

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>15</b>
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 Erreich .....	21
2.3.1 Frost-Tau-Wechsel .....	22
2.3.2 Künstliche Regeneration des Erreichs.....	23
2.4 Fallstudie .....	24
<b>Teil A Prototypentwicklung mit experimentellen und theoretischen Voruntersuchungen</b> .....	<b>29</b>
<b>3 Prototypentwicklung</b> .....	<b>31</b>
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
<b>4 Experimentelle Versuche zur Bereifung und Abtauung am Luft/Sole-Wärmeübertrager</b> .....	<b>43</b>
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 Abtaung .....	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	Beregnung .....	56
4.4	Versuchsergebnisse zur Soleabtaung .....	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	Abtaurrate 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- Soleabtaung .....	69
<b>5</b>	<b>Simulation des Mehrquellen-Wärmepumpensystems .....</b>	<b>71</b>
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 <sub>2</sub> -Emissionen .....	84
5.4	Optimale MQWPS-Variante und Quellendimensionierung .....	85
5.4.1	Machbarkeit der teillastdimensionierten EWS .....	88
5.4.2	Erdreichentlastung im MQWPS .....	89
5.4.3	Jahresarbeitszahl .....	91
5.4.4	Wärmegestehungskosten .....	92
5.4.5	CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten .....	94
5.4.6	Sensitivitätsanalyse .....	95
5.5	Fazit .....	98

<b>Teil B Proof of Concept: Mehrquellen-Wärmepumpensystem im Feldversuch .....</b>	<b>101</b>
<b>6 Feldtestanlage .....</b>	<b>103</b>
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
<b>7 Experimentelle Analyse .....</b>	<b>119</b>
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 <sub>2</sub> -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
<b>8 Diskussion und Einordnung der Ergebnisse .....</b>	<b>151</b>
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
<b>9 Fazit .....</b>	<b>161</b>
9.1 Zusammenfassung .....	161
9.2 Einordnung und Ausblick .....	163
9.3 Schlussfolgerung .....	164
<b>Danksagung .....</b>	<b>165</b>
<b>Publikationsliste .....</b>	<b>167</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>171</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>191</b>

<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>193</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>197</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>207</b>
<b>A Textanhang.....</b>	<b>211</b>
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>B Abbildungsanhang .....</b>	<b>279</b>
<b>C Tabellenanhang .....</b>	<b>283</b>