsstunden etwa 5% des Jahres als Spitzenlastverdichter im Einsatz sind.

Verdichter	Ort	Typ	Modell	Nennvolumenstrom	Regelbereich (Netzdruck)	Regelung	Elektr. Nennleistung	Baujahr
VT05	WKL 170	Turbo	Demag TD428S	2400 Nm <sup>3</sup> /h (Messung)	7.15 - 7.3 bar <sub>ü</sub> (Messung)	Last - Regelbereich (100-72%) - Überströmen - Leer - Aus	315 kW	1995
VT06	WKL 170	Turbo	Ingersoll-Rand Centac C21 MX4	3016 Nm <sup>3</sup> /h	6.4 bar <sub>ü</sub> - Hand	Last - Regelbereich (100-80%) - Abblasen - Aus von Hand	370 kW	1976
VT07	WKL 973	Turbo	Ingersoll-Rand Centac C21 MX4	2800 Nm <sup>3</sup> /h (Messung)	7.2 - 7.5 bar <sub>ü</sub> (Messung)	Last - Regelbereich (100-82%) - Abblasen - Aus von Hand	370 kW	1979
VS08	WKL 170	Schraube	Atlas Copco ZR4a	2100 Nm <sup>3</sup> /h	6.5 - 6.95 bar <sub>ü</sub>	Last - Leer - Aus	230 kW	1969

**Tab. 1: Kenndaten der Verdichter aus Herstellerangaben und Reglereinstellungen**

## Trockner

Die Trocknung der Druckluft wird durch 3 Trockner bewirkt. Das Netz ist weit verzweigt und wird teilweise im Freien geföhrt. Der geforderte Drucktaupunkt <-23 °C bei 6 bar<sub>ü</sub> entspricht bei einer Nutzttemperatur von 20 °C einer relativen Feuchte von unter 0.5%.

Im Gebäude WKL-170 befinden sich 2 parallel wirkende Trockner und im Gebäude WKL-973 ein Trockner mit je zwei abwechselnd aktiven Trockeneinheiten(s. Abb. 4). Sie werden mit externen Elektrodirektheizungen regeneriert, wobei jeder Trockner mit 2 Trockeneinheiten ausgerüstet ist, die abwechselnd in Betrieb sind bzw. regeneriert werden (entsprechend Abb. 4). Eine regelmässige Erneuerung des Trockenmittels ist gewährleistet. Tab. 2 beschreibt die Trockner anhand Ihrer Kenndaten.

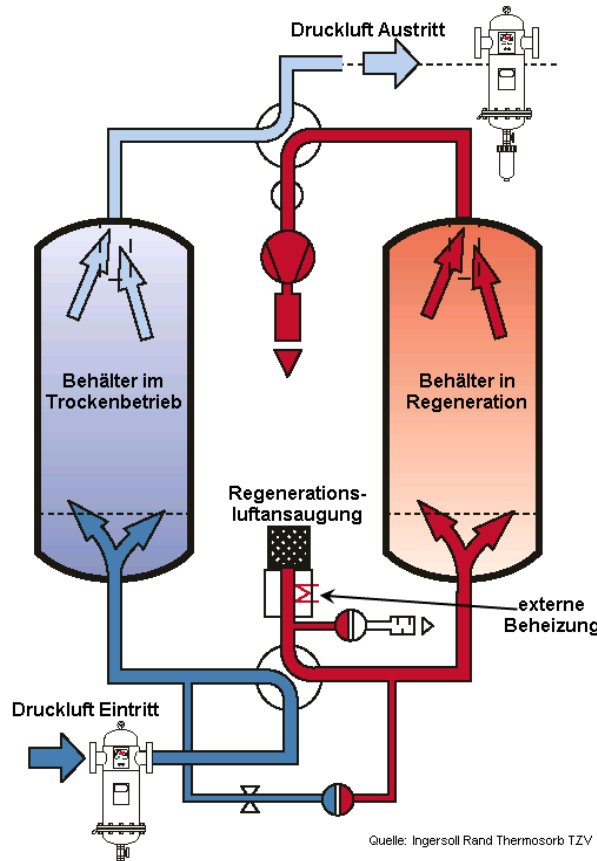


Abb. 4: schematische Darstellung eines Adsorptionstrockners

Trockner	Ort	Nennvolumenstrom	Regenerations-temperatur	Steuerung Regeneration	Drucktaupunkt	Heizleistung	Ventilatorleistung	Baujahr
T500 T501	WKL 170	2500 Nm <sup>3</sup> /h	170-180 °C	Ein: T <sub>DTP</sub> -23 °C Aus: T <sub>Tr</sub> 80 °C	-48...-23 °C	60 kW	15 kW	1975
T502 T503	WKL 170	3500 Nm <sup>3</sup> /h	170-180 °C	Ein: T <sub>DTP</sub> -23 °C Aus: T <sub>Tr</sub> 80 °C	-48...-23 °C	60 kW	15 kW	1969
T505 T506	WKL 973	3020 Nm <sup>3</sup> /h	160 °C	Ein: T <sub>DTP</sub> -23 °C Aus: T <sub>Tr</sub> 60 °C	-48...-23 °C	60 kW	15 kW	ca. 1970

Tab. 2: Kenndaten der Trockner aus Herstellerangaben und Reglereinstellungen

### Netz im Werk Klybeck

Das Druckluftnetz des Werk Klybeck hat eine Länge von etwa 4.5 km und ein abgeschätztes Volumen von etwa 35 m<sup>3</sup> bei einem angenommenen mittleren Durchmesser DN100. Der Nenndruck nach der Erzeugung liegt bei 7 bar und beim Gebäudeeintritt bei 6.5 bar Überdruck. Der Grenzwert für den Energiealarm liegt bei 4.8 bar, der maximale Druck bei 8.8 bar.

## 2.2 Messdaten und Kennzahlen

Die Betriebsweise der Anlagen kann zum einen aus der monatlichen Erfassung der Summengrößen von erzeugtem Steuerluftvolumen, Strombezug und Kühlwasserbezug sowie zum anderen aus der seit Oktober 2004 schrittweise im Aufbau befindlichen detaillierten Erfassung von dynamischen Messreihen der Verdichter VT05 und VT07 beurteilt werden.

### Messstellenschema

Abb. 5 zeigt die Messpunkte für die Zentrale im WKL170 und Abb. 6 für die Zentrale im WKL973. Die Messwerte wurden teilweise bereits über die zentrale Datenerfassung der Valorec Services AG erfasst, der Rest wurde im Rahmen dieses Projekts ergänzt.

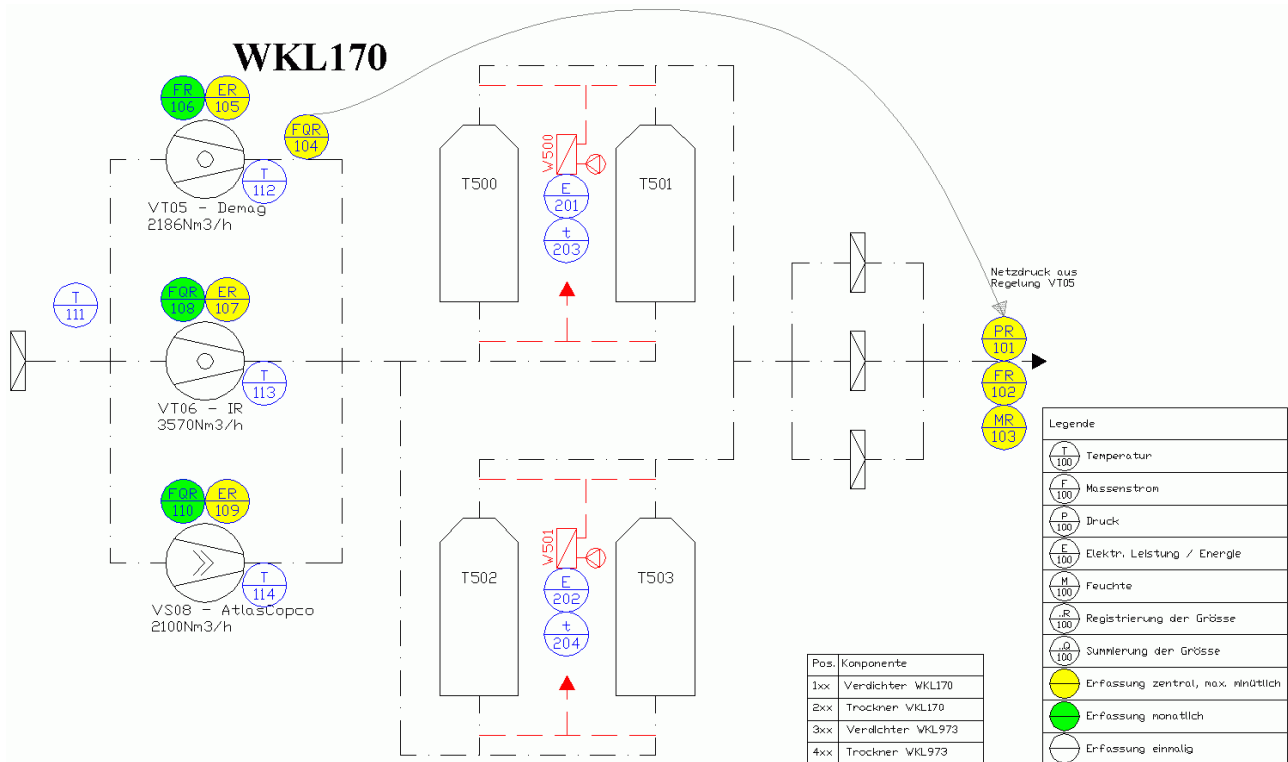


Abb. 5: Messstellen in der Zentrale WKL170

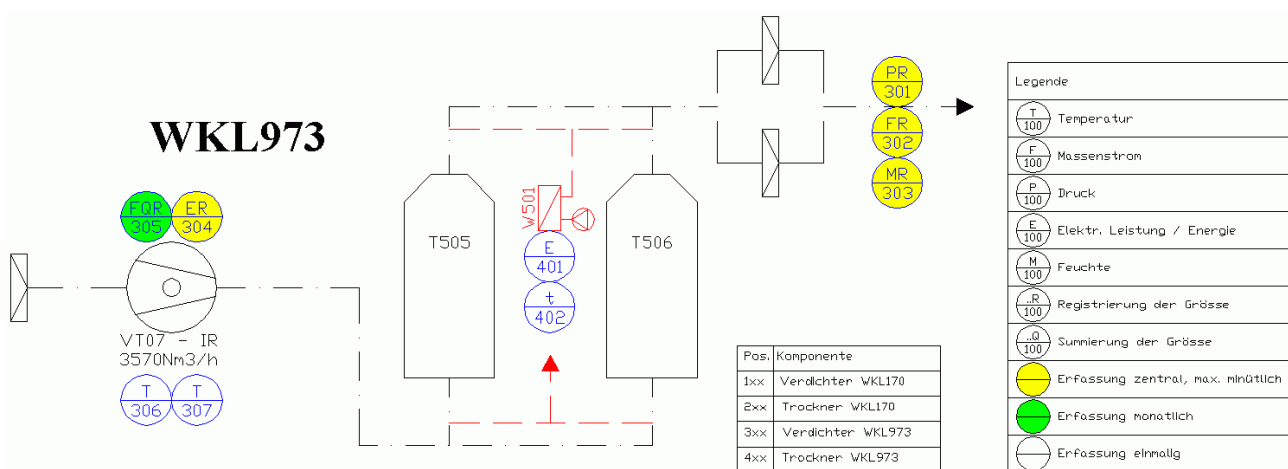


Abb. 6: Messstellen in der Zentrale WKL973 und Nomenklatur der Messstellen

Nr.	Symbol	Einheit	Bezeichnung	Intervall
101	$p_{WKL170}$	bar(ü)	gelieferter Druck im WKL170 (Netzeintritt)	5 sec
102	$V_{WKL170}$	Nm <sup>3</sup> /h	gelieferter Druckluftvolumenstrom im WKL170	5 sec
103	$\theta_{DTP\_WKL170}$	°C	Drucktaupunkt WKL170	10 sec
104	$V_{VT05}$	Nm <sup>3</sup> /h	gelieferter Druckluftvolumenstrom VT05	5 sec
105	$P_{VT05}$	kW	elektr. Leistungsaufnahme VT05	10 sec
106	$WF_{VT05}$	m <sup>3</sup>	bezogene Kühlwassermenge VT05	
107	$P_{VT06}$	kW	elektr. Leistungsaufnahme VT06 gesamt	10 sec
108	$WF_{VT06}$	m <sup>3</sup>	bezogene Kühlwassermenge VT06	
109	$P_{VS08}$	kW	elektr. Leistungsaufnahme VS08 gesamt	10 sec
110	$WF_{VS08}$	m <sup>3</sup>	bezogene Kühlwassermenge VS08	
111	$\theta_{WF\_WKL170}$	°C	Eintrittstemperatur Kühlwasser WKL170	
112	$\theta_{WF\_VT05}$	°C	Austrittstemperatur Kühlwasser an VT05	
113	$\theta_{WF\_VT06}$	°C	Austrittstemperatur Kühlwasser an VT06	
114	$\theta_{WF\_VS08}$	°C	Austrittstemperatur Kühlwasser an VS08	
201	$P_{W500}$	kW	elektr. Leistungsaufnahme des Trockner W500 gesamt	
202	$P_{W501}$	kW	elektr. Leistungsaufnahme des Trockner W501 gesamt	
203	$t_{REG-W500}$	min	Laufzeit der elektr. Heizung W500 bei Regeneration	
204	$t_{REG-W501}$	min	Laufzeit der elektr. Heizung W501 bei Regeneration	
301	$p_{WKL973}$	bar(ü)	gelieferter Druck im WKL973 (Netzeintritt)	5 sec
302	$V_{WKL973}$	Nm <sup>3</sup> /h	gelieferter Druckluftvolumenstrom im WKL973	5 sec
303	$\theta_{DTP\_WKL973}$	°C	Drucktaupunkt WKL973	10 sec
304	$P_{VT07}$	kW	elektr. Leistungsaufnahme VT07 gesamt	10 sec
305	$WF_{VT07}$	m <sup>3</sup>	bezogene Kühlwassermenge VT07	
306	$\theta_{WF\_WKL973}$	°C	Eintrittstemperatur Kühlwasser WKL973	
307	$\theta_{WF\_VT07}$	°C	Austrittstemperatur Kühlwasser an VT07	
401	$P_{W501}$	kW	elektr. Leistungsaufnahme des Trockner W501 gesamt	
402	$t_{REG-W501}$	min	Laufzeit der elektr. Heizung W501 bei Regeneration	

**Tab. 3: Liste der Messpunkte für detaillierte Auswertung**

## Kennzahlen

Die angestrebten Kennzahlen zur Bewertung der Effizienz für die Druckluftherzeugung sind:

- spezifische Leistung [kW/(Nm<sup>3</sup>/min)] (Momentan- & Mittelwert)

$$P_{spez} = \frac{\text{elektr. Leistung incl. Nebenaggregate [kW]}}{\text{Liefermenge [Nm}^3 \text{ / min]}}$$

$$P_{spez\_VT05}, P_{spez\_VT06}, P_{spez\_VT07}, P_{spez\_VS08}, P_{spez\_WKL170}, P_{spez\_WKL973}$$

- spezifischer Energiebedarf pro Nm<sup>3</sup> Druckluft [kWh/Nm<sup>3</sup>] (Monatswerte)

$$E_{spez} = \frac{\text{elektr. Energiebezug [kWh]}}{\text{Liefermenge [Nm}^3 \text{]}}$$

$$E_{spez\_WKL170}, E_{spez\_WKL973}$$

- Auslastung [%] der Kompressorstation, bzw. der einzelnen Kompressoren

$$A = \frac{\text{Vollaststunden}}{\text{Betriebsstunden}} \quad (\text{Jahres- bzw. Monatswerte})$$

$$A_{VT05}, A_{VT06}, A_{VT07}, A_{VS08}, A_{WKL170}, A_{WKL973}$$

- spezifischer Energieaufwand zur Trocknung [kWh/Nm<sup>3</sup>] (Wochenmittel)

$$E_{tr\_spez} = \frac{\text{Strombezug des Trockners incl. Regelung, Lüfter, Heizregister [kWh]}}{\text{getrocknete Luftmenge [Nm}^3 \text{]}}$$

- Rückgewonnene Wärme je eingesetzte elektrische Energie [kWh<sub>th</sub>/ kWh<sub>el</sub>]

$$Q_{WRG} = \frac{\text{rückgewonnene Wärme im Kühlwasser [kWh]}}{\text{eingesetzte elektr. Energie [kWh]}} \quad (\text{Jahres- bzw. Monatswerte})$$

$$Q_{WRG\_WKL170}, Q_{WRG\_WKL973}$$

- Druckluftkosten je erzeugte Nm<sup>3</sup> [Rp./Nm<sup>3</sup>] (Jahres- bzw. Monatsmittel)

$$K_{DL} = \frac{\text{Strombezug zur Druckluftherzeugung (Kompressor + Trockner) * Strompreis}}{\text{erzeugte Druckluftmenge}}$$

- mittlerer Netzdruck  $\bar{p}_ü$
- im Jahr erzeugt Druckluftmenge Nm<sup>3</sup>/a
- Verbrauchsprofil Druckluft ab WKL170 & WKL973

Dabei dienen die Kennzahlen  $P_{spez}$ ,  $E_{spez}$ ,  $A$ ,  $E_{tr\_spez}$ ,  $Q_{WRG}$  und  $K_{DL}$  dem externen Benchmarking sowie die Kennzahlen  $E_{spez}$ ,  $A$ ,  $E_{tr\_spez}$ ,  $Q_{WRG}$  auch dem internen Benchmarking, bei dessen Bewertung der mittlere Netzdruck und die jährliche erzeugte Druckluftmenge wichtige Randbedingungen sind. Das Verbrauchsprofil ist von Interesse für die Dimensionierung der Verdichter und deren übergeordnete Steuerung im energie- und kostenoptimierten Betrieb.



## 2.3 Verdichter-Steuerung im Werk Klybeck

Die vier Verdichter für die Steuerluftherzeugung im Werk Klybeck arbeiten jeweils autark. Die Abstimmung untereinander erfolgt durch die kaskadenförmig gestuften Druckeinstellungen für Ein- & Ausschaltdruck.

### Übergeordnete Steuerung mehrerer Kompressoren (Verbundsteuerung)

Die Aufgabe der übergeordneten Steuerung von mehreren Kompressoren ist, die Einzelanlagen optimal auszulasten und gemäss dem tatsächlichen Druckluftbedarf einzusetzen. Durch die übergeordnete Steuerung soll die Druckluftherzeugung eines Kompressorverbundsystems wirtschaftlich und verschleissarm erfolgen. Bei den Verbundsteuerungen unterscheidet man zwischen Kaskadensteuerung und Druckbandsteuerung (s. Abb. 7). Die Druckbandsteuerung arbeitet dabei in einem kleineren Druckband und damit mit einem niedrigeren Mitteldruck. Dabei ist zu beachten, dass pro bar Druckabsenkung eine Energieeinsparung von ca. 6% realisiert wird. Bei Ausfall der Verbundsteuerung muss die Anlage weiterhin funktionsfähig bleiben.

- **Autarke Betriebsweise**

Das Ein- und Ausschalten der Kompressoren erfolgt über die Drucksensoren. Jeder Kompressor hat seinen eigenen Drucksensor mit einem bestimmten Einschaltdruck  $p_{\min}$  und einem bestimmten Ausschaltdruck  $p_{\max}$ . Die Kompressoren schalten sich selber je nach Druck ein oder aus:

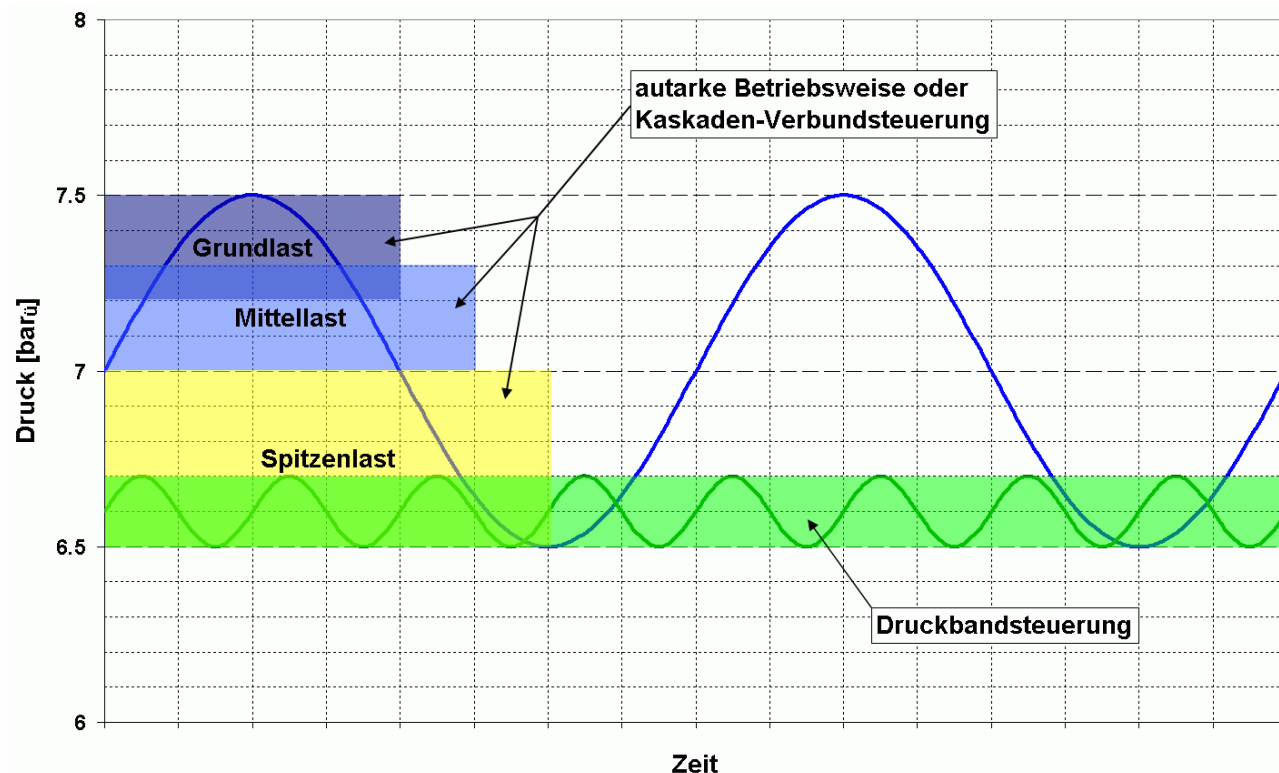
Der Grundlastkompressor arbeitet mit den höchsten Druckeinstellungen, der Mittellastkompressor mit den mittleren und der Spitzenlastkompressor mit den tiefsten.

- **Kaskaden – Verbundsteuerung**

Die Koordination der Kompressoren erfolgt über eine Druckkaskade. Jedem Kompressor ist ein bestimmter Schaltbereich durch die übergeordnete Regelung zugewiesen. Zum ordnungsgemässen Ein- und Ausschalten der Kompressoren werden bestimmte Mindestdruckdifferenzen benötigt. Das gesamte Druckband (Druckspreizung  $p_{\max} - p_{\min}$  für alle Kompressoren) beträgt üblicherweise zwischen 0.7 und 2 bar. Bei gleich grossen Kompressoren, die als Grund-, Mittel- und Spitzenlastkompressoren arbeiten, kann die Steuerung die Kompressoren zyklisch vertauschen. Dadurch werden eine gleichmässige Auslastung und ein gleichmässiger Verschleiss erzielt. Ein Einsatz ist nur bis maximal vier Kompressoren sinnvoll. Die Einsparung im Energieaufwand ist deutlich geringer als bei einer Druckband-Verbundsteuerung.

- **Druckband-Verbundsteuerung**

Bei der Druckbandregelung werden beliebig viele Anlagen über den Druck und dessen Änderung gesteuert. Die kleinste Steuerungsdifferenz ist 0,2 bar. Die Druckbandregelung ist gegenüber der Kaskadenregelung wesentlich leistungsfähiger. Der Vorteil dieser Steuerungsart ist die Reduzierung des maximalen Druckes in der Druckluftstation. Somit werden Energieverbrauch und Druckluftverluste stark reduziert.



**Abb. 7: Vergleich Kaskaden-Steuerung und Druckbandsteuerung**

Die Verbundsteuerung mehrerer Turboverdichter stellt aufgrund der Regelbarkeit dieses Verdichtertyps höhere Anforderungen. Im Gegensatz zu Schrauben- oder Kolbenverdichtern, die üblicherweise im Teillastbetrieb takten, verfügen Turboverdichter über einen Regelbereich von ca. 80...100%. Daher muss eine Ansteuerung von aussen, wie von der Verbundsteuerung, nicht nur ein digitales EIN/AUS – Signal liefern, sondern auch die Information über die angeforderte Last. Die Verbundsteuerung kann dazu einerseits über ein Bussystem mit dem Verdichter verbunden sein und damit die vollständigen Informationen (Verdichterbereitschaft, EIN/AUS, Anforderung 0...100%) austauschen oder andererseits nur ein virtuelles Drucksignal liefern, aus dem dann die Verdichtersteuerung zusammen mit den Grundeinstellungen den Lastzustand bestimmt. Über die Lösung mit Bus-Kommunikation können dann auch die Einstellwerte des Verdichters von der Zentrale aus geändert werden, allerdings müssen dafür meist alle Steuerungskomponenten von einem Hersteller stammen. Die Lösung mit virtuellem Drucksignal ist offen für nahezu alle Verdichtertypen und -modelle, jedoch sind die Funktionalität der zentralen Steuerung und die damit erreichbare Effizienzsteigerung eingeschränkt.

## 3. Markt und Akteure

### 3.1 Anbieter, Planer

Im Folgenden sind Hersteller von Anlagen zur Druckluftherzeugung und -aufbereitung aufgeführt, deren Lieferprogramm Kolben-, Schrauben- und/oder Turboverdichter im Leistungsbereich von 15...10'000 m<sup>3</sup>/h bei Drücken bis 10 bar und dazu passende Filter/Trockner umfasst.

- Atlas Copco Kompressoren und Drucklufttechnik GmbH  
<http://www.atlascopco.com>  
<http://www.atlascopco.ch>
- ALUP Kompressoren GmbH  
<http://www.alup.com>  
<http://www.airtag.ch>
- BOGE KOMPRESSOREN Otto Boge GmbH & Co. KG  
<http://www.boge.de>  
<http://www.vector.ch>
- CompAir Drucklufttechnik GmbH  
<http://www.compair.de>  
<http://www.compair-dlt.ch>
- GARDNER DENVER KOMPRESSOREN GMBH  
<http://www.gardnerdenver.de>
- Haug Kompressoren, Fritz Haug AG  
<http://www.haug.ch>
- Ingersoll-Rand Company  
<http://air.irco.com/de/>
- KAESER KOMPRESSOREN GmbH  
<http://www.kaeser.de>  
<http://www.kaeserkompressoren.ch>
- Reis Engineering (AIRLEADER Verbundsteuerung)  
<http://www.airleader.de/>  
<http://www.airleader.ch/>

## 3.2 Know-how

Kap. 7. Quellenverzeichnis listet die verwendeten Nachschlagewerke und Web-Links auf.

### Forschung & Öffentlichkeitsarbeit

- **Druckluft Kompetenzzentrum** an der HTA-Luzern  
(<http://www.hta.fhz.ch>)  
„Verschiedene Arbeiten im In- und Ausland haben aufgezeigt, dass Druckluft-Systeme meistens sehr ineffizient betrieben werden. Das Druckluft Kompetenzzentrum (DKZ) soll helfen, Anwender für dieses Problem zu sensibilisieren und so die Effizienz der Anlagen zu steigern. Dazu bietet das DKZ Analysen von Anlagen und die Beratung von Anwendern an. Ein weiteres Ziel ist der Aufbau eines Netzwerkes, welches die Kontakte unter den interessierten Kreisen fördert und den Zugang zu vorhandenem Wissen erleichtert.“
- **Druckluft-Schweiz**  
(<http://www.druckluft-schweiz.ch>)  
„Internetauftritt zur Förderung der Energieeffizienz von Druckluftanlagen in der Schweiz. In einer ersten Stufe wird in Kürze die Möglichkeit bestehen, am kostenfreien Druckluftanlagen Benchmarking teilzunehmen. Die Arbeiten dieses Projektes werden durch das Bundesamt für Energie gefördert.“
- **Bundesamt für Energie – Programm Elektrizität**  
(<http://www.electricity-research.ch>)  
„In allen Bereichen des täglichen Berufs- und Privatlebens spielt die Elektrizität eine unverzichtbare Rolle. Das BFE-Programm Elektrizität unterstützt in spezifischen Bereichen die optimierte Nutzung der elektrischen Energie von der Erzeugung über die Verteilung bis zum rationellen Einsatz. Das Programm stellt eines von zehn technisch orientierten BFE-Forschungsprogrammen dar, welche sich für die Umsetzung des Energieforschungskonzepts verantwortlich zeichnen. Dieses Energieforschungskonzept des Bundes wird durch die eidgenössische Energieforschungskommission CORE (Commission fédérale pour la Recherche Energétique) erarbeitet und periodisch aktualisiert. Das aktuelle CORE-Konzept deckt die Periode 2004 – 2007 ab und ist unter [www.energie-schweiz.ch](http://www.energie-schweiz.ch) zu finden. Das BFE-Programm Elektrizität wurde im Jahr 1990 gestartet und in drei Etappen (1990 – 1995, 1996 – 1999, 2000 - 2003) sukzessiv vertieft. In der nun aktuellen vierten Etappe (2004 - 2007) konzentrieren sich die Aktivitäten auf die vier Schwerpunkte Elektrizitätsnutzung, Elektrizitätstransport, Elektrizitätsspeicherung sowie Querschnittstechnologien. Es fokussiert die Arbeiten auf Forschungsprojekte und bereitet in den bearbeiteten Gebieten die Grundlage für das nachgelagerte Umsetzungs-/Marketing-Programm.“
- **EU-MotorChallenge**  
(<http://www.motorchallenge.ch>)  
“Das "Motor Challenge Programm" ist ein internationales Projekt im Rahmen des europäischen SAVE II - Programms. Es hat die Verbesserung der Energieeffizienz elektrischer Antriebe zum Ziel. Die Einspar-Potenziale - Energie und Kosten - sind auch in der Schweiz enorm: nahezu die Hälfte der gesamten Elektrizität wird von Motoren verbraucht, und je nach Anwendung können mit heutigen Technologien 10 bis 50% eingespart werden. Schon 10% bedeuten Stromkosten-Einsparungen von etwa einer Viertel Milliarde Franken pro Jahr!“
- **FHBB – Institut für Energie**  
(<http://www.fhbb.ch/energie>)  
“Das Institut für Energie setzt auch bei der angewandten Forschung und Entwicklung Akzente im Bereich nachhaltige Entwicklung. Die Gruppe "Gebäudetechnik" hat ihren Schwerpunkt im Bereich der Umweltwärmenutzung mit Wärmepumpen-Systemen, insbesondere hydraulische Schaltungen und deren Simulation zur Entwicklung praxistauglicher Vorschläge. Ausserdem ist die rationelle Energienutzung in Industrie- und Gewerbebetrieben ein wichtiges Thema.“

## 4. Einspar-Möglichkeiten und -Potenziale

### 4.1 Analyse IST-Zustand

#### Jahresmesswerte

Der Steuerluftbedarf im Werkareal Klybeck ist in den letzten drei Jahren nahezu konstant bei knapp 40 Mio.Nm<sup>3</sup> mit einer leicht abnehmenden Tendenz. Der für die Erzeugung der Steuerluft benötigte Strombezug liegt bei etwa 6'500 MWh/a was einen mittleren spezifischen Strombedarf von 0.160 kWh/Nm<sup>3</sup> bedeutet. Abb. 8 zeigt den Steuerluftbedarf, den absoluten Strombezug und den spezifischen Strombezug zur Steuerlufterzeugung im Werkareal Klybeck in den Jahren 2002 bis 2004, aufgeteilt auf die zwei Zentralen WKL170 und WKL973.

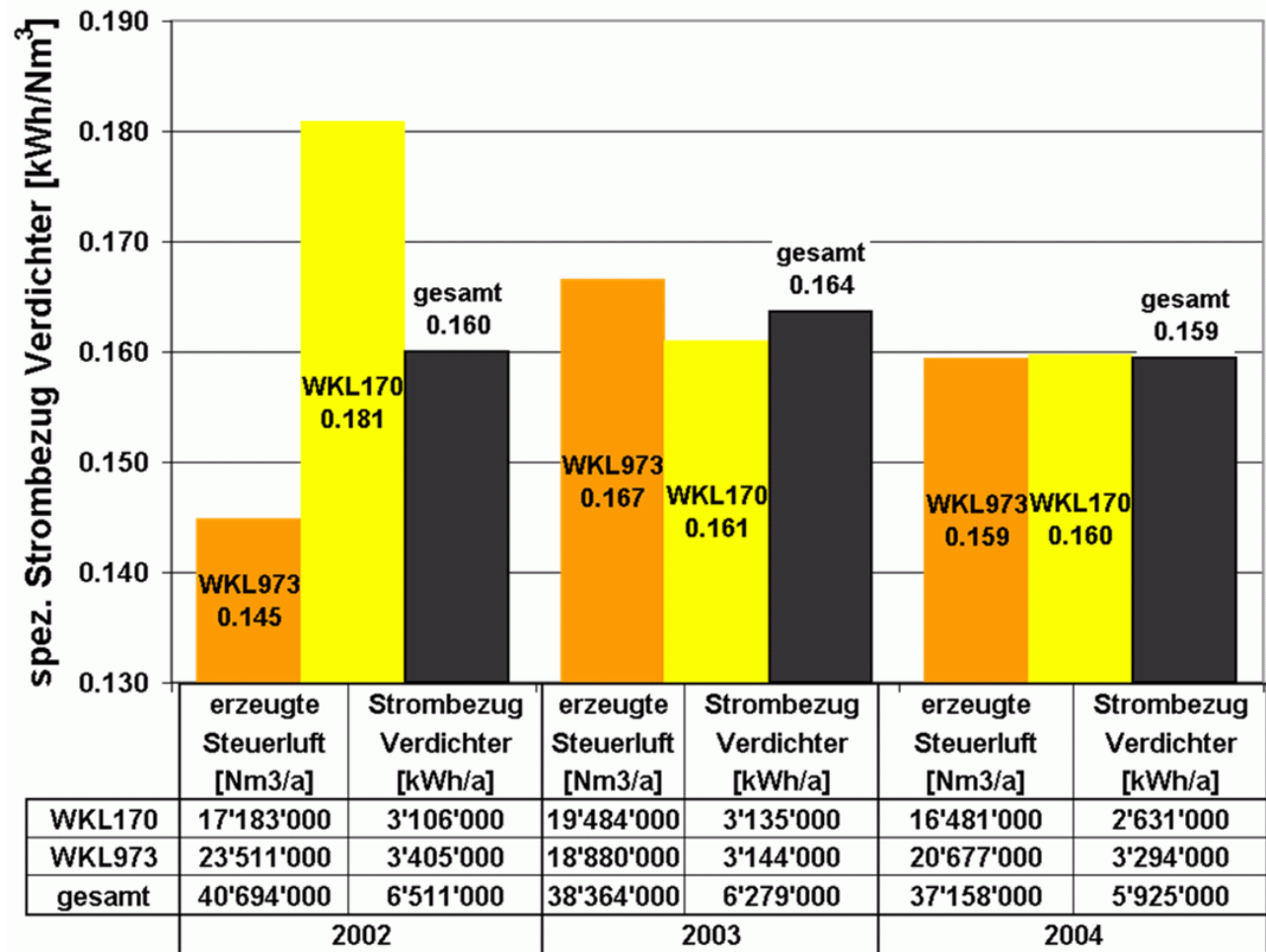
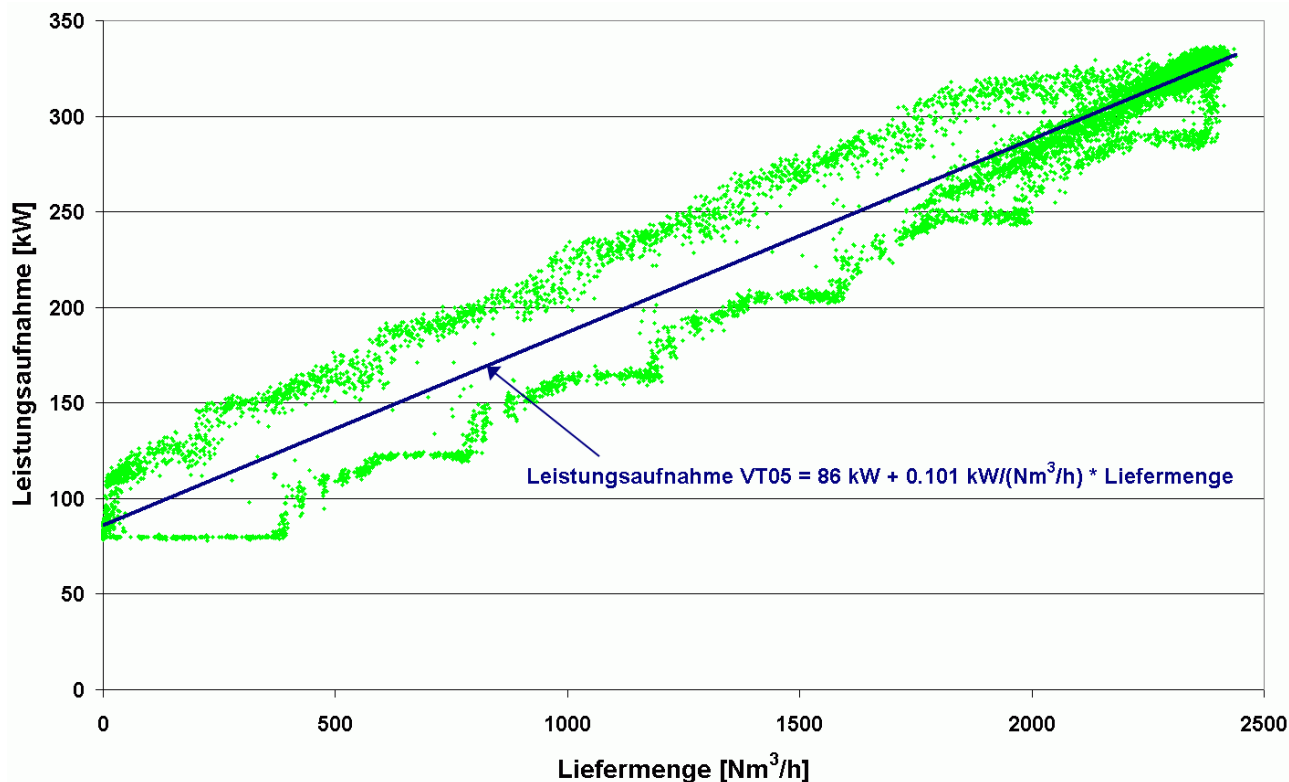


Abb. 8: Steuerluftbedarf, Strombezug und spezifischer Strombezug zur Steuerlufterzeugung im Werkareal Klybeck 2002 – 2004

Der Verdichter VT07 (= WKL973) weist im Jahr 2002 eine besonders gute Effizienz aus, da die Jahresliefermenge sehr nahe beim Maximum dieses Verdichters von rund 25 Mio.Nm<sup>3</sup> liegt und der Verdichter dementsprechend zu 94% ausgelastet ist. Die schlechte Teillasteffizienz, hervorgerufen durch die bei Turboverdichtern gängige Praxis, im Teillastbetrieb abzublasen, macht sich besonders im Jahr 2003 in der spezifischen Effizienz bemerkbar.

## Dynamische Messreihen

Aus dynamischen Messreihen mit einem Zeitintervall von 1 Minute kann für die Verdichter VT05 (Demag TD428S) und VT07 (Ingersoll-Rand Centac C21MX4) die Leistungscharakteristik bestimmt werden. Der neueste Verdichter VT05 aus dem Jahr 1995 weist einen sehr grossen Regelbereich von 1750 bis 2415 Nm<sup>3</sup>/h oder 72-100% auf (s. Abb. 9). Unterhalb des Regelbereichs schaltet der Verdichter zur Anpassung der Liefermenge zyklisch in Leerlauf und erreicht damit eine sehr gute Teillasteffizienz, sodass sich insgesamt ein lineares Verhältnis zwischen Liefermenge und Leistungsaufnahme ergibt.

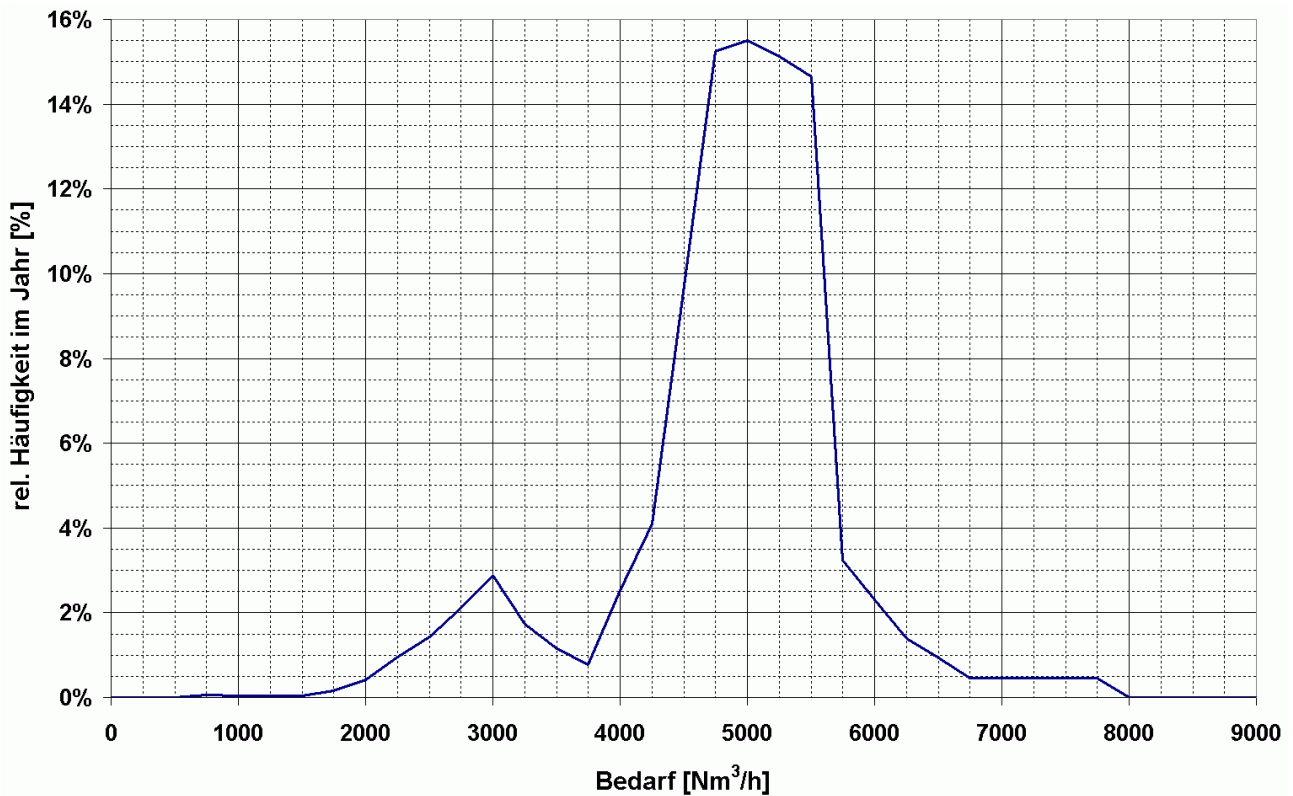


**Abb. 9: Leistungscharakteristik des Verdichters VT05 als 1-min-Messwerte und Regressionsgerade**

Der Verdichter VT07 weist einen kleineren Regelbereich von 82-100% bei einer maximalen Liefermenge von 2800 Nm<sup>3</sup>/h auf. Die Leistungsaufnahme liegt dabei zwischen 325 & 370 kW. Bei Liefermengen unterhalb des Regelbereichs bläst der Verdichter die überschüssig erzeugte Druckluft ab. Dadurch bleibt die Leistungsaufnahme in diesem Bereich bei konstant 325 kW, woraus ein sehr schlechtes Teillastverhalten resultiert.

## Bedarfsanalyse

Aus dem jährlichen Bedarf von 40 Mio. Nm<sup>3</sup> ergibt sich bei der Betriebszeit von 24h an 365 Tagen ein mittlerer Bedarf von rund 4500 Nm<sup>3</sup>/h. Dieser Wert spiegelt sich erstaunlich gut in der Analyse der dynamischen Messreihen wieder. Die in Abb. 10 dargestellte Analyse der Messwerte für die Monate Oktober 2004 bis Januar 2005 zeigt, dass 70% des Bedarfs mit 4500...5500 Nm<sup>3</sup>/h und 10% mit 2500...3500 Nm<sup>3</sup>/h gedeckt werden. Der Spitzenbedarf liegt bei 8000 Nm<sup>3</sup>/h.



**Abb. 10: Verteilung des Steuerluftbedarfs im Jahr**

Ein belastbares zeitdynamisches Bedarfsprofil konnte nicht erstellt werden, da die Liefermenge für den Verdichter VT07 über weite Zeiträume aus der Leistungsaufnahme abgeschätzt werden musste und nur für einen kurzen Zeitraum Liefermenge und Leistungsaufnahme parallel aufgezeichnet wurden.

Zur Bewertung der Existenz von zwei Zentralen wurde die Verteilung des Bedarfs auf die Gebäude des Werkareals Klybeck in Abb. 11 und Tab. 4 aufbereitet. Dabei ergibt sich eine relativ gleichmässige Verteilung des Bedarfs auf das Areal, d.h. beide Zentralen decken je zur Hälfte den Bedarf.

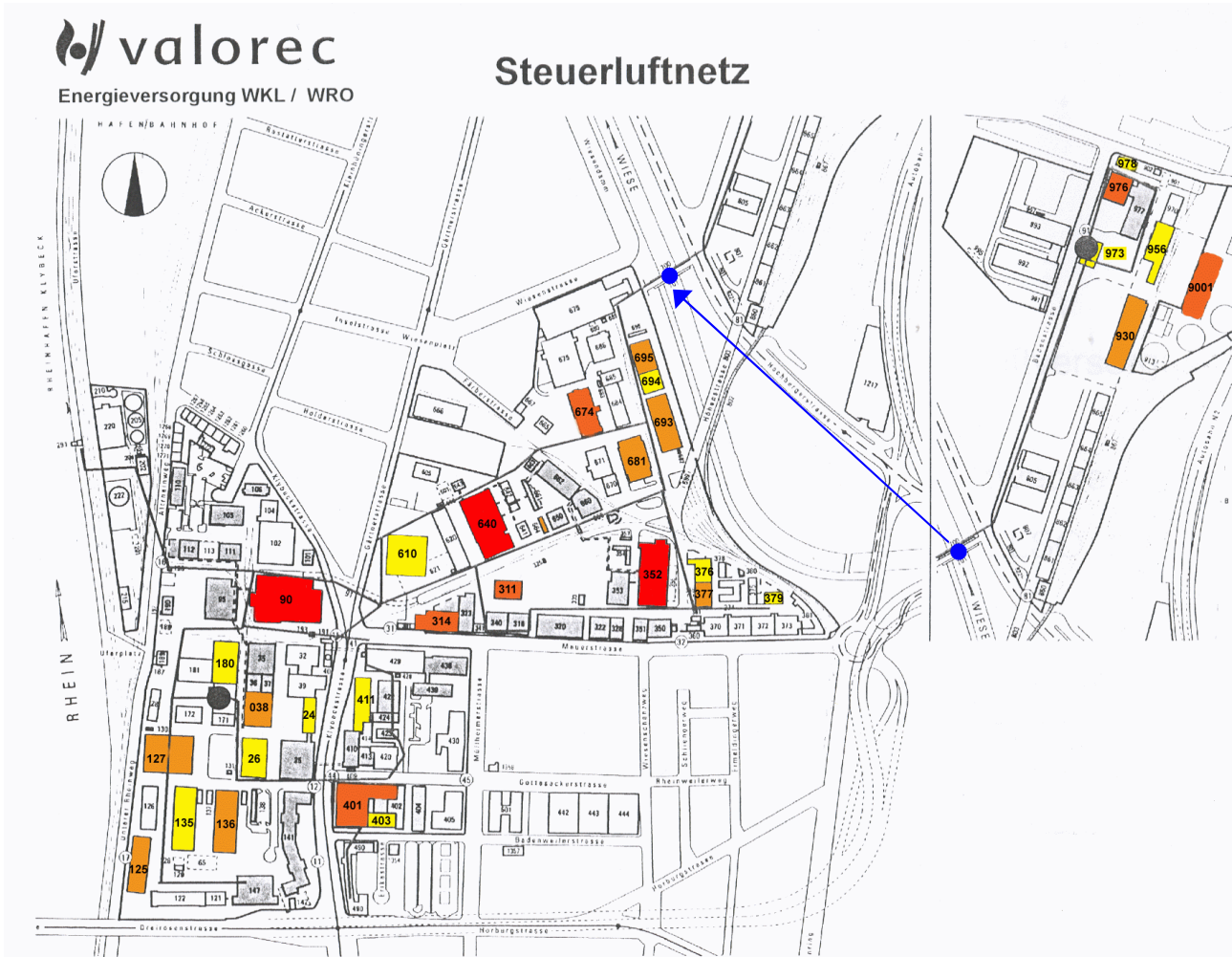


Abb. 11: örtliche Verteilung des Steuerluftverbrauchs auf dem Werkareal Klybeck



Bau	Steuerluftbezug 2004		Bau	Steuerluftbezug 2004	
	Mio.Nm <sup>3</sup>	%		Mio.Nm <sup>3</sup>	%
640	5.40	14.5%	681	0.52	1.4%
90	4.02	10.8%	136	0.47	1.3%
352	3.84	10.3%	38	0.40	1.1%
311	2.49	6.7%	694	0.32	0.9%
314	1.79	4.8%	180	0.30	0.8%
401	1.71	4.6%	411	0.26	0.7%
674	1.68	4.5%	24	0.26	0.7%
976	1.67	4.5%	26	0.26	0.7%
9001	1.53	4.1%	403	0.25	0.7%
125	1.29	3.5%	956	0.24	0.6%
695	0.96	2.6%	978	0.23	0.6%
377	0.89	2.4%	135	0.21	0.6%
930	0.82	2.2%	610	0.21	0.6%
664	0.72	1.9%	973	0.20	0.5%
693	0.71	1.9%	376	0.19	0.5%
127	0.60	1.6%	379	0.19	0.5%
			<b>SUMME</b>	<b>34.62</b>	<b>93.2%</b>

Tab. 4: Steuerluftverbrauch je Gebäude auf dem Werkareal Klybeck

## Trockner

Den Strombedarf der Adsorptionstrockner bestimmt vorwiegend der extern elektrisch beheizte Regenerationsbetrieb. Aus den Messreihen ergibt sich hierbei ein spezifischer Strombedarf von 4 Wh/Nm<sup>3</sup> bei dem gegebenen Eintrittszustand von 7bar<sub>i</sub>, Drucktaupunkt 35 °C und dem Austrittszustand von 7 bar<sub>i</sub>, Drucktaupunkt <-23 °C. Dieser spezifische Strombedarf liegt im Bereich guter Neuanlagen. Die durch die Trocknung verursachten Stromkosten liegen bei rund 16'000 CHF/a.

## 4.2 Vergleichswerte

Dieses Projekt liefert einen Beitrag zur Kampagne Druckluft-Schweiz deren Schwerpunkt in der Förderung der Energieeffizienz von Druckluftanlagen in der Schweiz liegt. Aktuell befinden sich die Kampagne und die Internetseite in der Startphase. Branchenspezifische Vergleichswerte aus deutschen Unternehmen können zurzeit aus der Teilnahme an der deutschen Kampagne Druckluft-Effizient generiert werden, die dann später in das länderspezifische Benchmarking auf der Internetseite <http://www.druckluft-schweiz.ch> einfließen wird.

Für die gewählten Kenngrößen werden die in Tab. 5 dargestellten Vergleichswerte herangezogen, die aus der Kampagne Druckluft-Effizient und Angaben von Herstellern zu Neuanlagen bestimmt wurden.

Kennzahlen	Einheit	eigener Wert	Vergleichswerte für die chemische Industrie		
			kleinster	Mittelwert	grösster
mittlerer Netzdruck	bar <sub>ü</sub>	7.3	5.0	6.5	7.5
spezifischer Energiebezug Druckluftherzeugung E <sub>spez</sub>	kWh/ Nm <sup>3</sup>	0.160	0.115	-/-	0.170
spezifischer Energieaufwand Trocknung	Wh/ Nm <sup>3</sup>	4.0	6.0	8.0	10.0
Druckluftkosten	Rp./ Nm <sup>3</sup>	1.99	0.77	1.30	1.90

**Tab. 5: einzelne Kenngrössen mit Vergleichswerten zur Bewertung der Druckluftherzeugung**

Die Kostenangaben der Vergleichswerte basieren der Plattform Druckluft-Effizient. Diese gelten für deutsche Anlagen unter anderem mit den entsprechenden deutschen Strompreisen und wurden für den Vergleich in CHF umgerechnet. Die spezifischen Druckluftkosten der eigenen Anlage basieren auf den Annahmen für das Werk Klybeck mit Berücksichtigung der Stromkosten und der Kosten für die Kühlwasseraufbereitung.

### Brancheninterner Vergleich

Der brancheninterne Vergleich aus den vermessenen Anlagen in Druckluft-Effizient für die chemische Industrie (DE) ist nur bedingt anwendbar, da die Anlagenvielfalt in der chemischen Industrie so gross ist, dass nur bei sehr wenigen Anlagen gleiche Randbedingungen herrschen. Dies beginnt bei der Vielfalt der Anwendungen. Das Druckniveau in der Anwendung der Steuerluft liegt in den meisten Anwendungsfällen zwischen 2.5 und 10 bar<sub>ü</sub>. Sind nun alle Anwendungen konsequent auf ein niedriges Druckniveau ausgelegt, kann der notwendige Druck bei der Erzeugung auf bis zu 3.5 bar<sub>ü</sub> abgesenkt werden und damit eine spezifische Effizienz von 0.085 kWh/Nm<sup>3</sup> erreicht werden. Dies trifft jedoch nur auf eine beschränkte Anzahl von Anwendungsfällen zu. Neben dem Druckniveau macht ein Vergleich der Anlagen nur Sinn, wenn auch die Anlagengrösse bzw. Liefermenge, die Druckluftqualität und das Bedarfsprofil ähnlich sind. Die Anlagengrösse beeinflusst den üblicherweise eingesetzten Verdichtertyp und dessen Steuerung. Die Druckluftqualität beeinflusst massgeblich den Aufwand für die Druckluftaufbereitung und ebenso den Verdichtertyp (ölfrei?). Das Bedarfsprofil beeinflusst über die Bedarfszeiten und die Gleichmässigkeit des Bedarfs sehr stark die mögliche Auslastung der Verdichter.

Bei grösseren Netzen in der chemischen Industrie, wie dem auf dem Werkareal Klybeck, liegt häufig der geforderte Druck am Gebäudeeintritt bei 6 bar<sub>ü</sub> um auch stärkere Antriebe mit akzeptabler Baugrösse realisieren zu können. Die Anforderungen an die Druckluftqualität sind üblicherweise hoch in Bezug auf den Ölgehalt der Luft und in Bezug auf den geforderten Drucktaupunkt. Der Bedarf ist durch die Vielzahl der Anwendungen meist recht gleichmässig, d.h. ohne häufige Schwankungen.

### 4.3 Potenzialabschätzung

Für die Potentialabschätzung der Energie- & Kosteneinsparung für die Verdichter werden als Referenz die realen Verbrauchsdaten aus dem Jahr 2002 entsprechend Tab. 6 Variante **IST** herangezogen. Bei den Optimierungsmassnahmen werden die Wirkung auf den elektrischen Energiebedarf, den Kühlwasserbedarf sowie wesentliche Differenzen im Aufwand für Wartung und Unterhalt betrachtet. Für die Abschätzung der finanziellen Auswirkung werden Stromkosten von 0.10 CHF/kWh und Kühlwasserkosten von 0.25 CHF/m<sup>3</sup> angesetzt. Für gegebenenfalls neu einzusetzende Schraubenverdichter wird der erhöhte Aufwand für Wartung und Unterhalt durch Schraubentausch und Ölwechsel pauschal mit 10'000 CHF/a angesetzt.

Als erster Vergleich (Tab. 6 Variante **NEU**) soll eine Neuanlage mit aktueller Technik der Variante **IST** gegenüber gestellt werden. Der spezifische Energiebedarf ähnlicher Grossanlagen liegt nach dem Benchmarking bei Druckluft-Effizient und Angaben von Herstellern zu realisierten Anlagen bei 0.09...0.12 kWh/Nm<sup>3</sup> und wird für den Vergleich mit 0.115 kWh/Nm<sup>3</sup> angesetzt. Die abgeschätzten Investitionskosten entsprechen einer Anlage mit öleingespritzten Schraubenverdichtern mit einer Nennliefermenge von 7500 Nm<sup>3</sup>/h zuzüglich Montage und besonderen Vorkehrungen für Lärmschutz und Absicherung ökologischer Folgen.

Der zweite Vergleich (Tab. 6 Variante **VSt**) beinhaltet allein eine Verbundsteuerung für die bestehende Anlage. Dadurch kann das Druckband von jetzt 6.8...7.5 bar<sub>ü</sub> verkleinert werden auf 6.8...7.0 bar<sub>ü</sub> und damit der mittlere Druck um ca. 0.4 bar gesenkt werden. Des Weiteren ist eine bessere Auslastung des Grundlastverdichters VT07 zu erwarten. Die gesamte zu erwartende Einsparung wird mit etwa 4% abgeschätzt.

Als letzter Vergleich soll durch eine Teilerneuerung der Verdichter eine effizientere Anpassung an den tatsächlichen Bedarf erreicht werden. Grundlage ist die Annahme, dass der Verdichter VT05 mit seiner Nennliefermenge von ca. 2200 Nm<sup>3</sup>/h über 7500 h im Jahr den konstanten Grundbedarf deckt und darüber hinaus ein stark schwankender Bedarf zwischen 2200 Nm<sup>3</sup>/h und 7500 Nm<sup>3</sup>/h besteht, was sich aus der Analyse der Messdaten vom Dezember 2004 zeigt. Mehrere kleinere Schrauben- oder Kolbenverdichter könnten dort zusammen mit einer Verbundsteuerung eine bessere Anpassung an den Bedarf erreichen. Der spezifische Strombedarf für die neuen Verdichter im WKL170 wird entsprechend einer Neuanlage mit 0.115 kWh/Nm<sup>3</sup> angesetzt und für den bestehenden Verdichter durch das abgesenkte mittlere Druckniveau um 4% reduziert. Tab. 6 Variante **VSt+ TNeu** zeigt die abgeschätzten Verbrauchsdaten und erwarteten Effizienzen dieser Optimierungsmassnahme.

Variante	Bezeichnung	Liefermenge Druckluft	Strombedarf Verdichter	spez. Strombedarf	Stromkosten	Kühlwasser- kosten	Differenz Wartung & Unterhalt	Jahreskosten ohne Kapitalkosten	Investitions- kosten
		Nm <sup>3</sup> /a	kWh/a	kWh/Nm <sup>3</sup>	CHF/a	CHF/a	CHF/a	CHF/a	CHF
IST	WKL170	17'183'257	3'105'525	0.181	310'553	100'630	-/-	411'182	-/-
	WKL973	23'511'424	3'404'708	0.145	340'471	58'176	-/-	398'647	-/-
	gesamt 2002	40'694'681	6'510'233	0.160	651'023	158'805	-/-	809'829	-/-
NEU	Neuanlage	40'694'681	4'679'888	0.115	467'989	114'157	10'000	592'146	750'000
	Differenz	0	-1'830'345	-0.045	-183'034	-44'648	10'000	-217'682	750'000
VSt	Verbundst.	40'694'681	6'249'824	0.154	624'982	152'453	-/-	777'435	40'000
	Differenz	0	-260'409	-0.006	-26'041	-6'352	-/-	-32'393	40'000
VSt+ TNeu	VT05	16'500'000	2'293'803	0.139	229'380	55'953	-/-	285'333	-/-
	TNeu+VSt	24'194'681	2'782'388	0.115	278'239	67'871	10'000	356'110	500'000
	gesamt	40'694'681	5'076'191	0.125	507'619	123'824	10'000	631'444	500'000
	Differenz	0	-1'434'042	-0.035	-143'404	-34'981	10'000	-168'385	500'000

**Tab. 6: reale Verbrauchsdaten der Verdichter für das Jahr 2002 und Potenzialabschätzung von Optimierungsvarianten**

## 5. Umsetzungsmöglichkeiten

### 5.1 Druckniveau

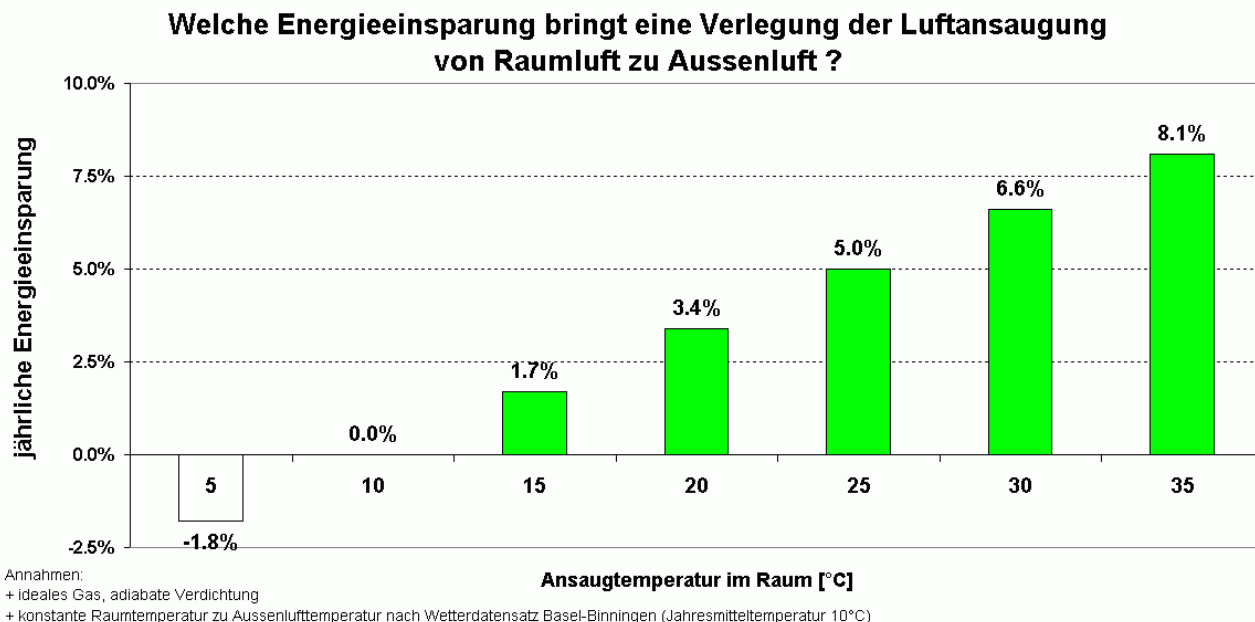
Den Druck auf dem minimal erforderlichen Niveau zu halten ist die Massnahme mit geringstem Investitionsaufwand und einer zu erwartenden Einsparung von etwa 6% je bar Druckabsenkung. Voraussetzungen sind die technische Umsetzbarkeit in der Steuerung und Engagement bei der zu erwartenden Überzeugungsarbeit.

### 5.2 Zwei Zentralen

Die Erzeugung der Steuerluft in zwei entfernten Zentralen im sternförmigen Netz im Werk Klybeck birgt einerseits den Vorteil der geringeren Druckverluste und zum anderen der höheren Sicherheit durch eine örtlich getrennte Erzeugung. Die Kosteneinsparung durch die Existenz der Zentralen im Gebäude WKL973 und die dadurch geringeren Druckverluste im Netz liegen bei etwa 4'500 CHF/a bei einer angenommenen Liefermenge von 23.5 Mio.Nm<sup>3</sup> aus dieser Erzeugung.

### 5.3 Verlegung Luftansaugung zu Aussenluft

Die Effizienz der Druckluftherzeugung ist umso besser, je geringer die Lufttemperatur und die Luftfeuchte bei der Luftansaugung sind. Im Gebäude WKL973 wird die zu verdichtende Luft aus dem Raum angesaugt. Dort herrscht das ganze Jahr über eine nahezu konstante Temperatur von etwa 25°C. Die mögliche Energieeinsparung durch Verlegung der Luftansaugung zu Aussenluft beträgt 5% (s. Abb. 12). Dabei ist die Luft als ideales Gas mit Konditionen gemäss langjährig gemittelten Wetterdaten für den Standort Basel-Binningen und der Verdichtungsprozess als adiabat angenommen.



für den Verdichter VT07 (WKL973) entspricht dies einer

**Einsparung von ca. 20'000 CHF/a**

bei einer abgeschätzten Raumtemperatur von 25°C bei 0.10 CHF/kWh<sub>el</sub> & 0.25 CHF/m<sup>3</sup><sub>Kühlwasser</sub>

**Abb. 12: Energieeinsparung durch Verlegung der Luftansaugung von Raumluft zu Aussenluft**

## 5.4 Verbundsteuerung

Gemäss Potenzialabschätzung ist der Einsatz einer Verbundsteuerung eine sowohl technisch als auch wirtschaftlich interessante Massnahme. Daher wurden Offerten für die Umsetzung dieser Massnahme bei zwei Lieferanten eingeholt, zum einen bei Ingersoll-Rand, einem Hersteller von Verdichtern und Steuerungen von dem zwei Verdichter im Werk Klybeck im Einsatz sind, und zum anderen bei Reis-Engineering, einem Engineering - Dienstleister und Händler der AIRLEADER-Verbundsteuerung welche für Verdichter unterschiedlicher Hersteller einsetzbar ist.

Abb. 13 zeigt die zu erwartenden Kosten für die Realisierung einer Verbundsteuerung und die dadurch zu erwartende Einsparung.

### Kostenübersicht Verbundsteuerung

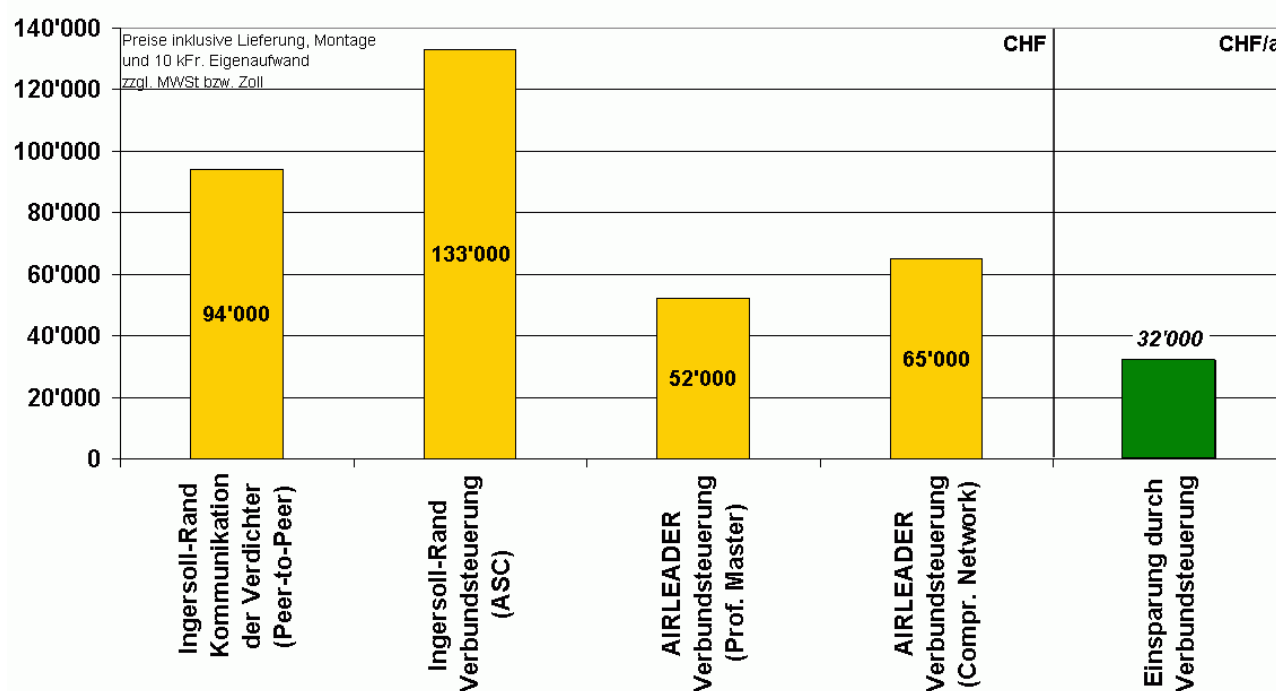


Abb. 13: Kostenübersicht zur Realisierung einer Verbundsteuerung

Die erreichbare Einsparung wird für beide Typen mit 32'000 CHF/a abgeschätzt. Die Kosten für die Realisierung variieren zwischen 52'000 und 133'000 CHF inklusive Lieferung, Montage und 10'000 CHF Eigenaufwand. In den beiden Offerten der Firma Ingersoll-Rand sind zusätzlich zur eigentlichen Verbundsteuerung die Kosten für eine neue Steuerung am Verdichter VT05 mit 63'475 CHF enthalten, damit dieser in voller Funktionalität an die Verbundsteuerung angeschlossen werden kann.

Verbundsteuerungen für Turboverdichter stellen hohe Anforderungen an die Funktionalität der Steuerung und an die Kommunikation mit den Geräten wegen der Regelbarkeit der Turboverdichter. Die Verbundsteuerungen von Herstellern von Verdichtern arbeiten mit Bussystemen in der Kommunikation mit dem Verdichter und sind wegen der herstellereigenen Schnittstelle häufig auf die eigenen Steuerungen an den Verdichtern angewiesen um ihre volle Leistungsfähigkeit entfalten zu können. Eine Verbundsteuerung, die mit unterschiedlichen Fabrikaten von Verdichtern zusammenarbeiten kann, wie AIRLEADER, ist wiederum wegen der herstellereigenen Schnittstellen in den Kommunikationsmöglichkeiten mit den Geräten eingeschränkt. Laut Herstellerangaben sind beide Verbundsteuerungstypen in der Lage die abgeschätzte Einsparung zu erreichen. Bei Auftragserteilung sollten das zu erreichende Druckband und die gewünschte Auslastung der Verdichter festgelegt werden.

## 5.5 Teilerneuerung

Der zweite Aspekt, den die Potentialabschätzung als lohnend für eine weitere Betrachtung herausstellte, ist eine Teilerneuerung der Verdichter. Vor allem die notwendige Erneuerung der Steuerung des Verdichters VT07 und dessen schlechtes Teillastverhalten legen einen Ersatz des Verdichters nahe. Die Ziele der Massnahme sind eine Verringerung des Energiebedarfs über eine bessere Teillasteffizienz und verbesserte Regelstrategie sowie die Möglichkeit zur Anbindung an eine zentrale Verbundsteuerung.

Dafür wurden folgende Varianten gegenübergestellt (Abb. 14 & Abb. 15 sowie Tab. 7 & Tab. 8):

- **Instandhaltung Steuerung**  
Die Steuerungen der beiden Ingersoll-Rand Verdichter VT07 & VT06 haben ihre Lebensdauer erreicht und werden ausgetauscht. Einsparungen im Energiebedarf sind nicht zu erwarten.
- **Verbundsteuerung Ingersoll-Rand**  
Zusätzlich zur Erneuerung der beiden Verdichter-Steuerungen wird eine Verbundsteuerung des Herstellers Ingersoll-Rand realisiert. Für die volle Leistungsfähigkeit ist eine zusätzliche Erneuerung der Steuerung des Verdichters VT05 notwendig. Die zu erwartende Einsparung liegt bei ca. 4% des Energiebedarfs oder 32'000 CHF/a.
- **Verbundsteuerung AIRLEADER**  
Zusätzlich zur Erneuerung der beiden Verdichter-Steuerungen wird eine Verbundsteuerung des Herstellers AIRLEADER realisiert. Die zu erwartende Einsparung liegt bei ca. 4% des Energiebedarfs oder 32'000 CHF/a.
- **neue Schraube 1685**  
Zusätzlich zur Erneuerung der beiden Verdichter-Steuerungen wird eine Verbundsteuerung Typ AIRLEADER und ein neuer ölfreier Schraubenverdichter mit Nennliefermenge 1685 Nm<sup>3</sup>/h realisiert. Der neue Verdichter soll den Energiebedarf in Regelbereich optimieren.
- **neue Schraube 3517+1250**  
Zusätzlich zur Erneuerung einer Verdichter-Steuerung und der Realisierung einer Verbundsteuerung wird ein Ingersoll-Rand Verdichter durch einen neuen ölfreien Schraubenverdichter ähnlicher Grösse (3517 Nm<sup>3</sup>/h) sowie einen im Teillastverhalten optimierten kleineren ölfreien Schraubenverdichter (1250Nm<sup>3</sup>/h) ersetzt. Dieser kleine Schraubenverdichter wird von einem Permanentmagnet-Motor angetrieben, wodurch er im Teillastbereich die gleiche spezifische Effizienz aufweist wie im Volllastbetrieb und damit wesentlich effizienter ist als herkömmliche Verdichter.
- **neuer Turbo 3100 + neue Schraube 1250**  
Zusätzlich zur Erneuerung einer Verdichter-Steuerung und der Realisierung einer Verbundsteuerung wird ein Ingersoll-Rand Verdichter durch einen neuen Turboverdichter ähnlicher Grösse (3100 Nm<sup>3</sup>/h) sowie einen im Teillastverhalten optimierten kleineren ölfreien Schraubenverdichter (1250Nm<sup>3</sup>/h) ersetzt.
- **neue Schraube 1250**  
Zusätzlich zur Erneuerung der beiden Verdichter-Steuerungen und der Realisierung einer Verbundsteuerung wird ein im Teillastverhalten optimierter kleinerer ölfreier Schraubenverdichter (1250Nm<sup>3</sup>/h) eingesetzt.
- **gebr. Turbo 3450**  
Zusätzlich zur Erneuerung einer Verdichter-Steuerung und der Realisierung einer Verbundsteuerung wird ein Ingersoll-Rand Verdichter durch einen gebrauchten Turboverdichter ähnlicher Grösse (3450 Nm<sup>3</sup>/h) ersetzt. Dieser gebrauchte Verdichter entspricht in der technischen Ausführung einem neuen Aggregat und hat seit der Inbetriebsetzung im Juni 2000 14'000 Betriebsstunden geleistet.

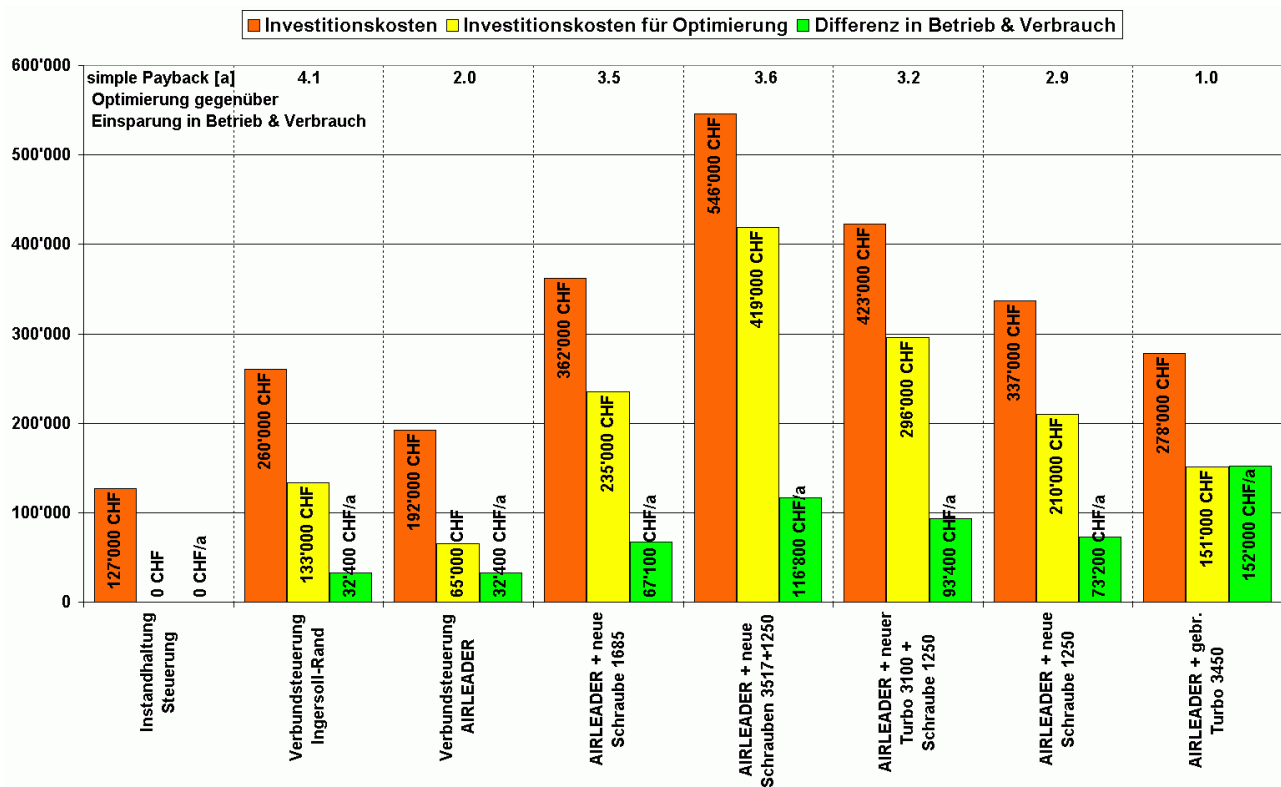


Abb. 14: Kostenvergleich der Teilerneuerungsvarianten

	Investitionskosten		Jahreskosten						simple Payback
	total	zusätzlich zu Instandhaltung	Investition inkl. Zins & Lebensdauer	Betrieb	Verbrauch	gesamt	Differenz gesamt	Differenz in Betrieb & Verbrauch	Zusatzinvestition zu Differenz in Betrieb und Verbrauch
	CHF	CHF	CHF/a	CHF/a	CHF/a	CHF/a	CHF/a	CHF/a	a
Instandhaltung (neue Steuerung VT06 & VT07)	127'000	-	31'400	-	810'600	842'000	-	-	
Verbundsteuerung Ingersoll-Rand	260'000	133'000	53'900	-	778'200	832'100	-9'900	-32'400	4.10
Verbundsteuerung AIRLEADER	192'000	65'000	37'800	-	778'200	816'000	-26'000	-32'400	2.01
AIRLEADER + neue Schraube 1685Nm <sup>3</sup> /h	362'000	235'000	57'000	3'800	739'700	800'500	-41'500	-67'100	3.50
AIRLEADER + neue Schrauben 3517 & 1250 Nm <sup>3</sup> /h	546'000	419'000	69'400	9'800	684'000	763'200	-78'800	-116'800	3.59
AIRLEADER + neuer Turbo 3100 Nm <sup>3</sup> /h + neue Schraube 1250 Nm <sup>3</sup> /h	423'000	296'000	55'500	2'800	714'400	772'700	-69'300	-93'400	3.17
AIRLEADER + neue Schraube 1250 Nm <sup>3</sup> /h	337'000	210'000	54'200	2'800	734'600	791'600	-50'400	-73'200	2.87
AIRLEADER + gebr. Turbo 3450 Nm <sup>3</sup> /h	278'000	151'000	43'900	-	658'600	702'600	-139'400	-152'000	0.99

Liefermenge Steuerluft	40'694'681 Nm <sup>3</sup> /a	Zinssatz	7.5%
spez. Kühlwasserbedarf	0.098 m <sup>3</sup> /kWh	Wechselkurs	1.54 CHF/EUR
Lebensdauer	10 a	Strompreis	0.10 CHF/kWh
		Wasserpreis	0.25 CHF/m <sup>3</sup>

Tab. 7: Kostenvergleich der Teilerneuerungsvarianten



In Abb. 14 und Tab. 7 sind Varianten zur Teilerneuerung im Kostenvergleich dargestellt. Für jede Variante sind zum einen die Investitionskosten insgesamt, des Weiteren die über die Instandhaltung der Steuerung hinausgehenden Investitionskosten für die Optimierung und die durch die Optimierung erzielbaren Einsparungen in den betriebs- & verbrauchsgebundenen Kosten dargestellt. Am oberen Rand der Tabelle ist die einfache Rückzahldauer der Optimierung gegenüber den Einsparungen dargestellt. Diese liegt zwischen 1.0 und 4.1 Jahren. Dabei ist die Variante bei der ein Verdichter durch einen gebrauchten Turboverdichter ersetzt wird sowie eine Verbundsteuerung realisiert wird diejenige mit der kürzesten einfachen Rückzahldauer und auch diejenige mit einer sehr hohen Energieeinsparung.

Der energetische Vergleich in Abb. 15 und Tab. 8 weist Einsparungen gegenüber dem aktuellen Zustand von 260 bis 1'221 MWh/a oder 4 bis 19% aus. Die maximale Einsparung mit 1'800 MWh/a oder 28% könnte somit zu 66% erreicht werden. Die dargestellten Beiträge für einen möglichen Subventionsbeitrag des Kantons Basel-Stadt wurden nach einer vorgegebenen Berechnungsformel bestimmt. Diese gibt einen theoretisch maximal möglichen Subventionsbeitrag aus. Der tatsächliche Subventionsbeitrag ist beschränkt auf die Differenz zur Wirtschaftlichkeit der Massnahme. Die genannte Berechnungsformel lautet:

theoretischer Subventionsbeitrag

- = Energieeinsparung durch eine Massnahme über den Stand der Technik hinaus
- \* Energiewertigkeit (3 für Strom)
- \* Energiewert (27 CHF/MWh)
- \* Lebensdauer der Massnahme (10 Jahre für Verdichter)

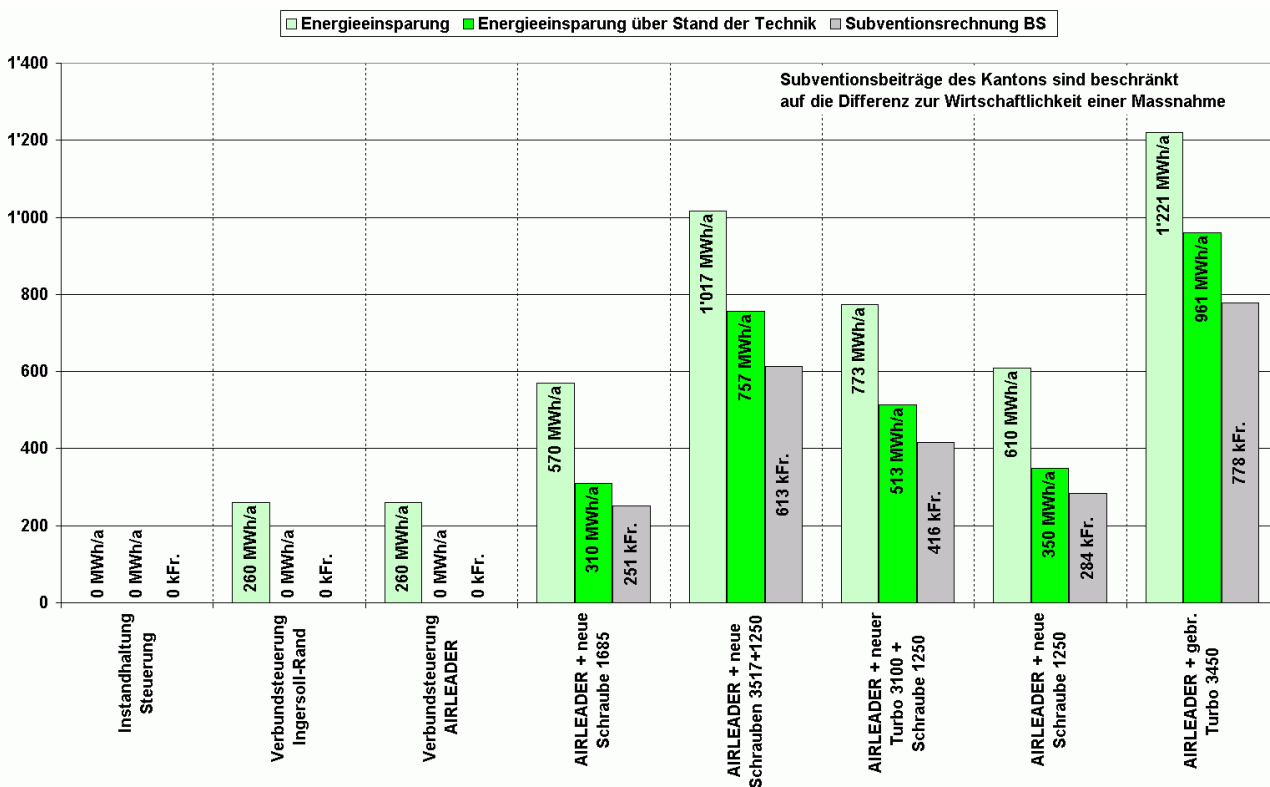


Abb. 15: Energetischer Vergleich der Teilerneuerungsvarianten

	spez. Kosten	Energie-Kennzahl	Energie-einsparung			CO <sub>2</sub> -reduktion	Subvention
	Jahresmittel	Jahresmittel	relativ	absolut	absolut über Stand der Technik hinaus	absolut	nach kantonaler Energie-rechnung
	Rp./Nm <sup>3</sup>	kWh/Nm <sup>3</sup>	%	MWh/a	MWh/a	to/a	CHF
Instandhaltung (neue Steuerung VT06 & VT07)	1.99	0.160	0%	-	-	-	-
Verbundsteuerung Ingersoll-Rand	1.91	0.154	-4%	-260	-	-2.1	-
Verbundsteuerung AIRLEADER	1.91	0.154	-4%	-260	-	-2.1	-
AIRLEADER + neue Schraube 1685Nm <sup>3</sup> /h	1.82	0.146	-9%	-570	-310	-4.6	-251'100
AIRLEADER + neue Schrauben 3517 & 1250 Nm <sup>3</sup> /h	1.68	0.135	-16%	-1'017	-757	-8.1	-613'170
AIRLEADER + neuer Turbo 3100 Nm <sup>3</sup> /h + neue Schraube 1250 Nm <sup>3</sup> /h	1.76	0.141	-12%	-773	-513	-6.2	-415'530
AIRLEADER + neue Schraube 1250 Nm <sup>3</sup> /h	1.81	0.145	-9%	-610	-350	-4.9	-283'500
AIRLEADER + gebr. Turbo 3450 Nm <sup>3</sup> /h	1.62	0.130	-19%	-1'221	-961	-9.8	-778'410

Energiewertigkeit	3	Lebensdauer [a]	10
Energiewert [Fr./MWh]	27	CO <sub>2</sub> -Fracht [kg <sub>CO2</sub> /MWh <sub>el</sub> ]	8

**Tab. 8: Ökologischer Vergleich der Teilerneuerungsvarianten**

Der wirtschaftliche Vergleich und die damit erreichte technische Verbesserung empfehlen die Realisierung einer Verbundsteuerung.

Darüber hinaus ist der Ersatz eines Ingersoll-Rand Verdichters durch einen gebrauchten Turboverdichter mit gutem Teillastverhalten und Anschlussmöglichkeit an die Verbundsteuerung und an die bestehende Stromversorgung mit sehr kurzen Rückzahlzeiten verbunden und zu empfehlen.

Bei einer Teilerneuerung mit neuer Technik empfiehlt sich der Einsatz von Verdichtern, die auf den Regelbereich 4500...5500 Nm<sup>3</sup>/h optimiert sind und damit für gegebenenfalls sinkenden Gesamtbedarf und steigende Dynamik im Bedarf angepasst sind. Dies könnte beispielsweise mit der Variante „neuer Turbo 3100 + neue Schraube 1250“ realisiert werden.

## 5.6 Bewertung durch Vergleich mit Neuanlagen

Für das Benchmarking bzw. den Branchenvergleich in der chemischen Industrie bieten die bisher vorhandenen Möglichkeiten nur einen sehr groben Anhaltspunkt. Besonders der praktisch erreichbare Stand der Technik wird dem Anwender aufgrund der Vielfalt der Anwendungen in der chemischen Industrie nicht deutlich. Hier wäre ein Vergleich mit einer Neuanlage bei der die jeweils wichtigsten Randbedingungen wie Netzdruck, Jahresliefermenge, Bedarfsprofil und Druckluftqualität gewählt werden können hilfreich.

## 6. Zusammenfassung

### 6.1 Empfohlene Massnahmen

Massnahme	Beschreibung	Nutzen	Aufwand
<b>Druckniveau</b>	Druckniveau auf möglichst geringem Niveau halten zur Vermeidung von unnötiger Energieverschwendung 1) Einstellung der Verdichter optimieren, hierfür Verbundsteuerung von Vorteil 2) Druckluftnutzer informieren	6% Energie- und Kosteneinsparung je bar Druckabsenkung	Engagement, ggf. Verbundsteuerung
<b>Aussenluft-ansaugung WKL973</b>	Die Ansaugtemperatur des Verdichters ist bei Verwendung von Aussenluft ist im Mittel um 15K geringer als die Raumlufttemperatur	5% Energieeinsparung für den VT07 entspricht ca. 20'000 CHF	Luftkanal, Wanddurchbruch, Schalldämm-massnahmen
<b>Verbundsteuerung</b>	übergeordnete Steuerung zur optimierten Bedarfsanpassung mehrerer Verdichter 1) herstellereinspezifische Steuerung, die vor allem auf regelbare Turboverdichter angepasst ist 2) herstellereunabhängige Steuerung, universell einsetzbar, jedoch mit beschränkter Leistungsfähigkeit bei regelbaren Verdichtern	geringeres mittleres Druckniveau + Teillastlaufzeit Energieeinsparung ca. 4% = 32'000CHF	ca.65'000CHF ggf. zzgl. Anpassung / Erneuerung der Steuerung der einzelnen Verdichter
<b>Teil-erneuerung</b>	Ersatz eines Turboverdichters mit schlechter Teillasteffizienz durch neuen oder gebrauchten Verdichter	Energieeinsparung 4 ... 19% oder 67'000 ... 150'000 CHF/a	Investitionsaufwand 150'000 ... 419'000 CHF

Tab. 9: Empfohlene Massnahmen zur Optimierung der Steuerluftherzeugung im Werk Klybeck

### 6.2 Realisierungsvorhaben

Zur Realisierung der Verbundsteuerung werden aktuell die internen Vorgänge zwischen der Valorec Services AG und der Novartis besprochen. Eine Realisierung wird von den Beteiligten angestrebt.

Für den Ersatz des Verdichters VT07 im Gebäude WKL973 liegt eine Offerte eines gebrauchten Turboverdichters vor. Dieser würde sowohl von den Leistungsdaten als auch von den technischen Schnittstellen in das System passen. Eine Realisierung ist seitens der Valorec Services AG erwünscht und wird in Zusammenarbeit mit der Novartis geprüft.

Die Realisierung der Aussenluftansaugung im Gebäude WKL973 und die Frage zur Existenz zweier Zentralen kann allein mit dieser Studie nicht beantwortet werden, da noch weitere Faktoren in die Entscheidungsfindung hineinspielen.

### 6.3 Ausblick

Die weiteren Schritte in diesem Projekt werden die beratende Begleitung der Umsetzung bei der Valorec Services AG, die Lancierung eines Zeitschriftenartikels und das Einbringen der Projektergebnisse in die Aktivitäten des Druckluftkompetenzzentrums und Druckluft-Schweiz sein.

## 7. Quellenverzeichnis

### Nachschlagwerke

Ruppelt, E.; „Druckluft-Handbuch“; Vulkan-Verlag; Essen; Dez.2003

Ruppelt, E.; Taschenbuch Drucklufttechnik; Vulkan Verlag; Essen; Jan.2004

Blaustein, Radgen; Compressed Air Systems in the European Union; LOG\_X Verlag GmbH; Mrz.2001

Handbuch der Drucklufttechnik; Atlas Copco Kompressoren und Drucklufttechnik GmbH;  
<http://www.atlascopco.com>

Ratgeber Drucklufttechnik; KAESER KOMPRESSOREN GmbH; <http://www.kaeser.de>

VDI-Bericht 1681; Druckluft –Erzeugung, Aufbereitung, Verteilung, Anwendung und Planung; Veitshöchstheim; Mrz.2002

### Web-Links

<http://www.drucklufttechnik.de/> (inklusive Formelrechner)

<http://www.druckluft-effizient.de/fakten/>

KAESER Toolbox: [http://www.kaeser.de/Online\\_Services/Toolbox/default.asp](http://www.kaeser.de/Online_Services/Toolbox/default.asp)

## 8. Anhang

### 8.1 Potenzialabschätzung Werk Rosental

Die Steuerlufterzeugung im Werk Rosental erfolgt über drei ölfreie Kolbenverdichter des Typs Comp-Air Champion 80T mit den Nennliefermengen  $330\text{Nm}^3/\text{h}$  bzw. zwei mal  $450\text{Nm}^3/\text{h}$ . Das Druckniveau liegt bei  $6.0\text{...}7.0\text{ bar}_\text{ü}$ . Der geforderte Drucktaupunkt liegt bei  $-2^\circ\text{C}$ .

Im Jahr 2004 erzeugten die Verdichter  $4.44\text{ Mio.Nm}^3$  und bezogen dafür  $596\text{ MWh}$  Strom woraus sich ein spezifischer Strombedarf von  $0.134\text{ kWh/Nm}^3$  ergibt. Die spezifische Druckluftkosten liegen bei  $1.58\text{ Rp./Nm}^3$  mit angenommenen Stromkosten von  $0.10\text{ CHF/kWh}$  und Kühlwasserkosten von  $0.25\text{ CHF/m}^3$ . Beide spezifischen Kennzahlen liegen in einem akzeptablen Bereich.

Für die Potenzialabschätzung einer Verbundsteuerung wird eine Einsparung von  $4\%$  angenommen, erzielt durch absenken des mittleren Druckniveaus und verminderte Teillast-/Leerlaufzeiten. Die Kosten einer Verbundsteuerung müssen ähnlich hoch wie im Werk Klybeck angesetzt werden. Einziger Vorteil ist, dass alle Geräte gleichen Typs sind und von einem Hersteller stammen und von daher ein etwas geringerer Aufwand für die Anbindung zu erwarten ist. Somit stehen den Einsparungen von ca.  $3'000\text{ CHF/a}$  Investitionsaufwendungen von ca.  $45'000\text{ CHF}$  gegenüber.

## **8.2 Vollkostenaufstellung der Optimierungsvarianten WKL**

**Instandhaltung  
(neue St. VT06+VT07)**

Zinssatz		7.5%
Strompreis	CHF/kWh	0.10
Wasserpreis	CHF/m3	0.25
Wechselkurs	CHF/EUR	1.54
Liefermenge Steuerluft	Nm3/a	40'694'681
spez. Kühlwasserbedarf	m3/kWh	0.098
alle Preise inklusive Lieferung, Montage, Eigenaufwand; zzgl. MWSt./Zoll		

Investitionskosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a	Annuitätsfaktor %	Jahreskosten CHF/a
VT06 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15'688.78
VT07 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15'688.78
<b>SUMME</b>		<b>126'950.00 CHF</b>			<b>31'377.56</b>

Betriebsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a		Jahreskosten CHF/a
<b>SUMME</b>					<b>-</b>

Verbrauchsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	spez.Kosten		Jahreskosten CHF/a
Strombedarf	0.160 kWh/Nm3	6'511'149 kWh	0.10 CHF/kWh		651'114.90
Kühlwasserbedarf	0.098 m3/kWh	638'093 m3	0.25 CHF/m3		159'523.15
<b>SUMME</b>					<b>810'638.05</b>

Jahreskosten	
Investitionskosten	31'377.56
Betriebsgebundene Kosten	-
Verbrauchsgebundene Kosten	810'638.05
<b>SUMME</b>	<b>842'015.61</b>

**Verbundsteuerung Ingersoll-Rand  
(neue St. VT05+VT06+VT07)**

Zinssatz		7.5%
Strompreis	CHF/kWh	0.10
Wasserpreis	CHF/m3	0.25
Wechselkurs	CHF/EUR	1.54
Liefermenge Steuerluft	Nm3/a	40'694'681
spez. Kühlwasserbedarf	m3/kWh	0.098
alle Preise inklusive Lieferung, Montage, Eigenaufwand; zzgl. MWSt./Zoll		

Investitionskosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a	Annuitätsfaktor %	Jahreskosten CHF/a
VT05 - DEMAG TD428S Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15688.78
VT06 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15688.78
VT07 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15688.78
IR ASC-Verbundsteuerung Bedingung sind neue Steuerungen für VT05, VT06, VT07		69'650.50 CHF	20	9.8%	6832.17
<b>SUMME</b>		<b>260'075.50 CHF</b>			<b>53898.51</b>

Betriebsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a		Jahreskosten CHF/a
<b>SUMME</b>					<b>0.00</b>

Verbrauchsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	spez.Kosten		Jahreskosten CHF/a
Strombedarf	0.154 kWh/Nm3	6'250'703 kWh	0.10 CHF/kWh		625'070.30
Kühlwasserbedarf	0.098 m3/kWh	612'569 m3	0.25 CHF/m3		153'142.22
<b>SUMME</b>					<b>778212.52</b>

Jahreskosten	
Investitionskosten	53898.51
Betriebsgebundene Kosten	0.00
Verbrauchsgebundene Kosten	778212.52
<b>SUMME</b>	<b>832111.04</b>



## Verbundsteuerung AIRLEADER, Reis-Eng. (neue St. VT06+VT07)

Zinssatz		7.5%
Strompreis	CHF/kWh	0.10
Wasserpreis	CHF/m3	0.25
Wechselkurs	CHF/EUR	1.54
Liefermenge Steuerluft	Nm3/a	40'694'681
spez. Kühlwasserbedarf	m3/kWh	0.098
alle Preise inklusive Lieferung, Montage, Eigenaufwand; zzgl. MWSt./Zoll		

Investitionskosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a	Annuitätsfaktor %	Jahreskosten CHF/a
VT06 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15688.78
VT07 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15688.78
Reis - AIRLEADER CN keine Bedingungen, neue Steuerungen der Verdichter empfehlenswert		65'000.00 CHF	20	9.8%	6375.99
<b>SUMME</b>		191'950.00 CHF			37753.55

Betriebsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a		Jahreskosten CHF/a
<b>SUMME</b>					0.00

Verbrauchsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	spez.Kosten		Jahreskosten CHF/a
Strombedarf	0.154 kWh/Nm3	6'250'703 kWh	0.10 CHF/kWh		625'070.30
Kühlwasserbedarf	0.098 m3/kWh	612'569 m3	0.25 CHF/m3		153'142.22
<b>SUMME</b>					778212.52

Jahreskosten	
Investitionskosten	37753.55
Betriebsgebundene Kosten	0.00
Verbrauchsgebundene Kosten	778212.52
<b>SUMME</b>	815966.08

## Teilerneuerung Schraube, tr.1685Nm<sup>3</sup>/h

Zinssatz		7.5%
Strompreis	CHF/kWh	0.10
Wasserpreis	CHF/m <sup>3</sup>	0.25
Wechselkurs	CHF/EUR	1.54
Liefermenge Steuerluft	Nm <sup>3</sup> /a	40'694'681
spez. Kühlwasserbedarf	m <sup>3</sup> /kWh	0.098
alle Preise inklusive Lieferung, Montage, Eigenaufwand; zzgl. MWSt./Zoll		

Investitionskosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a	Annuitätsfaktor %	Jahreskosten CHF/a
VT06 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15'688.78
VT07 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15'688.78
Ingersoll Rand SM200 Schraube, trocken 1685 Nm <sup>3</sup> /h		170'000.00 CHF	15	11.3%	19'258.83
Verbundsteuerung		65'000.00 CHF	20	9.8%	6'375.99
<b>SUMME</b>		<b>361'950.00 CHF</b>			<b>57'012.38</b>

Betriebsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a		Jahreskosten CHF/a
Schraubentausch zu 25'000 CHF, alle 40000h bei 6000 h/a		25'000.00 CHF	6.7		3'750.00 CHF
<b>SUMME</b>					<b>3'750.00</b>

Verbrauchsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	spez.Kosten		Jahreskosten CHF/a
Strombedarf	0.146 kWh/Nm <sup>3</sup>	5'941'423 kWh	0.10 CHF/kWh		594'142.34
Kühlwasserbedarf	0.098 m <sup>3</sup> /kWh	582'259 m <sup>3</sup>	0.25 CHF/m <sup>3</sup>		145'564.87
<b>SUMME</b>					<b>739'707.22</b>

Jahreskosten	
Investitionskosten	57'012.38
Betriebsgebundene Kosten	3'750.00
Verbrauchsgebundene Kosten	739'707.22
<b>SUMME</b>	<b>800'469.60</b>

## Teilerneuerung Schraube, tr. 3517 + 1250 Nm<sup>3</sup>/h

Zinssatz		7.5%
Strompreis	CHF/kWh	0.10
Wasserpreis	CHF/m <sup>3</sup>	0.25
Wechselkurs	CHF/EUR	1.54
Liefermenge Steuerluft	Nm <sup>3</sup> /a	40'694'681
spez. Kühlwasserbedarf	m <sup>3</sup> /kWh	0.098
alle Preise inklusive Lieferung, Montage, Eigenaufwand; zzgl. MWSt./Zoll		

Investitionskosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a	Annuitätsfaktor %	Jahreskosten CHF/a
VT07 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15'688.78
Atlas-Copco ZR400-7.5P Schraube, trocken 3517 Nm <sup>3</sup> /h		272'703.00 CHF	15	11.3%	30'893.77
Ingersoll Rand IRN160OF Schraube, trocken 1250 Nm <sup>3</sup> /h		145'000.00 CHF	15	11.3%	16'426.65
Verbundsteuerung		65'000.00 CHF	20	9.8%	6'375.99
<b>SUMME</b>		<b>546'178.00 CHF</b>			<b>69'385.19</b>

Betriebsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a		Jahreskosten CHF/a
Schraubentausch zu 40'000 CHF, alle 40000h bei 7000 h/a		40'000.00 CHF	5.7		7'000.00
Schraubentausch zu 25'000 CHF, alle 40000h bei 4500 h/a		25'000.00 CHF	8.9		2'812.50
<b>SUMME</b>					<b>9'812.50</b>

Verbrauchsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	spez.Kosten		Jahreskosten CHF/a
Strombedarf	0.135 kWh/Nm <sup>3</sup>	5'493'782 kWh	0.10 CHF/kWh		549'378.19
Kühlwasserbedarf	0.098 m <sup>3</sup> /kWh	538'391 m <sup>3</sup>	0.25 CHF/m <sup>3</sup>		134'597.66
<b>SUMME</b>					<b>683'975.85</b>

Jahreskosten	
Investitionskosten	69'385.19
Betriebsgebundene Kosten	9'812.50
Verbrauchsgebundene Kosten	683'975.85
<b>SUMME</b>	<b>763'173.54</b>

## Teilerneuerung Turbo 3100 Nm<sup>3</sup>/h + Schraube tr. 1250 Nm<sup>3</sup>/h

Zinssatz		7.5%
Strompreis	CHF/kWh	0.10
Wasserpreis	CHF/m <sup>3</sup>	0.25
Wechselkurs	CHF/EUR	1.54
Liefermenge Steuerluft	Nm <sup>3</sup> /a	40'694'681
spez. Kühlwasserbedarf	m <sup>3</sup> /kWh	0.098
alle Preise inklusive Lieferung, Montage, Eigenaufwand; zzgl. MWSt./Zoll		

Investitionskosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a	Annuitätsfaktor %	Jahreskosten CHF/a
VT07 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15'688.78
Ingersoll Rand C60MX2 Turbo, 3100 Nm <sup>3</sup> /h		150'000.00 CHF	15	11.3%	16'993.09
Ingersoll Rand IRN160OF Schraube, trocken 1250 Nm <sup>3</sup> /h		145'000.00 CHF	15	11.3%	16'426.65
Verbundsteuerung		65'000.00 CHF	20	9.8%	6'375.99
<b>SUMME</b>		<b>423'475.00 CHF</b>			<b>55'484.51</b>

Betriebsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a		Jahreskosten CHF/a
Schraubentausch zu 25'000 CHF, alle 40000h bei 4500 h/a		25'000.00 CHF	8.9		2'812.50
<b>SUMME</b>					<b>2'812.50</b>

Verbrauchsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	spez.Kosten		Jahreskosten CHF/a
Strombedarf	0.141 kWh/Nm <sup>3</sup>	5'737'950 kWh	0.10 CHF/kWh		573'795.00
Kühlwasserbedarf	0.098 m <sup>3</sup> /kWh	562'319 m <sup>3</sup>	0.25 CHF/m <sup>3</sup>		140'579.78
<b>SUMME</b>					<b>714'374.78</b>

Jahreskosten	
Investitionskosten	55'484.51
Betriebsgebundene Kosten	2'812.50
Verbrauchsgebundene Kosten	714'374.78
<b>SUMME</b>	<b>772'671.79</b>

## Teilerneuerung Schraube tr. 1250 Nm<sup>3</sup>/h

Zinssatz		7.5%
Strompreis	CHF/kWh	0.10
Wasserpreis	CHF/m <sup>3</sup>	0.25
Wechselkurs	CHF/EUR	1.54
Liefermenge Steuerluft	Nm <sup>3</sup> /a	40'694'681
spez. Kühlwasserbedarf	m <sup>3</sup> /kWh	0.098
alle Preise inklusive Lieferung, Montage, Eigenaufwand; zzgl. MWSt./Zoll		

Investitionskosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a	Annuitätsfaktor %	Jahreskosten CHF/a
VT07 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15'688.78
VT06 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15'688.78
Ingersoll Rand IRN160OF Schraube, trocken 1250 Nm <sup>3</sup> /h		145'000.00 CHF	15	11.3%	16'426.65
Verbundsteuerung		65'000.00 CHF	20	9.8%	6'375.99
<b>SUMME</b>		<b>336'950.00 CHF</b>			<b>54'180.20</b>

Betriebsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a		Jahreskosten CHF/a
Schraubentausch zu 25'000 CHF, alle 40000h bei 4500 h/a		25'000.00 CHF	8.9		2'812.50
<b>SUMME</b>					<b>2'812.50</b>

Verbrauchsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	spez.Kosten		Jahreskosten CHF/a
Strombedarf	0.145 kWh/Nm <sup>3</sup>	5'900'729 kWh	0.10 CHF/kWh		590'072.87
Kühlwasserbedarf	0.098 m <sup>3</sup> /kWh	578'271 m <sup>3</sup>	0.25 CHF/m <sup>3</sup>		144'567.85
<b>SUMME</b>					<b>734'640.73</b>

Jahreskosten	
Investitionskosten	54'180.20
Betriebsgebundene Kosten	2'812.50
Verbrauchsgebundene Kosten	734'640.73
<b>SUMME</b>	<b>791'633.43</b>

## Teilerneuerung Turbo gebr. 3450 Nm3/h

Zinssatz		7.5%
Strompreis	CHF/kWh	0.10
Wasserpreis	CHF/m3	0.25
Wechselkurs	CHF/EUR	1.54
Liefermenge Steuerluft	Nm3/a	40'694'681
spez. Kühlwasserbedarf	m3/kWh	0.098
alle Preise inklusive Lieferung, Montage, Eigenaufwand; zzgl. MWSt./Zoll		

Investitionskosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a	Annuitätsfaktor %	Jahreskosten CHF/a
VT06 - IR Centac C21MX4 Ern. der Steuerung		63'475.00 CHF	5	24.7%	15'688.78
Cooper TurboAir 3000 Turbo, 3450 Nm3/h		150'000.00 CHF	10	14.6%	21'852.89
Verbundsteuerung		65'000.00 CHF	20	9.8%	6'375.99
<b>SUMME</b>		<b>278'475.00 CHF</b>			<b>43'917.66</b>

Betriebsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	Lebensdauer a		Jahreskosten CHF/a
<b>SUMME</b>					-

Verbrauchsgebundene Kosten					
Beschreibung	spez. Aufwand	Aufwand	spez.Kosten		Jahreskosten CHF/a
Strombedarf	0.130 kWh/Nm3	5'290'309 kWh	0.10 CHF/kWh		529'030.85
Kühlwasserbedarf	0.098 m3/kWh	518'450 m3	0.25 CHF/m3		129'612.56
<b>SUMME</b>					<b>658'643.41</b>

Jahreskosten	
Investitionskosten	43'917.66
Betriebsgebundene Kosten	-
Verbrauchsgebundene Kosten	658'643.41
<b>SUMME</b>	<b>702'561.07</b>