



Ralf Benger (Autor)

# Dynamisches Verhalten von umrichter gespeisten Energiespeichersystemen

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen

**efzn**

Energie-Forschungszentrum  
Niedersachsen



TU Clausthal

## Dynamisches Verhalten von umrichter gespeisten Energiespeichersystemen

Ralf Benger

Promotion an der Technischen Universität Clausthal

Band 11

 Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6341>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

---

# INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Motivation	1
1.2	Einleitung	2
2	Übersicht über Kurzzeit-Energiespeichersysteme	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Leistungs- und Energiespeicher	6
2.3	Kurzzeit-Energiespeichersysteme	9
2.4	Elektrochemische Speicher	10
2.4.1	Blei-Säure-Batterie	11
2.4.2	Nickelbasierte Systeme	12
2.4.3	Lithium-Ionen-Batterien	14
2.4.4	Redox-Flow-Batterien	17
2.4.5	Hochtemperaturbatterien	18
2.4.6	Neue Batteriekonzepte	19
2.4.7	Zellgeometrie – Rundzelle oder Prismatische Zelle?	19
2.5	Schwungmassenspeicher	21
2.6	Supraleitende Magnetische Energiespeicher	24
2.7	Kondensatoren und Doppelschichtkondensatoren	25
2.7.1	Doppelschichtkondensatoren	25
2.7.2	Kondensatoren	27
2.7.3	Elektrolytkondensatoren	29
2.8	Vergleich der verschiedenen Energiespeichertechnologien	30
3	Anforderungen an elektrische Energiespeicher in Gleichspannungs-Zwischenkreisen	33
3.1	Einleitung	33
3.2	Hybridfahrzeug Toyota Prius	33



3.3	Elektrofahrzeug Tesla Roadster	36
3.4	Erneuerbare Energiesysteme - Beispiel Energiepark Clausthal	38
3.5	Erneuerbare Energiesysteme – Regenerative Ladestation	41
3.6	Energiespeicher in elektrischen Netzen am Beispiel der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA)	44
4	Modellbildung zur Beschreibung elektrochemischer Energiespeichersysteme für dynamische Anforderungen	49
4.1	Modelle für elektrochemische Systeme	49
4.1.1	Dynamische Ersatzschaltbildelemente	52
4.2	Parameteridentifikation	57
4.3	Übertragbarkeit von Modellen aus dem Frequenz- in den Zeitbereich - Gültigkeitsbereich der Laplace-Transformation	59
4.4	Verfahren zur Bestimmung von Impedanzen für elektrochemische Systeme im Zeitbereich und Transformation in den Bildbereich	61
4.5	Impedanzspektren und Impulsantworten verschiedener elektrischer Energiespeichersysteme	62
4.5.1	Elektrochemische Impedanzspektroskopie	63
4.5.2	Impedanzspektren verschiedener Energiespeichertechnologien	63
4.5.3	Sprungantworten verschiedener Energiespeichertechnologien	70
4.5.4	Vergleich der aus den beiden Verfahren ermittelten Ersatzschaltbild-Parameter	77
5	Verhalten von Kurzzeit-Energiespeichern bei hohen dynamischen Anforderungen - Bedeutung des elektromagnetischen Felds	83
5.1	Einleitung	83
5.2	Elektromagnetisches Feld	84
5.2.1	MAXWELLSche Gleichungen	88
5.2.2	Feldgleichungen für die Feldstärken	89
5.2.3	Einführung des Elektrodynamisches Vektorpotentials	90
5.3	Berechnung der transienten Stromverteilung im zylindrischen Massivleiter	90
5.3.1	Sprungartiger Einschaltvorgang	94



---

5.3.2	Transiente Stromverteilung bei beliebigem Gesamtstrom im zylindrischen Massivleiter	96
5.3.3	Vergleich der Lösung für den sprungartigen Einschaltvorgang mit der Lösung für beliebige Stromverläufe am Beispiel von Stromrampen unterschiedlicher Steigung	98
5.3.4	Vergleich der Lösung für den beliebigen Strom mit der aus der Wechselstromlehre bekannten Lösung für eine Sinusschwingung	102
5.4	Bestimmung der Verluste durch Stromverdrängung	107
5.4.1	Berechnung des Skinwiderstandes und des Spannungsabfalls auf Grund der ungleichmäßigen Stromverteilung im zylindrischen Massivleiter	107
5.4.2	Widerstandsbestimmung mit Hilfe des Poynting-Vektors	111
5.4.3	Skinwiderstand für Wechselströme	116
5.5	Experimenteller Nachweis des Skineffekts am Beispiel von Metallstäben und Batterien	118
5.5.1	Skinwiderstand bei einem Eisenstabstab	118
5.5.2	Skinwiderstand bei einer NiMH-Batterie	121
5.5.3	Skinwiderstand bei einer Lithium-Eisenphosphat-Rundzelle	123
5.6	Bedeutung der Verschiebungsstromdichte bei elektrochemischen Systemen	124
5.7	Gleichspannungs-Verzerrungsleistung	130
5.7.1	Einleitung	130
5.7.2	Bestimmung der Gleichspannungs-Verzerrungsleistung	131
5.7.3	Gleichspannungs-Verzerrungs-Blindleistung anhand einiger Beispiele	134
6	Auswirkungen des elektromagnetischen Feldes auf das thermische Verhalten von elektrischen Energiespeichern	137
6.1	Einleitung	137
6.2	Versuchsdurchführung	137
6.3	Simulation des thermischen Verhaltens bei hochdynamischer Belastung am Beispiel einer Lithium-Eisenphosphat-Rundzelle	143
6.3.1	Gekoppeltes elektrophysikalisch-thermisches Batteriemodell	143



6.3.2	Effektiver Skinwiderstand bei Rechteckimpulsen unterschiedlicher Frequenz	147
6.4	Temperaturinhomogenitäten	150
6.5	Zusammenfassung des Verhaltens von elektrochemischen Energiespeichern bei hohen dynamischen Anforderungen, deren Auswirkungen und deren Beschreibung mit Hilfe elektrischer Ersatzschaltbilder	154
7	Regelverhalten elektrochemischer Speicher beim Einsatz von Gleichstromrichtern hoher Dynamik	163
7.1	Einleitung	163
7.2	Einfluss von Filterkapazitäten und Glättungsinduktivitäten	169
7.3	Einfluss der Kapazität der Elektroden und des transienten Skineffekts auf die Reglerauslegung	172
8	Leistungsstarkes Kurzzeit-Energiespeichersystem	175
8.1	Beschreibung der Systemkomponenten	175
8.2	Versuchsdurchführung	186
9	Zusammenfassung	191
10	Formelzeichen und Indices	195
	Literaturverzeichnis	201
	Abbildungsverzeichnis	211
	Tabellenverzeichnis	219
A	Anhang	220
A1	Ortsaufgelöstes Ersatzschaltbild	220
A2	Datenblattangaben und Fotos der untersuchten Speichertechnologien	221
A2.1	Lithium-Eisenphosphat-Rundzelle OMT 8Ah	221
A2.2	Lithium-Eisenphosphat-Pouchzelle A123 20Ah	221
A2.3	Lithium-Eisenphosphat-Pouchzelle AEenergy 5 Ah	222
A2.4	Lithium-Pouchzelle Litec 40 Ah	222
A2.5	Lithium-Nickel-Kobalt (NCA) Rundzelle, GAIA 27 Ah	222
A2.6	NiMH-Rundzellen, Sanyo 6 Ah, 7,2V	223
A2.7	Blei-Säure-Batterie, Sprinter P12V875, 12 V, 40 Ah	223



---

A2.8	Doppelschichtkondensator 600 F, 2,5 V und Modul 50 F/ 50 V	223
A3	Elektrochemische Impedanzspektroskopie	224
A4	Sprungartiger Abschaltvorgang	229
A5	Stromdichteverteilung bei konstanter Steigung am Beispiel elementarer Sprünge	231
A6	Prinzip von DUHAMEL	233
A7	Leistung bei verzerrten Spannungen und Stromstärken	234
A8	Bestimmung der Leitfähigkeit eines Eisenstabes	236
A9	Parameter zur Berechnung der Sprungantwort in Abb. 6.18	236