

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Verwendete Symbole und Indizes	9
Abstract	15
1. Einleitung	16
1.1 Historische Entwicklung.....	16
1.2 Zweiwellige Rotationsverdrängermaschinen.....	20
1.2.1 Arbeitsspiel.....	20
1.2.2 Spaltverbindungen.....	22
1.2.3 Geometrische und thermodynamische Kennzahlen.....	25
1.3 Stand der Technik.....	30
1.3.1 Trockenlaufende Vakuumpumpen.....	31
1.3.2 Geometrische Modellierung von Rotationsverdrängermaschinen.....	36
1.3.3 Geometrische Berechnung von arbeitsraumbegrenzenden Spaltverbindungen.....	39
1.3.4 Simulation von Rotationsverdränger-Vakuumpumpen.....	42
1.4 Screw Vacuum Blower.....	46
1.5 Ziel der Arbeit.....	51
2. Vorgehensweise in der Softwareentwicklung	53
2.1 Notwendigkeit der Softwaretechnik.....	53
2.2 Qualität von Software.....	54
2.3 Techniken zur Qualitätssicherung.....	55
2.4 Adaption von Werkzeugen und Techniken.....	57
3. Komponenten der Kammermodell-Simulation	59
3.1 Solver (KaSim).....	59
3.1.1 Grundlagen der Füll- und Entleermethode.....	59
3.1.2 Struktur des Zeitschrittverfahrens.....	63
3.1.3 Generalisierung differentieller Verbindungen.....	70
3.1.4 Modellfrequenzabhängige Elemente.....	72
3.1.5 Erweiterung des Konvergenzkriteriums.....	73
3.1.6 Modularisierung der Kennfelddatei.....	75
3.2 Pre-Processing (KaSim-PRE).....	75
3.2.1 Modellierung der Schraubenmaschinengeometrie.....	77
3.2.2 Arbeitskammerzentrisches Modell.....	79
3.2.3 Interaktion mit Systemen der rechnergestützten Entwicklung.....	83
3.3 Post-Processing (KaSim-POST).....	87
3.4 Anwendung und Erweiterung der Simulationsumgebung.....	91

4. Thermodynamische und strömungsmechanische Modellierung.....	97
4.1 Arbeitskammer	97
4.2 Spaltströmung	99
4.2.1 Modellierung auf Basis des normierten Massenstromes	99
4.2.2 Erweiterung der geometrischen Grenzen	104
4.2.3 Temperatur- und Gasartabhängigkeit	109
4.3 Gasrücktransport über Oberflächen	118
4.3.1 Mechanismen der Ad- und Desorption.....	118
4.3.2 Abbildung des Adsorbens als Kapazität.....	123
4.3.3 Abbildung der Sorptionskinetik als differentielle Verbindung	124
4.3.4 Abbildung der Sorptionskinetik als integrale Verbindung.....	131
4.3.5 Definition des Bezugssystems	135
4.3.6 Physikalische Eigenschaften der Material- und Fluidkombination.....	137
4.4 Ladungswechsel	137
4.5 Wärmeübergang.....	139
4.5.1 Arbeitskammer	139
4.5.2 Spalte	141
4.6 Externe Leckagen.....	144
5. Geometrische Berechnung der arbeitsraumbegrenzenden Spaltverbindungen.....	146
5.1 Modellierung der Rotorgeometrie.....	146
5.2 Kollisionsanalyse der Hüllkörperhierarchie.....	147
5.3 Unterteilung der Annäherungsregion.....	149
5.4 Berechnung der Punktepaare der Quasi-Eingriffslinie	152
6. Geometrische Analyse und Modellierung	157
6.1 Identifikation der Arbeitskammern	157
6.1.1 Bauteilbezogene Stirnschnittanalyse	159
6.1.2 Synthese der Arbeitskammern in diskreten Rotorstellungen.....	164
6.1.3 Drehwinkelabhängige Identifikation der Arbeitskammern	166
6.1.4 Berechnung der Arbeitskammervolumina.....	168
6.1.5 Einfluss der Spaltverbindungen auf das Arbeitskammervolumen	173
6.2 Identifikation der Spaltverbindungen.....	176
6.2.1 Gehäuse- und Profileingriffsspalt	176
6.2.2 Stirnspalte	179
6.2.3 Berechnung von Spaltparametern.....	182
6.2.4 Berücksichtigung von Bauteilverformungen durch Verschiebungsfelder.....	196
6.3 Identifikation der Kammerverbindungen zwischen Haupt- und Nebenrotor.....	200
6.3.1 Gemeinsame Flächen des virtuellen Gehäuses.....	201
6.3.2 Heuristische Festlegung der Kopfrundungsöffnung.....	205

6.3.3	Weitere Möglichkeiten zur Berechnung der Kopfrundungsöffnung	207
6.4	Identifikation von Gehäuseöffnungsflächen	208
6.4.1	Radiale Flächen	208
6.4.2	Axiale Flächen	213
6.5	Identifikation der Grenzfläche des Adsorbens	217
6.5.1	Ermittlung der Grenzflächen im Bezugssystem der Arbeitskammer	218
6.5.2	Ermittlung der Transferflächen im Absolutsystem	220
6.6	Identifikation und Parametrisierung des konvektiven Wärmeübergangs	224
6.6.1	Parametrisierung der erzwungenen Konvektion.....	225
6.6.2	Modellierung der Bauteiloberflächen als Wärmekapazität	228
6.7	Identifikation der Lagerräume und ihrer Verbindung zu Arbeitskammern	230
6.7.1	Abschätzung der Lagerraumvolumina.....	230
6.7.2	Ermittlung der Spaltverbindungsgeometrie.....	232
6.8	Identifikation druckbelasteter Rotoroberflächen	234
6.8.1	Modellierung der Rotoren als Starrkörper.....	234
6.8.2	Berechnung der druckbezogenen Kräfte und Momente	236
6.9	Identifikation der relevanten Rotorkrümmungen.....	239
7.	Kennfeldanalyse einer ausgewählten Schraubenvakuumpumpe.....	241
7.1	Versuchsaufbau	241
7.1.1	Eingesetzte Messtechnik.....	242
7.1.2	Externe Leckagen	247
7.1.3	Betriebsparameter	249
7.1.4	Randbedingung der isothermen Maschine	249
7.2	Maximales Kompressionsverhältnis	251
7.2.1	Einfluss des Vorvakuumdruckes	251
7.2.2	Einfluss der Drehzahl	257
7.3	Saugvermögen.....	262
7.3.1	Einfluss des Eintrittsdruckes	262
7.3.2	Einfluss des Vorvakuumdruckes	267
7.3.3	Einfluss der Drehzahl	271
8.	Validierung der thermodynamischen Simulation	276
8.1	Modellierung des Screw Vacuum Blowers.....	276
8.2	Maximales Kompressionsverhältnis	279
8.3	Saugvermögen.....	283
8.4	Leistungsaufnahme	286
8.5	Variation der Stirnspalthöhe	290
8.6	Untersuchung des Lagerraumdruckes	293
8.7	Druckindizierung des Arbeitsraumes.....	297

8.8 Spaltströmungen bei fixierten Rotoren	303
9. Analyse und Evaluierung der physikalisch-technischen Wirkmechanismen	310
9.1 Interne Leckagen.....	310
9.2 Ladungswechsel	328
9.3 Gastemperaturen	331
9.4 Mechanische Belastung in der Rotorverzahnung.....	334
10. Zusammenfassung.....	338
Literaturverzeichnis.....	341