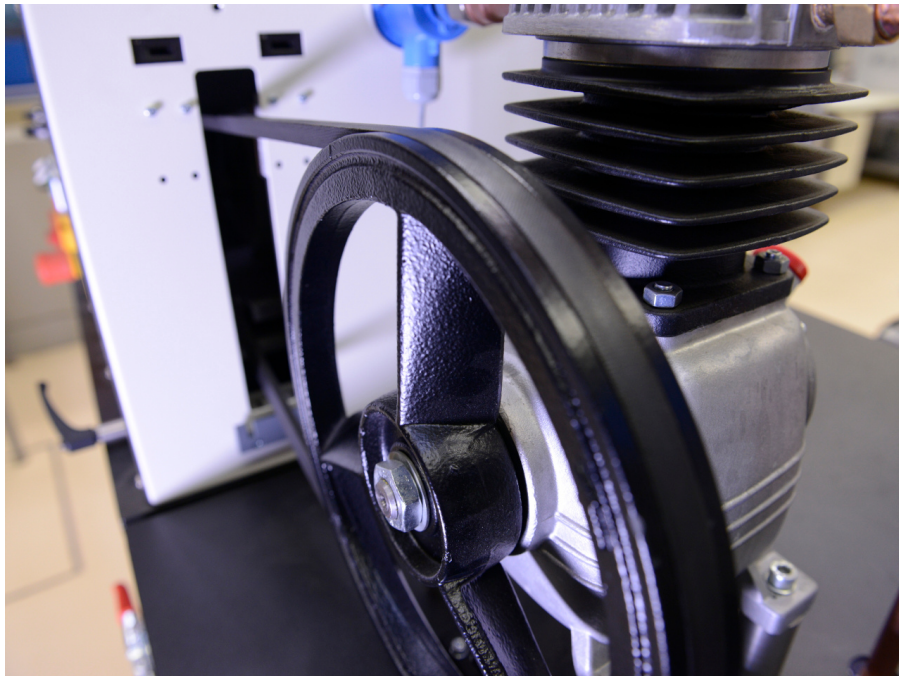


Labor Kraft- und Arbeitsmaschinen

Versuchsbeschreibung
Kolbenverdichter

Jens Glembin, Peter Treffinger



Symbole

Lateinische Buchstaben

c_p	Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
c_V	Wärmekapazität bei konstantem Volumen	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
l	Pleuelstangenlänge	m
M	Drehmoment	Nm
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg s^{-1}
n	Drehzahl	s^{-1}
n	Polytropenexponent	
P	Leistung	W
p	Druck	Pa
R	Widerstand	Ω
r	Kurbelwellenradius	m
R_i	spezifische Gaskonstante	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
s	Kolbenweg	m
T	Temperatur	K
V	Volumen	m^3
V_A	Arbeitsraumvolumen	m^3
V_H	Hubvolumen	m^3
V_S	Schadraumvolumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
W	Arbeit	J
w	Spezifische Arbeit	J kg^{-1}

Griechische Buchstaben

β	Pleuelschwenkwinkel	$^\circ$
ε_0	relatives Schadraumvolumen	
η	Wirkungsgrad	
κ	Isentropenexponent	
λ	Liefergrad	
μ	Füllungsgrad	
Π	Druckverhältnis	
ρ	Dichte	kg m^{-3}
φ	Kurbelwinkel	$^\circ$
ω	Winkelgeschwindigkeit	s^{-1}

Indizes

A	Antrieb
DMS	Dehnungsmesstreifen
DV	Druckventil
M	Gemessen
OT	Oberer Totpunkt
Pt	Platin
SV	Saugventil

t	technisch
UT	Unterer Totpunkt
U	Umgebung
V	Verdichter

Inhalt

Symbole	i
1 Einleitung und Versuchsziel	1
2 Theoretische Grundlagen	1
2.1 Arbeitsmaschine Kolbenverdichter	1
2.2 Arbeitstakt und Zustandsdiagramm	2
2.3 Realer Prozess im Kolbenverdichter	5
2.4 Messmethoden	7
2.4.1 Temperaturmessung mit Widerstandsthermometer	7
2.4.2 Drehmomentmesswelle	8
2.4.3 Optischer Drehwinkelgeber	9
3 Versuchsaufbau	11
4 Versuchsdurchführung	13
4.1 Aufgabenstellung	13
4.2 Versuchsvorbereitung	13
4.2.1 Berechnung eines Betriebspunktes	13
4.2.2 Bestimmung des Arbeitsraumvolumens	14
4.3 Versuchsdurchführung	14
4.4 Versuchsauswertung	14
Literaturverzeichnis	15
5 Anhang	16
5.1 Daten des Hubkolbenverdichters	16

1 Einleitung und Versuchsziel

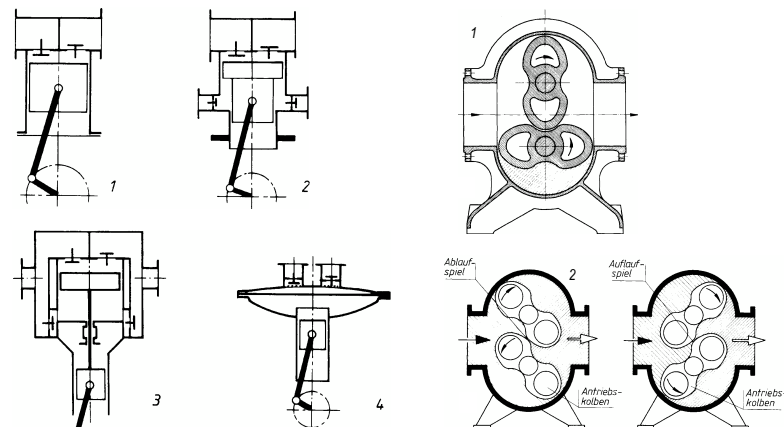
In diesem Versuch sollen die Studierenden die grundlegende Funktion einer Verdrängermaschine erlernen. Sie sollen die Fördercharakteristik einer Verdrängermaschine beschreiben, wesentliche Einflussparameter nennen und Unterschiede zur Strömungsmaschine aufzeigen können. Hierzu steht ein Prüfstand mit einem einstufigen Hubkolbenverdichter zur Verfügung, der über eine Antriebseinheit mit variabler Drehzahl betrieben werden kann. Der Strömungswiderstand auf der Druckseite und damit der Betriebsdruck kann mithilfe eines manuell betätigten Ventils variiert werden. Am Versuchsstand können so unterschiedliche Betriebszustände eingestellt werden. Die Sensoren für Druck, Durchfluss, Temperatur, Drehzahl und Drehmoment ermöglichen es, ein Verdichterkennfeld aufzunehmen und weitere Kenngrößen wie die Lieferzahl zu bestimmen.

2 Theoretische Grundlagen

Als wesentliche theoretische Grundlagen für den Versuch werden die wichtigsten Eigenschaften von Hubkolbenverdichter zusammengefasst. Darüber hinaus werden der Arbeitsprozess anhand eines Indikatordiagramms sowie die Berechnung wichtiger Kenngrößen erläutert. Abschließend werden einige der Messmethoden beschrieben, die bei der Versuchsdurchführung angewendet werden.

2.1 Arbeitsmaschine Kolbenverdichter

Kolbenverdichter finden meist Anwendung, wenn Gase auf hohe Enddrücke verdichtet werden sollen. Die Bauarten lassen sich anhand der Bewegungart der kraftübertragenden Elemente, der Verdränger, in Hubkolben- und Drehkolbenverdichter einteilen (siehe Abbildung 2.1).



(a) Schema verschiedener Hubkolbenverdichter

- 1 einfachwirkender Hubkolbenverdichter
- 2 doppelwirkender Hubkolbenverdichter (Stufenkolben)
- 3 doppelwirkender Hubkolbenverdichter (Scheibenkolben)
- 4 Membran-Kolbenverdichter

(b) Zweiwellige Drehkolbenverdichter (Roots-Gebläse)

- 1 Querschnittsdarstellung
- 2 Ablauf- und Auflaufspiel

Abbildung 2.1: Beispiele verschiedener Verdichterbauarten [1]

Während bei Hubkolbenverdichtern das kraftübertragende Element eine translatorische Bewegung

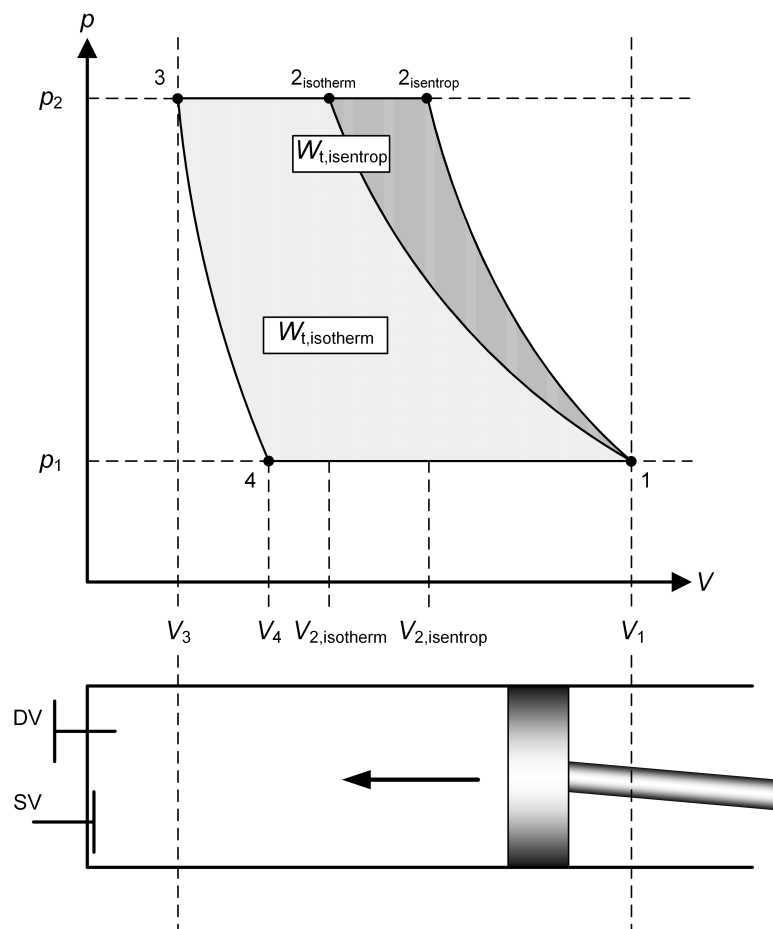


Abbildung 2.3: p, V -Indikatordiagramm eines Hubkolbenverdichters mit isentroper und isothermer Druckerhöhung. Die daraus resultierende technische Arbeit W_t entspricht der vom Prozess jeweils eingeschlossenen Fläche.

Im Zustand 1 befindet sich der Verdränger im unteren Totpunkt (UT). Der Arbeitsraum des Hubkolbenverdichters ist mit dem zu verdichtenden Gas gefüllt. Der Verdränger bewegt sich nun von 1 nach 2, Saug- und Druckventil (SV und DV) sind geschlossen. Im Diagramm ist für diese Zustandsänderung sowohl ein isothermer als auch ein isentroper Verlauf dargestellt. Bei einer isothermen Zustandsänderung kommt es zu keiner Temperaturänderung ($T = T_1 = T_2 = \text{const.}$), d. h. im Falle der Kompression muss Wärme abgeführt werden. Es gilt:

$$p \cdot V = p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 = m \cdot R_1 \cdot T = \text{const.} \quad (2.2)$$

Isentrope Zustandsänderungen verlaufen wärmedicht, d. h. es kommt zu keinem Wärmeaustausch mit der Umgebung. Außerdem wird vorausgesetzt, dass die Zustandsänderung reversibel, also verlustfrei, abläuft. Die beiden Annahmen bedeuten, dass die Entropie konstant bleibt. Zur Beschreibung der Zustandsänderung ist der Isentropenexponent κ wichtig, das Verhältnis der Wärmekapazitäten bei konstantem Druck c_p und bei konstantem Volumen c_v :

$$p \cdot V^\kappa = p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa = \text{const. mit } \kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.3)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (2.4)$$

Beim Verdichtungsprozess (1 → 2) wird die vom Verdränger geleistete Volumenänderungsarbeit auf das Gas übertragen und das Gas verdichtet. Die Fläche unter dem Verlauf der jeweiligen Zustandsänderung entspricht dem Betrag der dem Gas zugeführten Arbeit:

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV. \quad (2.5)$$

Erreicht der Druck im Arbeitsraum p_2 öffnet das Druckventil. Von 2 nach 3 kann nun durch weitere Verkleinerung des Arbeitsraumes das Ausstoßen des Gases erfolgen. Auch hier entspricht die aufgewandte Arbeit betragsmäßig der Fläche unter der Zustandsänderung. Im Zustand 3 erreicht der Verdränger den oberen Totpunkt (OT). Das Volumen, das zwischen OT und unterem Totpunkt (UT) eingeschlossen wird, wird Hubvolumen V_H genannt:

$$V_H = V_1 - V_3. \quad (2.6)$$

Konstruktionsbedingt verbleibt eine Restmasse Gas im Schadraumvolumen V_S des Verdichters, die nicht ausgestoßen werden kann. Das Verhältnis des Schadraumes zum Hubvolumen wird als relatives Schadraumvolumen ε_0 bezeichnet:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_S}{V_H}. \quad (2.7)$$

Der Kolben bewegt sich nun wieder in Richtung UT. Nachdem p_2 unterschritten wird, schließt das Druckventil. Das im Schadraum verbliebene Gas expandiert und überträgt Arbeit an den Kolben. Die abgegebene Arbeit wird dabei als kinetische Energie in der Schwungmasse des Verdichters gespeichert. Das Saugventil bleibt solange geschlossen, bis der Druck im Arbeitsraum des Verdichters p_1 erreicht wird. Bei der Bewegung des Kolbens von 4 nach 1 (Richtung UT) erfolgt das Ansaugen des im nächsten Arbeitstakt zu verdichtenden Gases.

Die Rückexpansion des Gases im Arbeitsraum führt zu einer Reduktion des Ansaugvolumens. Die Reduktion hängt neben dem Volumen des Schadraumes von dem Druck p_2 ab, da das Gas von diesem Druck bis zum Druck p_1 expandieren muss, bevor sich das Ansaugventil wieder öffnen kann. Zur Charakterisierung wird der Füllungsgrad μ verwendet, der das tatsächliche Ansaugvolumen ins Verhältnis zum Hubvolumen setzt:

$$\mu = \frac{V_{Saug}}{V_H} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3} \quad (2.8)$$

Durch Summation der Arbeiten für die einzelnen Prozessschritte erhält man die ideale Verdichterarbeit für die Verdichtung eines Gases. Im Falle einer isentrop angenommenen Verdichtung und Rückexpansion entspricht die Verdichterarbeit in Abhängigkeit von der Eintrittstemperatur T_1 , der Luftmasse m sowie den Stoffdaten Isentropenexponent und spezifische Gaskonstante R_s :

$$W_{t,isentrop} = m \cdot R_i \cdot T_1 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]. \quad (2.9)$$

Dividiert durch die Masse folgt daraus die spezifische Verdichterarbeit:

$$w_{t,isentrop} = R_i \cdot T_1 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]. \quad (2.10)$$

Abbildung 2.3 zeigt, dass bei gleichem Enddruck die technische Arbeit bei isothermen Verlauf geringer ist. Die spezifische Verdichterarbeit ergibt sich bei isothermen Zustandsänderung zu:

$$w_{t,isotherm} = R_i \cdot T_1 \cdot \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right). \quad (2.11)$$

2.3 Realer Prozess im Kolbenverdichter

Das Indikator diagramm eines realen Verdichters weicht vom Idealprozess ab. Das p, V -Diagramm in Abbildung 2.4 veranschaulicht den Unterschied zum idealisierten Verdichter. Wesentliche Abweichungen zeigen sich in den Ansaug- und Ausstoßlinien. Die Verdichterarbeit vergrößert sich dementsprechend. Eine umfassende Beschreibung der realen Prozesse von Kolbenverdichtern ist z. B. [3] zu entnehmen.

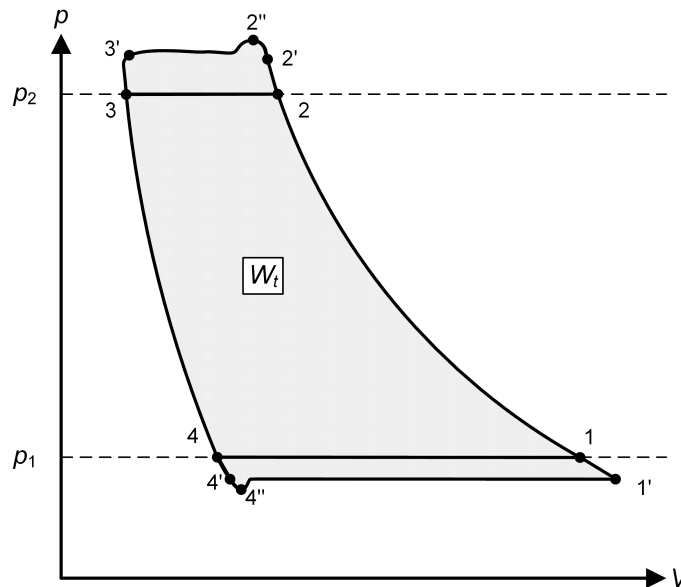


Abbildung 2.4: p, V -Indikator diagramm des realen Prozesses eines Hubkolbenverdichters

Im Gegensatz zum idealen Prozess verläuft die Verdichtung weder isotherm noch isentrop, da sich beides in der Wirklichkeit nicht erreichen lässt. Zur näherungsweisen Beschreibung von realen Zustandsänderungen werden sogenannte Polytropen verwendet. Dazu wird der Isentropenexponent κ durch einen Polytropenexponent n ersetzt.

$$p \cdot V^n = p_1 \cdot V_1^n = p_2 \cdot V_2^n = \text{const. mit } n = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{V_1}{V_2}} \quad (2.12)$$

Polytropenexponenten werden aus dem Anfangs- und Endzustand der Zustandsänderung bestimmt. Der so ermittelte Polytropenexponent hängt nicht vom Weg zwischen beiden Zuständen ab, was für viele technische Anwendungen ausreichend ist.

Der tatsächliche Förderstrom weicht vom theoretischen ab. Um das Förderverhalten ausreichend zu beschreiben, wird experimentell der Liefergrad λ bestimmt, welcher den realen zum idealen Massenstrom ins Verhältnis setzt. Der reale Massenstrom wird gemessen ($\dot{m}_{\text{real}} = \dot{V}_M \cdot \rho_M$). Wird der Volumenstrom im Ansaugzustand gemessen ($\rho_M = \rho_{\text{Ansaug}}$), so ergibt sich der Liefergrad als Verhältnis des realen Volumenstroms zum Produkt aus Drehzahl n und Hubvolumen V_H .

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{\text{real}}}{\dot{m}_{\text{ideal}}} = \frac{\dot{V}_M \cdot \rho_M}{\dot{V}_{\text{ideal}} \cdot \rho_{\text{Ansaug}}} = \frac{\dot{V}_M}{\dot{V}_{\text{ideal}}} = \frac{\dot{V}_M}{V_H \cdot n_V} \quad (2.13)$$

Der Liefergrad lässt sich in Faktoren aufspalten, die die unterschiedlichen Verlustmechanismen charakterisieren:

$$\lambda = \lambda_V \cdot \lambda_p \cdot \lambda_T \cdot \lambda_m \quad (2.14)$$

Die Faktoren kennzeichnen folgende Verluste:

- Rückexpansion des Schadvolumens: Volumenfaktor λ_V
- Verlust durch Druckdifferenz am Einströmventil (Drosselverlust): Druckfaktor λ_p
- Temperaturerhöhung beim Einströmen, dadurch Reduktion der Dichte und der einströmenden Masse: Temperaturfaktor λ_T
- Leckage an Ventilen und durch den Zwischenraum zwischen Zylinderwand und Kolben: Dichtheitsgrad λ_m

Die Güte eines Verdichters wird beschrieben durch unterschiedlich definierte Wirkungsgrade. Der indizierte Wirkungsgrad $\eta_{\text{indiziert}}$ beschreibt die Qualität des Prozesses im Verdichter durch Vergleich der tatsächlichen technischen Arbeit mit einem Vergleichsprozess, während der mechanische Wirkungsgrad $\eta_{\text{mechanisch}}$ die Verluste zwischen der angetriebenen Welle und dem Kolben berücksichtigt. Der Gesamtwirkungsgrad des Verdichters setzt sich aus diesen beiden Wirkungsgraden zusammen und lässt sich auch als Verhältnis der idealen Leistung zur realen Leistungsaufnahme $P_{\text{mechanisch}}$ bestimmen:

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{indiziert}} \cdot \eta_{\text{mechanisch}} = \frac{w_{t,\text{ideal}}}{w_{t,\text{real}}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{real}} \cdot w_{t,\text{real}}}{P_{\text{mechanisch}}} = \frac{\dot{m}_{\text{real}} \cdot w_{t,\text{ideal}}}{M \cdot 2\pi \cdot n} \quad (2.15)$$

Als idealisierter Vergleichsprozess kann sowohl der isentrope (Gleichung 2.10) als auch der isotherme Prozess (Gleichung 2.11) verwendet werden. Dementsprechend werden diese als isentroper und isothermer Wirkungsgrad bezeichnet.

Für den Gesamtwirkungsgrad ist auch der Liefergrad entscheidend. So sinkt der Liefergrad mit zunehmendem Druckverhältnis stetig aufgrund des Einflusses des schädlichen Raums. Der Einfluss wird auch im Gesamtwirkungsgrad deutlich, wenn man Gleichung 2.15 umschreibt. Man erkennt im indizierten Wirkungsgrad die beiden Einflüsse Liefergrad $\lambda = \frac{\dot{m}_{\text{real}}}{\dot{m}_{\text{ideal}}}$ sowie das Verhältnis der Arbeitsflächen $\frac{W_{t,\text{ideal}}}{W_{t,\text{real}}}$.

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \frac{w_{t,\text{ideal}}}{w_{t,\text{real}}} \cdot \eta_{\text{mechanisch}} = \frac{W_{t,\text{ideal}}}{W_{t,\text{real}}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{real}}}{\dot{m}_{\text{ideal}}} \cdot \eta_{\text{mechanisch}} = \frac{W_{t,\text{ideal}}}{W_{t,\text{real}}} \cdot \lambda \cdot \frac{w_{t,\text{real}} \cdot \dot{m}_{\text{real}}}{P_e} \quad (2.16)$$

2.4 Messmethoden

Während der Versuchsdurchführung werden als wesentliche Prozessgrößen Volumenstrom, Druck und Temperatur gemessen. Darüber hinaus werden die Drehzahl und das Drehmoment des Verdichters erfasst. Im Folgenden wird das Prinzip für die Messung der Temperatur (Widerstandsthermometer), des Drehmoments (Drehmomentmesswelle) sowie der Drehwinkel beschrieben. Die im Versuch angewandte Messverfahren zur Druckmessung (piezoresistive Drucksensoren) und zur Volumenstrommessung (Druckmessung an Venturidüse) werden in der Versuchsbeschreibung zum Versuch Radialventilator erläutert.

2.4.1 Temperaturmessung mit Widerstandsthermometer

Widerstandsthermometer nutzen die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Metallen zur Messung der Temperatur aus. Der Widerstand kann dabei je nach Material mit steigender Temperatur sinken (Heissleiter bzw. NTC = negative temperature coefficient) oder ansteigen (Kaltleiter bzw. PTC = positive temperature coefficient). Die Vorgänge bei Änderung der elektrischen Leitfähigkeit durch Anstieg/Abfall der Temperatur sind zwar grundsätzlich erklärbar, aber so komplex, dass eine rein physikalische Beschreibung der Abhängigkeit nicht vollständig möglich ist. Aus diesem Grund wird der Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand empirisch ermittelt und mit einem Polynom höherer Ordnung beschrieben:

$$R(T) = R_0 (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 + \dots). \quad (2.17)$$

Materialien für Widerstandsthermometer sollen einen hohen spezifischen Widerstand und große Temperaturkoeffizienten aufweisen, damit die Widerstandsänderung möglichst groß ist. Die Temperaturkoeffizienten sollten zudem über einen großen Temperaturbereich annähernd konstant bleiben und unabhängig von Druck und chemischen Einflüssen sein und sich während der Betriebsphase nicht verändern. Unter diesen Gesichtspunkten kommen in technischen Anlagen als Sensormaterialien Nickel, Kupfer und Platin in Frage. Das am häufigsten verwendete Material ist Platin, das einen positiven Temperaturkoeffizienten aufweist. Gebräuchlich sind vor allem Pt100-Sensoren mit einem Nennwert von $R_0 = 100 \Omega$. Im Temperaturbereich zwischen 0°C und 850°C lässt sich die Kennlinie von PT-Messwiderständen mit einem Polynom zweiten Grades in ausreichender Genauigkeit beschreiben:

$$R(T) = R_0 (1 + A \cdot T + B \cdot T^2). \quad (2.18)$$

In der DIN EN 60751 [4] werden die Polynomkoeffizienten sowie die wesentlichen Eigenschaften von Platin-Widerstandsthermometern angegeben. Zudem werden die Sensoren in vier Genauigkeitsklassen eingeteilt, für die jeweils die zulässigen Temperaturmessfehler aufgrund von Abweichungen in der Kennlinie vorgegeben werden. Die Empfindlichkeit von Pt-100 Messwiderständen liegt bei Temperaturen von 0°C bis 850°C bei $0,4 \frac{\Omega}{\text{K}}$ bis $0,3 \frac{\Omega}{\text{K}}$. Sensoren mit höheren Nennwerten (z. B. Pt1000-Sensoren mit $R_0 = 1000 \Omega$) weisen eine höhere Empfindlichkeit. Die Empfindlichkeiten liegen unter dem maximal möglichen Wert von reinem Platin, da dem Sensor gezielt andere Materialien wie Rhodium beigemischt werden. Das Vorhandensein von Fremdatomen im Metallgitter führt dazu, dass sich die elektrischen Werte bei der nicht zu vermeidenden weiteren Aufnahme von Fremdatomen (Alterungsprozess) weniger ändern als im Vergleich zu reinem Material. Platin-Messwiderstände gibt es in vielen unterschiedlichen Bauformen. Gebräuchlich sind vor allem Chipsensoren zur Anwendung als Anlegetemperaturfühler sowie Einschraubthermometer zur Temperaturmessung in Fluidströmungen.

In der Regel werden die Sensoren mit einer konstanten Stromstärke betrieben und der Widerstand und damit die Temperatur über den Spannungsabfall bestimmt. Die Verarbeitung und Umwandlung

des Messsignals im Messgerät geschieht allerdings häufig nicht direkt an der Messstelle, so dass die elektrischen Verbindungsleitungen und deren Widerstände berücksichtigt werden müssen. Bei Verwendung von nur zwei Leitungen (Zweileiterschaltung) beinhaltet die Spannungsmessung auch den Widerstand der Messleitungen, der abgezogen werden muss. Die hierzu erforderliche Messung der Leitungswiderstände ist aufwendig und muss nach jeder Änderung in der Leitungsführung wiederholt werden. Aufwendigere Messschaltungen mit drei oder vier Leitern sind hier von Vorteil. In Vierleiterschaltungen wird der Sensor durch zwei der vier Drähte mit einem konstanten Strom versorgt. Mithilfe der beiden anderen Drähte wird der Spannungsabfall direkt am Sensor gemessen. Durch diese Messleitungen fließt nur ein sehr kleiner Strom, so dass der Spannungsabfall in den Messleitungen vernachlässigbar klein bleibt.

2.4.2 Drehmomentmesswelle

Zur Messung des Drehmoments kommen direkte und nicht direkte Verfahren bzw. rotierende und nicht rotierende Sensoren zum Einsatz. Drehmomentmesswellen gehören zu Kategorie der Rotationssensoren und werden eingesetzt, um das Drehmoment direkt an einer sich drehenden Welle zu erfassen. Gemessen wird dabei die Torsionsverformung, die durch das Drehmoment hervorgerufen wird. Hierzu wird in der Regel ein sich drehender Messkörper in den Wellenstrang eingebaut, dessen Spannungsversorgung und Messsignal telemetrisch an eine fest stehende Einheit übertragen wird. Die Messkörper sind empfindlich gegenüber Exzentrizitäten bzw. Winkelfehler, die Achsen müssen genau fluchten. Zur Einbindung in der Wellenstrang kommen daher Kupplungen zum Einsatz, mit denen Fluchtungsfehler ausgeglichen sowie schnelle Drehmomentänderungen und Schwingungen gedämpft werden. Abbildung 2.5 zeigt den Aufbau am Prüfstand Kolbenverdichter, hier ist die Drehmomentmesswelle zwischen Motor und Verdichter mittels zweier Klauenkupplungen eingebaut.

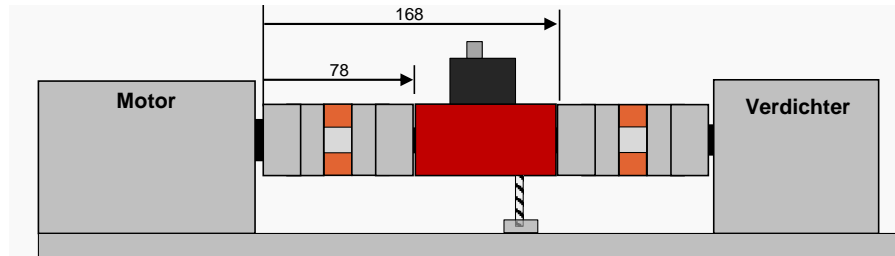


Abbildung 2.5: Montagesituation der Drehmomentmesswelle am Prüfstand Kolbenverdichter, erstellt von der Fa. KTR

Die Verformung des Messkörpers wird durch Dehnungsmessstreifen (DMS) erfasst. Das wesentliche Element eines DMS ist ein elektrischer Leiter, dessen Widerstand sich je nach Dehnung des Streifens verändert. Der Widerstand befindet sich als Messgitter auf einer Trägerfolie und ist über eine Abdeckschicht geschützt, die Dicke eines solchen Folien-DMS beträgt etwa 40 µm bis 50 µm. Je nach Verwendung reagieren DMS auf Zug-, Druck- und Biegebeanspruchungen oder auf Torsionskräfte. Letzteres erfordert, dass die DMS in einem 45°-Winkel gegenüber der Wellenachse installiert werden. Zur Verbesserung der Signalqualität werden meist vier DMS eingesetzt, die zu einer Vollbrücke verschaltet werden. Hierdurch werden äußere Störeinflüsse, wie z. B. durch Temperaturänderungen, kompensiert. Abbildung 2.6 zeigt links den grundsätzlichen Aufbau eines Folien-DMS, rechts ist der Aufbau zur Messung der Torsion dargestellt.

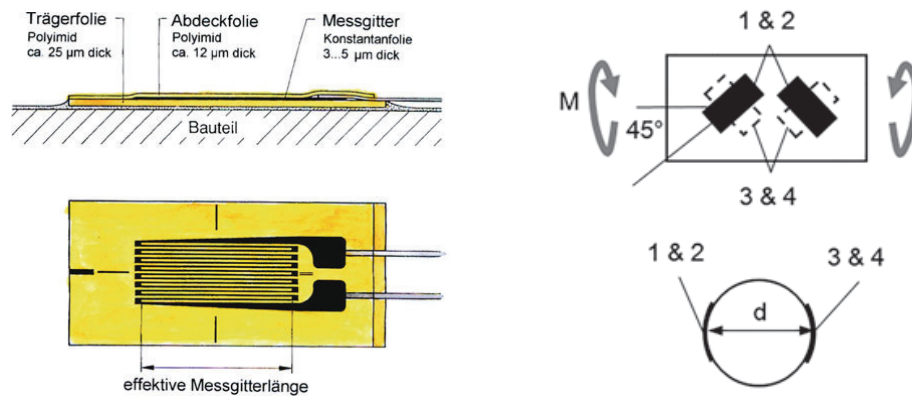


Abbildung 2.6: Links: Aufbau Folien-DMS aus [5], Rechts: Applikation von DMS zur Bestimmung von Torsion aus [6]

Die Übertragung des Messsignals und die Energieversorgung muss aufgrund des rotierenden Messkörpers berührungslos ohne Kabel erfolgen. Während hierfür früher häufig Schleifringe verwendet wurden, hat sich mittlerweile die telemetrische Übertragung durchgesetzt. Damit sich Messsignal und Energieübertragung nicht beeinflussen, werden unterschiedliche Frequenzen verwendet. Übliche Frequenzen für die Übertragung der Messsignale liegen im Bereich 5 MHz bis 20 MHz, bei der Spannungsversorgung dagegen bei 20 kHz bis 500 kHz.

2.4.3 Optischer Drehwinkelgeber

Drehwinkelgeber wandeln einen sich ändernden mechanischen Winkel in ein elektrisches Signal um. Hierzu werden vom Sensor pro Wellenumdrehung eine bestimmte Anzahl an Impulsen als Rechtecksignal ausgegeben. Daraus lässt sich die Geschwindigkeit der Bewegung aber auch die Position der Welle ermitteln. Während prinzipiell ein Impulskanal ausreicht, um die Geschwindigkeit zu bestimmen, werden in der Regel zwei weitere Impulse ausgegeben. Der zweite Impulskanal ist um 90° phasenverschoben und ermöglicht so die Feststellung der Drehrichtung. Diese beiden phasenverschobenen Kanäle werden in der Regel mit A und B bezeichnet, erlauben jedoch nur eine relative Positionsangabe. Zur Ermittlung der absoluten Position wird zusätzlich einmalig pro Umdrehung ein Impuls auf einen dritten Kanal ausgegeben. Dieser Nullimpuls hat eine definierte Lage und ermöglicht so die Zuordnung zum Vollwinkel. Allerdings muss der Nullimpuls hierzu einmal durchlaufen, d.h. die absolute Position ist erst bekannt, nachdem sich die Welle bis zum ersten Nullimpuls gedreht hat. Abbildung 2.7 zeigt das Impulsdiagramm mit den Kanälen A, B und dem Nullimpuls NI.

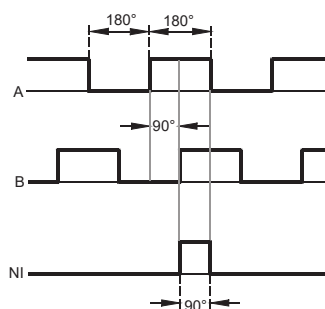


Abbildung 2.7: Impulsdiagramm aus [7]

Zur Impulserzeugung existieren unterschiedliche Verfahren, hierzu zählen magnetische, kapazitive,

induktive und vor allem optische Methoden, die auch am Prüfstand Kolbenverdichter zum Einsatz kommt. Hier sendet eine Leuchtdiode ein Lichtsignal aus. Dieses Signal wird durch ein Abtastgitter und eine Codescheibe/Teilscheibe mit einem Hell-Dunkel-Muster gesendet. Auf diese Weise wird das Signal je nach Position der Codescheibe absorbiert oder durchgelassen. Das so erzeugte Signal wird durch Photoelemente empfangen und in ein sinusförmiges Signal übersetzt. Im Nachgang wird das Signal in Rechteckimpulse umgewandelt und ausgegeben.

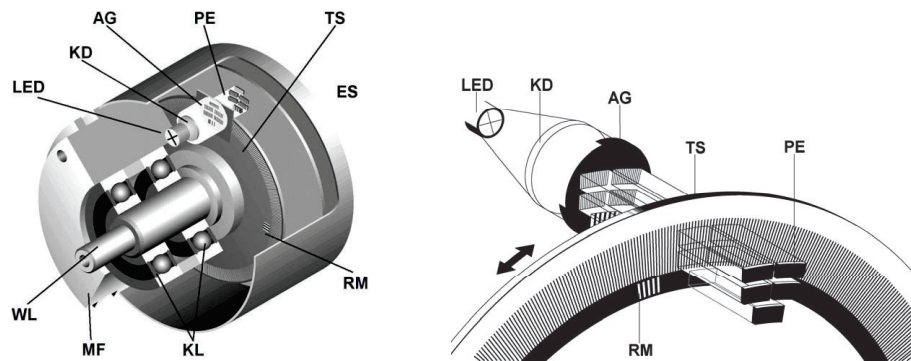


Abbildung 2.8: Aus [7]: Links: Inkremental-Drehgeber, rechts: Durchlichtverfahren; AG = Abtastgitter, PE = Photoelemente, TS = Teilscheibe, ES = Elektrische Signale, RM = Referenzmarke, KL = Kugellager, MF = Montageflansch, WL = Welle, KD = Kondensator

An Motoren werden in der Regel Hohlwellendrehgeber verwendet, die auf die Motorachse aufgeschoben werden. Die Antriebswelle wird mit der Hohlwelle des Drehgebers über eine flexible Kupplung verbunden, um den Drehgeber vor einem Versatz der Wellen zu schützen. Die Codescheibe ist fest mit der Hohlwelle verbunden, sodass die Abtastung genau der Drehung der Antriebswelle folgt.

3 Versuchsaufbau

Abbildung 3.1 zeigt den Versuchsaufbau mit allen Sensoren zur Messung von Temperatur, Druck, Drehmoment und Drehzahl.

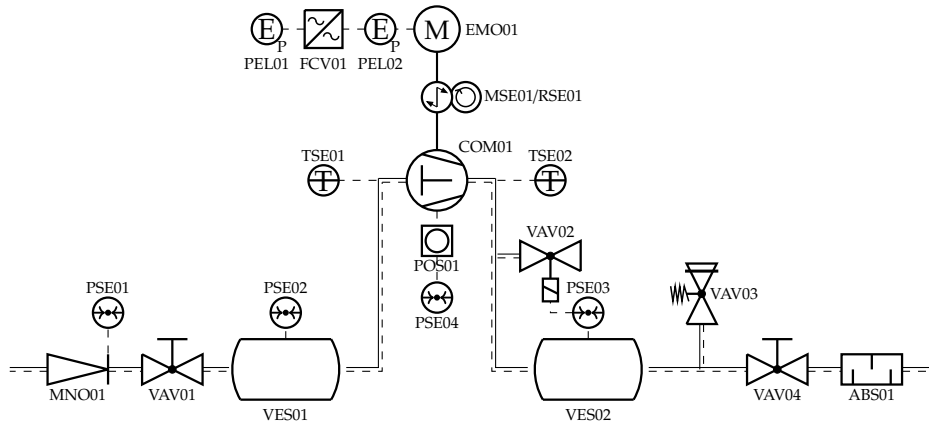


Abbildung 3.1: Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema des Prüfstandes

Unmittelbar am Eintritt wird an einer Venturi-Düse mit dem Sensor PSE01 der Relativdruck und damit der Volumenstrom ermittelt. Der Volumenstrom ist durch den periodischen Arbeitsprozess des Hülkolbenverdichters COM01 eigentlich diskontinuierlich. Zur Vergleichmäßigung des Volumensstroms ist vor dem Saugventil des Verdichters ein Behälter VES01 angeordnet. An diesem wird mit dem Sensor PSE02 der saugseitige Druck p_1 bestimmt. Die Eintrittstemperatur T_1 wird unmittelbar vor dem Eintrittsventil mit dem Sensor TSE01 gemessen. Am Austritt des Verdichters befindet sich der Temperatursensor TSE02 zur Messung von T_2 . Die Druckmessung PSE03 befindet sich am Behälter VES02, der für eine Vergleichmäßigung der Messgrößen am Austritt sorgt. Der Druck in den beiden Behältern wird über die manuell verstellbaren Ventile VAV01 und VAV04 eingestellt. Damit stellt sich entsprechend der geänderten Anlagenkennlinie ein anderer Volumenstrom und ein anderer Enddruck der Verdichtung ein. Im Versuch wird nur das Ventil am Austritt (VAV04) verwendet. Alle Drücke werden relativ zur Umgebung gemessen, d. h. zur Bestimmung des Absolutdruckwertes muss der Umgebungsdruck addiert werden.

Der Verdichter ist mit dem Motor EMO01 verbunden, dessen Drehzahl über den Frequenzumrichter FCV01 verändert werden kann. Zwischen beiden Komponenten ist eine Drehmomentmesswelle (MSE01/RSE01) montiert, mit der neben dem Drehmoment auch die Drehzahl gemessen wird. Die elektrische Leistung wird sowohl am Eingang (PEL01) als auch am Ausgang (PEL02) des Frequenzumformers gemessen.

Der Verdichter besteht aus einem Zylinder und ist einstufig. Der Kolbenhub beträgt 46 mm bei einem Zylinderdurchmesser von 65 mm. Die Nenndrehzahl beträgt $n = 980 \text{ min}^{-1}$, dies stellt auch die obere Drehzahlgrenze dar, die im Versuch angefahren werden kann. Ein Druckschalter am Druckbehälter öffnet bei einem Überdruck von 10 bar das Magnetventil VAV02 und begrenzt so den Enddruck. Zusätzlich befindet sich in der Ausgangsleitung das mechanische Sicherheitsventil VAV03, das bei einem etwas höheren Überdruck öffnet, falls der Druckschalter ausfällt. Zur Lärmreduktion ist am Austritt zudem der Schalldämpfer ABS01 installiert.

Am Verdichter sind zusätzlich der Drucksensor PSE04 und der Drehwinkelgeber POS01 verbaut, mit denen die Aufnahme eines Indikatordiagrammes ermöglicht wird. Beide Sensoren sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

4 Versuchsdurchführung

Lesen Sie vor dem Versuchsbeginn alle Unterkapitel zur Versuchsdurchführung durch und führen Sie die Berechnungen zur Versuchsvorbereitung in Abschnitt 4.2 durch.

4.1 Aufgabenstellung

Am Versuchsstand sollen im Rahmen des Laborversuches unterschiedliche Betriebszustände für den Kolbenverdichter eingestellt werden. Es werden Versuchsreihen bei konstanter Drehzahl des Verdichters unter Variation des Ausgangsdruckes aufgenommen. Anhand der Ergebnisse werden unterschiedliche Kennlinien erstellt, mit denen eine Charakterisierung des Hubkolbenverdichters möglich ist.

4.2 Versuchsvorbereitung

In der Vorbereitung auf den Versuch wird ein Betriebspunkt vollständig berechnet und dient damit als Muster für die Versuchsauswertung. Außerdem wird das Volumen im Arbeitsraum des Verdichters auf Grundlage des Kurbelwinkels bestimmt.

4.2.1 Berechnung eines Betriebspunktes

Im Rahmen der Versuchsdurchführung sind für die Auswertung unterschiedliche Größen aus den Messwerten zu berechnen. Führen Sie zur Vorbereitung des Versuches die vollständige Berechnung eines Betriebspunktes mit vorgegebenen Messwerten durch. Die Berechnungsschritte entsprechen dabei der Vorgehensweise während der Versuchsdurchführung, d. h. Sie können die Berechnungen als Grundlage für den Versuch verwenden. Es empfiehlt sich daher, die Berechnung in einer Tabellenkalkulation durchzuführen, die dann als Vorlage für die Versuchsdurchführung verwendet werden kann. Folgender Betriebszustand wird vorgegeben:

- Absolutdruck der Umgebung: $p_U = 1 \text{ bar}$,
- Zustandsdaten der Luft: Dichte $\rho_{\text{Luft}} = 1,183 \text{ kg m}^{-3}$, $\kappa_{\text{Luft}} = 1,4$, $R_{i,\text{Luft}} = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$,
- Drehmoment: $M_V = 6,54 \text{ N m}$,
- Drehzahl des Verdichters $n_V = 803 \text{ min}^{-1}$
- Durchfluss: $\dot{V} = 93 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$,
- Relativdruck Eingangsseite: $p_1 = 0 \text{ bar}$,
- Eingangstemperatur: $T_1 = 300 \text{ K}$,
- Relativdruck Ausgangsseite: $p_2 = 5 \text{ bar}$,
- Ausgangstemperatur: $T_2 = 407 \text{ K}$.

Berechnen Sie für diesen Betriebszustand:

1. Druckverhältnis zwischen Aus- und Eingangsseite nach Gleichung 2.1
2. Isentrope Endtemperatur nach Gleichung 2.4 und daraus die Differenz zur realen Ausgangstemperatur
3. Hubvolumen, idealer Förderstrom und Liefergrad nach Gleichung 2.13

4. Reale Leistungsaufnahme des Verdichters (siehe mechanischer Wirkungsgrad in Gleichung 2.15)
5. Ideale Verdichterleistung und Wirkungsgrad bei isentroper Kompression/Expansion nach Gleichungen 2.10 und 2.15
6. Ideale Verdichterleistung und Wirkungsgrad bei isothermer Kompression/Expansion nach Gleichungen 2.11 und 2.15

Kontrollwerte Wirkungsgrad: $\eta_{Isotherm} = 51,5 \%$, $\eta_{Isentrop} = 67,2 \%$

4.2.2 Bestimmung des Arbeitsraumvolumens

Im Versuch wird für einzelne Betriebspunkte der Druck im Arbeitsraum zusammen mit dem Kurbelwinkel aufgezeichnet. Für die Darstellung in einem p-V-Diagramm muss aus dem Kurbelwinkel das Arbeitsraumvolumen bestimmt werden. Berechnen Sie für die Kurbelwinkel 0° bis 360° (Schrittweite 1°) das entsprechende Volumen und erstellen Sie daraus ein Diagramm (Volumen über Kurbelwinkel). Nutzen Sie hierzu die Gleichungen aus Abschnitt 3 sowie die Daten des Verdichters aus Anhang 5.1.

4.3 Versuchsdurchführung

Verdichter können bei konstanter Drehzahl betrieben werden. Volumenstrom, Leistung und Wirkungsgrad hängen dabei vom Druckverhältnis ab. Ermitteln Sie diese Zusammenhänge bei zwei verschiedenen Drehzahlen des Verdichters und jeweils 6 bis 7 Enddrücken.

Die Drehzahl des Motors bzw. des Verdichters wird mithilfe eines Frequenzumrichters variiert. Der Fördervolumenstrom wird bei konstanter Drehzahl mittels des Auslassventils so eingestellt, dass der Ausgangsdruck p_2 konstant bleibt. Je nach Betriebspunkt (vor allem bei geringen Drehzahlen und/oder hohen Drücken) ist auch ein Nachjustieren der Drehzahl notwendig. Notieren Sie Ihre Messwerte, wenn die einzelnen Messgrößen sich nur noch wenig ändern. Bestimmen Sie einmalig vor Beginn des Versuches den Umgebungsdruck. Berechnen Sie während der Versuchsdurchführung die einzelnen Größen wie schon im Beispiel aus der Versuchsvorbereitung in Abschnitt 4.2. Verwenden Sie in den Berechnungen als Verdichterdrehzahl den direkt am Prüfstand gemessenen Wert.

Nehmen Sie für insgesamt acht Betriebspunkte (je vier Enddrücke für zwei Drehzahlen) zusätzlich den zeitlichen Verlauf des Druckes innerhalb eines Verdichterzyklus auf. Verwenden Sie hierzu die entsprechende Schaltfläche auf der Benutzeroberfläche. Zur weiteren Auswertung benötigen Sie die acht Zeitverläufe sowie für jede Drehzahl die Daten der Indikatordiagramme, nutzen Sie hierfür die Export-Funktion. In den Daten für das Indikatordiagramm wurde bereits die Umrechnung von Kurbelwinkel zum Arbeitsraumvolumen vorgenommen (siehe Versuchsvorbereitung in Abschnitt 4.2.2).

Hinweis: Die Oberflächen des Kompressors können durch die Verdichtung eine Temperatur bis zu 200°C erreichen.

4.4 Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Versuche sind folgende Aufgaben durchzuführen und zu diskutieren.

- Erstellen Sie ein Π, \dot{V} -Diagramm für die einzelnen Messreihen. Berechnen Sie den Liefergrad λ und erstellen Sie ein λ, Π -Diagramm. Beschreiben und interpretieren Sie den Verlauf von Volumenstrom und Liefergrad in Abhängigkeit von Druckverhältnis und Drehzahl!

- Berechnen Sie bei isentroper Betrachtung die theoretisch zu erwartende Verdichtungsendtemperatur und vergleichen Sie diese mit Ihren Messwerten. Erstellen Sie ein Diagramm der Temperaturdifferenz in Abhängigkeit von Druckverhältnis und Drehzahl. Wie und warum wird die Differenz zwischen realer und isentroper Endtemperatur beeinflusst? Warum dauert es im Versuch teilweise lange, bis sich die Temperatur am Verdichteraustritt nur noch wenig verändert?
- Berechnen Sie die isentropen und isothermen Wirkungsgrade. Erstellen Sie ein η, Π -Diagramm. Erläutern und diskutieren Sie den Verlauf der Wirkungsgrade!
- Stellen Sie den Verlauf des Druckes im Arbeitsraum sowie den Kurbelwinkel für die acht Betriebspunkte in zwei Diagrammen über der Zeit dar (je Drehzahl ein Diagramm). Verändern Sie hierzu die Zeitwerte, so dass alle Verläufe zum gleichen Zeitpunkt starten. Interpretieren Sie den Verlauf des Druckes in den Betriebspunkten. Vor allem bei geringen Drehzahlen kommt es bei unterschiedlichen Enddrücken zu einer zeitlichen Verschiebung im Verlauf des Kurbelwinkels. Warum tritt eine solche zeitliche Verschiebung auf?
- Erstellen Sie für die Betriebspunkte zwei Indikatordiagramme (je Drehzahl ein Diagramm) und vergleichen Sie den Verlauf mit Abbildung 2.4. Wählen Sie eine der Kennlinien aus und schätzen Sie für diese die Werte Druck und Volumen im Zustand 1' und 2' ab (p_1, V_1, p_2, V_2). Berechnen Sie mit diesen Werten den Polytropenexponenten (siehe Gleichung 2.12). Berechnen Sie zusätzlich das Volumen V_2 im Falle einer isothermen (Gleichung 2.2) und einer isentropen (Gleichung 2.3) Zustandsänderung. Erläutern Sie welcher Sonderfall näher an der realen Zustandsänderung liegt und warum dies der Fall ist.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Böge und M. Ristau, *Handbuch Maschinenbau*. Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [2] G.U.N.T. Gerätebau GmbH, *Versuchsanleitung ET 513 Versuchsmodul einstufiger Kolbenkompressor*, Barsbüttel, 2008.
- [3] W. Eifler, E. Schlücker, U. Spicher und G. Will, Hrsg., *Küttner Kolbenmaschinen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [4] DIN EN 60751: *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer mit Platin-Temperatursensoren*, 2009.
- [5] S. Keil, *Dehnungsmessstreifen*. Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [6] D. Goßlau, *Fahrzeugmesstechnik*. Berlin: Springer Vieweg, 2020.
- [7] Ifm Electronic gmbH, *Sensor, Systemkonfiguration und Steuerungstechnik für die Automatisierung - Schulungsunterlagen - Drehgeber*, Essen, 2004.
- [8] KULITE SEMICONDUCTOR PRODUCT, INC., *Datenblatt kulite Subminiature High Temperature Pressure Transducer XTEL-140 (M) Series*, Leonia, USA, 2019.

5 Anhang

5.1 Daten des Hubkolbenverdichters

Zahl der Zylinder: 1, einstufig

Bohrung des Zylinders: $d = 65 \text{ mm}$

Kurbelwellenradius: $r = 23 \text{ mm}$

Hub des Zylinders: $s = 46 \text{ mm}$

Pleuelstangelänge: $l = 105 \text{ mm}$

Schadraumvolumen: $V_S = 5,741 \text{ cm}^3$

Maximaler Betriebsüberdruck: $p_{\max} = 10 \text{ bar}$

Nenn Drehzahl: $n_{\text{Nenn}} = 980 \text{ min}^{-1}$