

Antriebsunterstützung eines Schraubenverdichters mittels ORC-Schraubenexpander im KWK-Betrieb

Dipl.-Ing. A. Dullinger VDI, Zwiesel

Zusammenfassung

Berichtsgegenstand ist eine ölfrei Luft verdichtende Schraubenkompressoranlage, deren Kühlkreislauf als ORC-Anlage ausgeführt ist. Der ORC-Schraubenexpander überträgt seine Wellenleistung mechanisch direkt auf den Verdichterantrieb. Die ORC-Anlage ist im KWK-Betrieb einsetzbar.

Es wird über die ab 1/1986 vorliegenden Betriebs-erfahrungen berichtet; weitere Abschnitte befassen sich mit Gesichtspunkten zum Umweltschutz, der Energiebilanz sowie der Wirtschaftlichkeit.

Summary

Subject of this report is an oilfree aircompressing screwcompressorunit, the cooling cycle of which is executed as ORC unit. Mechanically the ORC screw-expander transfers its shaft-capacity directly to the compressor-drive. The ORC unit is applicable for combined-heat-and-power-generation.

The report mentions technical experience available since 1/1986. Other paragraphs deal with aspects concerning protection of the environment, the energy balance, as well as economics.

1. Einleitung

Bei der maschinellen Herstellung von Kelchgläsern werden große Mengen Druckluft u.a. für den Blas- und Kühlvorgang sowie für mechanische Antriebe eingesetzt. Da Glashüttenbetriebe seit Jahren den Raumheizwärmebedarf technisch und wirtschaftlich sinnvoll durch Rauchgasabwärmenutzung decken, bleibt der Abwärmestrom der Druckluftverdichter im allgemeinen ungenutzt.

Vor diesem Hintergrund wurde, in Zusammenarbeit mit Fachfirmen von den Schott-Zwiesel-Glaswerken AG ein Weg zur Nutzung der Verdichterabwärme gefunden und bei mittlerweile drei ausgeführten Anlagen begangen. Der dabei entstandene und seit Januar 1986 betriebene Anlagentyp, dessen Verwendung nicht auf die Glasindustrie beschränkt bleiben muß, wird nun vorgestellt.

2. Anlagenbeschreibung

2.1 Grundanlage

Die Anlage besteht im wesentlichen aus einem zweistufig ölfrei verdichtenden Schraubenkompressor mit Drehstromantriebsmotor und einer zur Kühlung und Antriebsunterstützung integrierten ORC-Anlage. Die Liefermengenregelung des Verdichters erfolgt über Zwischendruckabsenkung, überlagert von einer Vollast-Leerlaufregelung.

Bei dem Verdichter handelt es sich um einen VMT 3500 der Aerezner-Maschinenfabrik, der bei 4,5 bar_ü mit einer Liefermenge von 3600 m³/h betrieben wird. Die ORC-Anlage wurde von der Fa. Sabroe, Flensburg, ausgelegt und erstellt.

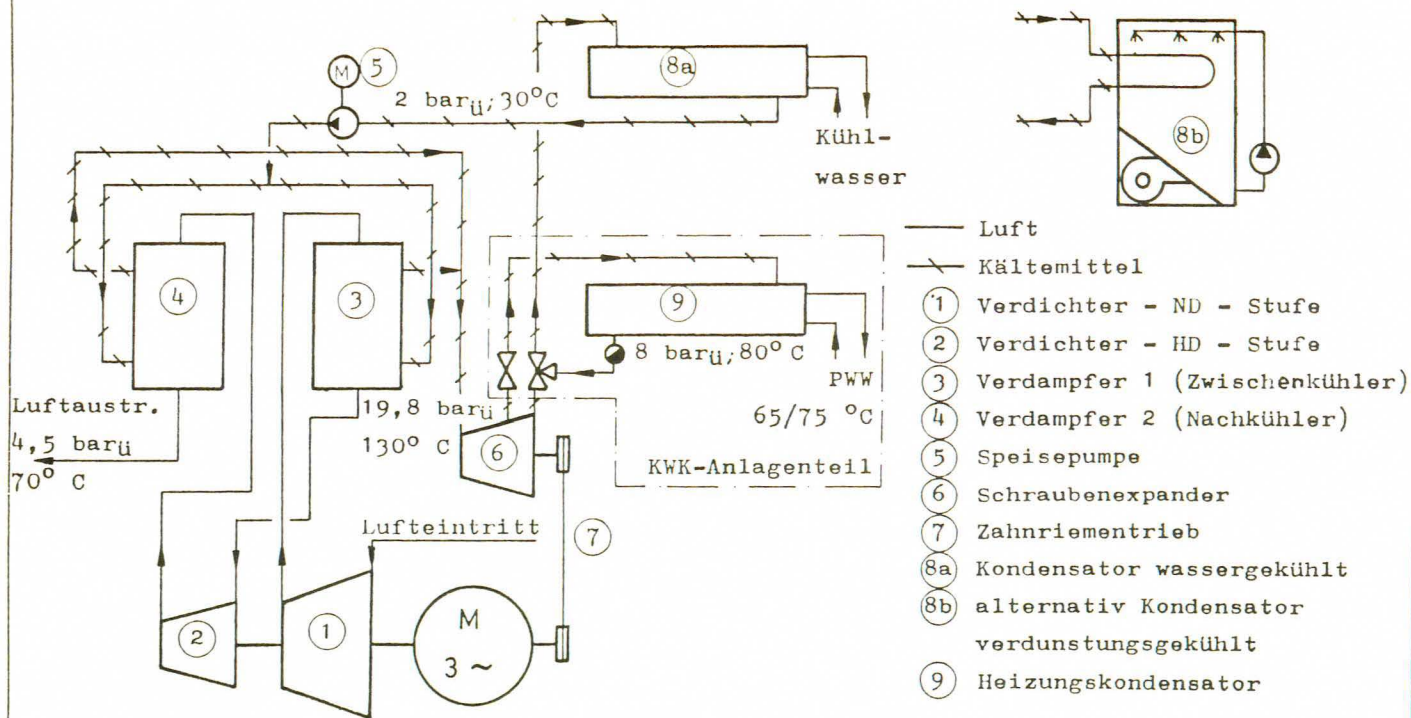


Bild 1 Vereinfachtes Anlagenfließschema für Verdichter mit ORC-KWK-Antriebsunterstützung

Fig. 1 Simplified scheme of a compressor drivesupportet by an ORC-unit with combined-heat-and-power-generation

Der grundsätzliche Aufbau geht aus dem Anlagenfließschema (Bild 1) hervor. Erwähnenswert sind die beiden Kältemittelverdampfer, welche als Zwischen- und Nachkühler zur Druckluftkühlung dienen und somit die Schnitt- oder besser die Verbindungsstelle zwischen Verdichter und ORC-Anlage bilden. Diese Apparate verursachen übrigens geringere Luftdruckverluste als vergleichbare Standardkühler. Die Erstanlage war ursprünglich mit einem wassergekühlten Kondensator ausgerüstet, um die vorhandene Kühlwasserversorgung weiter zu nutzen. Später kam hier, wie bei zwei Folgeanlagen, ein verdunstungsgekühlter Kondensator aus weiter unten genannten Gründen zum Einsatz. Beide Ausführungen bewiesen ihre Betriebseignung.

Der Schraubenexpander ist zweistufig mit Öleinspritzung ausgeführt. Hier setzte man aus der Drucklufttechnik bekannte Serienstufen der Aerzener VMX-Typenreihe in modifizierter Ausführung ein. Die Leistungsübertragung zum Verdichter erfolgt über einen Freilauf mittels Zahnriementrieb auf das zweite Wellenende des E-Motors.

Die beiden Hauptkomponenten Verdichter mit Antriebsmotor und ORC-Anlage wurden je als Kompaktanlage vormontiert geliefert und in einer begehbaren Schallschutzkabine aufgestellt. Die reine Anlagengrundfläche mißt ca. 4 x 3 m. Einen Überblick über die Anlage ermöglichen die Bilder 2, 3, 4 und 5.

2.2 Erweiterung um KWK-Teil

Aus Kühlwasserersparnisgründen waren endgültig verdunstungsgekühlte Kondensatoren für alle drei mittlerweile gebauten Anlagen vorgesehen.

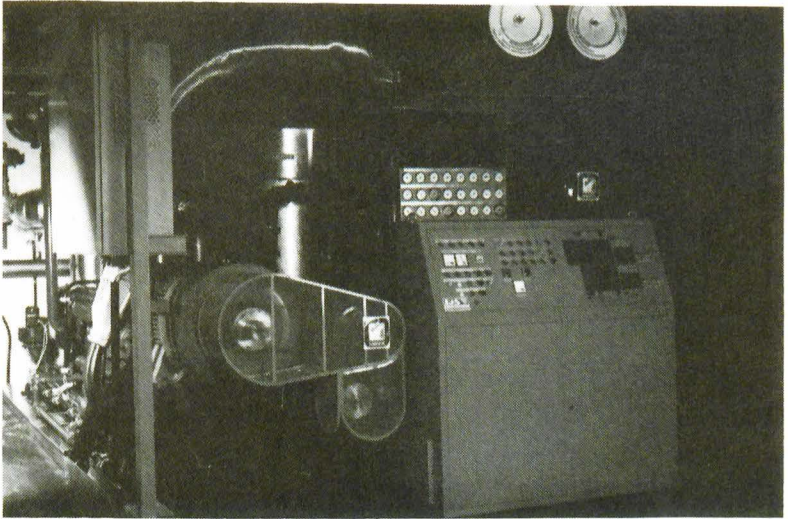


Bild 2 (oben):

Gesamtansicht der Anlage von der Verdichterseite her, bei demontierter Schallhau-benvorderwand.

Fig. 2 (top):

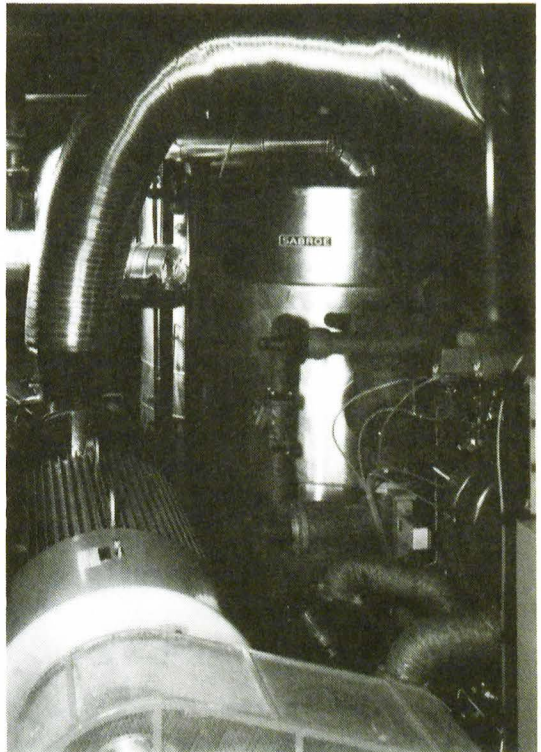
General view on the unit, seen from the compressor side, when soundabsorbing front-wall is disassembled.

Bild 3 (rechts):

Detailansicht auf Verdampfer, Expander-bereich und Verdichter.

Fig. 3 (right):

Detail view on evaporators, expander area and compressor.



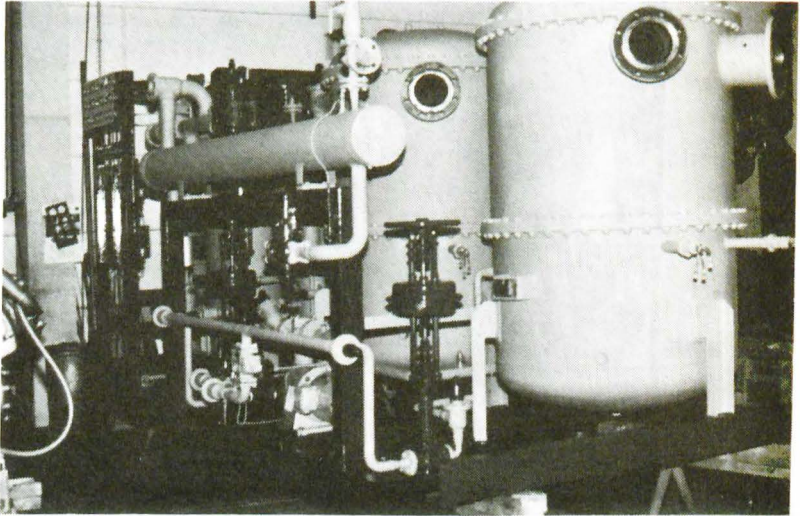


Bild 4 (oben): ORC-KWK-Anlage kurz vor der Auslieferung. Im Vordergrund links ist der Heizungskondensator zu sehen.

Fig. 4 (top): ORC-unit with combined-heat-and-power-generation short before delivery. It's to see the heating-condenser in the left foreground.

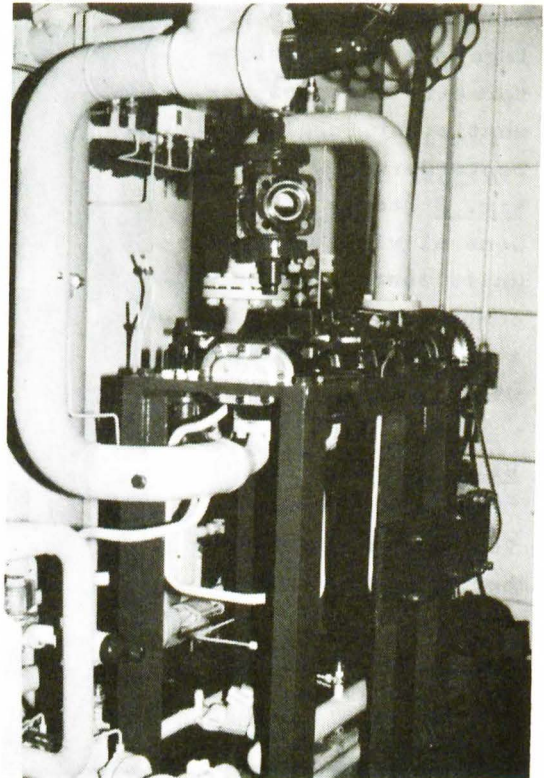


Bild 5 (rechts): Detailansicht vom Schraubenexpander auf der Zudampfseite.

Fig. 5 (right): Detail view of the screw expander on the side of steaminlet.

Daher bot sich der Platz des wassergekühlten Kondensators auf dem Anlagengrundrahmen für den Einbau eines Heizungskondensators an. Somit war der Weg zum KWK-Betrieb frei. Daß dies auch für einen "abwärmege-sättigten" Hüttenbetrieb noch interessant sein kann, wird unter 6. Wirtschaftlichkeit erläutert.

Bemerkenswert ist, wie in Bild 1 dargestellt, daß das Kältemittel nach der Kondensatableitung aus dem Heizungskondensator im verdunstungsgekühlten Kondensator weiter abgekühlt wird, um für die Verdichterkühlung die erforderlichlich niedrige Temperatur zu erreichen. Unter dem selben Gesichtspunkt wurde auch bei der "Grundanlage" auf einen Rekuperator zur Kondensatvorwärmung verzichtet.

3. Betriebserfahrungen

Die Erstanlage, zunächst nur als "Grundanlage" erstellt, mittlerweile ebenfalls für KWK nachgerüstet, befindet sich seit Januar 1986 im Betriebseinsatz.

Von ca. 13000 bis zum Betriebsurlaub '87 möglichen Betriebsstunden, konnte die Anlage ca. 10000 h genutzt werden. Der größte Teil der Fehlzeit entstand durch Optimierungsarbeiten speziell am Expander und den Umbau auf KWK. Störabschaltungen erfolgten in einem für eine Prototypanlage unerwartet geringem Umfang und hatten meist fehlerhafte Überwachungsgeräte als Ursache.

Von zwei Folgeanlagen konnte eine Anlage bis zum Betriebsurlaub '87 bereits weitere 2500 Betriebsstunden bei einer Verfügbarkeit von ca. 99 % aufweisen. Die andere wird während des Betriebsurlaubes aufgebaut und sich etwa ab Anfang September '87 im Einsatz befinden.

Im Betrieb sind alle Lastzustände ohne Einschränkung beherrschbar. Die erwarteten und der Wirtschaftlichkeitsrechnung zugrunde gelegten Leistungsdaten werden erreicht. Die Meßdaten zur Leistungsermittlung stimmten von der thermodynamischen und antriebs-elektrischen Seite zueinander gut überein.

An der HD-Verdichterstufe betragen die Luftaustritts-temperaturen im Normalbetrieb ca. 180 °C, bei Zwischen-druckabsenkung max. ca. 230 °C. Dies führt, zumindest örtlich, zu sehr hohen Kältemittel-Temperaturen von schätzungsweise 150 bzw. 200 °C. Die reguläre Kältemittel-Dampf-temperatur beträgt 130 °C.

Das Interesse am Nachweis der thermischen Stabilität des Kältemittels bei diesen Bedingungen ist sehr groß. Die Fa. Hoechst als Kältemittel-Lieferant begleitet deshalb den Betrieb mit regelmäßigen Analysen auf Zerfallsprodukte hin, ohne bisher z.B. einen Chloridgehalt nachweisen zu können.

4. Umweltschutzgesichtspunkte

Mit dem vorgestellten Anlagentyp werden Einsparungen von Antriebs- bzw. Elektroenergie und Heizwärme erzielt. Damit verbunden ist eine Abnahme des Rohstoff-verbrauches, des Schadstoffanfalles bei der Energie-umwandlung und der abzuführenden Wärmemengen.

Neben diesem vordergründigen Effekt bieten gerade Kältemittel und die verwandten Medien eine spezielle Möglichkeit bei der Anlagengestaltung zur Erfüllung wasserrechtlicher Auflagen :

Bei Verdichteranlagen mit einer Antriebsleistung oberhalb von ca. 100 kW hat sich gegenüber der Luft- die Wasserkühlung als betriebsgerechter durchgesetzt.

Viele Betreiber setzen hierzu Flußwasser ein, und sehen sich aus Umweltschutzgründen zunehmend mit einschränkenden Forderungen von seiten der Behörden konfrontiert. Im Allgemeinen stehen deshalb umfangreicher Wasserrückkühlanlagen zur Ausführung an. Nun benötigt ein verdunstungs- oder rein luftgekühlter Wasserrückkühler deutlich größere Apparateabmessungen und höhere Hilfsenergiekosten als ein vergleichbarer Kältemittelkondensator. Ähnliches gilt für die jeweils notwendigen Rohrleitungen und Pumpen. Der Grund hierfür liegt klar in der Latentform der Wärmeübertragung und des Wärmetransportes.

Es sind also mit Kältemittelkühlung kostengünstig bestimmte Umweltschutzauflagen erfüllbar. Zusätzliche Hinweise befinden sich im Kapitel Wirtschaftlichkeit.

5. Energiebilanz

5.1 Grundanlage

Die Angaben gelten für folgende E-Motorwirkungsgrade:

Verdichterantrieb 0,96

Speisepumpenantrieb 0,8

und bei einem Druckluftnetzdruck von 4,5 bar_ü
sowie einer Liefermenge von 3600 m³/h.

Datenzusammenstellung, siehe nächste Seite.

Datenzusammenstellung "Energiebilanz"

	$\text{kW}_{\text{therm.}}$	$\text{kW}_{\text{mech.}}$	$\text{kW}_{\text{el.}}$
Antriebsleistung Verdichter VMTS 3500 Standardausführung		293	305
Minderbedarf d. Verdichters wegen geringerer Luftdruckverluste		- 8	- 8,3
An die ORC-Anlage übertragbare Verdampferleistung	204		
Expanderleistung		(- 28,4)	(- 29,6)
Speisepumpenleistung		(+ 3,0)	(+ 3,8)
ORC-Nettoleistung		- 25,4	- 25,8
Antriebsleistung Verdichter VMT 3500 mit ORC-Anlage		259,6 =====	270,9 =====
→ Leistungsersparnis		33,4	34,1

ORC-Nettowirkungsgrad : 12,5 %

Verbesserung des spezifischen
Leistungsbedarfes für den

Verdichter : 11,4 % mech.
11,2 % el.

5.2 Anlage mit KWK

Abweichende Daten zur Grundanlage

Expanderleistung : 12 kW_{mech.} $\hat{=}$ 12,5 kW_{el.}

Heizleistung : 130 kW_{therm.}

Nutzungsgrad der in die
ORC-Anlage eingebrachten

Leistung : ca. 70 %

Nutzbare Leistungen : ca. 50 %

Antriebsleistung Verd.

6. Wirtschaftlichkeit

6.1 Grundanlage

Die Rentabilität der hier vorgestellten Anlage wird im wesentlichen durch zwei Umstände getragen.

Zum einen ermöglicht die Antriebsunterstützung eine Betriebskostensparnis beim Bezug von elektrischer Energie. Zum anderen ist durch die Gleichzeitigkeit von Antriebsenergieangebot des ORC und des -bedarfes des Verdichters eine gute Ausnutzung gegeben.

Dies steht im Gegensatz zu den Betriebsbedingungen vieler anderer Energiesparanlagen, wo Energieangebot und -nachfrage nicht immer zeitlich in Einklang zu bringen sind.

Durch Besonderheiten im Luftkühlverlauf wird der Taupunkt nicht unterschritten. Es kann von einer längeren Kühlerlebensdauer ausgegangen werden.

Bei guter Auslastung der Anlage (ca. 8000 h/a) ergab sich ein Betriebskostenanteil von ca. 50 TDM/a.

Dem würden bei der Anschaffung heute im Vergleich zum Standardverdichter Mehrkosten von ca. 150 TDM gegenüber stehen. Diese Kostensituation ergibt sich sowohl beim Bau einer neuen Verdichteranlage, als auch annähernd bei einem fälligen Kühler austausch.

Kommt der Einsatz eines verdunstungsgekühlten Kondensators gegenüber einer Wasserrückkühlung zum tragen, kann mit weiteren Einsparungen von mehreren 10 TDM bei der Anschaffung (betriebsabhängig, Leitungslängen usw.) und rund 10 TDM/a beim Betrieb gerechnet werden.

6.2 KWK-Anlagenteil

Die Anschaffungskosten lagen mit rund 35 TDM, im Vergleich zu anderen Abwärmenutzungsanlagen gleicher Leistung (130 kW), relativ niedrig. Hier wirkt sich vorteilhaft aus, daß die ORC-Anlage sozusagen die übertragungsgerechte Aufbereitung des Wärmeträgers, in diesem Fall für eine Kondensation, übernommen hat.

Je nach Brennstoffpreisen ist schon bei einigen tausend Betriebsstunden pro Jahr ein wirtschaftlicher Betrieb möglich. Dies gab im vorliegenden Fall den Anstoß zum Einbau der KWK-Anlagenteile.

7. Weiterentwicklungsmöglichkeiten

Zusammen mit kürzlich von der Aerzener-Maschinenfabrik vorgestellten einstufigen, ölfreien Verdichtern mit Wassereinspritzung könnte, gegenüber der vorliegenden zweistufigen Anlage, eine Vereinfachung erreicht werden. Wegen des hierbei für die ORC-Anwendung günstigeren hohen Temperaturniveaus,

wäre die Anwendung des Verfahrens auch bei geringeren Verdichtungsendrücken, bis herab zu ca. 2 bar_ü denkbar.

Durch Verwendung eines Verbrennungsmotors oder einer Gasturbine für den Verdichterantrieb sind weitere energietechnisch und wirtschaftlich interessante Varianten denkbar. Bei der vorgestellten Anlage kam aus Aufstellungsgründen nur der E-Antrieb in Frage.