

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Mehrquellen-Wärmepumpensysteme in Forschung und Praxis	4
1.2.1 Solebasiert mit einem gemeinsamen Kältekreis (1V).....	7
1.2.2 Zwei Verdampfer in einem Kältekreis (2V)	8
1.2.3 Zwei Kältekreise (2WP).....	9
1.3 Neuartigkeit und Abgrenzung.....	9
1.4 Fragestellung und Zielsetzung	11
1.5 Struktur der Arbeit.....	12
2 Grundlagen.....	15
2.1 Bewertung von Wärmepumpensystemen	15
2.2 Wärmequelle Außenluft.....	17
2.2.1 Reifbildung	17
2.2.2 Abtauung	18
2.2.3 Bewertung der Abtauung.....	20
2.3 Wärmequelle Erdreich.....	21
2.3.1 Frost-Tau-Wechsel	22
2.3.2 Künstliche Regeneration des Erdreichs.....	23
2.4 Fallstudie	24
Teil A Prototypentwicklung mit experimentellen und theoretischen Voruntersuchungen.....	29
3 Prototypentwicklung	31
3.1 Anforderungen und resultierende Betriebszustände	33
3.2 Wärmequellenhydraulik	35
3.3 Wärmequellenregelung.....	38
3.3.1 Bedingungen der Schaltwegmatrix	38
3.3.2 Schaltwegmatrix: Auswahl des Betriebsmodus.....	40
3.3.3 Umsetzung in Python	40
4 Experimentelle Versuche zur Bereifung und Abtauung am Luft/Sole-Wärmeübertrager	43
4.1 Versuchsaufbau und Methodik	43
4.2 Qualitativer Versuchsablauf bei Bereifung und Abtauung	46

4.2.1	Diskussion der Luftbilanz	47
4.2.2	Phasen der Bereifung und Abtauung	48
4.3	Versuchsergebnisse zur Bereifung	51
4.3.1	Einfluss der Luftgeschwindigkeit	51
4.3.2	Einfluss von Lufttemperatur und Luftfeuchte	54
4.3.3	Berechnung	56
4.4	Versuchsergebnisse zur Soleabtauung	59
4.4.1	Einfluss von Sole- und Lufttemperatur	59
4.4.2	Einfluss der Reifmasse	61
4.4.3	Schmelzwasser-Rückstände, Inversbetrieb und Zyklusverhalten	62
4.4.4	Abtaurate und Abtaudauer	65
4.5	Erkenntnisse für den Betrieb im Wärmepumpensystem	67
4.5.1	Bereifender Betrieb	67
4.5.2	Machbarkeit und Grenzen der Niedertemperatur- Soleabtauung	69
5	Simulation des Mehrquellen-Wärmepumpensystems	71
5.1	Heizsystemmodell des Mehrquellen-Wärmepumpensystems	72
5.1.1	Modellansatz	72
5.1.2	Regelung von Wärmeerzeugern und Wärmeabgabe	74
5.2	Submodelle und Modellinputs	74
5.3	Methodisches Vorgehen	78
5.3.1	Referenzsysteme	78
5.3.2	Hydraulik- und Regelungsvarianten sowie Quellendimensionierung	79
5.3.3	Kosten- und Emissionsbewertung	81
5.3.4	Strom- und Gasverbrauch	83
5.3.5	Jährliche Kosten und äquivalente CO ₂ -Emissionen	84
5.4	Optimale MQWPS-Variante und Quellendimensionierung	85
5.4.1	Machbarkeit der teillastdimensionierten EWS	88
5.4.2	Erdreichtentlastung im MQWPS	89
5.4.3	Jahresarbeitszahl	91
5.4.4	Wärmegestehungskosten	92
5.4.5	CO ₂ -Vermeidungskosten	94
5.4.6	Sensitivitätsanalyse	95
5.5	Fazit	98

Teil B Proof of Concept: Mehrquellen-Wärmepumpensystem im Feldversuch	101
6 Feldtestanlage	103
6.1 Wärmeerzeuger	104
6.2 Senkenhydraulik und -regelung	105
6.3 Wärmequellenhydraulik	107
6.4 Wärmequellen	111
6.4.1 Erdwärmesonden	111
6.4.2 Luft/Sole-Wärmeübertrager	113
6.5 Witterungsbedingungen	116
7 Experimentelle Analyse	119
7.1 Messtechnische Untersuchung und Energiebilanzen des Heizungssystems	120
7.2 Charakterisierung der Wärmesenke	121
7.2.1 Gesamtauswertung	122
7.2.2 Monatsweise Analyse	124
7.2.3 Wärmesenkentemperaturen	127
7.2.4 Anteile der Wärmeerzeuger	128
7.2.5 Effizienz und äquivalente CO ₂ -Emissionen	129
7.2.6 Betriebsdauer der Wärmepumpen	130
7.3 Charakterisierung des Mehrquellen-Wärmepumpensystems	134
7.3.1 Gesamtauswertung	135
7.3.2 Monatsweise Analyse	139
7.3.3 Primärtemperaturen und Arbeitszahl	142
7.3.4 Zeitreihenanalyse	144
7.3.5 Wärmeaustausch zwischen den Quellen	145
7.4 Fazit	148
8 Diskussion und Einordnung der Ergebnisse	151
8.1 Gegenüberstellung Simulation und Feldtest	151
8.2 Einordnung des MQWPS in den Kontext der Literatur	154
8.3 Potentiale und Herausforderungen der Praxiseinführung	157
9 Fazit	161
9.1 Zusammenfassung	161
9.2 Einordnung und Ausblick	163
9.3 Schlussfolgerung	164
Danksagung	165
Publikationsliste	167
Literaturverzeichnis	171
Abkürzungsverzeichnis	191

Symbolverzeichnis.....	193
Abbildungsverzeichnis.....	197
Tabellenverzeichnis.....	207
A Textanhang.....	211
A.4 Experimentelle Versuche zur Bereifung und Abtauung am Luft/Sole-Wärmeübertrager	211
A.4.1 Experimenteller Aufbau	211
A.4.2 Methodik	214
A.2 Simulation des Mehrquellen-Wärmepumpensystems	219
A.2.1 Modell Luft/Sole-WÜT	219
A.2.2 Einfluss der Diskretisierung	219
A.2.3 Trockene Kalibrierung der Wärmeübergangskoeffizienten	220
A.2.4 Bereifende Kalibrierung: Stoffübergangskoeffizient und Verblockungsrate	222
A.3 Feldtestanlage.....	225
A.3.1 Messstellen und Datenerfassung	225
A.3.2 Bereitschaft von Aktoren, Messtechnik und Messdaten.....	228
A.3.3 Messunsicherheit	230
A.3.4 Bestimmung der Wärmeabgabe des Gasbrennwertgeräts	233
A.3.5 Bilanzierung anhand von Spitzenlastmischer und WMZ.....	234
A.3.6 Unsicherheit der gefilterten quellenseitigen Wärmemengen...	236
A.4 Experimentelle Analyse.....	237
A.4.1 Betriebsverbesserung der Senkenregelung	237
A.4.2 Reduktion Spitzenlastbeimischung Heizkreis (Maßnahme 1)...	240
A.4.3 Absenkung der Heizkurve (Maßnahme 2)	242
A.4.4 Verbesserung des Trinkwarmwasser-Betriebs	245
A.4.5 Einfluss der Hilfsenergie.....	251
A.4.6 Qualitative Analyse des Betriebsverhaltens	252
A.4.7 Wärmequelle Außenluft: Abtauung des Luft/Sole-Wärmeübertragers	261
A.4.8 Wärmequelle Erdreich	271
A.5 Diskussion und Einordnung der Ergebnisse	277
B Abbildungsanhang	279
C Tabellenanhang	283