

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
2 Grundlagen und Theorie	9
2.1 Arbeitsstoffpaare	9
2.1.1 Lösungsfelder	9
2.1.2 Vor- und Nachteile der Stoffsysteme Wasser/LiBr, Wasser/Lauge und Ammoniak/Wasser	11
2.2 Funktionsprinzip von Absorptionswärmepumpen	12
2.2.1 Einstufige Absorptionswärmepumpe	13
2.2.2 Zweistufige Absorptionswärmepumpen	15
2.2.2.1 Double-effect Maschine	15
2.2.2.2 Double-lift Maschine	16
2.2.3 Eine umschaltbare zweistufige Absorptionswärmepumpe	17
2.3 Berechnung des Wärmepumpen- Prozesses	18
2.3.1 Anzahl der freien Parameter	18
2.3.2 Numerische Methode zur Berechnung des Wärmepumpen- Prozesses	20
3 Auslegung einer Absorptionswärmepumpe	23
3.1 Wärmetauscherflächen und spezifischer Lösungsumlauf	23
3.1.1 Berechnung der erforderlichen Wärmetauscherflächen	24
3.1.2 Der spezifische Lösungsumlauf	25
3.1.2.1 Abhängigkeit des COP vom spezifischen Lösungsumlauf	25
3.1.2.2 Der spezifische Lösungsumlauf bei Teillast	29
3.1.2.3 Wahl des spezifischen Lösungsumlaufs bei Vollast	30
3.1.3 Optimierung der Flächenverteilung und des Lösungsumlaufs	31
3.2 Auslegung der Wärmetauscher	33
3.2.1 Externer Wärmetübergang vom Wärmeträger auf die Rohrwand	33
3.2.2 Interner Wärme- und Stoffübergang	36
3.2.3 Leistungsverteilung im Wärmetauscher	38
3.2.4 Lösungswärmetauscher	43
3.3 Vakuumsystem	43
3.3.1 Wahl der Absaugstelle	44
3.3.2 Pumpen zum Absaugen der Inertgase	46
3.4 Anfahren, Gefrier- und Kristallisationsschutz einer Absorptionswärmepumpe	46

3.4.1 Anfahren	47
3.4.2 Gefrier- und Kristallisationsschutz	47
3.5 Einfluß der Umwälzpumpenleistung auf die Primärenergieausnutzung einer Absorptionswärmepumpe	48
4 Verfahren zur Meßdatenauswertung	51
4.1 Auswertung stationärer Arbeitspunkte	51
4.1.1 Definition eines stationären Punktes	51
4.1.2 Redundanz der Meßgrößen	54
4.1.3 Das wahrscheinlichste Meßergebnis	55
4.1.4 Skizze eines Rechenprogramms zur Meßdatenauswertung	56
4.1.5 Abschätzung der Fehlergrenzen	58
4.2 Berechnung von Wärmedurchgangskoeffizienten	62
5 Experimentelle Untersuchungen im Labor	65
5.1 Motivation	65
5.2 Wärmeübergänge	65
5.2.1 Wärme und Stoffübergang	65
5.2.2 Aufbau einer Apparatur zur Messung von Wärmeübergängen	67
5.2.3 Auswertung der Messungen	71
5.2.4 Meßergebnisse ohne Additive	74
5.2.5 Meßergebnisse mit Additiven	78
5.3 Einfluß von Restgasen	84
5.4 Lösungsverteilungen	85
5.4.1 Lösungsverteilung mit Lochblechen	86
5.4.2 Lösungsverteilung mit Düsen	87
5.5 Aufbau einer Laboranlage mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser/Lauge	89
5.5.1 Auslegung und Aufbau	89
5.5.2 Meßergebnisse	91
5.5.3 Messungen mit einem Additiv	95
5.5.4 Betriebserfahrungen	96
6 Die Absorptionswärmepumpe für die Flugwerft Schleißheim	97
6.1 Anforderungen	100
6.1.1 Wärmebedarf	100
6.1.2 Das Heiz- und Versorgungssystem	102
6.2 Regelung der Wärmepumpe	103

6.2.1	Regelungstechnische Einbindung der Wärmepumpe in das Versorgungssystem der Flugwerft	103
6.2.2	Regelung der Wärmepumpe	104
6.3	Thermodynamische Auslegung der Wärmepumpe	105
6.3.1	Kennfeld für die Wärmeleistungen	105
6.3.2	Wärmetauscher-Flächen und Flächenverteilung	107
6.4	Hydrodynamische Auslegung der Wärmetauscher	109
6.4.1	Wärmeträger	109
6.4.2	Interne Wärmeübertragung	110
6.4.2.1	Die Wärmetauscherrohre	110
6.4.2.2	Die Lösungs- und Kondensataufgabe	110
6.4.3	Die Lösungswärmetauscher	113
6.5	Vakuumsystem	115
6.6	Anfahren, Gefrier- und Kristallisationsschutz	115
6.6.1	Anfahren der Maschine	115
6.6.2	Gefrier- Kristallisations- und Überlauf-Schutz	116
6.7	Konstruktionsmaterialien	116
6.8	Meßtechnik	117
6.8.1	Temperaturmessung	117
6.8.2	Volumenflußmessung	117
6.8.3	Massenfluß und Dichte - Messung	118
6.8.4	Druckmessung	119
6.8.5	Leistungsmessung	120
7	Messungen an der Wärmepumpe der Flugwerft Schleißheim	121
7.1	Auswertung stationärer Arbeitspunkte	121
7.1.1	Auswahl der stationären Punkte	121
7.1.2	Die gemessenen Größen	122
7.1.3	Redundanz der Meßgrößen	123
7.1.4	Auswertung eines stationären Punktes	125
7.2	Wärmeverhältnis und Primärenergienutzungsrate	135
7.2.1	Wärmeverhältnis COP und Teillastverhalten vor Umbau der Lösungswärmetauscher	135
7.2.2	Wärmeverhältnis COP, Primärenergienutzungsrate PER und Teillastverhalten nach Umbau der Lösungswärmetauscher	139
7.2.3	Zahlenwerte für COP und PER für einige Betriebspunkte	142
7.3	Wärmeübergangskoeffizienten	144
7.4	Abschätzung der Fehlergrenzen	145
7.5	Lastgangkurven	149

7.5.1 Auswerteverfahren	149
7.5.2 Lastgangkurven	151
8 Vergleich verschiedener Wärme- und Kälteversorgungs- Systeme für die Flugwerft Schleißheim	154
8.1 Anforderungen	154
8.1.1 Winterbetrieb	154
8.1.2 Sommerbetrieb	156
8.1.3 Brauchwassererwärmung	156
8.1.4 Rahmenbedingungen in Schleißheim	157
8.2 Vergleich verschiedener Heiz- und Kühlsysteme für die Flugwerft Schleißheim	157
8.2.1 Absorptionswärmepumpen mit dem Stoffsystem Wasser/LiBr	159
8.2.1.1 Umschaltbare Double-Effect/Double-Lift Absorptionswärmepumpe (Pilotanlage Schleißheim)	161
8.2.1.2 Double-Effect Absorptionswärmepumpe und Heizkessel	163
8.2.1.3 Spezielle single-effect Maschine	165
8.2.2 Kompressionswärmepumpen	166
8.2.2.1 Gasmotorisch angetriebene Kompressionswärmepumpe	168
8.2.2.2 Elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpe	169
8.2.3 Absorptionswärmepumpe mit anderen Stoffpaaren	170
8.2.3.1 Absorptionswärmepumpe mit dem Stoffpaar Wasser/Lauge	170
8.2.3.2 Absorptionswärmepumpe mit dem Stoffpaar Ammoniak/Wasser	171
8.3 Energieeinsparung	172
8.3.1 Einsparpotential der Versorgungsmöglichkeiten	172
8.3.2 Primärenergieeinsparung der Pilotanlage beim tatsächlichen Wärmebedarf der Flugwerft	173
9 Zusammenfassung und Ausblick	175
10 Nomenklatur	179
11 Literaturverzeichnis	183
Anhang	189
A1 Anhang zu Kapitel 2	189
A2 Anhang zu Kapitel 5	195
A3 Anhang zu Kapitel 6	196
A4 Anhang zu Kapitel 7	197
A5 Anhang zu Kapitel 8	203