

---

Jakob Hennig

# Virtuelle Prototypen für Lamellenventile in Pkw-Kältemittel- verdichtern



Springer

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	V
Abbildungsverzeichnis . . . . .	IX
Tabellenverzeichnis . . . . .	XIII
Nomenklatur . . . . .	XV
Kurzfassung . . . . .	XXIII
Abstract . . . . .	XXV
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation: Lamellenventile im Pkw-CO <sub>2</sub> -Verdichter . . . . .	1
1.2 Ziele und wissenschaftlicher Fortschritt . . . . .	4
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Stand des Wissens zur Modellierung von Verdichter-Lamellenventilen . . . . .</b>	<b>7</b>
2.1 Grundbegriffe und Grundlagen zur Beschreibung des Ventilverhaltens . . . . .	7
2.1.1 Größen zur Berechnung des Durchflusses . . . . .	7
2.1.2 Größen zur Berechnung der Druckkraft . . . . .	10
2.2 Klassifizierung von Ventilmodellen nach Detaillierungsgrad . . . . .	11
2.2.1 Reine Fluidmodelle . . . . .	13
2.2.2 Reine Struktur-Modelle . . . . .	16
2.2.3 Gekoppelte Modelle (mechanische Zwei-Wege-Kopplung) . . . . .	17
<b>3 Angewandte Simulationsmethoden . . . . .</b>	<b>25</b>
3.1 Numerische Strömungsberechnung mittels Finite-Volumen-Methode . . . . .	25
3.2 Numerische Strukturanalyse mittels Finite-Elemente-Methode . . . . .	31
3.3 Darstellung der Netzbewegung des Strömungsgebietes . . . . .	34
3.3.1 Diskussion verfügbarer Netzbewegungsmethoden . . . . .	34
3.3.2 <i>Overset Mesh</i> -Methode für überlappende Rechengitter . . . . .	37
3.4 Partitionierte FSI-Kopplungsmethode . . . . .	40
3.4.1 Betrachtungsweise nach dem ALE-Ansatz . . . . .	40
3.4.2 Partitionierter, impliziter Kopplungsablauf . . . . .	41
3.5 Voruntersuchungen zu ausgewählten methodischen Schwerpunkten . . . . .	43
3.5.1 Scherschichtströmung: periodisch bewegte Wand . . . . .	45
3.5.2 Spaltströmung: periodisch öffnende und schließende Ventilplatte . . . . .	47
3.5.3 Strömungsablösung und Strukturanregung: Turek-Hron-Benchmark . . . . .	50
<b>4 Validierungsdatenbasis für die Ventilsimulation . . . . .</b>	<b>59</b>
4.1 Beschreibung des Ventilprüfstandes . . . . .	59
4.2 Auswahl und Aufbereitung der Validierungsdaten . . . . .	63
4.2.1 Stationäre Ventilkenmlinien . . . . .	63
4.2.2 Dynamisches Ventilverhalten . . . . .	64
<b>5 Erstellung und Validierung der virtuellen Ventilprototypen . . . . .</b>	<b>69</b>
5.1 FSI-Basismodell . . . . .	69
5.1.1 Geometrie und Rechenetze . . . . .	69

5.1.2	Basis-Simulationseinstellungen . . . . .	73
5.1.3	Nachrechnung der stationären Ventilkennlinien . . . . .	75
5.1.4	Nachrechnung der transienten Verläufe . . . . .	80
5.2	Anpassung der Simulationsparameter anhand transients Validierungsdaten . . . . .	81
5.2.1	CFD-Rechennetz und Randbedingungen . . . . .	82
5.2.2	Fluidseitige Parameter . . . . .	85
5.2.3	Strukturseitige Parameter . . . . .	87
5.2.4	Kopplung und Skalierbarkeit . . . . .	95
5.2.5	Festlegung und Bewertung des angepassten FSI-Simulationssetups . . . . .	98
5.3	Übertragung der validierten Simulationseinstellungen . . . . .	102
5.3.1	Nachrechnung der transienten Validierungsdaten des Saugventils . . . . .	102
5.3.2	Übertragbarkeit auf Betriebsbedingungen eines CO <sub>2</sub> -Verdichters . . . . .	106
<b>6</b>	<b>1D-Modellkalibrierung mittels virtueller Prototypen . . . . .</b>	<b>111</b>
6.1	1D-Referenz-Ventilmodell . . . . .	111
6.2	Virtuelle Ermittlung der 1D-Ventilparameter . . . . .	114
6.2.1	Federkraft . . . . .	114
6.2.2	Ersatzmasse . . . . .	115
6.2.3	Dämpfung . . . . .	117
6.2.4	Effektive Kraft- und Strömungsflächen . . . . .	119
6.3	Nachrechnung der Validierungsmessungen am Ventilprüfstand (Druckventil) . . . . .	125
6.3.1	Stationäre Ventilkennlinie . . . . .	125
6.3.2	Dynamische Auslenkungsverläufe . . . . .	126
6.4	Simulation des Ventilverhaltens im CO <sub>2</sub> -Axialkolbenverdichter . . . . .	128
6.4.1	Einbindung der 1D-Ventilparameter . . . . .	129
6.4.2	Modellannahmen und -vereinfachungen . . . . .	132
6.4.3	Auswertung der Indikatorgramme . . . . .	133
6.4.4	Sensitivitätsanalyse der 1D-Ventilparameter . . . . .	137
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>141</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>147</b>
	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>153</b>
A.1	Technische Grundlagen zum Pkw-CO <sub>2</sub> -Verdichter . . . . .	153
A.1.1	Kohlendioxid als Kältemittel in mobilen Anwendungen . . . . .	153
A.1.2	Verdichterkonzepte für CO <sub>2</sub> -Kälteanlagen . . . . .	155
A.1.3	Ventilbezogene Verlustgrößen . . . . .	158
A.2	Weiterführende Erläuterungen zu Vorbetrachtungen und Einzelstudien . . . . .	163
A.2.1	Periodisch bewegte Wand . . . . .	163
A.2.2	Spaltuntersuchung an der 2D-Ventilplatte . . . . .	165
A.2.3	Turek-Hron-Benchmark . . . . .	168
A.2.4	Modellierung der viskosen Kontaktdämpfung im Ventilspalt . . . . .	177
A.3	FFT-Auswertung der Ventil-Schwingungsverläufe . . . . .	179
A.4	Weiterführende Tabellen . . . . .	181
A.5	Weiterführende Abbildungen . . . . .	184