

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemein . . . . .	1
1.2	Digitale Zwillinge . . . . .	2
<b>2</b>	<b>IT-Architektur</b>	<b>5</b>
2.1	FIWARE . . . . .	5
2.1.1	Context Broker Orion . . . . .	5
2.1.2	FIWARE IoT-Agent . . . . .	5
2.2	Anbindung an die Glen Dimplex Infrastruktur . . . . .	6
2.2.1	MQTT . . . . .	6
2.2.2	Datenaustausch über eine MQTT-Bridge . . . . .	7
2.3	Umsetzung des Digitalen Zwillings - WebUI . . . . .	8
2.4	Anbindung des Digitalen Zwillings . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Modellierung</b>	<b>13</b>
3.1	Einleitung . . . . .	13
3.1.1	Thermische Gebäudesimulation . . . . .	13
3.1.2	Thermische Gebäude- und Anlagensimulation . . . . .	14
3.1.3	Strömungssimulation . . . . .	14
3.2	Prozesscharakter der Modellbildung und Simulation . . . . .	14
3.3	Modellbildung . . . . .	17
3.3.1	Modelleigenschaften und Modellklassen . . . . .	17
3.3.2	Theoretisch begründete Modelle . . . . .	18
3.3.3	Empirische Modelle . . . . .	20
3.3.4	Halbempirische Modelle . . . . .	21
3.3.5	Algorithmische Modelle . . . . .	22
3.4	Modellbildung - Digitale Zwillinge . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Grundlagen - Wärmepumpe</b>	<b>23</b>
4.1	Thermodynamische Grundlagen - Wärmepumpen . . . . .	23
4.1.1	Berechnungsgang - Kreisprozess Wärmepumpe . . . . .	26
4.1.2	Programmablaufplan - Kreisprozess Wärmepumpe . . . . .	31
4.1.3	Kreislaufumkehr - Abtauung/ Kühlbetrieb . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Teilmodelle - Wärmepumpe</b>	<b>35</b>
5.1	Verdampfer und interner Wärmeübertrager . . . . .	35
5.1.1	Literaturanalyse . . . . .	35
5.1.2	Verdampfer stationär - 2 Zonen . . . . .	37
5.1.3	Verdampfer instationär - finite Elemente . . . . .	43
5.1.4	Interner Wärmeübertrager - stationär, 2 Zonen . . . . .	45
5.2	Verdichter . . . . .	48
5.2.1	Literaturanalyse . . . . .	48
5.2.2	Verdichter - Static Scroll Compressor Modell 1 . . . . .	49
5.2.3	Verdichter - Static Scroll Compressor Modell 2 . . . . .	51
5.2.4	Verdichter - Static Scroll Compressor Modell 3 . . . . .	53
5.2.5	Verdichter - dynamischer Betrieb . . . . .	54
5.3	Kondensator . . . . .	55
5.3.1	Literaturanalyse . . . . .	55

5.3.2	Kondensator stationär - 3 Zonen . . . . .	55
5.3.3	Kondensator instationär - finite Elemente . . . . .	61
5.4	Expansionsventil . . . . .	63
5.4.1	Literaturanalyse . . . . .	63
5.4.2	Expansionsventil - Ideal Expansion Valve Model . . . . .	66
5.4.3	Expansionsventil - Electronic Expansion Valve . . . . .	67
5.5	Regelung . . . . .	70
5.5.1	Regelung der Überhitzung . . . . .	70
5.5.2	Wärmepumpenregelung . . . . .	71
5.6	Frostbildung und Abtauung . . . . .	72
5.7	Rohrleitungen . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Versuchsstand</b>	<b>75</b>
6.1	Versuchsstand TUD . . . . .	75
6.2	Versuchsstand GDD . . . . .	76
<b>7</b>	<b>Validierung und Anwendertests</b>	<b>79</b>
7.1	Anwendertest . . . . .	79
7.2	Validierung . . . . .	80
7.2.1	Prüfung - LA 9S-TUR . . . . .	80
7.2.2	Referenzmessdaten . . . . .	80
7.2.3	Verdichter . . . . .	82
7.2.4	Wärmeübertrager . . . . .	83
7.2.5	Expansionsventil . . . . .	86
7.2.6	Vereinfachter Kreisprozess - Validierung mit Labordaten . . . . .	87
7.2.7	Vereinfachter Kreisprozess - Validierung mit Felddaten . . . . .	90
<b>8</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>93</b>
8.1	Use Cases . . . . .	93
8.1.1	<i>Regelung</i> . . . . .	93
8.1.2	<i>Autokalibrierung</i> . . . . .	95
8.2	Technische Realisierung des Digitalen Zwillings . . . . .	96
8.2.1	MQTT Befähigung realer Wärmepumpen . . . . .	96
8.2.2	Adaption des IoT-Agents . . . . .	97
8.2.3	Webbasiertes DZWi-Userinterface . . . . .	97
8.2.4	Programmtechnische Umsetzung via Python . . . . .	98
8.2.5	Komponenten- und Unit-Tests . . . . .	98
8.3	Kopplung des Digitalen Zwillings mit einer realen Wärmepumpe . . . . .	99
8.4	Kopplung des Digitalen Zwillings mit einer Simulation . . . . .	103
8.5	Kreislaufumkehr . . . . .	105
<b>9</b>	<b>Wissenstransfer</b>	<b>107</b>
9.1	Allgemein . . . . .	107
9.1.1	Homepage . . . . .	107
9.1.2	Wiki . . . . .	109
9.1.3	Source Code's . . . . .	111
9.2	Demonstrator . . . . .	112
9.3	Veröffentlichungen . . . . .	113

<b>10 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>
10.1 Zusammenfassung . . . . .	117
10.2 Ausblick . . . . .	117
<b>Literatur</b>	<b>121</b>
<b>A Kältemitteldatenbanken Benchmark</b>	<b>126</b>
<b>B Digitaler Zwilling Brennstoffzelle</b>	<b>127</b>
B.1 Grundlagen Brennstoffzelle . . . . .	127
B.2 Charakteristisches Modell BlueGEN BG-15 . . . . .	128
<b>C Vergleich Messung / Simulation</b>	<b>131</b>