

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	I
Vorwort des Autors	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Nomenklatur	VII
1 Einleitung.....	1
2 Thermische und elektrische Energiesysteme in Einfamiliengebäuden	5
2.1 Übersicht über das Energiesystem	6
2.2 Das thermische Energiesystem	7
2.2.1 Die Wärmepumpe.....	7
2.2.2 Thermische Energiespeicher	12
2.2.3 Wärmeverteilung und Warmwasserbedarf	14
2.2.4 Das Einfamiliengebäude.....	15
2.2.5 Die Regelung von Wärmepumpen-Heizungsanlagen.....	18
2.3 Das elektrische Energiesystem	22
2.3.1 Photovoltaik.....	23
2.3.2 Batteriespeichersystem und Gebäudeelektronik.....	27
2.4 Definition des Referenzsystems und der Referenzregelung	32
3 Entwicklung einer modellprädiktiven Systemregelung.....	37
3.1 Modellprädiktive Regelung von Energiesystemen in Wohngebäuden	37
3.1.1 Grundlagen der modellprädiktiven Regelung.....	38
3.1.2 Lösungsmethoden von Optimalsteuerungsproblemen	40
3.1.3 Stand der Forschung.....	44
3.2 Verteilte modellprädiktive Regelung	47
3.3 Systemdynamik.....	49
3.4 Kostenfunktion und Komfortkriterien	55
3.5 Optimierungsalgorithmen	57
3.6 Beobachter	63
3.7 Prognosemethoden	63
4 Beschreibung der Versuchsanlage.....	67
4.1 Anlagenaufbau	67
4.2 Anlagenregelung	69
4.3 Messfehleranalyse.....	71
5 Verifizierung und Validierung der Modelle	73
5.1 Verifizierung der Gebäudemodelle.....	73

5.2	Validierung der Heizungssystemmodellierung	76
5.3	Validierung des Warmwasserspeichers	80
6	Experimentelle Analyse der modellprädiktiven Regelung.....	83
6.1	Vorgehen und Randbedingungen.....	83
6.2	Experimenteller Vergleich der Laboranlagen	84
6.3	Experimentelle Anwendung der modellprädiktiven Regelung.....	86
6.3.1	Auswertung der 24-stündigen Anlaufphasen der Messungen	86
6.3.2	Evaluierung der 96-stündigen Testphasen.....	87
7	Analyse der modellprädiktiven Regelung in Jahressimulationen	95
7.1	Analyse der modellprädiktiven Regelung einzelner Teilsysteme.....	95
7.1.1	Modellprädiktive Regelung der Gebäudeheizung	95
7.1.2	Modellprädiktive Regelung der Warmwassererwärmung.....	98
7.1.3	Modellprädiktive Regelung des Batteriespeichersystems	101
7.2	Analyse der modellprädiktiven Regelung des Gesamtsystems	105
7.3	Einflussanalyse ausgewählter Randbedingungen und Modellierungen.....	109
7.3.1	Separater Anschluss der Wärmepumpe an das Netz mit Heizstromtarif.....	109
7.3.2	Einfluss des Wetters auf das Potential der modellprädiktiven Regelung.....	110
7.3.3	Einfluss der Wärmepumpenkennlinie	112
7.4	Einflussanalyse algorithmenbasierter Prognoseverfahren	114
8	Thermoökonomische Bewertung der modellprädiktiven Regelung.....	121
8.1	Ökonomische Randbedingungen und Berechnung der Annuität	121
8.2	Sensitivitätsanalyse der Komponentendimensionierung	125
8.2.1	Thermische Energiespeicher	125
8.2.2	Elektrische Systemkomponenten.....	129
8.2.3	Dimensionierung der Wärmepumpe.....	133
8.2.4	Gebäudestandard	136
8.3	Potential in zukünftigen Energiesystemen.....	143
9	Zusammenfassung.....	149
10	Summary.....	155
11	Literaturverzeichnis	161
12	Vorveröffentlichungen.....	175
A	Anhang.....	177
A.1	Ablaufdiagramme der Optimierungsalgorithmen	177
A.2	Wettermessdaten der experimentellen Untersuchungen.....	179
A.3	Definition der implementierten Wärmepumpenmodelle	187