1 Einleitung und Motivation

1.1 Motivation

Um einen elektrischen Energiespeicher z. B. in der öffentlichen Elektrizitätsversorgung, wirtschaftlich einzusetzen, ist auf Grund des besonderen Eigenschaftsprofils elektrischer Energiespeicher vor allem auf eine umfassende Systemintegration hinzuarbeiten. Die bestmögliche Systemintegration ist dann erreicht, wenn bei der jeweiligen Anwendung das Zusammenwirken des Speichers und der Anwendungsumgebung einen maximalen Nutzeffekt mit möglichst kleinem bzw. kostengünstigem Speicher ergibt [ECKE99].

Energiespeicher werden in der Energietechnik vielfältige Rollen in verschiedenen Anwendungen gewinnen. Der weitere Abbau von Kraftwerkskapazitäten kann zukünftig zu häufigeren Netzinstabilitäten sowie Spannungs- und Frequenzschwankungen führen [VDI02]. Dieses erfordert zusätzliche Maßnahmen, vor allem für sensible Produktionsbereiche. Des Weiteren wird der Anteil an erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung, insbesondere der zeitlich schwankenden Windenergie und Photovoltaik weiter ansteigen und somit effizientere Speicher- sowie Managementsysteme zur Sicherung der Versorgung erforderlich machen. Wirtschaftliche Energiespeicherung wird eine Schlüsseltechnologie für den stabilen Netzbetrieb und die weitere Integration erneuerbarer Energien werden [VDI02, EURO05, VDI04, EURO01].

Weiterhin entstehen durch den zunehmenden Einsatz von elektrischen und elektronischen Systemen in Fahrzeugen und die Entwicklung von Elektro- und Hybridfahrzeugen neue Anforderungen an elektrische Energiespeicher. Obwohl Elektrostraßenfahrzeuge in aller Munde sind, die Entwicklung von Akkumulatoren inzwischen auch im EU Raum stärker gefördert wird, besteht doch weiterhin eine Diskrepanz bei der Integration des Speichers in das Gesamtsystem.

Sowohl für stationäre als auch mobile Anwendungen gewinnt also die Energiespeicherung eine immer größere Bedeutung. Schnelle Schalthandlungen oder unvorhergesehene Lastsprünge können durch Speicher ausgeglichen werden und durch „Down-Sizing“ der Stromerzeugungseinheiten lassen sich Kosten und Energie einsparen [EURO05].

Als Speichertechnologien für die Erzeugung der so genannten Sekundenreserve kommen aus derzeitiger Sicht vor allem Batterien, Doppelschichtkondensatoren (DSK), Schwungmassenspeicher (SMS) und Supraleitende Magnetische Energiespeicher

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

(SMES) in Frage [VDI02, SPAH06]. Pumpspeicher oder herkömmliche Druckluftspeicher kommen auf Grund ihrer relativ großen Anregelzeiten aus heutiger Sicht nicht in Betracht; zukünftig könnten Speicher mit heißer Druckluft in dieses Segment vordringen [MOHA03], derzeit stehen sie erst am Anfang der Entwicklung.

Ausgehend von der Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Carsten Ropeter [ROPE07] und Problemstellungen, die sich im Zusammenhang mit dem Wirkleistungsspeicher der „Virtuellen Synchronmaschine“ [HESS07b] ergeben haben, soll in der vorliegenden Arbeit ein Ansatz gegeben werden, die Frage, wie ein ideales Kurzzeit-Energiespeichersystem konzipiert werden muss, um Leistungsanforderungen im Millisekunden- bis Minutenbereich gerecht zu werden, zu beantworten. Während der Bearbeitung dieses Themas zeigte sich schnell, dass mathematische Modelle nur unzureichend vorhanden sind und dass die Untersuchung von Kombinationen von Energiespeichersystemen bei hohen Leistungsfluktuationen bisher nur oberflächlich betrachtet worden sind.

1.2 Einleitung

In stromrichtergespeisten Gleichspannungs-Zwischenkreisen wie zum Beispiel bei elektrischen Antrieben in Hybrid- oder Elektrofahrzeugen müssen Energiespeicher hohen Anforderungen bzgl. Leistungsänderungen über einem breiten Frequenzspektrum genügen. Traditionell werden Elektrolyt- und Snubberkondensatoren dazu eingesetzt, die Gleichspannung zu stabilisieren und zu glätten. Sobald der Energiebedarf aus dem Zwischenkreis zunimmt, werden üblicherweise zusätzlich elektrochemische Speicher, Schwungmassenspeicher oder Doppelschichtkondensatoren installiert.

Bei der näheren Betrachtung der Strombelastungen dieser Speicher stellt sich heraus, dass sie in vielen Systemen als eine Wechselstrom- bzw. Mischstromkomponente und nicht als eine Gleichstromkomponente angesehen werden müssen. Beispiele hierfür sind Starterbatterien in Kraftfahrzeugen [ROPE07], Bordnetzbatterien in Schienenfahrzeugen [ROPE07, BECK06], Batterien in Anlagen zur Energiekonditionierung [BENG05] und Netzstützung oder Batterien in Hybrid- bzw. Elektrofahrzeugen [BENG08b, BENG08c].

In vielen Anwendungen übersteigt die Amplitude des Wechselstrom- die Größe des Gleichstromanteils und Änderungen der Stromrichtung führen zu so genannten Mikrozyklen im Bereich einiger Millisekunden bis zu Mikrosekunden [ROPE01]. Die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Auswirkungen auf das Spannungsverhalten von elektrochemischen Systemen wie Batterien bei transienten Strom- oder Leistungsänderungen werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Es wird gezeigt, dass die in der Literatur beschriebenen Modelle für elektrochemische Systeme nicht ausreichend sind, um das Verhalten bei sehr schnellen Strom- bzw. Leistungsänderungen richtig zu beschreiben. Anhand der Analyse mathematischer Methoden wie der Fourier- und Laplace-Transformation wird dargestellt, in welchen Fällen ein elektrochemisches System mit der Theorie der linearen zeitinvarianten Systemtheorie behandelt werden kann und in welchen diese aufgrund der vorhandenen zeitabhängigen Nichtlinearitäten falsche Ergebnisse liefern muss.

Bei der Auswahl eines Energiespeichers für Gleichspannungs-Zwischenkreise sind verschiedene technische und wirtschaftliche Restriktionen zu beachten. Eine kurze Zusammenstellung möglicher Alternativen und deren Vor- und Nachteile finden sich in Kapitel 2.

In Kapitel 3 wird auf die Bedeutung von Wechselbelastungen auf ein Gleichspannungssystem eingegangen und anhand einiger Beispiele näher erläutert. Es zeigt sich hierbei, dass zur Beschreibung des Systemverhaltens elektrochemischer Speicher oder Quellen es nicht ausreichend ist, nur das „FARADAYsche“ Verhalten (also das mit Massenumsatz verbundene Verhalten) zu untersuchen. Die in dieser Arbeit durchgeführte Betrachtung des Energiespeichers in der jeweiligen Systemumgebung (z. B. in Hybrid- und Elektrofahrzeugen mit oder ohne Netzanschlussmöglichkeit (Plug-In), stationären Energiespeichern zur Netzstützung) unterscheidet sich von den Ansätzen „reiner“ Elektrotechniker oder Elektrochemiker.

Das Kapitel 4 widmet sich der Modellbildung zur Beschreibung der Energiespeichersysteme für dynamische Anforderungen. Es wird gezeigt, dass nicht immer eine Korrelation von Ergebnissen aus dem Frequenzbereich mit denen des Zeitbereichs vorliegt und welche Ursache für diese Abweichungen zu finden ist.

In Kapitel 5 wird recht ausführlich auf die Bedeutung des elektromagnetischen Felds eingegangen, um hieraus ein erweitertes Modell zur Beschreibung des thermischen und elektrischen Verhaltens von elektrochemischen Speichern abzuleiten. Neben der bei nichtsinusförmigen Strom- und Spannungsverläufen auftretenden (Gleichspannungs-) Verzerrungs-Blindleistung werden ausgehend von den MAXWELLschen Gleichungen eine geschlossene Lösung für die transiente Stromverdrängung gesucht

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

und die Bedeutung der Verschiebungsstromdichte bei elektrochemischen Systemen hervorgehoben. Zum Abschluss entsteht ein erweitertes elektrisches Ersatzschaltbild, welches zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens weiter verwendet wird.

Zur Verifikation der in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse und zum Vergleich des dynamischen Verhaltens unterschiedlicher Energiespeichertechnologien werden in Kapitel 6 Erwärmungsversuche bei hochfrequenten Rechteckimpulsen durchgeführt und die Wärmeentstehung in den Speichern betrachtet. Hierbei zeigt sich, dass die Verlustmechanismen stark von der Materialzusammensetzung aber auch von der Geometrie abhängig sind.

Auf Grundlage der bis hierhin gemachten Erkenntnisse erfolgt in Kapitel 7 die Betrachtung der Speichersysteme hinsichtlich der Reglerauslegung in Gleichspannungs-Zwischenkreisen.

Die Übertragbarkeit und die Validierung der theoretischen bzw. auf Zell- und Modulebene gezeigten Ergebnisse auf Systemebene werden am Beispiel eines Gleichspannungs-Zwischenkreises aus einer Kombination verschiedener Energiespeichersysteme zur Stützung eines elektrischen Netzes in Kapitel 8 untersucht. Anhand von Prüfstandsmessungen wird dabei v.a. die Relevanz der Ausführungen bezogen auf hochdynamische Anforderungen betrachtet.

In Kapitel 9 werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gegeben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.