

# Auslegung von öleingespritzten Schraubenkompressoranlagen, Simulation der Betriebsbedingungen

G. Benes, Gießen-Friedberg

## Zusammenfassung

Der Schraubenverdichter wird als Teil eines Systems betrachtet. Somit erhöht sich die Zahl der Einflußgrößen auf den Gesamtwirkungsgrad der Kompressoranlage um ein Vielfaches. Mit Hilfe eines Auslegungs- und Simulationsprogramms erfolgt die Auslegung und Optimierung der Gesamtanlage.

## Summary

The screw compressor is regarded as part of a compressor unit system. Therefore the number of parameters having an influence on the total efficiency of the compressor unit is increased many times over. The whole compressor unit is layed out and optimized by means of a lay-out and simulation program.

## 1. Einleitung

Die stetig steigenden Anforderungen des Marktes an Wirtschaftlichkeit und Qualität spiegeln sich auch im Bereich der Druckluftherzeugung wider.

Eine Vielzahl von Neuentwicklungen von Schraubenverdichterstufen verbunden mit der Grundlagenforschung brachten eindeutige Verbesserungen, die aber nicht immer vollständig bei den Kompressoranlagen realisiert werden konnten. Komplizierte Zusammenhänge und eine hohe Anzahl von Einflußgrößen erlaubten nur eine begrenzte Optimierung der Anlage.

Das vorliegende "Computerprogramm zur Auslegung und Berechnung von Schraubenverdichteranlagen" - CABS bietet die Möglichkeit, alle relevanten Bauteile (z. B. Motor, Verdichter, Kühler, Lüfter, Karosserie usw.) als Gesamtsystem zu betrachten. Entsprechend den Anforderungen kann eine Optimierung der Gesamtanlage unter Berücksichtigung der Betriebsdaten sowie der Herstellungskosten durchgeführt werden.

Neben der Neuauslegung und der Simulation des Betriebsverhaltens der Gesamtanlage kann aufgrund einer Anpassungskonstruktion der Einfluß von einzelnen Bauteilen auf alle Anlagenparameter geprüft werden. Unabhängig vom Gesamtsystem können auch Einzelbauteile ausgelegt bzw. ihre Betriebsdaten ermittelt werden.

## 2. Anlagenaufbau

Bei der Wahl des Grundaufbaus (Abb. 1) sind außer dem Wirkungsgrad auch die techn. Durchführbarkeit sowie die Herstellungskosten gleichermaßen von Bedeutung. Im Einzelnen sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

Technische Daten	:	Fördervolumenstrom, Aufnahmeleistung, Umgebungsbedingungen, Schallemission, Druckluftqualität
Wirtschaftlichkeit:	:	volumenspezifische Arbeit, Herstellungskosten
Technische Ausführung	:	bauliche Abhängigkeit wesentlicher Bauteile; separater/integrierter Lüfterantrieb; thermische Beanspruchung von Bauteilen; Gewährleistung der Kühlung im Betrieb bzw. bei Reparaturarbeiten

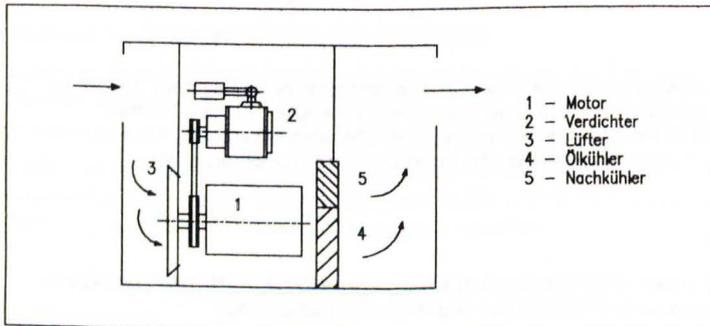


Abb. 1 Aufbau einer Schraubenverdichteranlage mit E-Antrieb  
Fig. 1 Construction of a compressor unit with E-motor

### 2.1 Konstruktionsvarianten

Die angesprochenen Kriterien werden wesentlich durch den Grundaufbau der Anlage beeinflusst. In Verbindung mit der Integration eines Nachkühlers ergeben sich 30 Varianten (Abb. 2). Diese können unter Berücksichtigung der Funktion und der konstruktiven Durchführbarkeit auf 10 Versionen reduziert werden.

### 2.2 Energie- und Wärmebilanz

Entsprechend dem gewählten Grundaufbau muß bei der Auslegung auch der zugehörige Energie- und Wärmefluß berücksichtigt werden (Abb. 3).

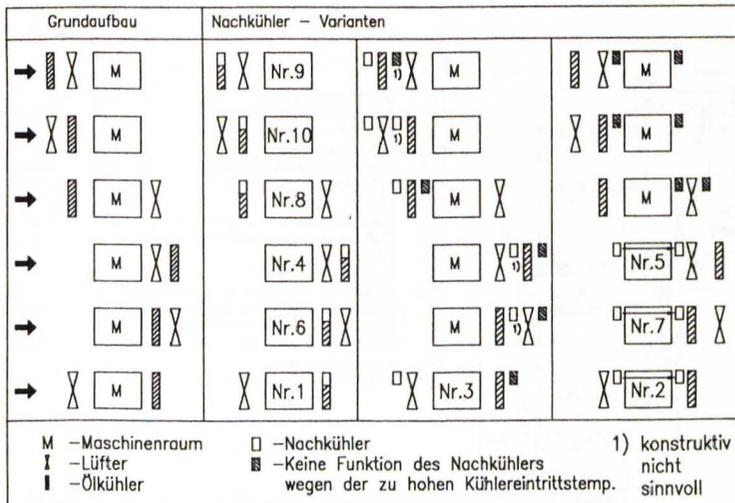


Abb. 2 Aufbauvarianten von Schraubenverdichteranlagen  
Fig. 2 Variants of screw compressors

### 3. Programmaufbau

Das Programmpaket CABS ist ein menügesteuertes modular aufgebautes Simulationsprogramm (Abb. 4). Es ist weitestgehend selbsterklärend. Das Programm weist seinen Benutzer auf die nächste, zur Fortführung des Programmes erforderliche Eingabe hin. Als Hilfe zur Festlegung der Eingabegrößen werden alle relevanten Daten in einem Infowindow (Abb. 5) angezeigt. Es handelt sich um Daten, die bei anderen Bauteilen festgelegt bzw. berechnet wurden. Falls sie noch nicht vorliegen, können Näherungswerte abgefragt werden.

Für jede Baugruppe steht eine graphische Auswahlhilfe bereit, so daß eine schnelle Übersicht über die vorhandenen Bauteile und ihre Eckdaten möglich ist.

Bei einer Neuauslegung der gesamten Anlage ist eine schrittweise Vorgehensweise, bei der nacheinander einzelne Baugruppen berechnet werden, sinnvoll. Die Berechnung der Bauteile erfolgt unabhängig voneinander und kann in beliebiger Reihenfolge durchgeführt werden.

Die Module sind autark, so daß bei Bedarf nur ein Bauteil ausgelegt bzw. seine Leistungsdaten überprüft werden können.

Die Module können, lediglich begrenzt durch die Arbeitsspeicherkapazität, beliebig erweitert werden.

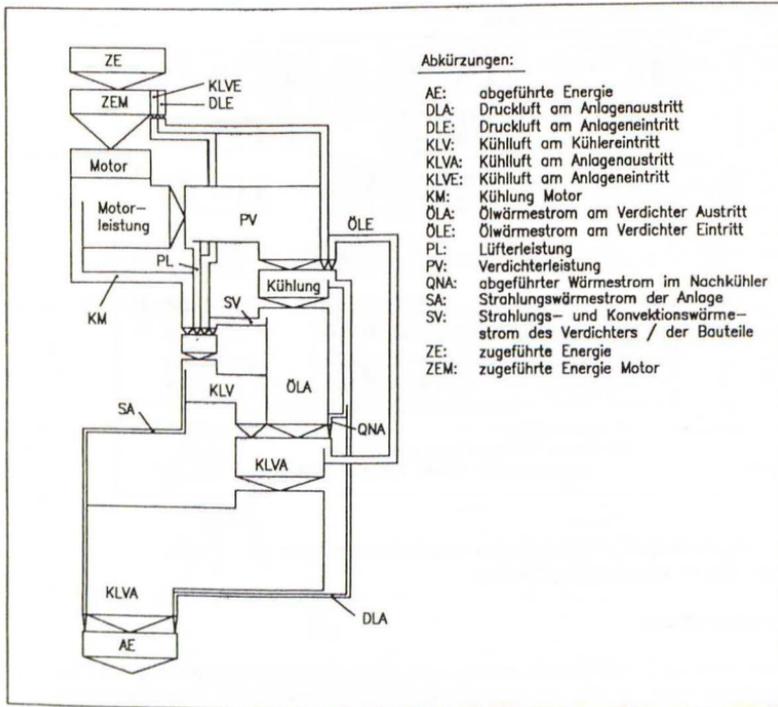


Abb. 3 Energie- und Wärmefluß einer E-Anlage für den Aufbau 1, 3, 4  
 Fig. 3 Energy flow diagram of an E-compressor unit for the variants 1, 3, 4

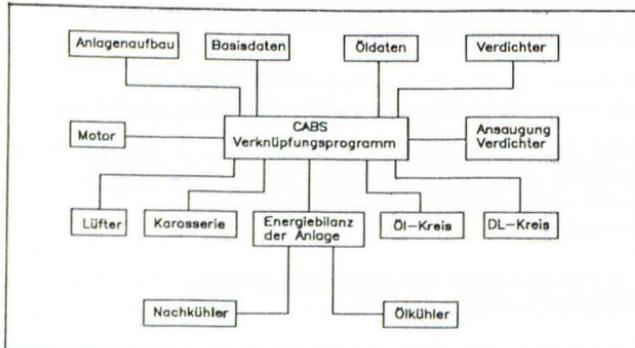


Abb. 4 Modularer Aufbau des Simulationsprogramms CABS  
 Fig. 4 Module structure of the simulation program CABS

ÖLKÜHLERBERECHNUNG: =====		1.)		Kühl- luft →	L	Maschinen- Satz	NK ÖK	Kühl- luft →
über Anlagenaufbau ( 1 ) & Temperatur								
Kühlerhöhe	= 550.0	mm ?		Kühl.strom Kü.ges.=	32.50	m <sup>3</sup> /min		
Kühlertiefe	= 63.0	mm ?		(Tu, patm)				
Blechdicke	= 0.80	mm ?		Kühl.strom NaKü	= 7.50	m <sup>3</sup> /min		
Randbreite	= 5.0	mm ?		(Tu, patm)		23 %		
Umlenkungsanzahl	= 1	?		Kühl.strom Ölkü	= 25.00	m <sup>3</sup> /min		
Luftkorrekturf.	= 0.901	?		(Tu, patm)		77 %		
Ölkorrekturfakt.	= 0.978	?		Lüftervolumenstrom=	0.00	m <sup>3</sup> /min		
				(Tu, patm)				
Kühllufttemp. Kühleintritt	=	39.86	°C	?				
Kühl.strom Ölkü (Tu, patm)	=	25.00	m <sup>3</sup> /min	?				
Kühl. strom Kühler ges. (Tu, patm)	=	32.50	m <sup>3</sup> /min	?				

Abb. 5 Eingabemenü mit Infowindow  
Fig. 5 Insert menu with info window

CABS verfügt über verschiedene Speicherroutinen. Temporäre Dateien haben die Aufgabe, Berechnungsdaten zwischen den Modulen zu übertragen bzw. sie zu aktualisieren. In den konstanten Dateien werden die Berechnungsdaten langfristig gespeichert.

### 3.1 Basisdaten

Im Modul Basisdaten werden die Umgebungsbedingungen ( $t_U$ ,  $p_U$ ,  $H_0$ ,  $\Phi$ ), die für die Auslegung der Gesamtanlage gelten, festgelegt. Sie sind die Bezugsdaten für die Auslegung aller Bauteile.

### 3.2 Öldaten

Hier erfolgt die Auswahl des zu verwendenden Öls entsprechend der Viskositätsklassen ISO VG 22; 32, 46, 68.

### 3.3 Anlagenaufbau, Energiebilanz

Mit Anwählen einer der zehn möglichen Anlagebauarten (Kap. 2) im Modul Anlagenaufbau erfolgt die thermodynamische, strömungstechnische und leistungsmäßige Verknüpfung der Baugruppen Motor, Verdichter, Ölkühler, Nachkühler, Lüfter und Karosserie.

Im Modul "Energiebilanz der Anlage" wird aufgrund der Wärme- und Energiebilanz der einzelnen Baugruppen der Zustand der Kühlluft beim Durchströmen der Anlage berechnet (Abb. 6).

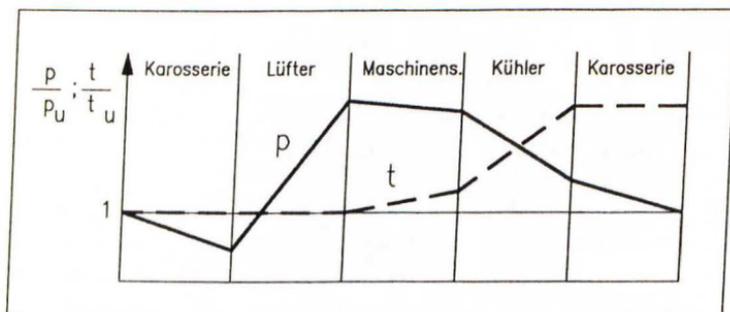


Abb. 6 Temperatur- und Druckprofil innerhalb der Anlage

Fig. 6 Temperature and pressure profile within the compressor unit

### 3.4 Motor

Für die Auslegung einer Kompressoranlage ist die Wahl der Antriebseinheit von besonderer Bedeutung. Sie beeinflusst im wesentlichen den konstruktiven Aufbau und die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

CABS bietet sowohl Diesel- als auch E-Motoren als Antrieb an. Als Beispiel wird die E-Motorenoption mit folgenden Auslegekriterien herangezogen:

- Nennleistung
- Nenndrehzahl
- Schutzklasse
- Einfluß der Kühllufttemperatur auf die Motorkenndaten
- Strahlungs-, Konvektionswärme
- Überlastbarkeit
- Einfluß der geod. Höhe auf die Motorkenndaten

Als konstruktive Beurteilungskriterien sollten

- das Schallverhalten,
- das Schwingungsverhalten,
- der Einbauraum und die Einbauanschlüsse

berücksichtigt werden. Die Nutzleistung wird in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen und der vorgegebenen Auslastung berechnet. CABS bietet 39 Motortypen von 7,5 bis 200 KW an.

### 3.5 Verdichter

Die theoretische Berechnung der Betriebscharakteristik eines öleingespritzten Schraubenverdichters ist mit einem enormen Rechenaufwand verbunden. Zudem fehlt es z. T. noch an geeigneten Strömungs- und Wärmeübertragungsmodellen, um gesicherte Daten zu erhalten.

Abgesehen von den konstruktiven Gegebenheiten wie der Profilgestaltung, den Spaltgrößen usw. wird die Betriebscharakteristik durch folgende Betriebsparameter bestimmt:

- Umfangsgeschwindigkeit  $c_U$
- Ansaugdruck  $p_1$
- Verdichtungsenddruck  $p_2$
- Öleinspritzdruck  $p_{Öl}$
- Ölvolumenstrom  $\dot{V}_{Öl}$
- Ansaugtemperatur  $t_1$
- Öleinspritztemperatur  $t_{Öl}$
- Viskositätsklasse ISO VG

Da dieses Berechnungsprogramm zum Simulieren der Betriebsbedingungen vorhandener Verdichter eingesetzt wird, basiert es auf empirisch ermittelten Stützfunktionen bei identischen Randbedingungen.

$$\lambda = f(c_U, p_2) \quad (\text{Abb. 7}) \quad M_{opt} = f(p_2) \quad /1/$$

$$v = f(c_U, p_2) \quad (\text{Abb. 8}) \quad c_{uopt} = f(p_2) \quad /1/$$

$$t_2 = f(\dot{V}_{Öl}, p_2) \quad \dot{V}_{Öl opt} = f(p_2) \quad /1/$$

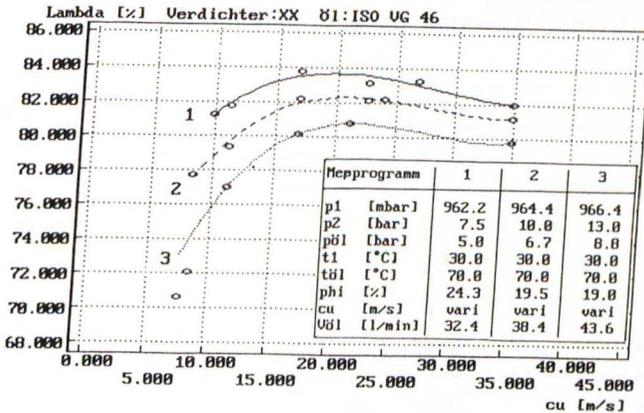


Abb. 7 Stützfunktionen des volumetrischen Wirkungsgrades  
 Fig. 7 Basic function of the vol. efficiency

Die Verdichtungsendtemperatur wird in Abhängigkeit vom Verdichtungsenddruck und Ölvolumenstrom für eine konstante Bezugsumfangsgeschwindigkeit mit Hilfe der Newtonschen Approximation von mindestens neun Werten bestimmt. Weiterhin von Bedeutung ist die Kenntnis des Optimums in Abhängigkeit vom Verdichtungsenddruck und der daraus resultierende Verlauf der optimalen Größen /1/:

Der physikalische Einfluß der restlichen Parameter auf den volumetrischen Wirkungsgrad, die Bestimmung des Momentes und die Verdichtungsendtemperatur wurden in /1/ behandelt.

Das Ergebnis einer Rechnung ist in Abb. 9 dargestellt.

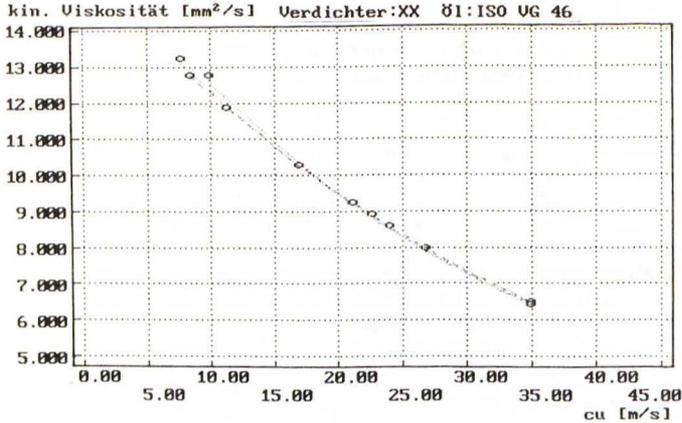


Abb. 8 Stützfunktionen der kin. Viskosität

Fig. 8 Basic function of the kin. viscosity

Schraubenverdichter - Berechnung - Datenausgabe			
Berechnungs - Nr.	:	1	
Verdichtertyp	:		
Sach - Nr.	:	XX	
Ölsorte	:	Shell Tellus C46	ISO VG 46
atm. Druck	:	0.89871	bar
Umgebungstemperatur	:	20.00	°C
Luftfeuchte	:	70	%
geod. Höhe	:	1000.00	m
Verdichtungsenddruck (rel.)	:	10.40	bar
Ansaugdifferenzdruck (rel.)	:	-1312.38	Pa
HL - Umfangsgeschwindigkeit	:	20.18	m/s
HL - Drehzahl	:	3568.61	1/min
Temperatur am Saugstutzen	:	25.00	°C
Taupunkttemperatur	:	61.16	°C
Öleinspritztemperatur	:	60.00	°C
Temperatur am Druckstutzen	:	75.74	°C
Ölvolumenstrom	:	39.00	l/min
Fördervolumenstrom	:	2.40	m <sup>3</sup> /min (bei 1 bar, 20 °C)
Fördervolumenstrom	:	2.67	m <sup>3</sup> /min (bei patm, Tu)
vol. Wirkungsgrad	:	0.84332	
Moment	:	50.35	Nm
Verdichterleistung	:	18.815	kW
Volumenspezifische Arbeit	:	7.85	kW/m <sup>3</sup>

Abb. 9 Schraubenverdichterdaten

Fig. 9 Screw compressor data

### 3.6 Lüfter

Die Bestimmung des Kühlluftvolumenstromes ist von entscheidender Bedeutung bei der Auslegung einer luftgekühlten Kompressoranlage. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Betriebscharakteristik des Lüfters unter Berücksichtigung der Einbauverhältnisse sowie der zu überwindenden Widerstände (Abb. 10).

Eine Anpassung der Lüfterdaten an die Betriebsbedingungen ist über die Drehzahl und in begrenztem Maße über den Lüfterdurchmesser möglich. In EBOS stehen z. Zt. 39 Lüfter zur Verfügung.

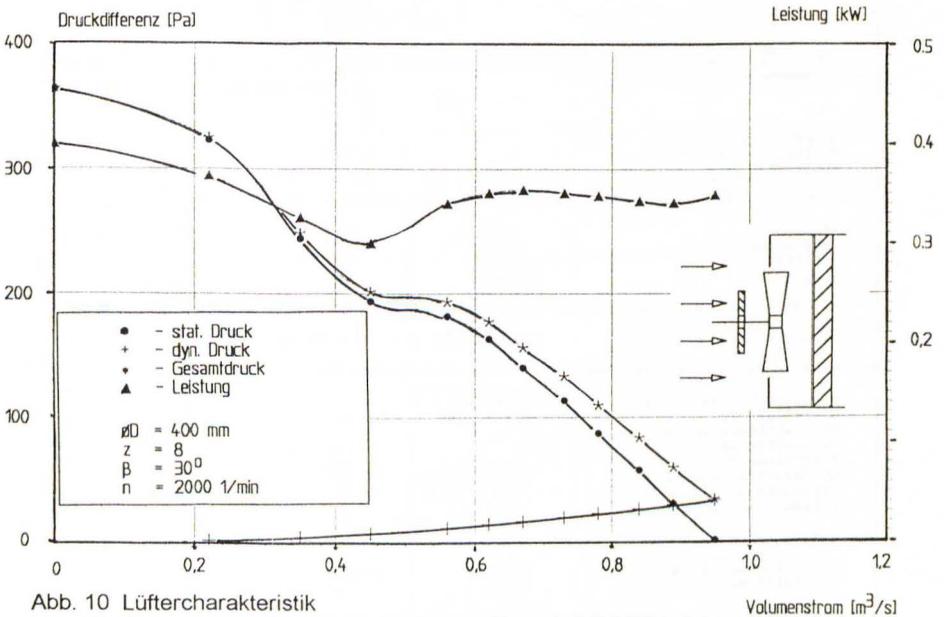


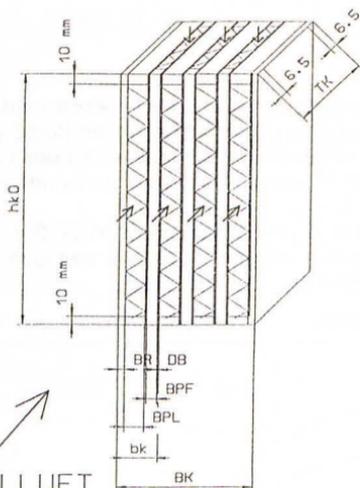
Abb. 10 Lüftercharakteristik  
Fig. 10 Fan characteristic

### 3.7 Ölkühler, Nachkühler

Die Auslegung der beiden Kühlerarten erfolgt in selbständigen Modulen. Es handelt sich um Kreuzstromkühler in Blockbauweise (Abb. 11).

Die Berechnung der mittleren Temperaturdifferenz erfolgt mit Hilfe der von Nusselt gelösten, gekoppelten partiellen Differentialgleichungen für den Kreuzstrom [2].

Es ist möglich, die Kühlergröße (Abb. 11) für den vorgegebenen abzuführenden Wärmestrom bzw. die Austrittsdaten für die vorgegebene Kühlergröße zu berechnen.



Ölkühlerberechnung		
Berechnungs - Nr.	:	
Kühlertyp / Hersteller	:	
Kühlersach-Nr.	:	
KÜHLLUFT		
atm. Druck	:	0.89871 bar
Umgebungstemperatur	:	20.00 °C
Luftfeuchte	:	70 %
geod. Höhe	:	1000.00 m
Ölsorte	:	Shell Tellus C46 ISO VG 46
Kühler-Art/Umlenkungen	:	Kreuzstrom / 1
Kühlermaße B/H/T	:	324 / 550 / 63 mm
Kühlluftlamellentyp	:	WI15
Öllamellentyp	:	T13
Blechdicke/Rand	:	0.8 / 5.0 mm
Luftpas.Breite/Deckfläche	:	11.2 / 10.96 mm
Ölpassage Breite/Deckfläche	:	3.0 / 4.20 mm
Passagenzahl Luft/Öl	:	19 / 18 -
Kühllufttemp. Eintritt	:	25.00 °C
Kühllufttemp. Austritt	:	48.74 °C
Öltemp. vor Kühler	:	75.00 °C
Öltemp. nach Kühler	:	60.00 °C
Kühl.strom Ölkü (Tu, patm)	:	40.00 m <sup>3</sup> /min
Kühlluftvolumenstrom ges.	:	52.00 m <sup>3</sup> /min
Anteil d. Kühlluft d. Ölkü.	:	94 %
Ölvolumenstrom	:	39.00 l/min
Kühlluftdruckverlust	:	231. / 24. Pa bzw. mmWS
Öldruckverlust	:	.339 bar
Öldruck Kühleintritt	:	9.00 bar

Abb. 11 Ölkühlerdaten

Fig. 11 Oil cooler data

### 3.8 Karosserie

Die Karosserie schützt die Einrichtungen der Kompressoranlage vor unerwünschten Umgebungseinflüssen. Sie muß auch so ausgeführt sein, daß die Schallabstrahlung den gesetzlichen Vorschriften /3/ entspricht.

Nach der Beziehung:

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{c^2}{2} \quad \text{bzw.} \quad \Delta p = \frac{\rho \cdot l \cdot \lambda \cdot c^2}{2D}$$

können verschiedene Anordnungen der Kühlluftführung (Abb. 12) ausgelegt und zusammengefügt werden /4/.

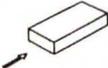
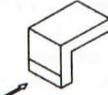
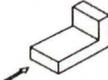
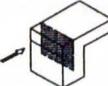
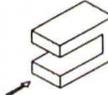
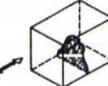
	gerader Kanal		zweifache Umlenkung mit bündiger Öffnung
	einfache Umlenkung		vierfache Umlenkung mit bündiger Öffnung
	doppelt gleichs. Umlenkung		plötzliche Querschnittsänderung
	doppelt gegens. Umlenkung		Machinenraum

Abb. 12 Karosseriebauelemente /4/  
Fig. 12 Coach parts

### 3.9 Ansaugung, Druckluftkreis, Ölkreis

Die Minimierung der ansaug- und druckseitigen Verluste des Schraubenverdichters kann im Modul Ansaugung und DL-Kreis erfolgen. Im Modul Ölkreis erfolgt die Abstimmung des erforderlichen Ölvolumenstromes und der zur Verfügung stehenden Druckdifferenz.

Die Berechnung der Druckverluste erfolgt nach:

$$\Delta p = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{c^2}{2} \quad \zeta = f(\text{Re}, K_1, K_2)$$

Zur Auswahl stehen Rohre, Kniestücke, Bögen, Umlenkungen, Luftfilter, Ölfilter, Feinölabscheider, Rohrverschraubungen usw.

#### 4. Anwendung

Das vorliegende Programm erlaubt die Auslegung einzelner Bauteile unter Berücksichtigung des Gesamtwirkungsgrades der Kompressoranlage. Weiterhin kann durch Verändern eines oder mehrerer Parameter das Betriebsverhalten der Gesamtanlage simuliert werden.

Als Simulationsbeispiel soll der Einfluß des Kühlluftvolumenstroms auf die wichtigsten Betriebsparameter einer vorhandenen Kompressoranlage erläutert werden. Dieser Vorgang kann z. B. durch das Vorsehen zusätzlicher, schalldämmender Maßnahmen /3/ hervorgerufen werden. Der Einfluß der Änderung des Kühlluftvolumenstroms auf die Bauteilparameter ist in Abb. 13 dargestellt. Die Auswirkung auf die Anlagenparameter zeigen die Abb. 14 und 15. Ein nachträglicher Vergleich mit Meßwerten ergab eine Berechnungsgenauigkeit  $\leq \pm 3\%$ .

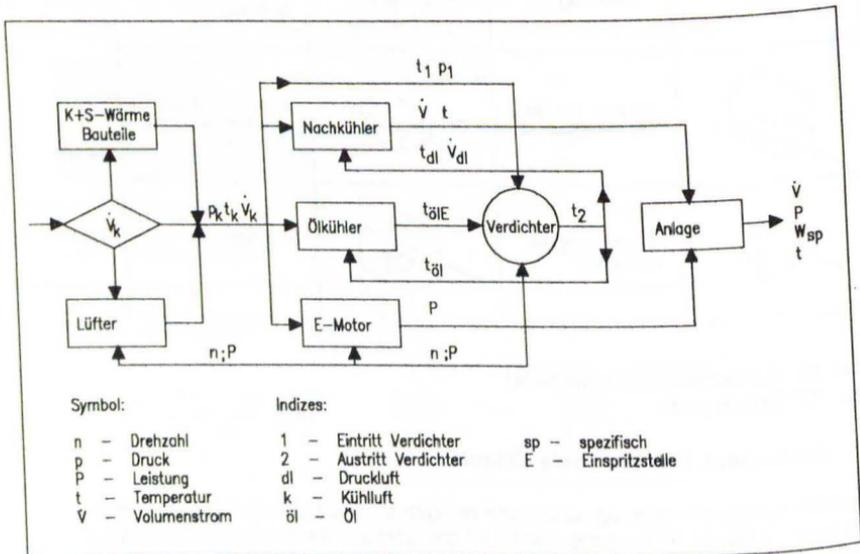


Abb. 13 Einfluß des Kühlluftvolumenstroms auf die Bauteilparameter  
Fig. 13 The air cooling flow's influence on the parts parameter

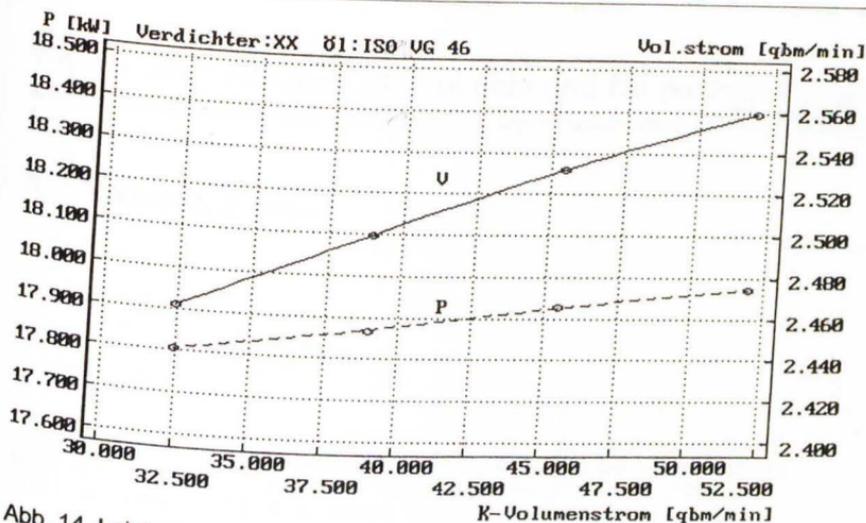


Abb. 14 Leistung und Volumenstrom als Funktion des Kühlluftvolumenstroms  
 Fig. 14 Power and air flow dependent on cooling air flow

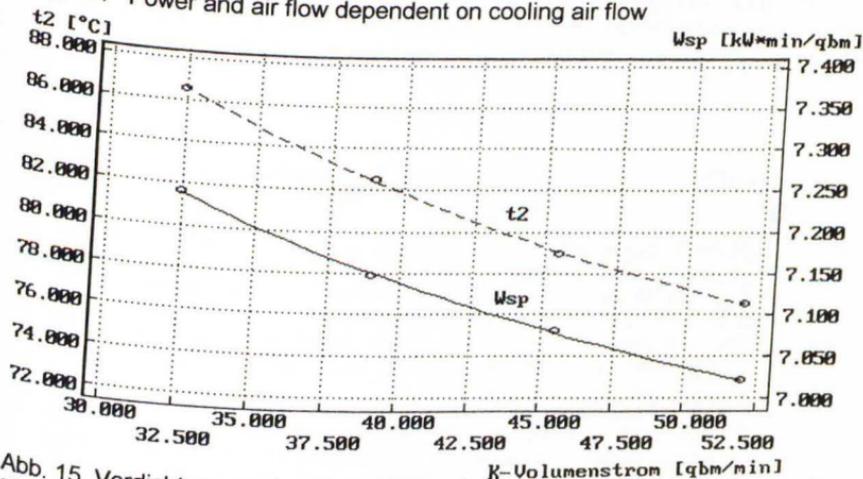


Abb. 15 Verdichtungsendtemp. und Wsp als Funktion des Kühlluftvolumenstroms  
 Fig. 15 Discharge temperature and Wsp dependent on cooling air flow

Literatur

- 1/1 Benes, G. - Betriebsparameter eines öleingespritzten Schraubenverdichters; Schraubenmaschinen 94
- 1/2 Nusselt, W. - Technische Mechanik und Thermodynamik 1930
- 1/3 Benes, G. - Schall - das Auslegkriterium für ölüberflutete Schraubenverdichteranlagen; VDI-Berichte 640
- 1/4 Benes, G. - Widerstandsbeiwerte von Karosseriebauteilen; unveröffentlicht