

AutoUni – Schriftenreihe

AutoUni 

Michael König

# Verlustmechanismen in einem halbherme- tischen PKW-CO<sub>2</sub>- Axialkolbenverdichter

---

# **AutoUni – Schriftenreihe**

Band 127

**Reihe herausgegeben von/Edited by**  
Volkswagen Aktiengesellschaft  
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

**Reihe herausgegeben von/Edited by**

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

---

Michael König

# Verlustmechanismen in einem halbherme- tischen PKW-CO<sub>2</sub>- Axialkolbenverdichter

 Springer

Michael König  
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2018

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe  
ISBN 978-3-658-23001-2                      ISBN 978-3-658-23002-9 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23002-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# **Verlustmechanismen in einem halbhermetischen Pkw-CO<sub>2</sub>-Axialkolbenverdichter**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu  
Braunschweig

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte DISSERTATION

von: Michael König  
aus (Geburtsort): Wolfenbüttel

eingereicht am: 07. August 2017  
mündliche Prüfung am: 07. Mai 2018

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler  
Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts  
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der Volkswagen AG am Standort Salzgitter im Bereich elektrifizierter Nebenaggregate.

Die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit erfolgte durch Herrn Prof. Dr. Jürgen Köhler vom Institut für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig. Meine besondere Hochachtung gilt Herrn Prof. Dr. Jürgen Köhler für die umfangreiche fachliche Auseinandersetzung mit den Inhalten der Arbeit. Die regelmäßig geführten Diskussionen zu den methodischen Ansätzen, Fortschritten und Ergebnissen der Arbeit stellen einen erheblichen Anteil zum Gelingen der Arbeit dar. Herrn Prof. Dr.-Ing. Eilts danke ich herzlich für die Erstellung des Zweitgutachtens. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Ferit Küçükay für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ohne die Unterstützung der Kolleginnen und Kollegen der Volkswagen AG in meiner Abteilung und auch über die Abteilung hinaus wäre die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Stefan Lieske, Dr. Julia Lemke, Michael Luer und Mathias Möller haben mir die Anfertigung der vorliegenden Arbeit bei gleichzeitig spannender, lehr- und erkenntnisreicher Projektarbeit im Rahmen meiner Doktorandenzeit grundsätzlich ermöglicht. Eine weiterführende inhaltliche Bereicherung zur Verdichtersimulation konnte ich durch meinen sehr geschätzten Doktoranden-Kollegen Jakob Hennig sowie Christian Schneck, Florian Boseniuk, Dr. Andreas Gitt-Gehrke und Clément Scheuber erfahren. Für die Unterstützung bei der Konstruktion und dem Prototypenaufbau danke ich besonders Daniel Blasko, Felix Nowak, Oswald Gehl, Norman Welz, Anton Gugenheimer und Kevin Tauch.

Zum Gelingen der Arbeit haben weiterhin besonders die Kollegen der Fa. TLK-Thermo GmbH aus Braunschweig beigetragen. Für die Konzeption und den Betrieb eines wunderbaren Verdichterprüfstandes möchte ich besonders Mario Schlickhoff, Dr. Manuel Gräber, Sven Packheiser, Norbert Stulgies, Sergej Uhrich und André Stöbel meinen Dank aussprechen. Die stets hilfreichen Anregungen und zahlreichen Diskussionen zu experimentellen Ansätzen und Untersuchungsergebnissen mit Dr. Nicholas Lemke haben einen inhaltlich großen Mehrwert für diese Arbeit geliefert. Auch haben die Diskussionen mit Dr. Nicholas Lemke im Hinblick auf die erzielten Simulationsergebnisse einen erheblichen Beitrag für eine interpretierende und gleichzeitig kritische Bewertung der erzielten Ergebnisse geleistet. Für eine umfangreiche fachkundige Unterstützung im Rahmen der Verdichtermodellerstellung danke ich besonders Dr. Sven Försterling und Dr. Christian Schulze.

Meiner lieben Familie bin ich abschließend dankbar für den dauerhaften Rückhalt, die Förderung meines Werdegangs und die fortwährende Unterstützung jeglicher Art. Für eine stetige Motivation, den liebevollen harmonischen Umgang und eine ausgewogene mentale Balance auch in schwierigen Zeiten danke ich von Herzen meiner Partnerin Nane Vollmer.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	VII
Abbildungsverzeichnis . . . . .	XIII
Tabellenverzeichnis . . . . .	XVII
Symbolverzeichnis . . . . .	XIX
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	XXVII
Kurzfassung . . . . .	XXIX
Abstract . . . . .	XXXI
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Kohlendioxid als Kältemittel . . . . .	1
1.2 Forschungsbedarfe für die Fahrzeugklimatisierung mit CO <sub>2</sub> . . . . .	2
1.3 Ziele der Arbeit . . . . .	4
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen zur Untersuchung von Verlustmechanismen im Verdichter . . . . .</b>	<b>7</b>
2.1 Anlagenverschaltung für eine Pkw-CO <sub>2</sub> -Klimaanlage . . . . .	7
2.2 Verdichterbauarten . . . . .	8
2.2.1 Scrollverdichter . . . . .	10
2.2.2 Hubkolbenverdichter . . . . .	11
2.3 Verdichtungsprozess eines einstufigen Kolbenverdichters . . . . .	14
2.4 Identifikation von Verlustmechanismen . . . . .	16
2.4.1 Strömungsverluste . . . . .	17
2.4.2 Druckpulsationen . . . . .	18
2.4.3 Aufheizungsverluste . . . . .	19
2.4.4 Elektrische Verluste . . . . .	19
2.4.5 Reibungsverluste . . . . .	21
2.4.6 Rückexpansionsverluste . . . . .	23
2.4.7 Leckageverluste . . . . .	23
2.4.8 Rückströmungsverluste . . . . .	24
2.5 Bewertungskenngrößen für elektrisch angetriebene Kältemittelverdichter . . . . .	25
2.5.1 Äußere Bewertungskenngrößen . . . . .	25
2.5.2 Innere Bewertungskenngrößen . . . . .	27
<b>3 Modellierung eines Taumelscheibenverdichters . . . . .</b>	<b>29</b>
3.1 Thermodynamische und strömungsmechanische Modellierung . . . . .	29
3.1.1 Bilanzgleichungen . . . . .	29
3.1.2 Wärmeübergangsbeziehungen . . . . .	31
3.1.3 Düsen- und Ventilströmung . . . . .	34
3.2 Modellierung mechanischer Verdichter-Komponenten . . . . .	36
3.2.1 Kinematische Beziehungen am Kolben . . . . .	36
3.2.2 Gleitstein- und Kolbendynamik . . . . .	38

3.2.3	Kräftegleichgewicht am Kolben . . . . .	43
3.2.4	Kräftegleichgewicht an der Pleuellwelle . . . . .	45
3.2.5	Lagerreibung . . . . .	46
3.2.6	Ventilmodell . . . . .	47
3.3	Elektrischer Antrieb . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Experimentelle Methodik der Verdichter-Untersuchung . . . . .</b>	<b>53</b>
4.1	Anlagenkonfiguration . . . . .	53
4.2	Indiziermessungen . . . . .	56
4.3	Leistungsmessung am elektrischen Antriebsstrang . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchung des Verdichters . . . . .</b>	<b>63</b>
5.1	Indiziermessungen . . . . .	63
5.1.1	Synchronizität und Verdichtungscharakteristik der Zylinder . . . . .	64
5.1.2	Einfluss der Ölumlaufzeit (OCR) . . . . .	68
5.1.3	Einfluss des Druckverhältnisses und der Drehzahl . . . . .	70
5.1.4	Einfluss der Druckpulsationen . . . . .	72
5.2	Charakterisierung von Leckageverlusten am Zylinder . . . . .	75
5.2.1	Leckageverluste an den Pleuellringen . . . . .	76
5.2.2	Leckageverluste an den Ventilen . . . . .	77
5.3	Charakterisierung des elektrischen Antriebsstranges . . . . .	79
5.4	Charakterisierung des Verdichters bei Betriebspunktvariation . . . . .	81
5.4.1	Liefergradbetrachtung . . . . .	82
5.4.2	Füllgradbetrachtung . . . . .	85
5.4.3	Gütegradbetrachtung . . . . .	87
<b>6</b>	<b>Validierung des Verdichtermodells . . . . .</b>	<b>91</b>
6.1	Wärmeübertragungsmodell . . . . .	91
6.2	Reibungsmodell . . . . .	93
6.3	Zylinder- und Ventilmodell . . . . .	96
6.4	Bewertungskenngrößen . . . . .	100
<b>7</b>	<b>Bewertung ausgewählter Verlustbeiträge des Verdichters . . . . .</b>	<b>103</b>
7.1	Elektrische Verluste . . . . .	103
7.2	Reibungsverluste . . . . .	105
7.3	Wärmeübertragungsverluste . . . . .	107
7.4	Leckageverluste . . . . .	108
7.5	Ventilverluste . . . . .	109
7.6	Gegenüberstellung ausgewählter relativer Verlustanteile . . . . .	111
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>117</b>

<b>A</b>	<b>Messunsicherheiten der experimentellen Untersuchungen . . . . .</b>	<b>131</b>
A.1	Bestimmung der erweiterten Standardmessunsicherheit an Komponenten	131
A.1.1	Elektrische Leistung am Eingang der Leistungselektronik . . .	131
A.1.2	Elektrische Leistung am Eingang des E-Motors . . . . .	132
A.1.3	Mechanische Leistung . . . . .	133
A.1.4	Elektrische Wirkungsgradbewertung . . . . .	135
A.1.5	Indizierte Leistung . . . . .	135
A.1.6	Leckage am Zylinder . . . . .	139
A.2	Bestimmung der erweiterten Standardmessunsicherheit der Kenngrößen	140
A.2.1	Liefergrad . . . . .	140
A.2.2	Klemmengütegrad . . . . .	142
A.2.3	Indizierter isentroper Gütegrad . . . . .	143
A.2.4	Füllgrad . . . . .	144
A.3	Bestimmung der erweiterten Standardmessunsicherheit der Ölumlauftrate	145
A.4	Bestimmung der erweiterten Standardmessunsicherheit des Druckes . .	146
A.5	Bestimmung der erweiterten Standardmessunsicherheit bei Wiederholung	147
A.6	Bestimmung der erweiterten Standardmessunsicherheit der Ventilmessung	148
A.7	Verwendete Messinstrumente der experimentellen Untersuchungen . . .	149
<b>B</b>	<b>Ergänzende Daten zur Verdichter-Modellierung . . . . .</b>	<b>151</b>
B.1	Wärmeübertragung im Zylinder . . . . .	151
B.2	Kolbenringdynamik . . . . .	152
B.3	Stoffeigenschaften von CO <sub>2</sub> -Öl-Gemischen . . . . .	154
B.4	Ersatzparameter des Ventilmodells . . . . .	157
<b>C</b>	<b>Ergänzende Daten zur experimentellen Methodik . . . . .</b>	<b>161</b>
C.1	Prüfstandskonfiguration der Leckagemessung an den Kolbenringen . . .	161
C.2	Prüfstandskonfiguration der Ventil-Leckagemessung am . . . . .	162
<b>D</b>	<b>Ergänzende Daten zur experimentellen Untersuchung des Verdichters . .</b>	<b>163</b>
D.1	Parametrisierung des elektrischen Antriebsstrang-Modells . . . . .	163
D.2	Verdichtungscharakteristik bei Drehzahl- und Druckverhältnisvariation .	164
<b>E</b>	<b>Ergänzende Daten zur Validierung des Verdichtermodells . . . . .</b>	<b>165</b>
E.1	Kolbenringmodell . . . . .	165
E.2	Ventilmodell . . . . .	166
E.3	Sauggasaufheizung . . . . .	167
E.4	Bewertungsgrößen . . . . .	167

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Verschaltungsschema und Prozessverlauf einer PKW-CO <sub>2</sub> -Klimaanlage . . .	8
2.2	Kältemittelverdichter-Bauarten nach Kaiser [76] und Süß [74] . . . . .	9
2.3	Schema und Leckagepfade eines Scrollverdichters . . . . .	10
2.4	Schema eines Pkw-CO <sub>2</sub> -Taufelscheibenverdichters . . . . .	13
2.5	Idealer einstufiger Verdichtungsprozess eines Kolbenverdichters . . . . .	14
2.6	Realer einstufiger Verdichtungsprozess eines Kolbenverdichters . . . . .	15
2.7	Schema eines elektrischen drehzahlgeregelten Antriebsstranges . . . . .	20
2.8	Strickbeck-Kurve für verschiedene Reibungszustände . . . . .	22
3.1	Fluid- und Wärmeströme für ein Kontrollvolumen des Simulationsmodells .	29
3.2	Strukturdiagramm des 0D-/1D-Simulationsmodells . . . . .	30
3.3	Schema der Wärmeübergangsbedingungen am Ventildeckel . . . . .	33
3.4	Schema des Saug- und Druckventils . . . . .	34
3.5	Geometrische Parametrisierung der Triebwerkskonfiguration . . . . .	37
3.6	Gleitsteinverkipfung an der Taufelscheibe . . . . .	40
3.7	Kräftegleichgewicht am verkippten Kolben . . . . .	41
3.8	Kräftegleichgewicht an der Antriebswelle . . . . .	45
3.9	Plattennormales Abheben im flüssigkeitsgefüllten Spalt . . . . .	51
4.1	Anlagenverschaltung des Verdichterprüfstandes mit Kreislaufzuständen . .	54
4.2	Prozessschema des Verdichterprüfstandes . . . . .	55
4.3	Positionierung der Hall-Schalter im Stator des E-Motors . . . . .	56
4.4	Kolbenhub-Drehwinkel-Kalibrierung des Hall-Schalters U . . . . .	57
4.5	Drehungleichförmigkeit eines elektrisch angetriebenen Verdichters . . . . .	58
4.6	Referenzpunkte der Flankenerkennung mit Abgleich der Kolben-OT-Lage .	58
4.7	Wheatston'sche Vollbrücke zur Druckmessung mit Temperaturmessung . .	59
4.8	Druck- und Temperatureinfluss auf die Drucksensorkennlinie . . . . .	60
4.9	Anlagenverschaltung der Wirkungsgradmessung . . . . .	61
5.1	Indikatoridiagramme für fünf Zylinder bei Drehzahlvariation . . . . .	65
5.2	Indikatoridiagramme für Zylinder 3 bei OCR-Variation . . . . .	69
5.3	Winkelversatz des Schließzeitpunktes des Saug- und Druckventils . . . . .	70
5.4	Indikatoridiagramme für Zylinder 3 bei Betriebspunktvariation . . . . .	71
5.5	Winkelversatz für das Ventilschließen aufgrund von Ventilspätschlüssen . .	72
5.6	Zylinder- und Kammerdruckverläufe für Betriebspunkt B . . . . .	73
5.7	Detailansichten Zylinder- und Kammerdruckverläufe für Betriebspunkt B	74
5.8	Blowby-Massenstrom für die Betriebspunkte B und D . . . . .	76
5.9	Experimentell ermittelte Leckagemassenströme für die Ventile . . . . .	78
5.10	Wirkungsgrad-Charakterisierung der Leistungselektronik . . . . .	79
5.11	Wirkungsgrad-Charakterisierung des E-Motors . . . . .	80
5.12	Wirkungsgrad-Charakterisierung des Antriebsstranges . . . . .	81

5.13	Stutzen- und Kammerliefergrad bei Betriebspunktvariation . . . . .	82
5.14	Sauggasaufheizung bei Betriebspunktvariation . . . . .	83
5.15	Teilliefergrad durch Sauggasaufheizung bei Betriebspunktvariation . . . . .	84
5.16	Zylinderfüllgrad bei Betriebspunktvariation . . . . .	85
5.17	Details der Indikatordiagramme für Zylinder 3 bei Drehzahlvariation . . . . .	86
5.18	Indizierter isentroper Gütegrad bei Betriebspunktvariation . . . . .	87
5.19	Klemmengütegrad bei Betriebspunktvariation . . . . .	89
6.1	Vergleich unterschiedlicher Simulationsansätze übertragener Wärmestrom . . . . .	92
6.2	Relative Reibleistungsabweichung unterschiedlicher Simulationsansätze . . . . .	95
6.3	Reibleistungsanteile anhand des 0D-/1D-Simulationsmodells . . . . .	96
6.4	Vergleich der Indikatordiagramme Simulation/Experiment . . . . .	97
6.5	Vergleich des Ventilspätschlussverhaltens Simulation/Experiment . . . . .	98
6.6	Vergleich des Stutzen-Liefergrades Simulation/Experiment . . . . .	100
6.7	Vergleich des indizierten isentropen Gütegrades Simulation/Experiment . . . . .	101
6.8	Vergleich des Klemmengütegrades Simulation/Experiment . . . . .	102
7.1	Verlustanteil des Klemmengütegrades aufgrund von elektrischen Verlusten . . . . .	104
7.2	Verlustanteil des Klemmengütegrades aufgrund von Reibungsverlusten . . . . .	106
7.3	Verlustanteil des Klemmengütegrades aufgrund von Wärmeübertragung . . . . .	107
7.4	Verlustanteil des Klemmengütegrades aufgrund von Leckageverlusten . . . . .	108
7.5	Verlustanteil des Klemmengütegrades aufgrund von Ventilverlusten . . . . .	110
7.6	Relative Verlustanteile des Klemmengütegrades anhand der Simulation . . . . .	112
A.1	Relativer Versatz zwischen idealem und realem Kolben-OT . . . . .	137
A.2	Standardmessunsicherheit der indizierten Arbeit bei Betriebspunktvariation . . . . .	138
A.3	Standardmessunsicherheit des Füllgrades bei Betriebspunktvariation . . . . .	145
B.1	Leckagemassenstrom am Kolbenring-Stoßspiel und an der Kolbenringnut . . . . .	152
B.2	Kolbenring-Geometrie im gespannten und ungespannten Zustand . . . . .	153
B.3	Dampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur für CO <sub>2</sub> -Öl-Gemische . . . . .	155
B.4	Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur für CO <sub>2</sub> -Öl-Gemische . . . . .	155
B.5	Stoffdichte in Abhängigkeit von der Temperatur für CO <sub>2</sub> -Öl-Gemische . . . . .	156
B.6	Ersatzparameter des Saugventils . . . . .	157
B.7	Ersatzparameter des Saugventils . . . . .	158
B.8	Ersatzparameter des Druckventils . . . . .	159
B.9	Ersatzparameter des Druckventils . . . . .	160
C.1	Anlagenverschaltung zur Leckageuntersuchung an den Kolbenringen . . . . .	161
C.2	Verschiedener Messprinzipien der Leckagemessung an den Kolbenringen . . . . .	162
C.3	Anlagenverschaltung zur Leckageuntersuchung an den Ventilen . . . . .	162
D.1	Indizierter isentroper Gütegrad bei Betriebspunktvariation . . . . .	164
D.2	Klemmengütegrad Gütegrad bei Betriebspunktvariation . . . . .	164
E.1	Vergleich des Kolbenring-Leckagemassenstromes Simulation/Experiment . . . . .	165
E.2	Mittlerer effektiver Spaltquerschnitt am Kolbenring anhand der Simulation . . . . .	166

---

E.3	Vergleich des Saugventil-Spätschlussverhaltens Simulation/Experiment . . .	166
E.4	Vergleich der Sauggasaufheizung Simulation/Experiment . . . . .	167
E.5	Vergleich des kammerbezogenen Liefergrades Simulation/Experiment . . .	168
E.6	Vergleich des Zylinderfüllgrades Simulation/Experiment . . . . .	168
E.7	Vergleich des Fördermassenstromes Simulation/Experiment . . . . .	169
E.8	Vergleich der indizierten Leistung Simulation/Experiment . . . . .	169
E.9	Vergleich der elektrischen Leistung Simulation/Experiment . . . . .	170

# Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht verschiedener Bauweisen von Axialkolbenverdichtern nach [101]	12
2.2	Komponenten des Schadraumes am Zylinder mit Beitragsanteilen . . . . .	18
5.1	Betriebspunktmatrix für die Vermessung eines Taumelscheibenverdichters .	63
5.2	Erweiterte Standardmessunsicherheit der Kolben-OT-Bestimmung . . . . .	64
A.1	Szenarien der OT-Abweichung zwischen dem realen und idealen Kolben-OT	137
A.2	Korrekturfaktoren Drehzahl und Druckverhältnis . . . . .	139
A.3	Korrekturfaktoren Drehzahl und Druckverhältnis . . . . .	145
A.4	Korrekturfaktoren Drehzahl und Druckverhältnis . . . . .	147
A.5	Erweiterungsfaktoren für die erweiterte Standardmessunsicherheit . . . . .	148
A.6	Verwendete Messinstrumente mit Angabe der Messunsicherheit . . . . .	149
B.1	Wärmeübergangsbeziehungen am Zylinder nach Disconzi et al. [29] . . . . .	151
B.2	Parameter für ein Öl-CO <sub>2</sub> -Gemisch mit dem Öl Zerol® RFL 68-EP [124] .	156
D.1	Koeffizienten zur Charakterisierung des elektrischen Antriebsstranges . . .	163

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Formelzeichen

$A$	Fläche	$m^2$
$a$	Koeffizient/Grenzabweichung/Parameter	–
$B$	Magnetische Flussdichte	T
$b$	Koeffizient/Parameter	–
$b$	Breite	m
$b$	Dämpfungskonstante	$kg\ s^{-1}$
$C$	Korrekturfaktor	–
$c$	Beiwert/Parameter	–
$c$	Federsteifigkeit	$Nm^{-1}$
$c$	Spezifische Wärmekapazität	$Jkg^{-1}K^{-1}$
$d$	Durchmesser	m
$E$	Energie	J
$F$	Kraft	N
$\vec{F}$	Kraftvektor	N
$f$	Funktion	–
$f$	(Dreh-)Frequenz	Hz
$\dot{f}$	Frequenzänderung	$1/s^2$
$\vec{f}$	Richtungsvektor	–
$H$	Anzahl	–
$h$	Höhe	m
$h$	Spezifische Enthalpie	$Jkg^{-1}$
$I$	(Phasen-)strom	A
$\hat{I}$	Scheitelwert des Stromes	A
$i$	Anzahl	–
$i$	Augenblickswert des Stromes	A
$K_0$	Besselfunktion 2. Art (0-ter Ordnung)	–
$k$	Erfahrungswert/Erweiterungsfaktor	–
$l$	(Charakteristische) Länge	m
$M$	Drehmoment	Nm
$m$	Modulationsgrad/Parameter	–
$m$	Masse	kg
$\dot{m}$	Massenstrom	$kg\ s^{-1}$
$n$	Polytropenexponent/Anzahl	–
$Nu$	Nußelt-Zahl	–
$OCR$	Ölzirkulationsrate	–
$P$	Leistung	W
$\vec{P}$	Positionsvektor	–

$\vec{P}$	Geschwindigkeitsvektor	1/s
$p$	Druck	Pa
$p$	Polpaaranzahl	–
$Pr$	Prandtl-Zahl	–
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$R$	Widerstand	$\Omega$
$R$	Wärmeleitwiderstand	$\text{KW}^{-1}$
$r$	Radius	m
$r$	Differenzieller Widerstand	$\text{VA}^{-1}$
$r^*$	Radius der neutralen Faser	m
$Re$	Reynolds-Zahl	–
$s$	Spezifische Entropie	$\text{JK}^{-1} \text{kg}^{-1}$
$s$	Dicke	m
$T$	Temperatur	K
$\bar{T}$	Mittlere Temperatur	K
$t$	Zeit	s
$U$	Phase/Erweiterte Standardmessunsicherheit	–
$U$	(Phasen-)spannung	V
$U$	Innere Energie	J
$u$	Länge	m
$u$	Standardmessunsicherheit	–
$u$	Augenblickswert der Spannung	V
$V$	Phase	–
$V$	Volumen	$\text{m}^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$\text{m}^3/\text{s}$
$v$	Faktor	–
$v$	Geschwindigkeit	$\text{ms}^{-1}$
$W$	Phase	–
$W$	Arbeit	J
$w$	Relative Standardmessunsicherheit	–
$w$	Strömungsgeschwindigkeit	$\text{ms}^{-1}$
$w$	Dicke	m
$x$	Länge/Koordinate/Dicke	m
$\dot{x}$	Geschwindigkeit	$\text{ms}^{-1}$
$\bar{x}$	Mittlere Geschwindigkeit	$\text{ms}^{-1}$
$\ddot{x}$	Beschleunigung	$\text{ms}^{-2}$
$y$	Länge/Koordinate	m
$y$	Ergebnisgröße	–
$z$	Zylinderanzahl	–
$z$	Länge/Koordinate	m

## Griechische Formelzeichen

$\alpha$	Neigungswinkel	rad
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
$\alpha$	Durchflusskennzahl	–
$\dot{\alpha}$	Winkelgeschwindigkeit	$\text{rad s}^{-1}$
$\ddot{\alpha}$	Winkelbeschleunigung	$\text{rad s}^{-2}$
$\beta$	Korrekturfaktor	–
$\beta$	Winkel	rad
$\gamma$	(Kipp-)Winkel	rad
$\delta$	Relativer Druckverlust(-beiwert)	–
$\Delta$	Differenz	–
$\varepsilon$	Leistungszahl/Schadraumanteil/Kompressibilität/ Dehnung	–
$\zeta$	(Druckverlust-)beiwert	–
$\eta$	Wirkungsgrad/Gütegrad	–
$\eta$	Dynamische Viskosität	Pas
$\kappa$	Isentropenexponent	–
$\lambda$	Liefergrad(-anteil)	–
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\mu$	Zylinderfüllgrad/Reibungszahl/Leckagekoeffizient/ Schätzwert	–
$\mu'$	Erweiterter Zylinderfüllgrad	–
$\nu$	Kinematische Viskosität	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\xi$	Empirischer Faktor	–
$\Pi$	Verdichtungsdruckverhältnis	–
$\rho$	Stoffdichte	$\text{kg/m}^3$
$\bar{\rho}$	Mittlere Stoffdichte	$\text{kg/m}^3$
$\sigma$	Standardabweichung	–
$\varphi$	Konstante	–
$\varphi$	(Phasen-)Winkel	rad
$\dot{\varphi}$	Winkelgeschwindigkeit	$\text{rad s}^{-1}$
$\ddot{\varphi}$	Winkelbeschleunigung	$\text{rad s}^{-2}$
$X$	Hubspaltverhältnis	–
$\psi$	Realgasfaktor	–
$\omega$	Massenanteil	–

**Indizes**

0	Referenz/drehzahlabhängig
1	Lastabhängig
a	Position/außen
A	Antrieb(-swelle)
AC	Wechselspannung
aus	Austrittszustand
B	Brücke
b	Position/Dämpfung
c	Position
char	Charakteristisch
D	Durchlass/Düse
DB	Druckbereich
DC	Gleichspannung
DC,r	Gleichspannung unter Berücksichtigung geringfügiger Wechselspannungsanteile
Diss	Dissipation
DK	Druckkammer
DSt	Druckstutzen
DV	Druckventil
e	Position
eff	Effektiv
EF	Einführfase der Zylinderlaufbuchse
ein	Eintrittszustand
EM	Elektromotor
en	Energetisch
ers	Ersatz-
F	Druck und Temperatur/Kraft
f	Reibung/Frequenz
Fl	Flanke
G	Geschwindigkeit/Gleitstein
g	gespannt
ges	gesamt
GK	Gleitstein-Kolben-Kontakt
GT	Gleitstein-Taumelscheibe-Kontakt
GTW'	Gleitstein-Taumelscheibe-Kontakt unter Berücksichtigung der Gleitstein- und Kolbenverkipfung
GW	Gleitstein-Taumelscheibe-Kontakt unter Berücksichtigung der Gleitsteinverkipfung
h	Spezifische Enthalpie
Hall	Hall-Schalter
Hub	Hubvolumen
Hys	Hysterese

---

I	(Phasen-)Strom
i	Innen/Anzahl/Strom
id	Ideal
ind	Indiziert
IGBT	Bipolartransistor mit isolierten Gate-Elektrode
isen	Isentrop
K	Kammer(-zustand)/Kolben(-seite)
Kal	Kalibrierung
KB	Kolbenboden
Kb	Kleben
KG	Kolben-Gleitstein-Kontakt
Kl	Klemme
KM	Kältemittel
KR	Kolbenring
KV	Kontrollvolumen
L	Leckage/Lager
l	Lokal
La	Lamelle
Lang	Langzeitstabilität
LB	Zylinderlaufbuchse
LE	Leistungselektronik(-seite)
Lin	Linear
LL	Leerlauf
Lu	Luft
M	Mantelfläche/Messung/Drehmoment
m	Schwerpunkt
<i>m</i>	Massenstrom
max	Maximal-/Grenzwert
mech	Mechanisch
mess	Messwert
n	Normal/Anzahl
Nenn	Nennwert
NH	Niederhalter
norm	Normiert
OA	Ölabscheider
OCR	Ölzirkulationsrate
Oel	Öl
OT	Oberer Totpunkt
oV	Ohne Verluste
Puls	Pulsation
p	Druck-/isobar
PTC	Kaltleiter
pv	Druck- (erweitert)
Q	Quetsch-