

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	III
Abstract	V
Vorveröffentlichungen zu dieser Arbeit	VII
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik von trockenlaufenden Schraubenvakuumpumpen	2
1.1.1 Bauformen und Wirkprinzip	2
1.1.2 Arbeitsraumbegrenzende Spalte	7
1.1.3 Strömungsmechanische und thermodynamische Einordnung	9
1.1.4 Simulation von trockenlaufenden Schraubenvakuumpumpen	11
1.1.5 Untersuchung allgemeiner Strömungsformen	12
1.1.6 Spaltströmungen in trockenlaufenden Rotationsverdrängermaschinen	15
1.2 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise	18
2 Grundlagen der Spaltberechnung	21
2.1 Kinetische Gastheorie	21
2.1.1 Eigenschaften perfekter Gase	21
2.1.2 Verteilungsfunktion der Teilchen	23
2.1.3 Momente der Verteilungsfunktion	24
2.1.4 Boltzmann-Gleichung und die Maxwell-Boltzmann-Verteilung	27
2.1.5 Lösungsmethoden der Boltzmann-Gleichungen	28
2.2 Makroskopische Erhaltungsgleichungen	29
2.2.1 Erhaltungsgleichungen in integraler Form	30
2.2.2 Navier-Stokes-Fourier-Gleichung und Transportgrößen	31
2.2.3 Turbulente Strömungen	34
2.2.4 Schlupfströmungen	36
2.2.5 Lösungsmethoden der Navier-Stokes-Fourier-Gleichungen	37
2.2.6 Analytische Lösungen für die Schlupfströmung	39

3	Beschreibung der Spaltströmung	43
3.1	Einordnung der Spaltströmung	44
3.1.1	II-Theorem	44
3.1.2	Lokale strömungscharakterisierende Kennzahlen	48
3.1.3	Ergänzung zu Gasgemischen	49
3.2	Modellierung des eindimensionalen Strömungsbereichs	49
3.2.1	Stationäre Erhaltungsgleichungen	50
3.2.2	Differentialgleichung der Mach-Zahl	55
3.2.3	Ergänzungen zu Gasgemischen	57
3.2.4	Diskussion der Formfaktoren	57
3.3	Zu- und Abströmung	63
3.4	Stoßbetrachtung	64
3.5	Lösungsverfahren für den Spaltmassenstrom	65
4	Spaltströmung mit ausgebildetem Geschwindigkeitsprofil und konstanter Totaltemperatur	69
4.1	Modellierung der Reibung und der Strömungsprofile im Spalt	70
4.1.1	Laminare Couette-Poiseuille-Strömung inklusive des viskosen Geschwindigkeitsschlupfs	72
4.1.2	Laminare Düsen- und Diffusor-Strömung	72
4.1.3	Laminare kompressible Strömungen (inkompressible Ersatzströmung)	75
4.1.4	Schleichende, verdünnte Strömungen	78
4.1.5	Turbulente Strömungen	80
4.1.6	Zusammenführung der Modellierungsansätze	80
4.2	Modellierung der Zu- und Abströmung	81
4.3	Ergebnisse für Spalte in Vakuumpumpen	82
4.3.1	Spalt mit Radiuskontur	82
4.3.2	Spalt mit planarer Kontur	85
4.3.3	Anwendung auf eine Vakuumpumpe	87
4.4	Ergebnisse für Spalte von Schraubenkompressoren	91
4.4.1	Beschreibung der Spaltgeometrie	92
4.4.2	Statische Spaltgeometrien	93
4.4.3	Einfluss der bewegten Wand	96
4.5	Diskussion der lokalen Strömungsgrößen	96
4.6	Zwischenfazit	101
5	Ergänzende Modellierungsansätze	103
5.1	Thermischer Einlauf in einer verdünnten Couette-Poiseuille-Strömung	103
5.1.1	Allgemeine Problemschreibung und Lösungsansatz	104
5.1.2	Poiseuille-Strömung	107
5.1.3	Couette-Strömung	108
5.1.4	Couette-Poiseuille-Strömung	109

5.1.5	Schlupfströmungen	111
5.1.6	Zwischenfazit	115
5.2	Druckverlust im Einlauf einer laminaren Poiseuille-Strömung	115
5.2.1	Zwischenfazit	118
5.3	Nicht-Gleichgewichtsrandbedingung für Ansys-CFX	118
5.3.1	Implementierung in CFX	119
5.3.2	Überschallplattenströmung	121
5.3.3	Radiuspalt mit bewegter Wand	124
5.3.4	Zwischenfazit	126
6	Zusammenfassung und Ausblick	129
	Literatur	139
A	Lösung der Jeffery-Hamel-Strömung	141
B	Eigenwerte und Konstanten für die Bestimmung der dimensionslose Wandwärmestromdichten	143