

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	XV
Tabellenverzeichnis .....	XXVII
Abkürzungsverzeichnis .....	XXXI
1      Beschreibung von Referenznetzen.....	1
1.1    Quantifizierbare Zielvorgaben .....	1
1.1.1    Quantitative Ziele .....	1
1.1.2    Stromnetz und Netzbetreiber.....	6
1.1.3    Kraftwerke und Systemdienstleistungen .....	7
1.2    Definition der Leitszenarien.....	8
1.2.1    Definition der Erzeugung und Lasten in der Niederspannung .....	8
1.2.2    Definition der Erzeugung und Lasten in der Mittelspannung .....	9
1.3    Definition von Netzstrukturen .....	11
1.3.1    Ermittlung der Netzstrukturen in der Niederspannung .....	11
1.3.2    Ermittlung der Netzstrukturen in der Mittelspannung .....	14
1.4    Entwicklung der Netzmodelle mit Erzeugern und Lasten.....	15
1.4.1    Implementierung der definierten MS-Netzstrukturen in den Netzsimulator .....	15
1.4.2    Implementierung der definierten NS-Netzstrukturen in den Netzsimulator	17
1.5    Validierung und Simulation des Netzes ohne Speicher .....	19
1.5.1    Ermittlung residualer Last (NS-Sammelschienen) und Spannungsprofile in Netzausläufern .....	19
1.5.2    Ermittlung residualer Last (MS-Sammelschienen) und Spannungsprofile in Netzausläufern .....	24
1.5.3    Betriebsmittelauslastung in der Niederspannung.....	24
1.5.4    Betriebsmittelauslastung in der Mittelspannung.....	25
1.5.5    Gesamtheitliche Betrachtung und Bewertung.....	25
2      Benötigte Speicherkapazität und technische und wirtschaftliche Anforderungen ....	27
2.1    Festlegung der Anwendungsszenarien .....	27
2.2    Integration der Speichermodelle in die Netzsimulation.....	36
2.2.1    Erstellung von spezifischen Modellen elektrochemischer Speicher .....	36
2.2.2    Definition der Schnittstelle zwischen Speichermodell und Netzmodell .....	37

## Inhaltsverzeichnis

2.2.3	Implementierung der Speichermodelle in den NS-Netzsimulator für ausgewählte Anwendungsfälle in der Niederspannung .....	38
2.2.4	Implementierung der Speichermodelle in den MS-Netzsimulator für ausgewählte Anwendungsfälle in der Mittelspannung.....	42
2.3	Validierung und Netzsimulationen mit Speicher .....	47
2.3.1	Niederspannungsebene.....	47
2.3.2	Mittelspannungsebene.....	54
2.3.3	Netzanalysen mit Last- und Verbrauchsprognosen auf Basis vorhandener realer Netze .....	67
2.4	Wirtschaftliche Anforderungen an die Speicher .....	73
2.4.1	Anforderungen an Zyklenfestigkeit und stationäre Betriebslebensdauer ....	73
2.4.2	Anforderungen an die Energiespeicherlebensdauer in der Beispielanwendung PV-Heimenergiespeicher .....	75
2.5	Ableitung von Kriterien zur Definition von Folgevorhaben als Pilot- und Demonstrationsprojekte .....	81
3	Alternative Lösungen zum Einsatz von Speichern.....	85
3.1	Netzausbau .....	86
3.1.1	Verwendete Studien .....	86
3.1.2	Konzepte, Technologien und Einsatzfelder .....	86
3.1.3	Wirtschaftliche Aspekte.....	88
3.1.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	90
3.2	Nutzung von Gas- und Wärmenetzen.....	92
3.2.1	Verwendete Studien .....	92
3.2.2	Konzepte, Technologien und Einsatzfelder .....	92
3.2.3	Wirtschaftliche Aspekte.....	94
3.2.4	Methodik und Ergebnisse .....	95
3.2.5	Zusammenfassung .....	97
3.3	Lastmanagement .....	99
3.3.1	Verwendete Studien .....	99
3.3.2	Konzepte und Einsatzfelder.....	99
3.3.3	Wirtschaftliche Aspekte.....	101
3.3.4	Methodik zur Bewertung des Lastmanagements.....	102
3.3.5	Ergebnisse.....	103

3.3.6	Zusammenfassung und Vergleich.....	104
3.4	Spitzenlastkraftwerke .....	106
3.4.1	Verwendete Studien.....	106
3.4.2	Konzepte, Technologien und Einsatzfelder .....	106
3.4.3	Methodik und Ergebnisse.....	108
3.4.4	Bestehender Kraftwerkspark.....	111
3.4.5	Ersatz des bestehenden Kraftwerksparks durch hochdynamische Gasmotorenkraftwerke .....	112
3.4.6	Zusammenfassung .....	113
3.5	Zusatzzlasten .....	114
3.5.1	Verwendete Studien.....	114
3.5.2	Konzepte, Technologien und Einsatzfelder .....	114
3.5.3	Wirtschaftliche Aspekte.....	117
3.5.4	Untersuchung der PtH-Anwendung als Zusatzzlast zur Nutzung regionaler EE-Überschüsse .....	117
3.5.5	Zusammenfassung .....	119
4	Charakterisierung, Auswahl und Tests von elektrochemischen Energiespeichern ...	121
4.1	Ermittlung von Lastkollektiven .....	121
4.1.1	Statistische Lastkollektive.....	122
4.1.2	Methoden zur Bestimmung von Lastkollektiven.....	128
4.1.3	Lastkollektive (Monte Carlo Methoden) .....	132
4.1.4	Statistische Analyse von Lastprofilen .....	134
4.2	Entwicklung beschleunigter Prüfmethoden für dynamische Lebensdauertests.....	137
4.2.1	Methoden zur beschleunigten Prüfung.....	137
4.2.2	Synthetische Generierung von dynamischen Lastprofilen.....	139
4.3	Auswahl geeigneter Prüflinge .....	142
4.3.1	Recherche und Bewertung verfügbarer Speicher .....	142
4.3.2	Recherche & Bewertung verfügbarer Speicher .....	144
4.4	Durchführung von Tests.....	149
4.4.1	Dynamische Parameter- & Lebensdauertests .....	149
4.4.1.4.2	Belastungstestpunkte .....	161
4.4.2	Parametertests .....	178
4.5	Abgleich der Testergebnisse und Entwicklung von Modellen .....	184

## Inhaltsverzeichnis

4.5.1	Modellentwicklung .....	184
4.5.2	Untersuchung der dynamischen Eigenschaften über die Lebensdauer einer Batterie .....	190
4.6	Vermessung von Wirkungsgrad, Selbstentladung und Stillstandverlusten von verschiedenen Batteriesystemen.....	193
4.6.1	Vermessung von Wirkungsgrad, Selbstentladung und Stillstandverlusten (Hochtemperatur- und Bleibatterie) .....	193
4.6.2	Vermessung von Wirkungsgrad, Selbstentladung und Stillstandverlusten bei einer Li-Ionen Batterie.....	197
5	Nutzung vorhandener Energiespeicher im Netz .....	201
5.1	Erfassung und Beschreibung vorhandener Energiespeicher .....	201
5.1.1	Erfassung und Beschreibung von vorhandenen Elektroautos .....	201
5.1.2	Speicher in USV-Anwendungen .....	206
5.1.3	Sonstige Energiespeicher.....	209
5.2	Evaluation möglicher Betriebsweisen zur alternativen Nutzung .....	212
5.2.1	Betriebsführung sonstiger Energiespeicher im Verbund .....	212
5.2.2	Betriebsführung USV-Anlagen.....	215
5.2.3	Evaluation möglicher Betriebsweisen von Elektroautos.....	217
5.3	Modellierung und Simulation in einem Netzsegment.....	219
6	Lebensdauerzykluskosten .....	223
6.1	Ermittlung der Speicherparameter und relevanter Nebenkosten .....	223
6.1.1	Technische Parameter .....	224
6.1.2	Ökonomische Parameter .....	226
6.1.3	Technologiesteckbriefe .....	227
6.2	Erstellung von Referenzlastprofilen.....	233
6.2.1	Primärregelleistung .....	233
6.2.2	Netzausbauverzögerung in der Niederspannungsebene .....	236
6.2.3	Netzausbauverzögerung in der Mittelspannungsebene .....	237
6.3	Energiespeicherdimensionierung .....	239
6.3.1	Optimierte Dimensionierung von Energiespeichern.....	239
6.3.2	Dimensionierung von Batterien anhand von Alterungsbetrachtungen.....	244
6.3.3	Alterung und Wirkungsgradeinflüsse .....	245
6.4	Bestimmung der Lebensdauerzykluskosten .....	250



6.4.1	Entwicklung einer Berechnungsmethodik zur Bestimmung der Lebensdauerzykluskosten .....	250
6.4.2	Skalierungseffekte .....	260
6.5	Wirtschaftlicher Vergleich zu Alternativen.....	262
6.5.1	Vergleich der Speichersysteme für die Anwendung Primärregelleistung...	263
6.5.2	Vergleich der Speichersysteme für die Anwendung Netzausbauvermeidung in der Niederspannungsebene .....	266
6.5.3	Vergleich der Speichersysteme für die Anwendung Netzausbauvermeidung in der Mittelspannungsebene .....	267
7	Regelung der Energiespeicher, Aktivierung und Überwachung .....	271
7.1	Messung dynamischer Lastprofile an unterschiedlichen Batterietechnologien .....	271
7.1.1	Messung dynamischer Lastprofile an unterschiedlichen Batterietechnologien .....	272
7.1.2	Messung dynamischer Lastprofile an alternativen Batterietechnologien ..	275
7.1.3	Messung dynamischer Lastprofile an Li-Ionen Batterien.....	278
7.2	Modellierung und Parametrierung der Dynamik der Batterietechnologien .....	282
7.2.1	Modellierung und Parametrierung der Dynamik der Batterietechnologien .....	282
7.2.2	Modellierung und Parametrierung der Dynamik alternativer Batterietechnologien.....	284
7.2.3	Modellierung und Parametrierung der Dynamik von Li-Ionen Batterien ...	286
7.3	Simulation von Batteriesystemen, Wechselrichtern, Netzen und verteilten Lasten	297
7.3.1	Simulationsumgebung und Referenznetz .....	297
7.3.2	Erzeugung von Daten für die Simulationsumgebung .....	298
7.4	Regelung virtueller Synchronmaschinen anhand von Netzgrößen .....	301
7.4.1	Regelung virtueller Synchronmaschinen am Testnetz .....	301
7.4.2	Simulationsgestützte Regelung viertueller Synchromaschinen anhand von Netzgrößen .....	305
7.5	Erarbeitung alternativer Regel- und Aktivierungskonzepte .....	308
7.6	Kommunikation und Zusammenfassung verteilter Speicher zur Bereitstellung von Netzdienstleistungen.....	309
7.7	Anforderungskatalog für den Informationsaustausch aus organisatorischer Sicht .	314
7.7.1	Darstellung der Referenzarchitektur .....	314
7.7.2	Aufbau der Referenzarchitektur.....	317



## Inhaltsverzeichnis

8	Rolle und Wert von Kommunikationssystemen zur Überwachung und zum Einsatz von Speichern .....	323
8.1	Anforderungen an Kommunikationssysteme .....	323
8.2	Erfassung und Beschreibung möglicher Kommunikationssysteme .....	328
8.2.1	Technische Erfassung der Kommunikationssysteme und des benötigten Datenaustausches .....	328
8.2.2	Beschreibung der Kommunikationsmöglichkeiten für eine Simulation.....	330
8.3	Bewertung von Kommunikationssystemen hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Funktionalität .....	331
9	Rechtliche Rahmenbedingungen bei Bereitstellung von Speicherkapazität durch kleine, dezentral im Netz vorhandene Energiespeicher .....	335
9.1	Analyse der aktuellen notwendigen Rahmenbedingungen.....	335
9.1.1	Speicheranlagen im Kontext zu den gesetzlichen Rahmenbedingungen ...	335
9.1.2	Ökonomische Rahmenbedingungen .....	340
9.2	Speicheranlagen im Kontext technisch-organisatorischer Rahmenbedingungen....	343
9.2.1	Transmission und Distribution Codes.....	343
9.2.2	Erfordernisse bezüglich des netztechnischen Anschlusses in der Nieder- und Mittelspannungsebene.....	343
9.2.3	Anwendungsabhängige Anforderungen.....	345
9.3	Notwendige Rahmenbedingungen für ein dezentrales und zentrales Systemdesign .....	349
9.3.1	Interessenanalyse seitens der Netzbetreiber und der Speicherbetreiber..	349
9.3.2	Analyse des Speicherbedarfs im zentralen und dezentralen Systemdesign	354
9.3.3	Zusammenfassung und erste Bewertung .....	355
9.4	Konzept zur Adaption und Erweiterung bestehender rechtlicher Randbedingungen für die NetzinTEGRATION dezentraler Speichereinheiten .....	357
9.4.1	Bereitstellung von Systemdienstleistungen (dynamische Basis) .....	357
9.4.2	Bereitstellung von Systemdienstleistungen (quasidynamische Basis) sowie zur Langzeitspeicherung von Energie .....	359
10	Akzeptanzproblematik.....	367
10.1	Evaluation möglicher Akzeptanzprobleme.....	367
10.1.1	Gefährdungen.....	370
10.1.2	Ökobilanzen .....	371
10.2	Ermittlung des Gesamtpotentials dezentraler Hausspeicher .....	374

10.3 Konzepte zur Erschließung des Potentials dezentraler Speicher .....	376
11 Dissemination .....	381
11.1 Erarbeitung von Konsens und Erläuterung von Konfliktpotenzialen, Bestimmung von Entwicklungslinien und Bestimmung des Gesamtpotenzials .....	381
11.1.1 Zugrunde liegende Annahmen .....	382
11.1.2 Potentiale für elektrochemische Speicher .....	384
11.1.3 Entwicklungsbedarf und Vorschläge für Demonstrationsvorhaben .....	385
11.2 Projektbegleitende Workshops .....	386
11.2.1 Workshop: Pumpspeicherkraftwerke.....	386
11.2.2 Workshop: Große Batteriespeicher (1) .....	386
11.2.3 Workshop: Spannungshaltung und Mittel- und Niederspannungsnetzen..	387
11.2.4 Workshop: Power-to-Heat .....	387
11.2.5 Workshop: Power-to-Gas .....	387
11.2.6 Workshop: Netzausbau .....	388
11.2.7 Workshop: Große Batteriespeicher (2) .....	388
11.2.8 Workshop: Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen für den Einsatz von Speichern.....	389
11.2.9 Workshop: Nachhaltige Versorgungssicherheit .....	389
11.2.10 Workshop: Nutzung bestehender USV- und Notstromanlagen für die zukünftige Energieversorgung.....	389
Literaturverzeichnis.....	391
Anhang A: Netzstrukturen der modellierten Niederspannungsnetze .....	409
Anhang B: Gesammelte Anwendungsfälle .....	413