



Berlin University of Applied Sciences and Technology

Fachbereich VIII Maschinenbau – Veranstaltungstechnik - Verfahrenstechnik

Masterarbeit

von

Tobias Ehrich

Zur Erlangung
des akademischen Grades

Master of Engineering

im Studiengang
Verfahrenstechnik

Thema:

Systemsimulation einer Kompressionskältemaschine

Betreuerin: Prof. Dr. Anja Paschedag

Betreuer extern: Dr. Andreas Spille

Eingereicht: 31.12.2021

Kurzfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wird mit der 1D-CFD-Systemsimulationssoftware Flownex ein Modell einer Kompressionskältemaschine erstellt. Für die Modellierung der einzelnen Komponenten dienen Messwerte einer Versuchsanlage, die in der Literatur hinreichend dokumentiert ist. Es werden lediglich Messwerte eines Betriebspunktes für die Modellierung verwendet. Ausgehend diesem Auslegungspunkt wird das Kältemittel substituiert und für beide Kältemittel die Betriebspunkte geändert. Die stationären Zustände der verschiedenen Betriebspunkte werden mit den Messwerten der Versuchsanlage verglichen. Die Machbarkeitsstudie zeigt, dass die Abweichungen der Simulation am Auslegungspunkt für beide Kältemittel sich zum größten Teil innerhalb der Messungenauigkeit befinden. Durch die Änderung der Betriebspunkte zeigen sich größere Abweichungen zu den Messwerten. Tendenziell gilt so weiter der Auslegungspunkt entfernt ist, desto größer sind die Abweichungen. Durch die Implementierung eines Geschwindigkeitsprofils des Verdichters und einer Regelung der Überhitzung konnten die Abweichungen verringert werden.

Abstract

In this master thesis, a model of a compression chiller is created using the 1D system simulation software Flownex. For the modeling of the individual components, measured values of a test plant are used, which is adequately documented in the literature. Only measured values of one operating point are used for the modeling. Starting from this design point, the refrigerant is substituted and the operating points are changed for both refrigerants. The steady-state conditions of the different operating points are compared with the measured values of the test plant. The feasibility study shows that the deviations of the simulation at the design point for both refrigerants are mostly within the measurement inaccuracy. Due to the change of the operating points, larger deviations from the measured values can be seen. In general, the further away the design point is, the larger the deviations are. By implementing a speed profile of the compressor and a control of the superheat, the deviations could be reduced.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Nomenklatur.....	IV
1 Einführung.....	1
1.1 Einleitung und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Stand der Technik.....	3
2 Grundlagen.....	5
2.1 Thermodynamik	5
2.1.1 Zustandsgrößen im Nassdampfgebiet.....	8
2.1.2 Zustandsdiagramme.....	10
2.2 Kompressionskältemaschine	11
2.3 Strömungsmechanik von Zweiphasenströmungen.....	14
2.3.1 Erhaltungssätze	14
2.3.2 Konvertierung der Erhaltungssätze in eine Dimension	17
2.3.3 Homogenes Modell	19
2.4 Numerik	20
2.4.1 Diskretisierung	20
2.4.2 Lösungsverfahren	23
3 Modellierung der Kompressionskältemaschine	24
3.1 Versuchsanlage einer Wärmepumpe	24
3.2 Funktionsweise und Modellierung der Komponenten	27
3.2.1 Funktionsweise und Modellierung des Verdichters	27
3.2.2 Funktionsweise und Modellierung des Kondensators	29
3.2.3 Funktionsweise und Modellierung des Expansionsventils	34
3.2.4 Funktionsweise und Modellierung des Verdampfers	36
4 Simulation der Kompressionskältemaschine.....	39
4.1 Simulation des Betriebspunktes $N = 1400 \text{ U/min}$	39
4.2 Simulation der verschiedenen Betriebspunkte	43
4.3 Simulation der verschiedenen Betriebspunkte mit konstanter Überhitzung	50
5 Zusammenfassung	60

5 Zusammenfassung

Die Ausgangssimulation ist anhand des Betriebspunktes $N = 1400$ U/min und dem Kältemittel R134a modelliert. Es hat sich gezeigt, dass die simulierten Zustände des Betriebspunktes sich nahe an den Messwerten befinden und zum größten innerhalb der Messunsicherheit. Durch die Substitution eines alternativen Kältemittels (R152a) in das bestehende Modell, ergaben sich ebenfalls geringe Abweichungen zu den Messwerten, vgl. Tabelle 9. Somit ist das kalibrierte Modell eines Betriebspunktes in der Lage die Zustände mit alternativen Kältemittel an diesem Betriebspunkt mit geringem Fehler berechnen.

Für die Berechnung der anderen Betriebspunkte konnte durch die Implementierung eines Geschwindigkeitsprofils die Simulation verbessert werden. Besonders deutlich ist dies durch den Vergleich der Ansaugdrücke vgl. Abbildung 25 mit Abbildung 30. Daraus folgt das die Randbedingung an der Messstelle p1, die als Initialisierung dient, einen großen Einfluss auf die Simulation hat. Hingegen bei den betrachteten Temperaturen geringe Unterschiede auftreten vgl. Abbildung 24 mit Abbildung 29.

Der berechneten Zustände an der Messstelle p1 weisen keinen konstanten Wert für die Überhitzung auf vgl. Abbildung 32. Hierfür wird eine Regelung der Überhitzung in das System implementiert, mit einer Überhitzung von 6,5 K für das Kältemittel R134a und 5 K für das Kältemittel R152a. In den nachfolgenden Tabellen werden die Abweichungen zwischen den Messwerten und der Simulation mit und ohne Überhitzungsregelung gegenübergestellt. Dabei sind in der Tabelle 12 die relativen Fehler und in der Tabelle 13 die absoluten Fehler aufgelistet.

Tabelle 12: Relative Abweichungen der berechneten Größen von den Messwerten aus der Simulation ohne Überhitzungsregelung (weiß hinterlegt) und der Simulation mit Überhitzungsregelung (grau hinterlegt)

Drehzahl N [U/min]	R134a relative Abweichung [%]					R152a relative Abweichung [%]				
	Tsuc	Tdis	psuc	pdis	m	Tsuc	Tdis	psuc	pdis	m
1200	0,46	0,10	2,55	-0,18	3,59	-0,14	-1,17	5,89	0,93	-1,29
1300	0,43	0,19	0,59	-1,08	1,20	-0,02	-0,30	2,07	-0,67	-2,18
1400	0,61	0,47	-0,98	-1,35	-0,12	0,11	0,20	-1,32	-1,23	0,06
1500	0,53	0,65	-2,68	-1,30	-1,52	0,13	0,59	-3,85	-1,57	4,15
1600	0,52	0,94	-5,30	-1,44	-1,70	0,25	0,94	-6,10	-1,54	8,19
1200	0,50	0,49	1,52	1,50	1,13	0,01	-0,75	0,72	-1,89	2,96
1300	0,39	0,28	2,66	1,55	3,22	0,04	-0,26	-0,11	-2,70	0,67
1400	0,49	0,27	3,95	2,27	5,92	0,09	-0,12	-0,59	-2,47	1,81
1500	0,34	0,20	4,86	3,37	8,46	0,01	-0,10	-0,29	-1,98	4,95
1600	0,25	0,26	4,53	4,28	11,40	0,05	-0,08	-0,19	-1,07	8,12

Tabelle 13: Absolute Abweichungen der berechneten Größen von den Messwerten aus der Simulation ohne Überhitzungsregelung (weiß hinterlegt) und der Simulation mit Überhitzungsregelung (grau hinterlegt)

Drehzahl N [U/min]	R134a absolute Abweichung T[K], p[bar], m[kg/h]					R152a absolute Abweichung T[K], p[bar], m[kg/h]				
	Tsuc	Tdis	psuc	pdis	m	Tsuc	Tdis	psuc	pdis	m
1200	1,28	0,35	0,08	-0,02	27,73	-0,40	-4,07	0,18	0,10	-6,32
1300	1,20	0,65	0,02	-0,14	9,63	-0,05	-1,05	0,06	-0,08	-11,68
1400	1,72	1,61	-0,03	-0,17	-0,95	0,32	0,71	-0,04	-0,14	0,31
1500	1,50	2,25	-0,08	-0,17	-12,78	0,35	2,08	-0,11	-0,18	23,71
1600	1,47	3,28	-0,16	-0,18	-14,59	0,71	3,36	-0,18	-0,18	47,57
1200	1,40	1,68	0,05	0,19	8,70	0,02	-2,62	0,02	-0,21	14,54
1300	1,09	0,96	0,08	0,20	25,77	0,13	-0,90	0,00	-0,30	3,58
1400	1,39	0,95	0,12	0,29	48,71	0,24	-0,41	-0,02	-0,28	10,14
1500	0,95	0,71	0,15	0,43	71,32	0,04	-0,37	-0,01	-0,23	28,24
1600	0,70	0,91	0,14	0,55	97,86	0,14	-0,27	-0,01	-0,12	47,13

Bei der Berechnung mit dem Modell ohne Überhitzungsregelung stellen sich tendenziell die geringsten Abweichungen bei dem Betriebspunkt $N = 1400$ U/min ein. Das ist daran Begründet, dass die Simulation mit den Messwerten an diesem Betriebspunkt ausgelegt ist. So weiter der Auslegungspunkt entfernt ist, desto höher sind die Abweichungen zu den Messwerten. Hingegen bei der Simulation mit konstanter Überhitzung die Abweichungen am geringsten Betriebspunkt eher am niedrigsten ausfallen und mit steigender Drehzahl zunehmen. Durch die Implementierung der Überhitzungsregelung konnten bei dem Kältemittel R152a bessere Ergebnisse erzielt werden als ohne Überhitzungsregelung. Hingegen bei dem Kältemittel R134a durch die Regelung sich größere Abweichungen einstellen, obwohl das Modell anhand des Kältemittels modelliert ist. Als mögliche Ursache kann die nicht berücksichtigten Druckverluste über die Rohrleitungen und den anderen Komponenten sein. Augenscheinlich scheint die Implementierung der Regelung das Modell nicht signifikant zu verbessern. Allerdings verbessert die Implementierung den Trend, das wird deutlich durch die Betrachtung der untersuchten Verläufe. Die Abweichungen sind bei der Simulation mit Regelung fast ausschließlich immer oberhalb bzw. unterhalb der Messwerte. Die Ausnahme betrifft nur den Ansaugdruck bei dem Kältemittel R152a da zwischen den ersten beiden Betriebspunkt ein Vorzeichenwechsel der Abweichungen auftritt.

Durch Berücksichtigung der Druckverluste kann das entwickelte Modell wahrscheinlich die reale Anlage besser nachbilden. Trotzdem ist das Modell in der Lage die Versuchsanlage mit einer gewissen Abweichung darzustellen.