



Fachbereich VIII Maschinenbau – Veranstaltungstechnik – Verfahrenstechnik

Bachelorarbeit

zur Erlangung
des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)

zum Thema:

Systemmodellierung und Optimierung eines Kolbenkompressors in einer Kältemaschine

von: Sarah Hamade

Matrikelnummer: 905331

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Geike

Betreuer extern: Dr. rer. nat. Andreas Spille

Eingereicht am 27. Juni 2025

Vorwort

Diese Bachelorarbeit entstand im Rahmen des Studiengangs „Computational Engineering and Design“ an der Berliner Hochschule für Technik. Die praktische Bearbeitung sowie die Themenstellung erfolgten in Kooperation mit der CFX Berlin Software GmbH.

Mein herzlicher Dank gilt dem Team der CFX Berlin Software GmbH, das mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Abschlussarbeit in einem praxisnahen Umfeld durchzuführen. Die Gelegenheit, verschiedene Simulationstools kennenzulernen und anzuwenden, hat meinen fachlichen Horizont erheblich erweitert. Darüber hinaus herrschte im Team stets eine Atmosphäre von Offenheit, Freundlichkeit und Hilfsbereitschaft, wodurch meine Fragen jederzeit willkommen waren und die Bearbeitung der Aufgaben wesentlich erleichtert wurde.

Mein besonderer Dank gilt Dr. rer. nat. Andreas Spille, der mich während der gesamten Projektzeit mit großem Engagement begleitet hat. Die wöchentlichen Zwischenbesprechungen, seine fachliche Expertise und die stets konstruktive Unterstützung waren für die Strukturierung und Weiterentwicklung dieser Arbeit von zentraler Bedeutung.

Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Thomas Geike für seine Betreuung seitens der Hochschule und die Begutachtung dieser Arbeit.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit widmet sich der 1D-Modellierung und Simulation eines Kolbenkompressors sowie dessen Integration in eine Kältemaschine unter Verwendung der Simulationssoftware Flownex. Das Ziel besteht darin, den komplexen Verdichtungsprozess durch ein physikalisch fundiertes Kammermodell realitätsnah abzubilden und dabei die Rechenzeiten gegenüber klassischen 3D-CFD-Simulationen signifikant zu reduzieren. In Ergänzung dazu erfolgt die Integration des entwickelten Kompressormodells in einen vollständigen Kältekreislauf, mit dem Ziel, dessen Einfluss auf das Gesamtsystemverhalten zu untersuchen.

Ein besonderer Fokus liegt auf der Integration eines strömungsmechanisch charakterisierten Lamellenventils, das auf Basis vorheriger 3D-Strömungssimulationen modelliert wurde. Die Ventildynamik wird in das 1D-Kammermodell überführt, um den Gasaustausch zwischen Zylinder und Umgebungsraum präzise zu steuern.

Die Validierung der Simulation erfolgt anhand von Vergleichsdaten aus Herstellerdatenblättern des SLVE18CN Variable Speed Drive Compressors (R290, 208–240 Vac, 50/60 Hz), wobei insbesondere die abgegebene Kompressorleistung über verschiedene Betriebspunkte hinweg betrachtet wird. Zunächst erfolgte die Kalibrierung des Modells auf einen Referenzbetriebspunkt von 4000 U/min. Die Analyse ergab, dass durch die Parametrierung eines Totvolumens von 2,5 % eine signifikante Übereinstimmung mit den Leistungsdaten des Datenblatts erzielt werden konnte. Bei abweichenden Drehzahlen wurden systematische Abweichungen festgestellt. Bei niedrigen Drehzahlen wurde eine tendenziell zu geringe und bei höheren eine leicht überhöhte berechnete Leistung ermittelt. Um diese Abweichungen zu kompensieren, wurden thermische Verluste in Form eines Wärmeentzugs aus dem Zylinder sowie eines gezielten Wärmeeintrags am Auslassrohr modelliert. Die Höhe der Wärmeströme wurde durch parametrische Anpassung so gewählt, dass über den gesamten Drehzahlbereich eine möglichst genaue Übereinstimmung mit den im Datenblatt angegebenen Leistungswerten erreicht wurde.

Abstract

This thesis is dedicated to the 1D modeling and simulation of a reciprocating compressor and its integration into a refrigeration machine using the simulation software Flownex. The aim is to realistically model the complex compression process using a physically based chamber model and to significantly reduce the computing times compared to classic 3D CFD simulations. In addition, the developed compressor model is integrated into a complete refrigeration cycle with the aim of investigating its influence on the overall system behavior.

A particular focus is on the integration of a fluid mechanically characterized reed valve, which was modelled on the basis of previous 3D flow simulations. The valve dynamics are transferred to the 1D chamber model in order to precisely control the gas exchange between the cylinder and the surrounding space.

The simulation is validated using comparative data from manufacturer data sheets for the SLVE18CN Variable Speed Drive Compressor (R290, 208-240 Vac, 50/60 Hz), with a particular

focus on the compressor power output across different operating points. First, the model was calibrated to a reference operating point of 4000 rpm. The analysis showed that by parameterizing a dead volume of 2.5 %, a significant agreement with the performance data of the data sheet could be achieved. Systematic deviations were found at deviating speeds. At low speeds, the calculated power tended to be too low and at higher speeds it was slightly too high. To compensate for these deviations, thermal losses were modeled in the form of heat extraction from the cylinder and targeted heat input at the outlet pipe. The level of the heat flows was selected by parametric adjustment in such a way that the performance values specified in the data sheet were matched as closely as possible over the entire speed range.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	1
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Problemstellung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	3
2. Theoretische Grundlagen.....	4
2.1. Thermodynamische Grundlagen.....	4
2.1.1 Zustandsgrößen und Phasenzustände.....	5
2.1.2 Das log(p)-h-Diagramm.....	6
2.1.3 Leistungszahl und Effizienz.....	7
2.2 Aufbau und Funktionsweise eines Kolbenkompressors.....	7
2.3 Kinematische Grundlagen und Berechnungen.....	11
2.4 Aufbau und Funktionsweise eines Lamellenventils.....	15
2.5 Aufbau und Funktionsweise einer Kältemaschine.....	16
2.6 Grundlagen der Strömungsmechanik.....	17
2.6.1 Erhaltungsgleichungen in einer Rohrkomponente.....	17
2.6.2 Erhaltungsgleichungen in Knoten – bzw. Volumenkomponenten.....	21
2.7 Numerik.....	23
2.7.1 Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen.....	23
2.7.2 Lösungsalgorithmus.....	25
3. Systemmodellierung eines Kolbenkompressors.....	26
3.1 Validierung des Kammermodells.....	26
3.2 Randbedingungen.....	31
3.3 Modellaufbau in Flownex.....	32
3.3.1 Ventilcharakteristik.....	32
3.3.2 Kolbenkompressor - transient.....	37
3.3.3 Kompressor – stationär.....	40
4. Simulationsergebnisse des Kolbenkompressors.....	41
4.1 Kompressormodell - transient.....	41
4.2 Kompressormodell – stationär.....	49
4.3 Vorteile und Grenzen der Modellansätze.....	50
5. Integration in eine Kältemaschine.....	51
5.1 Modellierung des stationären Kältekreislaufs.....	51
5.2 Modellierung des transienten Kältekreislaufs.....	55
6. Simulationsergebnisse der Kältemaschine.....	56
6.1 Stationäre Simulation des Kältekreislaufs.....	56

6.2 Transiente Simulation des Kältekreislaufs	58
6.3 Vergleich der stationären und transienten Simulation.....	61
7. Optimierung	62
7.1 Optimierungsansatz.....	62
7.2 Optimierungsergebnisse	64
7.2.1 Kompressormodell – transient (optimiert)	64
7.2.2 Transiente Simulation des Kältekreislaufs (optimiert).....	65
8. Fazit.....	67
8.1 Zusammenfassung	67
8.2 Ausblick.....	69
9. Literaturverzeichnis.....	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: p-h-Diagramm eines Kältemittels mit markierten Zustandsbereichen [11] .5	5
Abbildung 2: log(p)-h-Diagramm mit idealisiertem Kältekreisprozess [10].....	6
Abbildung 3: Schema eines Kolbenkompressors [19].....	8
Abbildung 4: Kolben des SLVE18CN - Kompressors	9
Abbildung 5: Phasen eines Kolbenkompressors (blau: Ansaugphase; orange: Kompressionsphase; rot: Auslassphase).....	9
Abbildung 6: Kolbenkompressor - SLVE18CN	10
Abbildung 7: Schema der Kolbenbewegung im Zylinder [16, 17]	12
Abbildung 8: Kolbenweg in Abhängigkeit des Kurbelwinkels	14
Abbildung 9: Lamellenventil des SLVE18CN – Kompressors	15
Abbildung 10: Schema eines Lamellenventils [5]	15
Abbildung 11: Schema des Kaltdampfkompansionsprozesses	16
Abbildung 12: Eindimensionales Kontrollvolumen [8]	18
Abbildung 13: Knotenkontrollvolumen mit Ein- und Auslässen [7]	21
Abbildung 14: Schema eines Kontrollvolumens [9]	23
Abbildung 15: Vergleich der numerischen Lösung – Druck.....	29
Abbildung 16: Vergleich der numerischen Lösung – Temperatur	30
Abbildung 17: Kraft über Auslenkung der Ventillamelle (Simcenter STAR-CCM+).....	33
Abbildung 18: Systemaufbau eines Lamellenventils in Flownex.....	33
Abbildung 19: Normierter Öffnungsgrad in Abhängigkeit von der Ventilauslenkung.....	35
Abbildung 20: Kolbenkompressor als Kammermodell in Flownex	38
Abbildung 21: Compound Component des Kolbenkompressors.....	39
Abbildung 22: Aufbau des stationären Kompressormodells (Flownex)	40
Abbildung 23: Leistungsvergleich verschieden kalibrierter Kompressoren.....	42

8. Fazit

8.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein physikalisch fundiertes, transient arbeitendes Kammermodell eines Kolbenkompressors in der 1D-Simulationsumgebung Flownex entwickelt und mit einem vereinfachten stationären Modell verglichen. Die Kalibrierung des Modells erfolgte auf Basis eines Referenzbetriebs bei 4000 rpm, entsprechend dem Datenblatt des SECOP-Kompressors SLVE18CN (R290, 208–240 V, 50/60 Hz), wobei ein Totvolumen von 2,5 % als optimal ermittelt wurde. Der ermittelte Totvolumenanteil von 2,5 % wurde für sämtliche nachfolgenden Simulationen als feste Modellannahme beibehalten, um eine konsistente Bewertung der Modellgüte über verschiedene Betriebspunkte hinweg zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurde die Abweichung zwischen berechneter und datenblattbasierter Kompressorleistung über einen weiten Drehzahlbereich hinweg analysiert. Tabelle 21 fasst die entsprechenden Ergebnisse mit und ohne Optimierungsmaßnahmen zusammen.

Drehzahl [rpm]	Abweichung ohne Optimierung. [%]	Abweichung mit Optimierung. [%]
2200	-9.38	-0.76
2400	-9.56	-0.54
2600	-8.51	0.23
2800	-5.35	0.17
3000	-4.57	-0.09
3500	0.52	0.58
4000	-0.08	0.17
4500	1.02	-0.06

Tabelle 20: Relative Abweichung der Kompressorleistung vor und nach der Optimierung

Die Simulationsergebnisse wiesen anfänglich signifikante Diskrepanzen zwischen dem modellierten und dem realen Kompressorbetrieb auf, wobei diese insbesondere bei niedrigen Drehzahlen ersichtlich wurden. Durch den Einsatz gezielter Optimierungsmaßnahmen, zu denen auch die Modellierung thermischer Verlustquellen in Zylinder und Auslass zählt, konnte die durchschnittliche Leistungsabweichung über den gesamten Drehzahlbereich auf unter 1 % reduziert werden.

Auf Grundlage dieser optimierten Modellergebnisse wurde das überarbeitete Kompressormodell in einen vollständigen Kältekreislauf integriert. Die Auswirkungen dieser Integration sowie die Übereinstimmung zentraler thermodynamischer Kenngrößen mit den Referenzwerten werden exemplarisch in Tabelle 21 für den Betriebspunkt bei 4000 rpm dargestellt.

Parameter	ohne Op.	mit Op.	Datenblatt	Abweichung ohne Op. [%]	Abweichung mit Op. [%]
p_1 [bar]	3,48	3,47	3,45	0,870	0,580
p_2 [bar]	15,34	15,34	15,34	0,000	0,000
T_1 [K]	292,34	292,27	293,15	-0,276	-0,300
T_3 [K]	318,14	318,14	318,15	-0,003	-0,003
T_4 [K]	262,51	263,46	263,15	-0,243	0,118
Q_{zu} [W]	1682,23	1681,91	1709	-1,566	-1,585
P [W]	773,14	779,98	775	-0,240	0,643
COP	2,18	2,16	2,21	-1,357	-2,26

Tabelle 21: Vergleich optimiertes Modell vs. nicht optimiertes Modell

Die Integration des optimierten Kompressormodells in einen vollständigen Kältekreislauf ergab, dass die Modellqualität nicht nur das Verhalten des Kompressors selbst beeinflusst, sondern auch das Zusammenspiel der Systemkomponenten maßgeblich prägt. Die transienten Modellierungen gestatten die Visualisierung dynamischer Effekte wie Druckschwankungen, Rückströmung und zyklische Massenstromverläufe, die mit einem stationären Ansatz nicht abgebildet werden können. Auch systemweite Kenngrößen wie der COP oder die Verdampferleistung reagierten sensibel auf die Genauigkeit der Verdichtermodellierung. Dies unterstreicht die enge Wechselwirkung zwischen Einzelkomponente und Gesamtsystem.

Das stationäre Modell hingegen hat sich insbesondere dann als geeignet erwiesen, wenn schnelle Berechnungen zur Erstabschätzung oder zur Konfiguration idealer Betriebspunkte erforderlich waren. Für die Ausführung dieser Aufgaben bietet es eine robuste und effiziente Grundlage. Es ist jedoch zu beachten, dass die Gültigkeit des Ansatzes in bestimmten Fällen, insbesondere bei der Berücksichtigung zeitabhängiger Prozesse, nichtlinearer Rückkopplungen oder realer Betriebsbedingungen, begrenzt ist. In solchen Fällen erweist sich die transiente Modellierung trotz des höheren Rechenaufwands als vorteilhaft, da sie eine realitätsnahe Analyse und Bewertung des Systemverhaltens ermöglicht.

8.2 Ausblick

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich mehrere Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen und Optimierungen. Ein erster Ansatz besteht in der detaillierteren Modellierung des Einlassventils. Während das Auslassverhalten durch strömungsmechanische Daten bereits gut abgebildet wurde, könnte das Einlassventil ebenfalls auf Basis einer 3D-CFD-Analyse charakterisiert und in das 1D-Modell überführt werden.

Eine weitere Optimierung betrifft die realistischere Abbildung der Wärmeübertragung im Kältekreislauf. In der vorliegenden Arbeit wurden zur Vereinfachung Konvektionselemente eingesetzt. Zukünftig könnten diese durch modellierte Wärmetauscher, beispielsweise Plattenwärmetauscher, ersetzt werden. Eine inkrementelle Auflösung dieser Komponenten würde es ermöglichen, lokale Temperatur- und Druckverläufe entlang des Wärmetauschers zu erfassen. Dies könnte zu einer Reduktion der Rückflüsse und einer präziseren Abbildung des thermodynamischen Verhaltens des Gesamtsystems führen.