

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | V |
| Tabellenverzeichnis | IX |
| Abkürzungsverzeichnis | XI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangslage und Problemstellung | 1 |
| 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise | 4 |
| 2 Energiewirtschaftlicher und energiepolitischer Rahmen | 7 |
| 2.1 Strukturwandel auf der Angebots- und Nachfrageseite | 7 |
| 2.1.1 Zur Integration erneuerbarer Energien | 8 |
| 2.1.2 Zur Dezentralisierung der Stromversorgung | 11 |
| 2.1.3 Strom- und Wärmenachfrage in Haushalten | 14 |
| 2.1.4 Entwicklung und Auswirkungen der Elektromobilität | 17 |
| 2.2 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen | 19 |
| 2.2.1 Erneuerbare-Energien-Gesetz | 19 |
| 2.2.2 Energieeinsparverordnung | 20 |
| 2.2.3 Erneuerbare-Energien-WärmeGesetze | 22 |
| 2.2.4 Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz | 24 |
| 2.3 Implikationen für Mikro-KWK-Anlagen | 26 |
| 3 Mikro-KWK-Anlagen für Wohngebäude | 29 |
| 3.1 Prinzip, Verbreitung und Potenzial | 29 |
| 3.2 Mikro-KWK-Technologien | 33 |
| 3.2.1 Standardkomponenten und technische Charakteristika | 33 |
| 3.2.2 Wärmekraftmaschinen | 36 |
| 3.2.3 Brennstoffzellen | 39 |
| 3.3 Betriebsweisen und Einsatzaspekte | 45 |
| 3.4 Effizienz- und Betriebskennzahlen | 48 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.5 | Technologievergleich und -auswahl | 51 |
| 3.6 | Wechselwirkungen des Anlagenbetriebs mit Elektrofahrzeugen | 54 |
| 4 | Methoden und Modellansätze zur Optimierung des Mikro-KWK-Betriebs | 55 |
| 4.1 | Optimierungsziele | 55 |
| 4.2 | Methodische Ansätze zur Optimierung des Mikro-KWK-Betriebs | 57 |
| 4.2.1 | Deterministische exakte Verfahren | 57 |
| 4.2.2 | Deterministische heuristische Verfahren | 60 |
| 4.2.3 | Stochastische Verfahren | 61 |
| 4.3 | Modellierung der Haushaltsnachfrage | 63 |
| 4.3.1 | Elektrizitätsnachfrage | 63 |
| 4.3.2 | Wärmenachfrage | 65 |
| 4.3.3 | Elektrizitätsnachfrage durch Elektrofahrzeuge | 66 |
| 4.3.4 | Zeitliche Auflösung der Lastgangdaten | 66 |
| 4.4 | Literaturüberblick zu existierenden Modellen zur Betriebsoptimierung | 67 |
| 4.4.1 | Arbeiten mit perfekter Kenntnis zukünftiger Lastgangdaten | 68 |
| 4.4.2 | Arbeiten zur prädiktiven Optimierung des Anlagenbetriebs | 71 |
| 4.5 | Auswahl der verwendeten Optimierungsmethoden | 76 |
| 5 | Kurzfristige Lastprognose zur Begegnung nachfrageseitiger Unsicherheiten | 79 |
| 5.1 | Vorbemerkungen zu den vorgestellten Methoden | 80 |
| 5.1.1 | Klassifizierung | 80 |
| 5.1.2 | Bewertung von Lastprognosen | 82 |
| 5.1.3 | Auswahl und Aufbereitung der Inputs und Outputs | 86 |
| 5.1.4 | Wahl des Modellansatzes | 88 |
| 5.2 | Klassische statistische und ökonometrische Methoden | 91 |
| 5.2.1 | Naive Prognose | 91 |
| 5.2.2 | Multiple Regression | 91 |
| 5.2.3 | Exponentielle Glättung | 92 |
| 5.2.4 | Box-Jenkins-Methoden | 94 |
| 5.2.5 | Kalman Filter | 96 |
| 5.3 | Methoden des Soft Computing | 98 |
| 5.3.1 | Mustererkennungsverfahren | 98 |
| 5.3.2 | Support Vector Machines | 99 |
| 5.3.3 | Künstliche neuronale Netze | 100 |
| 5.3.4 | Fuzzy-Systeme | 104 |
| 5.3.5 | Neuro-Fuzzy-Systeme | 108 |
| 5.4 | Literaturüberblick und Vorauswahl von Lastprognosemethoden | 115 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | Modellbeschreibung und Parameterwahl | 119 |
| 6.1 | Verwendete Datenbasis | 120 |
| 6.1.1 | Haushaltslastgänge und Fahrprofil | 120 |
| 6.1.2 | Eingangsgrößen zur Lastprognose | 126 |
| 6.2 | Modul zur kurzfristigen Lastprognose auf Haushaltsebene | 127 |
| 6.2.1 | Skripte zur Steuerung des Prognosevorgangs | 129 |
| 6.2.2 | Funktionen zur Datenaufbereitung | 130 |
| 6.2.3 | Funktionen zur Durchführung der Lastprognose | 132 |
| 6.2.4 | Auswahl des Lerdatenumfangs | 136 |
| 6.2.5 | Gütebewertung der implementierten Methode zur Lastprognose | 140 |
| 6.3 | Modul zur Bestimmung des optimalen Fahrplans | 141 |
| 6.3.1 | Mathematische Beschreibung | 143 |
| 6.3.2 | Komplexität und Implementierung als rollierende Optimierung | 147 |
| 6.3.3 | Modellendogene Simulation | 152 |
| 6.3.4 | Anwendung zur Anlagenauslegung | 153 |
| 6.3.5 | Analysen zur zeitlichen Auflösung | 153 |
| 6.4 | Modul zur heuristischen Fahrplanoptimierung | 157 |
| 6.4.1 | Phase 1: Tägliche Bestimmung des Anlagenfahrplans | 159 |
| 6.4.2 | Phase 2: Tägliche Bestimmung der EV-Ladestrategie | 162 |
| 6.5 | Modul zur Simulation unterschiedlicher Betriebsweisen | 165 |
| 6.5.1 | Synthetisierung des elektrischen Lastgangs in minütlicher Auflösung | 165 |
| 6.5.2 | Mathematische Beschreibung der Simulation | 167 |
| 6.5.3 | Ergebnisse der Simulation | 170 |
| 6.6 | Zwischenfazit zur gewählten Methodik | 171 |
| 7 | Modellgestützte Analysen im Rahmen einer Fallstudie | 173 |
| 7.1 | Allgemeine Rahmenbedingungen | 173 |
| 7.2 | Szenariodefinition | 174 |
| 7.2.1 | Beispielhaushalte | 174 |
| 7.2.2 | Haushaltsstrompreise | 175 |
| 7.3 | Auslegung der PEMFC-Mikro-KWK-Referenzanlage | 179 |
| 7.3.1 | Basiskonfiguration | 179 |
| 7.3.2 | Ableitung von Richtlinien zur Anlagenauslegung | 180 |
| 7.4 | Ergebnisse der Modellanwendung | 186 |
| 7.4.1 | Lastprognose für die Beispielhaushalte | 186 |
| 7.4.2 | Ergebnisse der Optimierung für die Beispielhaushalte | 190 |
| 7.4.3 | Saisonale Betrachtung der Optimierungsergebnisse | 196 |
| 7.4.4 | Vergleichende Analyse einzelner Beispieltage | 199 |
| 7.4.5 | Ergebnisse bei sofortigem Laden als Referenzstrategie | 202 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.4.6 | Auswirkungen eines stationären elektrischen Speichers | 204 |
| 7.4.7 | Sensitivitätsanalyse für unsichere Rahmenparameter | 207 |
| 8 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 209 |
| 8.1 | Das entwickelte Modellsystem | 209 |
| 8.2 | Diskussion der Ergebnisse aus der Fallstudie | 213 |
| 8.3 | Kritische Würdigung des Modellsystems | 220 |
| 8.4 | Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen | 224 |
| 9 | Zusammenfassung | 227 |
| | Anhang | 233 |
| | Literaturverzeichnis | 241 |