

Erfahrungen mit
Leistungsmessungen an
Kolbenverdichtern mittels Druckindizierung

Dr.-Ing. J. Lenz
KÖTTER Consulting Engineers

Inhalt:

- 1.) Einheitliche Bestimmungen beim Leistungsversuch
- 2.) Grundlagen
- 3.) Vorgegebene Möglichkeiten zur Leistungsmessung
- 4.) Durchführung eines Abnahmeversuches nach VDI 2045
 - 4.1. Berechnung der Meßunsicherheiten
 - 4.2. Lageplan der Meßstellen
 - 4.3. Meßstellenliste (Verdichter und Gasmotor)
 - 4.4. Garantiebedingungen des Garantiepunktes 1
 - 4.5. Ablaufprogramm
 - 4.6. Versuchsdurchführung
 - 4.7. Bestimmung der gemessenen indizierten Leistungen aus dem p-V Diagramm
 - 4.8. Stundenmittelwert der durchgeführten 13 Meßwertreihen (ohne Korrektur)
- 5.) Ergebnisse der Leistungsmessung
 - 5.1. Umrechnung auf die Garantievoraussetzungen
 - 5.1.1. Nutzbarer Ansaugvolumenstrom
 - 5.1.2. Leistungsbedarf P_{KV}
 - 5.1.3. Umgerechneter spezifischer Leistungsbedarf w_{Um}
 - 5.1.4. Wirkungsgrad des Gasmotors η_{GM}
 - 5.2. Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den garantierten Werten
 - 5.3. Ergebnis
- 6.) Zusammenfassung
- 7.) Literatur

1.) Einheitliche Bestimmungen beim Leistungsversuch

Zur meßtechnischen Überprüfung der vom Hersteller einer Verdichteranlage zugesicherten Eigenschaften gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. In der VDI 2045 / DIN1945 [1,2] werden Regeln zur einheitlichen Bestimmung für die Vorbereitung, Vorgehensweise, Auswertung und Beurteilung der Leistungsversuche an Verdichtern geschaffen. Ausgangspunkt sind die im Liefervertrag getroffenen Vereinbarungen. Hier sollte festgehalten werden, bei welchen Bedingungen (z. B. Gastemperaturen, Saug- und Enddruck) welche Leistung und welcher Volumenstrom von der Anlage zu erbringen ist. Oft ergibt sich ein ganzes Feld von unterschiedlichen Randbedingungen, die dann jeweils als einzelne Garantiepunkte zu überprüfen sind. Entscheidend ist, daß im Vorfeld neben den unterschiedlichen Bedingungen die Vorgehensweise zur Leistungsmessung, die maximal auftretenden Abweichungen und die zugrundeliegenden Normen vertraglich festgelegt werden.

In den nachfolgenden Ausführungen wird die Durchführung speziell der Leistungsmessung mittels Druckindizierung auf Basis der VDI 2045 bzw. der DIN 1945 als eine effektive Möglichkeit an einem Beispiel vorgestellt und erläutert.

2.) Grundlagen

Zwischen Hersteller bzw. Lieferer und Abnehmer wird vertraglich vereinbart, welche Eigenschaften des Verdichters garantiert und durch den Abnahmeversuch nachgewiesen werden sollen. Die Bedingungen als Voraussetzung für die Garantien müssen im Liefervertrag festgelegt werden. Dazu gehören:

- Saug- und Enddruck
- physikalische Eigenschaften und Zusammensetzung des Gases
- Betriebsbedingungen der Antriebsmaschine
- bei Zwischenkühlung, die Rückkühltemperatur, Druckverluste in den Zwischenstufen, Kühlmittel (Massenstrom, Temperaturen)

- jegliche thermodynamischen Informationen zu Zwischeneinspeisungen oder Zwischenentnahmen
- festgelegte Größen der Strömungsquerschnitte am Verdichter

Als Gegenstand der Garantien werden die Werte bezeichnet, die zu garantierende Eigenschaften beschreiben, wie z. B.:

- - Leistung des Verdichters an der Verdichterkupplung
 - elektrische Leistung an den Klemmen des Antriebsmotors
 - Triebmittelbedarf der Antriebsmaschine
- nutzbarer Ansaugvolumenstrom
- Enddruck
- Grenzen des Arbeitsbereiches
- Leistungen von Hilfsmaschinen

Die Versuchsergebnisse müssen unter Berücksichtigung der Meßunsicherheiten auf die tatsächlichen Garantievoraussetzungen zurückgerechnet werden und können dann mit den Garantiewerten verglichen werden.

In der VDI 2045 werden verschiedene Meßverfahren und Meßgeräte aufgeführt. Unabhängig davon sollten im Vorfeld grundsätzlich alle Meßumformer kalibriert werden. Es muß auf jeden Fall die Möglichkeit bestehen, die gesamten eingesetzten Meßketten durch geeignete Maßnahmen zu überprüfen.

3.) Vorgegebene Möglichkeiten zur Leistungsmessung

Zur meßtechnischen Erfassung der Leistung werden in der VDI 2045 unterschiedliche Möglichkeiten vorgeschlagen:

- **Unmittelbare mechanische Messung an der Kupplung**

Die Leistung zwischen Antriebsmaschine und Verdichter kann durch Messung des Drehmomentes und der Drehzahl erfaßt werden. Dazu ist es notwendig, die Winkelverdrehung einer das Drehmoment übertragenden Welle zu erfassen. Dies kann über verschiedene Verfahren (kapazitiv, optisch oder ohmisch) erfolgen.

- **Bestimmung aus der zugeführten Leistung**

Die Leistung bei elektrischem Antrieb kann aus der dem Motor zugeführten Klemmenleistung und aus dem Wirkungsgrad des Motors berechnet werden.

- **Mittelbare Bestimmung durch Messung des Indizierdruckes**

Die Leistung speziell am Kolbenverdichter kann durch Messung des Zylinderraumdruckes (Indikatordruck) erfolgen. Die Kupplungsleistung ergibt sich dann über den mechanischen Wirkungsgrad des Verdichters oder durch Messung der Eingangsleistung am Antrieb.

- **Mittelbare Bestimmung mittels Energiebilanz**

Die Leistung wird indirekt aus der Energiebilanz bestimmt. Dabei werden Massenstrom und Enthalpieerhöhung der verwendeten Medien zur Kühlung, Schmierung und Sperrung des Gases gemessen.

Aus diesen in der Richtlinie aufgeführten Möglichkeiten ist im Hinblick auf die Gegebenheiten der Verdichteranlage und dem zu vertretenden Aufwand bzw. der Genauigkeit des Messergebnisses ein Verfahren zur Bestimmung der Leistung auszuwählen.

4.) Durchführung eines Abnahmeversuches nach VDI 2045

Nachfolgend wird die Durchführung der Leistungsmessung an einem Erdgasverdichter auf Basis von Indikatorgrammen beispielhaft aufgezeigt.

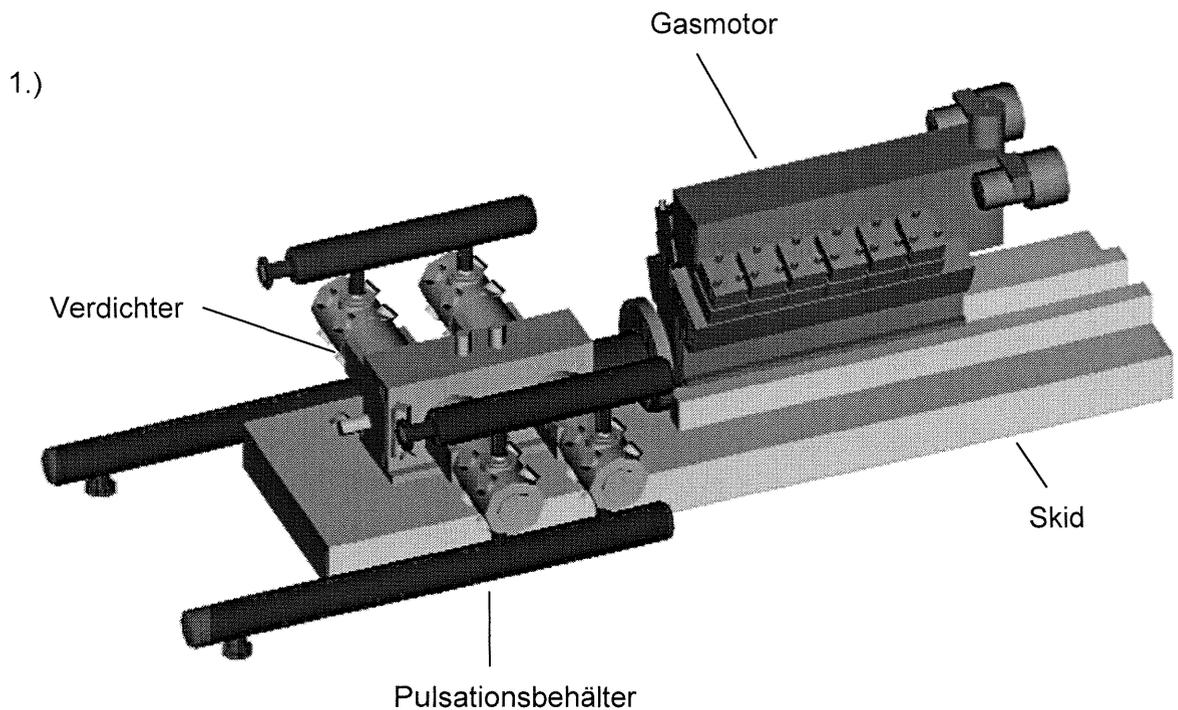


Abb. 1: Kolbenverdichteranlage mit Gasmotor als Antriebseinheit

Technische Daten:

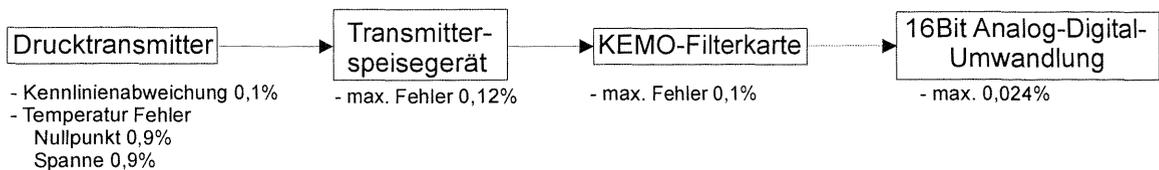
Bauart: Liegender einstufiger 4-Zylinder Hubkolbenverdichter in Boxeranordnung, doppelt wirkend
 Antrieb: 12-Zylinder Gasmotor
 Nennleistung: 2.150 kW
 Drehzahlbereich: 700 - 1000 1/min

Vor der Versuchsdurchführung ist ein konkretes Versuchsprogramm zu erarbeiten und zwischen Hersteller und Abnehmer abzustimmen. In diesem Programm sollen unter anderem Art, Umfang der Messung, Meßorte, zeitlicher Ablauf sowie Meßunsicherheiten der einzelnen Meßketten und die Vorausberechnung von den zu erwartenden Ergebnismessunsicherheiten enthalten sein.

4.1. Berechnung der Meßunsicherheiten

Die Meßunsicherheiten der einzelnen Meßketten setzen sich zusammen aus den maximalen Meßfehlern der einzelnen Meßglieder. Die Ermittlung erfolgt nach der Richtlinie VDI 2048 (Messungenauigkeiten bei Abnahmeversuchen) [3]. Der Gesamtfehler bzw. die Messungenauigkeit wird aus der geometrischen Summe der Einzelfehler bestimmt. Entsprechend sind auch die Meßunsicherheiten der Ergebniswerte zu berechnen.

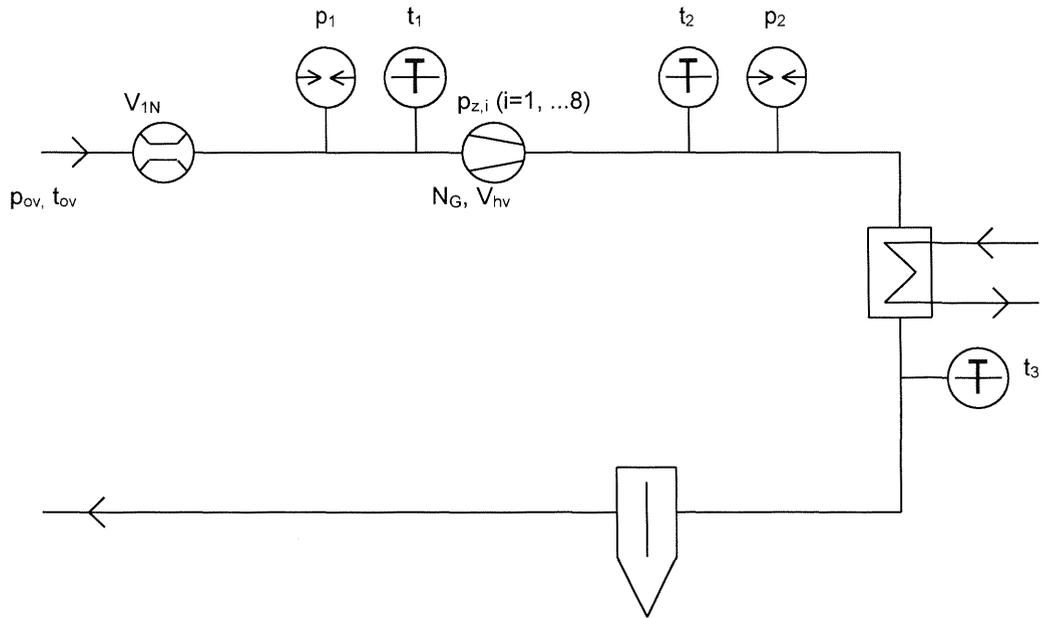
z. B.: Fehler $\Delta p_{z,i}$ der Druckmeßstrecke $p_{z,i}$



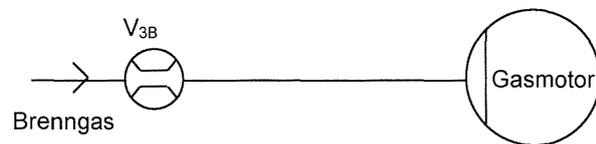
$$\text{Gesamtfehler: } \frac{\Delta p_{z,i}}{p_{z,i}} = \sqrt{\sum_{E=1}^n \left(\frac{\Delta F_E}{F_E} \right)^2} = 1,28\%$$

4.2. Lageplan der Meßstellen

1) Verdichter



2) Gasmotor



4.3. Meßstellenliste (Verdichter und Gasmotor)

Meßgröße	Meßgerät	Bezeichnung [Einheit]	Meßunsicherheit
Volumenstrommenge (Saugleitung)	Ultraschallzähler TWIN Sonic-5	V_{1N} [Nm ³ /h]	0,12 %
Gastemperatur (Verdichtereintritt)	Widerstands- thermometer PT 100	t_1 [°C]	0,94 %
Gasdruck (Verdichtereintritt)	STS-ATM/H Absolutdruck (KÖTTER-Meßsensor)	p_1 [bar]	1,28 %
Verdichterzahl	Triggersensor: Pepperl + Fuchs GmbH	N_G [1/min]	0,16 %
Zylinderinnenraum- druck	STS-ATM/H Absolutdruck (KÖTTER-Meß- sensor)	p_{zi} [bar] $i = 1, \dots, 8$	1,28 %
Gesamter Leckgas Verbrauch Verdichter	Durchflußzähler ESK-Z Fa. Krohne Typ H 250	V_{hv} [Nm ³ /h]	1 %
Gastemperatur (Verdichteraustritt)	Widerstands- Thermometer PT 100	t_2 [°C]	0,94 %
Gasdruck (Verdichteraustritt)	STS-ATM/H Absolutdruck (KÖTTER-Meßsensor)	p_2 [bar]	1,28 %
Gastemperatur (nach Kühler)	Widerstands- thermometer PT 100	t_3 [°C]	0,94 %
Volumenstrom Brenngasmenge	Turbinenradzähler TRZ03	V_{3B} [Nm ³ /h]	0,28 %

4.4. Garantiebedingungen des Garantiepunktes 1

Bezeichnung	Formelzeichen	Zahlenwert GP1	Einheit
Gasdruck am Verdichtereintritt	$p_{1,g}$	32	bar
Gastemperatur am Verdichtereintritt	$t_{1,g}$	15	°C
Normvolumenstrom an der Liefergrenze	$V_{1,N}$	25000	Nm ³ /h
Enddruck nach Verdichtung	$p_{2,g}$	70	bar
Endtemperatur nach Verdichtung	$t_{2,g}$	93	°C
Endtemperatur nach Kühlung	$t_{3,g}$	< 45	°C
Drehzahl	N_g	700	min ⁻¹

Betriebszustand:

Schadraumzuschaltung 1. Zylinder DS
 Saugventilabhebung: 2., 3. und 4. Zylinder DS

4.5. Ablaufprogramm

a) Vorbereitung der Verdichteranlage

Im Vorfeld bzw. vor Beginn des Abnahmeversuches ist der Zustand der Kompressoranlage auf eine entsprechende Eignung zu untersuchen und einzurichten:

- Fahren der Verdichteranlage im Garantiepunkt zur Prüfung der Erreichbarkeit der Betriebswerte.
- Kontrolle der Undichtigkeiten an der Verdichteranlage bzw. am Rohrleitungsnetz und deren Beseitigung.
- Installation der temporären Meßsensorik, ggf. Entspannung und Neutralisierung der Verdichtungsräume, Dichtigkeitsprüfung unter Betriebsbedingungen.
- Kontrolle der Meßgeräte.
- Kontrolle aller Leitungsanschlüsse.

- Verschluß der Anschlußleitungen, deren Durchflußmenge nicht gemessen werden kann.
- Kalibrierungsprotokolle der Meßgeräte müssen vorliegen, ggf. ist bei den wichtigsten Meßgeräten nach dem Versuch eine erneute Kalibrierung durchzuführen.

b) Bedingungen während des Versuches

- Für den Garantiepunkt 1 werden über eine Stunde verschiedene Meßreihen aufgezeichnet.
- Die automatische Gasanalyse erfolgt insgesamt dreimal während des Versuches.
- Der Beharrungszustand, d. h. auch die Schwankungen der gemessenen Werte, muß sich innerhalb der vorgegebenen bzw. vereinbarten Toleranzbreite befinden. Dabei sind Anzahl und zeitlicher Abstand der Ablesung so zu wählen, daß eine ausreichende Genauigkeit erzielt wird.
- Die Versuchsbedingungen sollten so nah wie möglich den Garantievoraussetzungen entsprechen. Abweichungen sind nur in den festgelegten Grenzen erlaubt.
- Während des Versuches dürfen keine gesonderten Einstellungen vorgenommen werden.
- Die Verdichteranlage muß vor Beginn der Ablesung bzw. Erfassung der relevanten Meßwerte einen stationären Zustand erreicht haben (betriebswarmer Beharrungszustand).
- Die Leistungsbestimmung erfolgt aus mindestens 4 nacheinander folgenden pV-Diagrammen.

Nach Abschluß der Messungen wird durch den Versuchsleiter eine Grobabschätzung der Gültigkeit der Meßergebnisse vorgenommen, um ggf. einen weiteren Versuch durchführen zu können.

4.6. Versuchsdurchführung

Bei der Vorabüberprüfung im Garantiepunkt wurden die Schwankungen um den Mittelwert der Meßreihen überprüft.

Der Betriebszustand des Garantiepunktes 1 wurde über eine Stunde angefahren. Die Volumenstrommenge (V_{1N}) ist am geeichten Ultraschallzähler ermittelt worden. Aus dem Prozeßleitsystem wurden im Abstand von 10 s die ermittelten Größen (t_1 , t_2 , t_3 , V_{3B} , V_{hV}) erfaßt und in einer Datenbank abgelegt.

Die mobile Datenerfassung zeichnete die Daten (p_1 , p_2 , $p_{z,i}$, N_G) mit einer Abtastrate von 2,56 kHz in festen Zeitabständen von 5 Minuten jeweils über eine Zeitdauer von ca. 60 s auf. Die indizierte Leistung wurde dementsprechend aus den gemessenen pV-Diagrammen (Mittelung aus 4 hintereinander liegenden Verdichtungsprozessen) ermittelt. Unabhängig von diesen Meßdatenerfassungen wurden während des Versuches insgesamt drei Gasanalysen durchgeführt.

Meßdatenerfassung

Meßgröße	Bezeichnung	Art der Datenerfassung
Volumenstrommenge (Saugleitung)	V_{1N}	Prozeßleitsystem
Gastemperatur:		
- (Verdichtereintritt)	t_1	
- (Verdichteraustritt)	t_2	
- (nach Kühler)	t_3	
Brenngasmenge	V_{3B}	
Leckgasmenge	V_{hV}	
Gasdruck:		mobile Datenerfassung (16 Kanal-DOLCH-Meßrechner) <u>oder</u> auch PROGNOST-Zustandsüber- wachungssystem
- (Verdichtereintritt)	p_1	
- (Verdichteraustritt)	p_2	
Zylinderinnenraumdruck	$p_{z,i}$	
Drehzahl	N_G	
Temperatur am Aufstellungsort	t_{ov}	Wetterstation
atmosphärischer Druck	p_{ov}	

4.7. Bestimmung der gemessenen indizierten Leistungen aus dem p-V Diagramm

An der Verdichteranlage wird die OT-, UT-Lage der Zylinder mit Hilfe eines Näherungssensors unter Last ausgemessen und am Schwungrad gekennzeichnet. Gleichzeitig werden alle 8 Zylinderinnenraumdrücke sowie der Saug- und Förderdruck vor bzw. nach dem Verdichter parallel erfaßt. Es besteht somit eine Zuordnung der gemessenen Drucksignale zum Kurbelwinkel des Verdichters. Der gemessene Zylinderinnenraumdruck kann so mittels der geometrischen Daten der Verdichtungsräume über dem Volumen aufgetragen werden (Abb.2).

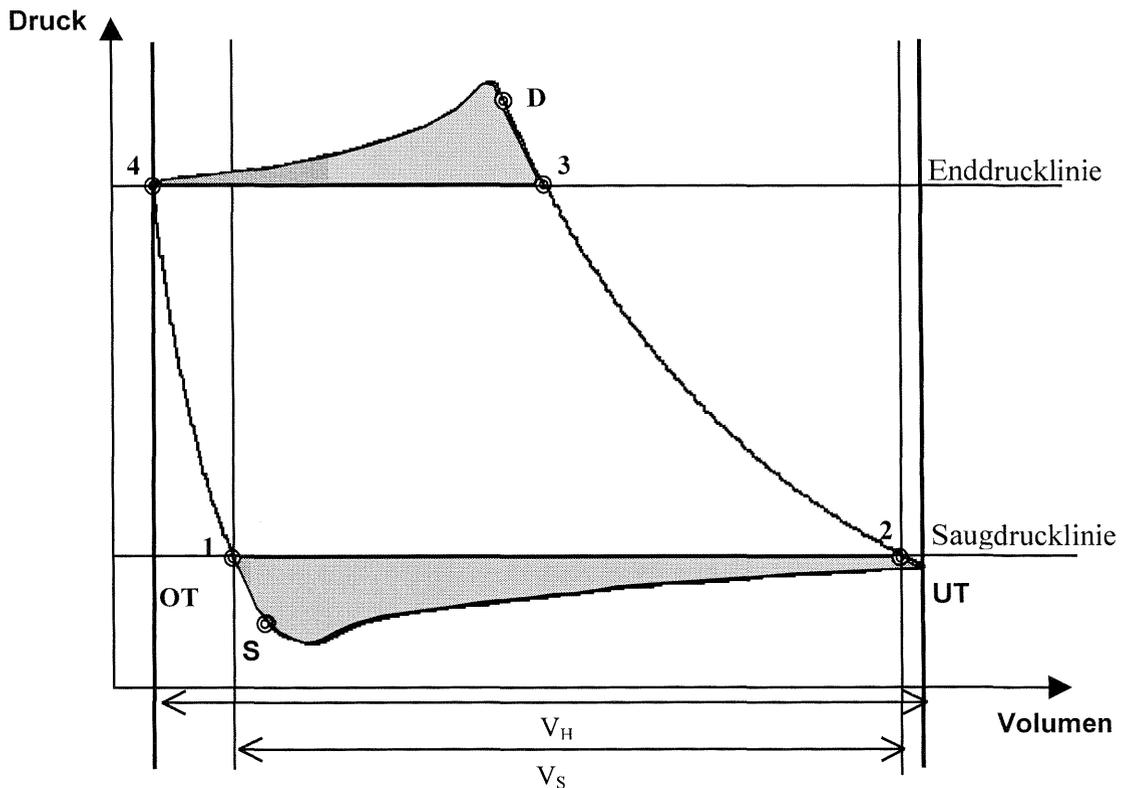


Abb. 2: Typisches Indikator diagramm eines Kolbenverdichterzylinderraumes

Zusätzlich werden der gemessene Saugdruck vor dem Verdichter sowie der Förderdruck nach dem Verdichter im Diagramm eingetragen. Die dargestellten Flächen (grau) jeweils unterhalb der Saugdrucklinie bzw. oberhalb der Enddrucklinie geben die Saug- bzw.

Druckventilverluste an. Die eingeschlossene Fläche zwischen dem Saug- und Enddruck gibt die tatsächlich abgebende Verdichtungsarbeit an. Aus dem dargestellten Diagramm kann wie in der VDI 2045, Blatt 2, vorgegeben, der mittlere indizierte Druck p_j bestimmt werden. Daraus ergibt sich die indizierte Verdichtungsleistung eines Zylinderraumes zu

$$P_j = A_{KB,j} \cdot s \cdot N_g \cdot p_j$$

$A_{KB,j}$ \triangleq Kolbenfläche j

s \triangleq Kolbenhub

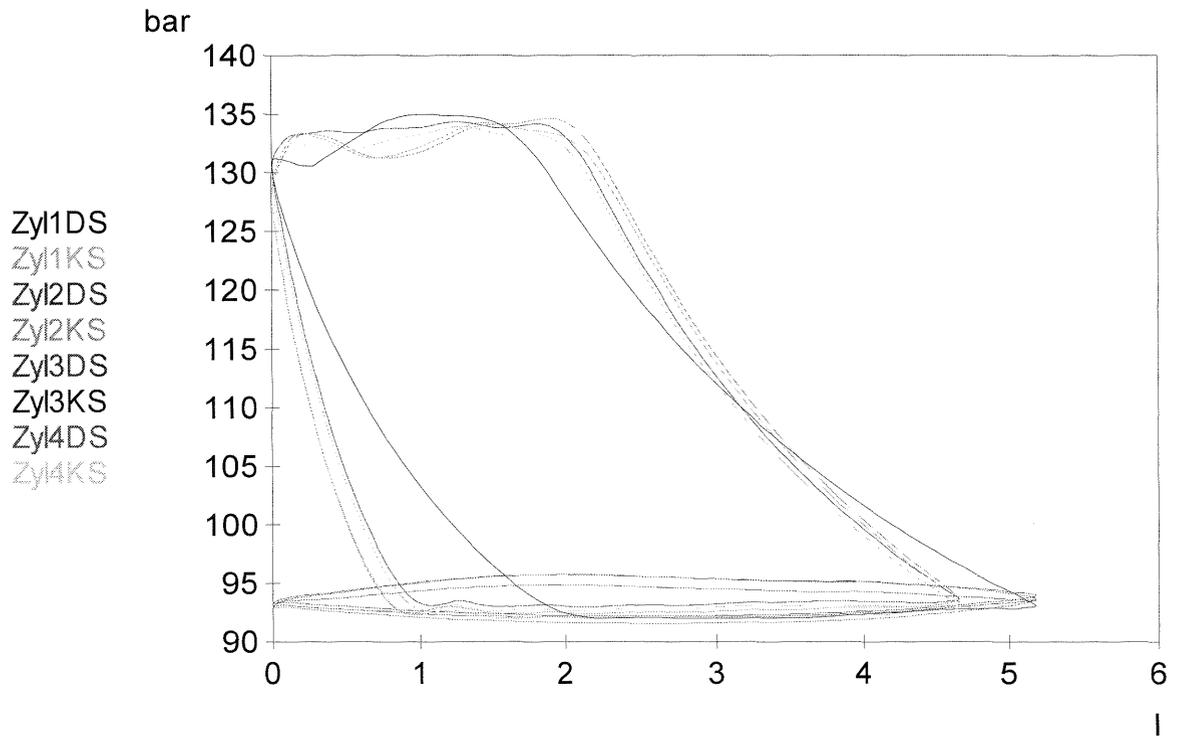
N_g \triangleq Drehzahl (gemessen)

p_j \triangleq mittlerer indizierter Druck des j Zylinderraumes

P_j \triangleq indizierte Verdichtungsleistung des j Zylinderraumes

Die gesamte indizierte Verdichtungsleistung P_v des Verdichters errechnet sich aus der Summe der in allen 8 Zylinderräumen ermittelten Einzelleistungen

$$P_v = \sum_{j=1}^8 P_j$$



15.06.00 09:00:02 9:00:09,17

Abb. 3: Zeitgleich gemessene 8 Indikatordiagramme

Uhrzeit	09:02 Uhr	
	Leistung P_v [kW]	Drehzahl [1/min]
Gesamt	715,3	701,0
Zyl1DS	122,3	
Zyl1KS	140,9	
Zyl2DS	11,1	
Zyl2KS	140,8	
Zyl3DS	14,8	
Zyl4DS	18,1	
Zyl4KS	133,0	

Tabelle 1: Auszug aus den gemessenen indizierten Leistungswerten

4.8. Stundenmittelwert der durchgeführten 13 Meßwertreihen (ohne Korrektur)

	Einheit	
Saugdruck p_1	bar	32,35
Förderdruck p_2	bar	68,90
Verdichtungsleistung P_V	kW	716,14
Verdichterdrehzahl N_V	1/min	700,20
Gastemperatur t_1	°C	9,3
Gastemperatur t_2	°C	77,5
Gastemperatur t_3	°C	44,8
Leckgas V_{hV}	Nm ³ /h	0,7
Brenngasmenge V_{3B}	Nm ³ /h	187
Volumenstrom V_{1N}	Nm ³ /h	24823

Wetteraußenstation
Außentemperatur = 26,9 °C
Luftdruck = 1019 hPa

Normdichte (d, n)	[kg/Nm ³]	0,790
Heizwert (H _n , n)	[kWh/Nm ³]	10,188
Gaskonstante R	[J/kg*K]	471,400
Molmasse M	[kg/mol]	17,670
Isotropenexponent κ		1,308

Vergleicht man diese ermittelten Meßwerte mit den vorgegebenen Garantiebedingungen, so stellt man Abweichungen fest, die entsprechend der Norm berücksichtigt werden und in die zu berechnenden Ergebnisgrößen mit einfließen.

5.) Ergebnisse der Leistungsmessung**5.1. Umrechnung auf die Garantievoraussetzungen**

Aus den gemessenen Größen werden nachfolgend die Ausgangsgrößen bestimmt. Des weiteren werden die nach DIN 1945 (VDI 2045) vorgegebenen Umrechnungsgleichungen angewandt, um die auftretenden Abweichungen von den vorgegebenen Garantievoraussetzungen zu berücksichtigen. Ein Versuch ist dann verbindlich, wenn die Abweichungen der Mittelwerte von den Werten der Garantievoraussetzungen innerhalb

bestimmter Grenzen liegen. Diese Grenzen sind für Verdrängungsverdichter nach der VDI 2045 wie folgt vorgegeben (Tabelle 2)

Gaskonstante R^*	$\pm 5 \%$
Isentropenexponent κ	$\pm 3 \%$
Drehzahl $N^{**})$	$\pm 4 \%$
Differenz zwischen den Eintrittstemperaturen des Kühlmittels t_{w1} und des Gases t_1	$\pm 10 \text{ K}$
Massenstrom des Kühlmittels m_w	$\pm 10 \%$
Ansaugdruck p_1	$\pm 10 \%$

Tabelle 2: Zulässige Abweichungen der mittleren Versuchsbedingungen von den Garantievoraussetzungen

Auch größere Abweichungen können bei entsprechenden Vereinbarungen zwischen Hersteller und Abnehmer in Sonderfällen vereinbart werden.

5.1.1. Nutzbarer Ansaugvolumenstrom

$$K_1 = \frac{N_g}{N_v} = \frac{700}{700,2} = 0,9997$$

N_g vertraglich festgelegte Wellendrehzahl = 700 [1/min]

N_v gemessene Wellendrehzahl = 700,2 [1/min]

$$K_2 = 1 + c \left(\pi_v^{\frac{1}{n_v}} - \pi_g^{\frac{1}{n_g}} \right)$$

n = Polytropenexponent = $0,9 \cdot \kappa$

n_v = gemessener Polytropenexponent = 1,1772

n_g = vertraglich festgelegter Polytropenexponent = 1,1727

π_v = gemessenes Druckverhältnis = $\pi_v = 2,0959$

π_g = vertraglich festgelegtes Druckverhältnis = $\pi_g = 2,1515$

$c =$ der relative Schadraum (hier gemittelt für den Betriebszustand = 24,8 % mit insgesamt 5 Zylinderräumen im Eingriff, 3 Zylinderräume durch Saugventilniederhalter offen, Hubraum $0,024 \text{ m}^3$, Schadraum ges. = $0,00596 \text{ m}^3$)

$$K_2 = 0,9883$$

$$K_3 = 1 \text{ (Kühlmitteltemperatureinfluß)}$$

Der umgerechnete nutzbare Ansaugvolumenstrom V_{LUM} beträgt

$$V_{LUM} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot V_{1N} = 0,9997 \cdot 0,9883 \cdot 24823 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] = \underline{\underline{24525,2 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right]}}$$

am Verdichtereintritt.

5.1.2. Leistungsbedarf P_{KV}

Da Eintrittsdruck, Isentropenexponent und Druckverhältnis von den geforderten festgelegten Werten abweichen, werden nachfolgende Umrechnungsverfahren angewendet (DIN 1945, Kap. 9.4).

- einstufig ohne Kühlung

$$K_4 = \frac{\left[\frac{\kappa}{\kappa - 1} \right]^{(g)}}{\left[\frac{\kappa}{\kappa - 1} \right]^{(v)}} \cdot \frac{p_{1g} \cdot \pi_g^{\left[\frac{\kappa-1}{\kappa} \right]^{(g)}} - 1}{p_{1v} \cdot \pi_v^{\left[\frac{\kappa-1}{\kappa} \right]^{(v)}} - 1}$$

$$\kappa_g = 1,303 \quad \pi_g = 2,1515$$

$$\kappa_v = 1,308 \quad \pi_v = 2,0959$$

$$p_{1g} = 33 \text{ bar a}$$

$$p_{1v} = 33,35 \text{ bar a}$$

$$\underline{\underline{K_4 = 1,0265}}$$

$$K_5 = 1 \text{ (Kühlmitteleinfluß)}$$

$$K_6 = 1 \text{ (Feuchteinfluß)}$$

$$K_7 = K_1 = 0,9997 \text{ (Wellendrehzahleinfluß)}$$

$$\rightarrow P_{Um} = K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot P_{KV} = 1,0261 P_{KV}$$

Aus den gemessenen Daten wurde ein Mittelwert der gesamten indizierten Verdichterleistung gebildet.

$$\underline{P_V = 716,14 \text{ kW}}$$

Bei dem vom Hersteller ermittelten mechanischen Wirkungsgrad von $\eta_{\text{mech}} = 0,95$ ergibt sich die Kupplungsleistung zu

$$P_{KV} = \frac{P_V}{\eta_{\text{mech}}}$$

$$P_{KV} = \frac{716,14 \text{ kW}}{0,95} = 753,83 \text{ kW}$$

Daraus wird ein umgerechneter Leistungsbedarf P_{Um} des Verdichters (Kupplungsleistung im Garantiepunkt) bestimmt.

$$P_{Um} = 1,0261 \cdot P_{KV}$$

$$\underline{P_{Um} = 773,5 \text{ kW}}$$

5.1.3. Umgerechneter spezifischer Leistungsbedarf w_{Um}

$$w_{Um} = \frac{P_{Um}}{V_{LUM}} = \frac{773,5 \text{ kW}}{24525,2 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}}$$

$$\underline{\underline{w_{Um} = 0,0315 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3}}}$$

V_{LUM} = nutzbarer Ansaugvolumenstrom

P_{Um} = Leistungsbedarf Verdichter

5.1.4. Wirkungsgrad des Gasmotors η_{GM}

Der Wirkungsgrad wird direkt mit den gemessenen Daten ohne Umrechnung berechnet.

$$\eta_{GM} = 0,395$$
$$\eta_{GM} = \frac{P_{KV}}{m_B \cdot H_{u,n}} = \frac{753,83 \text{ kW}}{187 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot 10,188 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3}}$$

$$\underline{\underline{\eta_{GM} = 39,5 \%}}$$

m_B = Brenngasmenge

$H_{u,n}$ = unterer Heizwert

P_{KV} = Leistungsbedarf Verdichter (Kupplung)

5.2. Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den garantierten Werten

Berechnungsgröße	Garantie-wert	Zulässige Abweichung	Garantieband unten	Garantieband oben	Berechneter Wert	Meßspiel	Berechnungs-band unten	Berechnungs-band oben	Garantie-bedingung erfüllt
Verdichterupplungsleistung P_{UM} [kW]	765,5	3%	742,53	788,46	773,5	1,44 %	762,36	784,6	ja
spez. Leistungsbedarf w_{UM} [kWh/Nm ³]	0,036	3%	0,02968	0,03152	0,0315	1,45 %	0,03104	0,03195	ja
Wirkungsgrad Gasmotor η_{GM} [%]	37	3%	35,89	38,1	39,5	1,49 %	38,91	40,08	besser als spezifiziert

5.3. Ergebnis

Die vereinbarten Garantiewerte des Garantiepunktes werden erreicht. Der Wirkungsgrad des Gasmotors liegt oberhalb des spezifizierten Toleranzbandes und ist damit besser als gefordert.

6.) Zusammenfassung

Zum einheitlichen Ablauf einer Leistungsmessung werden in der VDI 2045 unterschiedliche meßtechnische Möglichkeiten vorgestellt. In diesem Beitrag wird die Leistungsmessung mittels Druckindizierung am Kolbenverdichter erläutert. Im Vorfeld ist zwischen Hersteller und Abnehmer ein konkretes Versuchsprogramm zu vereinbaren. In diesem sollte neben Meßverfahren, Meßstellen und Meßunsicherheiten auch eine Vorausberechnung von den zu erwartenden Ergebnismeißunsicherheiten enthalten sein.

Nach Durchführung des Versuches ist bei Abweichung von den vorgegebenen Garantiebedingungen eine entsprechende Umrechnung vorzunehmen.

Durch den Einsatz entsprechender Drucksensorik bzw. Meßketten und einer abgestimmten meßtechnischen Vorgehensweise sind Ergebnisse mit einer Meßunsicherheit < 2% erreichbar.

Wichtig ist, daß bei Abschluß eines Liefervertrages die Garantiewerte, die zulässigen Garantietoleranzen und die entsprechende Vorgehensweise aufeinander abgestimmt und festgelegt werden. Sinnvollerweise sollten die Minimal- und Maximalwerte für Volumenstrom bzw. Leistung als Garantiewert vereinbart werden. Ergänzt werden können die Garantiepunkte mit den Betriebspunkten, die z. B. hauptsächlich in der Anlage gefahren werden.

Ein Vorteil der Leistungsmessung durch Indizierung besteht darin, daß das Ergebnis die Verdichtungsleistung wiedergibt, die tatsächlich an das Gas weitergegeben wird, inclusive aller Wirkungsgrade ohne zusätzliche theoretische Annahmen. Zusätzlich erhält man mit dem pV-Diagramm auch eine Zustandsdokumentation als Kontrolle des mechanischen Zustands und der korrekten Arbeitsweise aller an der Verdichtung beteiligten Bauteile (Ventile, Dichtungen, usw.).

7.) Literatur

- [1] VDI 2045 Blatt 1 bis 4: Abnahme- und Leistungsversuche an Verdichtern, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Ausschuß VDI 2045-Verdichterregeln, August 1993
- [2] DIN 1945 T1: Verdrängerkompressoren, Thermodynamische Abnahme und Leistungsversuche, November 1980
- [3] VDI 2048: Meßungenauigkeiten bei Abnahmeversuchen, Grundlagen, 06.1978