



Hans-Peter Beck (Herausgeber)

Potentiale elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen (ESPEN)

Abschlussbericht

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen

efzn

Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen

Potentiale elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen (ESPEN)

Abschlussbericht

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck (Hrsg.)

Band 44



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7418>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>



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



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 Zyklfestigkeit 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	Zusatzlasten	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 Zusatzlast 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 Prüfmethode 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	Ableich der Testergebnisse und Entwicklung von Modellen	184



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 virtueller Synchronmaschinen 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



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