

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Trockenlaufende Verdrängervakuumpumpen	2
1.1.1	Einordnung der Bauarten	2
1.1.2	Arbeitsprinzip	5
1.1.3	Simulation	7
1.2	Spaltströmung in Vakuumpumpen	9
1.3	Stand der Wissenschaft	10
1.3.1	Methoden zur Berechnung von Spaltströmungen	10
1.3.2	Untersuchungen zu elementaren Strömungsproblemen	13
2	Zielsetzung und Vorgehensweise	17
3	Grundlagen der Spaltströmung	19
3.1	Erhaltungsgleichungen	19
3.1.1	Kontinuumsmechanik	19
3.1.2	Kinetische Gastheorie	22
3.2	Dimensionslose Kennzahlen	24
3.2.1	Π -Theorem	24
3.2.2	Einordnung der Spaltströmung	27
4	DSMC-Methode	32
4.1	Einordnung der DSMC-Methode	32
4.2	Algorithmus der DSMC-Methode	33
4.2.1	Bewegung der Teilchen	35
4.2.2	Randbedingungen	36
4.2.3	Intermolekulare Kollisionen	39
4.2.4	Berechnung makroskopischer Größen	42
5	Eindimensionale Theorie	44
5.1	Ansatz	45
5.2	Bestimmung der Flussraten	47
5.2.1	Kontinuums- und Schlupfströmung	47

5.2.2	Übergangsströmung	49
5.2.3	Freie Molekularströmung	51
5.3	Modell und Simulationsablauf	51
6	Experimentelle Untersuchungen	56
6.1	Versuchsaufbau und Methodik	56
6.1.1	Messtechnik	57
6.1.2	Methoden zur Ermittlung des Massenstroms	59
6.2	Spaltmodell mit statischer Berandung	61
6.2.1	Untersuchte Konturen	63
6.2.2	Äußere Leckage	63
6.2.3	Messunsicherheit	65
6.2.4	Vergleich der Messmethoden für den Spaltmassenstrom	66
6.3	Spaltmodell mit bewegter Berandung	67
6.3.1	Äußere Leckagen	69
6.3.2	Innere Leckagen	70
6.3.3	Messunsicherheit	71
6.3.4	Vergleich der Messmethoden für den Spaltmassenstrom	72
6.3.5	Erweiterung des Messbereichs	73
7	Validierung der Simulationswerkzeuge	76
7.1	Modell der eindimensionalen Theorie	76
7.2	Modell der DSMC-Methode	78
7.2.1	Aufbau der Modelle	78
7.2.2	Variation der Simulationsparameter	81
7.2.3	Dynamische Vernetzung	82
7.2.4	Variation der Teilchen-Wandinteraktion	84
7.2.5	Simulierte Spaltlänge für den Radiusspalt	88
7.3	Ergebnisse der statischen Berandung	90
7.3.1	Variation des Längen zu Höhenverhältnisses	90
7.3.2	Variation des Radius zu Höhenverhältnisses	94
7.3.3	Variation des Druckverhältnisses	95
7.3.4	Variation des Breiten zu Höhenverhältnisses	98
7.4	Ergebnisse der bewegten Berandung	99
7.4.1	Variation der normierten Berandungsgeschwindigkeit	99
7.4.2	Variation des Druckverhältnisses	101
7.4.3	Variation des Radius zu Höhenverhältnisses	107
7.5	Ergebnisse der thermischen Kriechströmung	111
7.6	Fazit der Validierung	113
8	Grenzen der eindimensionalen Theorie	117

8.1	Knudsenzahl	117
8.2	Normierte Berandungsgeschwindigkeit	121
8.3	Druckverhältnis	123
8.4	Temperaturverhältnis	125
8.5	Längen zu Höhenverhältnis	129
8.6	Radius zu Höhenverhältnis	130
8.7	Variation der Gastemperatur	132
8.8	Fazit zur Ermittlung der Grenzen	135
9	Zusammenfassung und Ausblick	138
	Literaturverzeichnis	141
	Anhang	150
A	Flussraten	150
B	Messaufbauten	152
C	Simulierte Spaltlänge beim Radiusspalt	154
D	Messergebnisse	155
D.1	Statische Berandung	155
D.2	Bewegte Berandung	159