

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation für diese Arbeit	1
1.2 Betrachtungsgegenstand und Zielsetzung	2
1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit	3
2 Einsatz von Stromspeichern im Stromversorgungssystem	7
2.1 Veränderungen des Stromversorgungssystems	7
2.1.1 Entwicklung der Stromnachfrage	8
2.1.2 Entwicklung der Stromerzeugungsstruktur	11
2.2 Technische Herausforderungen des Stromversorgungssystems	15
2.2.1 Volatilität und Steilheit der Rampen des Residuallastgangs . . .	15
2.2.2 Überschreiten der Netzleitungskapazitäten	18
2.2.3 Überschussmengen bei der erneuerbaren Stromerzeugung . . .	20
2.2.4 Frequenzschwankungen im Übertragungs- und Verteilnetz . . .	21
2.2.5 Zwischenfazit	23
2.3 Grundsätzliche Optionen zur Harmonisierung von Stromangebot und Stromnachfrage	24
2.3.1 Ausbau der Stromnetze	25
2.3.2 Demand Response Maßnahmen	29
2.3.3 Stromspeicherung	32
2.4 Zwischenfazit: Dezentrale Stromspeicher als Lösungsoption	37

3	Kombinationsfähigkeit von Speicheranwendungen bei der Einsatzplanung dezentraler Stromspeicher	41
3.1	Technologien zur dezentralen objektgebundenen Stromspeicherung . .	42
3.1.1	Blei-Säure Batterien	42
3.1.2	Nickel Zellen	44
3.1.3	Li-Ion Zellen	48
3.1.4	Natrium-Schwefel Batterien	51
3.1.5	Redox-Flow Batterien	54
3.2	Anwendungsmöglichkeiten für dezentrale Stromspeicher	56
3.2.1	Klassifizierung von Stromspeicheranwendungen für diese Arbeit	59
3.2.2	Stromspeicheranwendungen bei Stromerzeugern	62
3.2.3	Stromspeicheranwendungen bei Stromverbrauchern	65
3.2.4	Stromspeicheranwendungen bei Prosumern	68
3.2.5	Stromspeicheranwendungen bei Netzbetreibern	69
3.3	Anwendungsmöglichkeiten für Stromspeicher an Strommärkten	72
3.3.1	Spekulativer Stromhandel an den Spotmärkten	72
3.3.2	Angebot von Regelleistung	74
3.3.3	Rolle von Virtuellen Kraftwerken für die Marktaktivitäten	77
3.3.4	Zukünftige Anpassungen der Marktmechanismen	78
3.4	Kombinationsfähigkeit unterschiedlicher Stromspeicheranwendungen .	80
3.4.1	Kombinationsmatrix zur Abbildung des potenziellen Lösungs- raums und Konsistenzbewertung	81
3.4.2	Anwendungskombinationen bei Stromerzeugern	82
3.4.3	Anwendungskombinationen bei Stromverbrauchern	83
3.4.4	Anwendungskombinationen bei Prosumern	84
3.4.5	Anwendungskombinationen bei Netzbetreibern	85
3.5	Verfahren zur kombinierenden Einsatzplanung von Stromspeichern . .	87
3.5.1	Verfahren zur Einsatzplanung von Stromerzeugungsanlagen . .	87
3.5.2	Einsatzplanung von Stromspeichern in Kraftwerksportfolios . .	89
3.5.3	Defizite verwendeter Verfahren bei der Einsatzplanung dezentraler Stromspeicher	91
3.5.4	Anforderungen an die gewinnmaximierende Einsatzplanung dezentraler Stromspeicher für mehrere Speicheranwendungen	93
4	Modell zur Einsatzplanung und Bewertung dezentraler Stromspeicher	97
4.1	Ziel und Aufbau des Modells	97

4.2	Algorithmus zur optimierenden Einsatzplanung für Stromspeicher . . .	101
4.2.1	Verfahren zur Folgetagsoptimierung des Speichereinsatzes . . .	103
4.2.2	Verfahren zur Resttagesplanung des Speichereinsatzes	104
4.3	Modellierung des Speichers und seiner primären Anwendung	106
4.3.1	Technische Eigenschaften des Stromspeichers	107
4.3.2	Abbildung der primären Speicheranwendung	109
4.4	Modul zur Simulation der Preise des Day-Ahead-Spotmarktes	112
4.4.1	Beschreibung des Simulationsverfahrens	113
4.4.2	Abbildung der Preis-Angebotsfunktion	115
4.4.3	Abbildung der Residuallast	119
4.4.4	Validierung der Funktionsfähigkeit des Preissimulationsmoduls	128
4.5	Modul zur Simulation der Preise des Intraday-Spotmarktes	130
4.5.1	Identifikation preisbestimmender Einflussfaktoren	130
4.5.2	Beschreibung des Simulationsverfahrens	134
4.6	Modul zur Simulation der Regelleistungsmärkte	136
4.6.1	Simulation der Ausschreibungsmengen	138
4.6.2	Simulation der Gebotslisten für Arbeits- und Leistungspreise .	141
4.6.3	Simulation der Abrufwahrscheinlichkeit, -Höhe und -Dauer . .	146
4.7	Wirtschaftliche Bewertung der Stromspeicherinvestition	150
4.7.1	Auswahl eines geeigneten Bewertungsverfahrens	150
4.7.2	Verfahren zur Bestimmung des internen Zinsfußes der Investition	152
5	Parametrisierung des Modells zur Wirtschaftlichkeitsberechnung für ausge-	
	wählte Fallbeispiele	155
5.1	Auswahl und Vorstellung der Fallbeispiele	155
5.2	Stromspeichereinsatz in einem Industriebetrieb	157
5.2.1	Betriebsstrategie der primären Speicheranwendung	157
5.2.2	Implementierung in das Simulationsmodell	159
5.2.3	Technische Auslegung des Stromspeichers	161
5.2.4	Kosten des Stromspeichers	163
5.3	Stromspeichereinsatz in einem Verteilnetz	165
5.3.1	Betriebsstrategie der primären Speicheranwendung	165
5.3.2	Implementierung in das Simulationsmodell	166
5.3.3	Technische Auslegung des Stromspeichers	168
5.3.4	Kosten des Stromspeichers	170
5.4	Stromspeichereinsatz bei einem Prosumer	172

5.4.1	Betriebsstrategie der primären Speicheranwendung	172
5.4.2	Implementierung in das Simulationsmodell	173
5.4.3	Technische Auslegung des Stromspeichers	175
5.4.4	Kosten des Stromspeichers	177
5.5	Simulation von Marktdaten	179
5.5.1	Preise am Day-Ahead-Spotmarkt für Strom	180
5.5.2	Preise am Intraday-Spotmarkt für Strom	186
5.5.3	Preise am Markt für Minutenreserveleistung	187
6	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die Fallbeispiele	191
6.1	Stromspeichereinsatz in einem Industriebetrieb	192
6.1.1	Darstellung des stochastischen Speichereinsatzprofils	192
6.1.2	Erlöse des Speichereinsatzes	196
6.1.3	Wirtschaftlichkeit der Stromspeicherinvestition	199
6.1.4	Fazit für das Fallbeispiel	201
6.2	Stromspeichereinsatz in einem Verteilnetz	202
6.2.1	Darstellung des stochastischen Speichereinsatzprofils	202
6.2.2	Erlöse des Speichereinsatzes	205
6.2.3	Wirtschaftlichkeit der Stromspeicherinvestition	209
6.2.4	Fazit für das Fallbeispiel	211
6.3	Stromspeichereinsatz bei einem Prosumer	212
6.3.1	Darstellung des stochastischen Speichereinsatzprofils	212
6.3.2	Erlöse des Speichereinsatzes	216
6.3.3	Wirtschaftlichkeit der Stromspeicherinvestition	219
6.3.4	Fazit für das Fallbeispiel	221
6.4	Erkenntnisse aus dem Vergleich der Fallbeispiele	222
7	Fazit	225
7.1	Ergebnis der Analyse der Fallbeispiele	227
7.2	Verwendung des Modells in Forschung und Praxis	228
7.3	Ansätze für eine Weiterentwicklung des Modells und für angrenzende Forschungsansätze	229
	Literaturverzeichnis	231