

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>II</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1 Wärmepumpensysteme in Mehrfamilienhäuser . . . . .	1
1.2 Ziel und Struktur der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Mehrfamilienhaus</b>	<b>4</b>
<b>3 Heizungssysteme mit Wärmepumpe in Mehrfamilienhäusern</b>	<b>6</b>
3.1 Heizungssystem „WoSta mit integriertem DLE-E“ . . . . .	7
3.2 Heizungssystem „zentrale FriWa, WP mit Heizstab“ . . . . .	9
3.3 Heizungssystem „zentrale FriWa mit DLE-E“ . . . . .	10
3.4 Heizungssystem „zentrale FriWa, TWW über BW-H“ . . . . .	10
3.5 Heizungssystem „zentrale FriWa, TWW über WP u. BW-H“ . . . . .	12
3.6 Heizungssystem „dezentrale DLE-E“ . . . . .	12
3.7 Übersicht der betrachteten Heizungssysteme . . . . .	14
<b>4 Simulationsverfahren</b>	<b>17</b>
<b>5 Hydraulische Simulationsmodelle</b>	<b>19</b>
5.1 Pumpen . . . . .	19
5.2 Rohrnetzberechnung . . . . .	21
5.2.1 Grundlagen der Rohrhydraulik . . . . .	22
5.2.1.1 Kontinuitätsgleichung . . . . .	22
5.2.1.2 Energieerhaltungssatz nach Bernoulli . . . . .	23
5.2.1.3 Druckverlusthöhen . . . . .	24
5.2.2 Grundlagen der Rohrnetzberechnung . . . . .	27
5.2.2.1 Knoten . . . . .	27
5.2.2.2 Stränge . . . . .	28
5.2.2.3 Rohrleitungswiderstand . . . . .	29
5.2.2.4 Widerstand von Thermostatventilen . . . . .	30
5.2.2.5 Widerstand von Differenzdruckreglern . . . . .	30
5.2.3 Auswahl eines Verfahrens zur hydraulischen Rohrnetzberechnung . . . . .	30
5.2.3.1 Das Knoten-Verfahren . . . . .	33

5.3	Thermostatische Ventile . . . . .	39
5.3.1	Wärmeübertrager-Kennlinie und a-Wert . . . . .	40
5.3.2	Ventilkennlinien, $K_V$ -Werte und Ventilautoritäten . . . . .	41
5.3.3	Streckenkennlinien . . . . .	42
5.3.4	Proportionalbereich von Thermostatventilen im Auslegungsfall . . . . .	43
5.3.5	Thermostatische Heizungsventile . . . . .	45
5.4	Zapfprofil . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Thermische Simulationsmodelle</b>	<b>49</b>
6.1	Thermodynamische Grundlagen . . . . .	49
6.1.1	Wärmeleitung (Konduktion) . . . . .	50
6.1.2	Konvektiver Wärmeübergang . . . . .	51
6.1.3	Wärmedurchgang . . . . .	53
6.1.4	Strahlung . . . . .	54
6.1.5	Wärmespeicherung . . . . .	55
6.2	Rohrmodell . . . . .	56
6.3	Wärmepumpenmodell . . . . .	64
6.4	Modell eines Gas-Brennwertheizgeräts . . . . .	67
6.5	Pufferspeicher . . . . .	78
6.6	Plattenwärmeübertrager . . . . .	84
6.7	Heizkörper . . . . .	88
6.8	Elektrischer Durchlauferhitzer . . . . .	91
6.9	Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung . . . . .	92
6.10	Gebäudesimulation . . . . .	93
6.10.1	Referenzlastprofilen der VDI-Richtlinie 4655 . . . . .	94
6.10.2	Tageszeitabhängige Außentemperaturverläufe . . . . .	97
6.10.3	Jahreszeitabhängiger Trinkwassertemperaturverlauf . . . . .	101
<b>7</b>	<b>Kombinierte Simulationsmodelle</b>	<b>103</b>
7.1	Wohnungsstation mit elektrischer Nacherwärmung . . . . .	103
7.1.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	103
7.1.2	Komponentenauslegung . . . . .	104
7.2	Zentrale Frischwasserstation . . . . .	107
7.2.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	107
7.2.2	Komponentenauslegung . . . . .	107
<b>8</b>	<b>Aufbau der Simulationsumgebung</b>	<b>111</b>
<b>9</b>	<b>Abschätzung der Investitionskostendifferenzen</b>	<b>115</b>
<b>10</b>	<b>Simulationsergebnisse</b>	<b>119</b>
10.1	Ergebnisdiagramme . . . . .	119
10.2	Simulationsergebnis „WoSta mit integriertem DLE-E“ . . . . .	121

10.3 Simulationsergebnis „zentrale FriWa, WP mit Heizstab“ . . . . .	123
10.4 Simulationsergebnis „zentrale FriWa mit DLE-E“ . . . . .	124
10.5 Simulationsergebnis „zentrale FriWa, TWW über BW-H“ . . . . .	126
10.6 Simulationsergebnis „zentrale FriWa, TWW über WP u. BW-H“ . . . . .	127
10.7 Simulationsergebnis „dezentrale DLE-E“ . . . . .	128
10.8 Vergleich der Energiekosten und Amortisationsdauer . . . . .	129
<b>11 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>132</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>
<b>Anhang</b>	<b>142</b>
<b>A Ergebnisdiagramme Wärmepumpe</b>	<b>143</b>
<b>B Parameter der Heizkreispumpen</b>	<b>154</b>
<b>C Parameter der Wärmepumpen</b>	<b>155</b>
<b>D Rohrnetzpläne der betrachteten Heizungssysteme</b>	<b>156</b>
<b>E Regressionskoeffizienten der Außentemperaturverläufe</b>	<b>158</b>