

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xii
Tabellenverzeichnis	xv
Liste verwendeter Symbole	xvi
Abkürzungsverzeichnis	xxvii
1 Einleitung	1
1.1 Politische Randbedingungen	3
1.2 Industrielles Energiemanagement	4
1.3 Aktuelle Trends und Bedarfe	6
1.4 Forschungsthemen	8
2 Zielstellung und Vorgehensweise	13
2.1 Forschungslandschaft	14
2.2 Exemplarische Optimierungsaufgabe	15
2.3 Ziel der Untersuchung	17
2.4 Methodik und Vorgehensweise	21
3 Grundlagen	27
3.1 Grundlagen mathematischer Optimierung	28
3.1.1 Problemklassen	30

3.1.2	Lösungsverfahren	33
3.1.3	Verfügbare Lösungsalgorithmen	38
3.2	Graphentheorie	41
3.3	Optimierung durch Kaskadenregelung	47
3.4	Agentenbasierte Optimierung	49
3.5	Grundlagen des Energiemanagements	51
3.5.1	Energieeffizienz in der Prozesskälte	57
3.5.2	Kennzahlen für das Energiemanagement	59
3.5.3	Energiemonitoring	64
4	Stand der Technik	67
4.1	Forschungsprojekte	67
4.1.1	Projekt Ecomation	67
4.1.2	ETA-Fabrik und PHI-Fabrik	68
4.1.3	Projekt SynErgie	69
4.1.4	Projekt FOREnergy	71
4.2	Optimierung gekoppelter Systeme	73
4.2.1	Kaskadenregelung	73
4.2.2	Optimierung von Werkzeugmaschinen durch Zustandsgraphen	74
4.2.3	Echtzeitoptimierung in der Gebäudetechnik	76
4.2.4	Modellfreie Optimierung von Kältetechnik	78
4.2.5	Reinforcement Learning in der ETA-Fabrik	80
4.2.6	Multi-Agenten Reinforcement Learning .	81
4.2.7	Optimierung paralleler Pumpen	81
4.3	Erkenntnisstand und Forschungsbedarf	83
5	Konzept des Verfahrens OptTopo	89
5.1	Kriterien zur Bewertung	90
5.1.1	Qualität der Lösungen	90
5.1.2	Komplexität der Berechnung	92
5.2	Anwendung der Kennzahlmethodik	93
5.2.1	Modell der Arbeitspunkte	97
5.2.2	Interpretation der Definition des Nutzens	102
5.2.3	Anwendung auf eine Kälteanlage	107

5.2.4	Praktische Hürden bei der Modellbildung	109
5.2.5	Beliebige aber feste Einflussgrößen	112
5.2.6	Fazit zum Umgang mit der Kennzahlmethodik	114
5.3	Mathematische Beschreibung	115
5.3.1	Systembegriff	115
5.3.2	Energieströme	117
5.3.3	Informationen und Signale	119
5.3.4	Konzeption von steuerndem Eingriff	126
5.3.5	Energieflüsse zwischen Komponenten	129
5.3.6	Kompatibilität der Verschaltung	133
5.3.7	Vom Modell zur Optimierungsbeschreibung	136
5.4	Formalisierung des Optimierungsproblems	138
5.5	Verhaltensmodelle für Teilsysteme	141
5.6	Entwurf der Optimierungsmethode	143
5.6.1	Voraussetzungen und Grundbegriffe	144
5.6.2	Vereinigung von Teillösungen	146
5.6.3	Topologische Sortierung	148
5.6.4	Ergänzung einer abschließenden Senke	150
5.7	Funktionsweise des Verfahrens	151
5.7.1	Initialisierung des Verfahrens	152
5.7.2	Traversierung des Systems	152
5.7.3	Datenstruktur der Lösungsmengen	153
5.7.4	Berechnung der Lösungen je Komponente	155
5.7.5	Produkt mit existierenden Teillösungen	156
5.7.6	Anforderung an ein Teilsystem	158
5.7.7	Vergleich der Effizienz von Lösungen	161
5.7.8	Verwerfen obsoleter Lösungen und Propagation von Bedingungen	161
5.7.9	Terminierung	162
5.7.10	Zusammenfassung des Ablaufs	162
5.8	Komplexität der Berechnung	163
5.8.1	Zeitkomplexität	164
5.8.2	Einfluss der topologischen Sortierung	167

5.9	Zusammenfassung und Einordnung	172
6	Experimentelle Untersuchung	175
6.1	Implementierung	175
6.1.1	Programmiersprache	177
6.1.2	Systemdefinition im Softwareprojekt . . .	179
6.1.3	Kontrollfluss von Testszenarien	181
6.1.4	Metriken für die Evaluation	186
6.2	Vorbereitung der Experimente	189
6.2.1	Experimentieranordnung	190
6.2.2	Versuchsaufbau	194
6.2.3	Konfiguration der Experimente	195
6.3	Experiment 1: Machbarkeit der Optimierung . .	197
6.3.1	Motivation und Aufbau	197
6.3.2	Ergebnisse	197
6.3.3	Interpretation	200
6.4	Experiment 2: Vergleich der Optimierer	202
6.4.1	Motivation und Aufbau	202
6.4.2	Ergebnisse	203
6.4.3	Interpretation	205
6.5	Experiment 3: Einfluss der Problemgröße	207
6.5.1	Motivation und Aufbau	207
6.5.2	Ergebnisse	208
6.5.3	Interpretation	211
7	Auswertung und Diskussion	215
8	Zusammenfassung und Ausblick	219
	Appendices	xxxiii
A	Softwareplanung	xxxiii
B	Simulation	li
B.1	Rohrleitungen	lii

B.2	Verbraucher	lii
B.3	Kaltwasserkreis	liii
B.4	Kältemaschine	lv
B.5	Kühlwasserkreis	lviii
B.6	Kühlturm	lix
B.7	Anwendung Kennzahlmethodik	lx
Quellen	lxv