

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.3 | Lithium-Ionen-Batterien | 182 |
| 7.3.1 | Chemie von Lithium-Ionen-Batterien | 182 |
| 7.3.2 | Anforderungen und Systemkomponenten für den Gebrauch von Lithium-Ionen-Batterien | 184 |
| 7.3.3 | Alterung und Betriebsführung | 187 |
| 7.3.4 | Anwendungsbeispiel – Solarstromspeichersystem | 189 |
| 7.4 | Hochtemperaturbatterien | 201 |
| 7.4.1 | Hauptreaktion | 201 |
| 7.4.2 | Anforderungen und Systemkomponenten | 203 |
| 7.4.3 | Anwendungsbeispiel – Einbindung einer Natrium-Schwefel-Batterie an einen Windpark in einem Inselnetz | 205 |
| 7.5 | Redox-Flow-Batterien | 209 |
| 7.5.1 | Chemie und Hauptreaktionen | 209 |
| 7.5.2 | Anforderungen an Redox-Flow-Batterien | 212 |
| 7.5.3 | Anwendungsbeispiel – Einbindung einer Redox-Flow-Batterie an einen Windpark in einem Inselnetz | 215 |
| 7.6 | Übungsaufgaben | 216 |
| 7.7 | Literatur | 217 |
| 8 | Chemische Speicher | 219 |
| 8.1 | Allgemeine Funktion und Anforderungen | 220 |
| 8.2 | Wasserstofftechnik | 223 |
| 8.2.1 | Speicherung von Wasserstoff | 223 |
| 8.2.2 | Techniken zur Wasserspaltung | 227 |
| 8.2.3 | Brennstoffzelle | 232 |
| 8.2.4 | Anwendungsbeispiel – Lastwagen mit Brennstoffzellenantrieb | 236 |
| 8.3 | Methanisierung | 238 |
| 8.3.1 | Grundreaktion | 239 |
| 8.3.2 | Anwendungsbeispiel – Windanlage und Methanisierung | 239 |
| 8.4 | Übungsaufgaben | 242 |
| 8.5 | Literatur | 243 |
| 9 | Lastmanagement | 245 |
| 9.1 | Grundfunktionen und Anforderungen | 245 |
| 9.2 | Anwendungsbeispiel – Lastmanagement für einen Gewerbe- und Wohnkomplex | 250 |
| 9.3 | Übungsaufgaben | 254 |
| 9.4 | Literatur | 254 |
| | Index | 257 |

1

Einleitung

Das Konzept, Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt zu produzieren und zu einem späteren Zeitpunkt zu konsumieren, ist im Grunde seit Beginn der menschlichen Zivilisation bekannt. Das Mästen einer Martinsgans kann als ein Speichervorgang, der Martinsschmaus als Entladevorgang interpretiert werden. Ganze Industrien leben davon, die Fettspeicher der Menschen zu füllen. Und andere Industrien leben wiederum davon, dafür Sorge zu tragen, dass diese Speicher nicht zu groß werden, oder diese übervollen Speicher auf ein gesundes Maß zu reduzieren.

Während Segelschiffe nur vorhandene (Wind-)Energie sofort nutzen konnten und somit bei einer Flaute ein Vorankommen lediglich durch Rudern möglich war, konnten Dampfschiffe und Motorschiffe nicht nur erheblich schneller fahren, sondern waren auch nicht mehr abhängig vom Wind. Es konnten neue, direktere Routen gewählt werden, ohne dass das Risiko einer Flaute in Kauf genommen werden musste.

Heutzutage wird der Begriff des Energiespeichers eher im Kontext der Energiewende gesehen. Man spricht von Elektroautos und Solarstromspeichern. Es gibt Pläne, riesige Stauseen in Skandinavien zu bauen, die Überschussstrom aus den Off-Shore-Windparks zwischenspeichern, damit die Energie in Zeiten von Flaute genutzt werden kann.

Im Alltag begegnen uns Energiespeicher in mobilen Geräten wie zum Beispiel Videokameras, MP3-Playern, Smartphones, E-Bikes und Werkzeugen. Ohne die Steigerung der Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien wären viele dieser Anwendungen kaum möglich.

Dieses Buch behandelt die Auslegung und den Betrieb von Speichersystemen. Es will dem Leser Werkzeuge an die Hand geben, mit denen diese und viele andere Energiespeichersysteme sinnvoll ausgelegt und geeignete Betriebsstrategien erarbeitet werden. Der Leser soll sich mit dem Thema vertraut machen, um gestalterisch neue Systeme zu entwickeln, deren Verhalten zu erkennen und erste Abschätzungen über deren Wirtschaftlichkeit erstellen zu können.

Das Buch gliedert sich in neun Kapitel. Im zweiten Kapitel wird ein Großteil der benötigten Werkzeuge beschrieben – ein Basissatz, der im weiteren Verlauf für die verschiedenen Technologien jeweils angepasst und verfeinert wird. Danach wird zunächst mit jenen Speichertechnologien begonnen, die auf klassischen physikalischen Mechanismen beruhen und die größtenteils bereits seit Jahrhunderten in unseren Alltag eingezogen sind: mechanische Speicher und thermische Speicher. Anschließend folgen neuere Technologien wie elektrische, elektrochemische und chemische Speicher. Den Abschluss bildet das Lastmanagement.

Dieses Buch kann auf zwei Arten gelesen werden: linear, analog zur Begleitung einer Vorlesung, oder punktuell, motiviert durch die eigene Lebens- oder Interessenlage. Damit das Springen in einzelne Technologien möglich ist, sollten die [Kapitel 2](#) und [3](#) zuerst gelesen werden. Sie enthalten all diejenigen Werkzeuge, die in späteren Kapiteln genutzt werden. Die dabei vorgestellte Methodik mag dem Leser auf den ersten Blick komplex und umständlich erscheinen. Wie bei jeder neuen Technik, die man erlernt, braucht es Geduld und Übung, bis sich Erfolge einstellen. Die Methoden haben sich in der Praxis bewährt. Mit ihnen entwickelte Speichersysteme fahren oder stehen bei Kunden und leisten gute Dienste.

2

Beschreibung von Speichertechnologien

Obwohl in diesem Buch sehr viele unterschiedliche Speichertechnologien angesprochen werden, ist deren systemtechnische Beschreibung vergleichbar. Ob Elektrofahrzeuge, Pumpspeicherkraftwerke oder Solarstromspeicher – alle diese Systeme lassen sich durch einen einheitlichen Satz von Werkzeugen beschreiben. Dies erleichtert einerseits die Auslegung einzelner Systeme, andererseits auch die Kombination von Technologien zu komplexeren, hybriden Speichersystemen. Eine Reihe von Phänomenen, die bei dieser allgemeinen Betrachtung auftreten, wird auch bei der speziellen Betrachtung der verschiedenen Speichertechnologien wiederkehren. Bereits bei dieser allgemeinen und abstrakten Betrachtung sind einige Phänomene zu beobachten, die bei der Verwendung verschiedenster Speichertechnologien auftreten. Sie werden in diesem Kapitel vorgestellt.

■ 2.1 Grundlegende Funktion, Aufbau von Speichersystemen und deren Beschreibung

Der grundlegende Aufbau und die Funktion eines Speichersystems lassen sich durch die Einführung des Leistungsflussbilds sehr einfach mathematisch beschreiben (Bild 2.1). Das Schöne an dieser Beschreibung ist, dass sie technologieunabhängig ist. Für die Auslegung eines Systems kann so im ersten Schritt ohne die Festlegung auf eine konkrete Technologie bereits eine Architektur erarbeitet werden, für die dann im zweiten Schritt eine geeignete Technologie gefunden wird.

2.1.1 Einspeichern, Ausspeichern oder Be- und Entladen

Ein Speichersystem kann als ein System aus Quellen und Senken verstanden werden, zwischen denen Leistung ausgetauscht werden kann. In Bild 2.2 ist dies beispielhaft dargestellt. Das Speichersystem besteht aus drei Elementen: einer Energiequelle Q^t , deren Energie gespeichert werden soll, dem Speicher S^t , der die Energie speichert, und einer Last L^t , die die Energie zu einem späteren Zeitpunkt verbraucht. Der Index t steht für einen bestimmten Zeitpunkt.

Damit die von Q^t erzeugte Energie gespeichert werden kann, muss Leistung von Q^t in den Speicher S^t fließen. Dieser Fluss wird durch $Q_S^t(W)$ beschrieben. Dieser Leistungstransport ist in der Regel nicht ideal. Es treten Verluste durch den Transport oder die Umwandlung der Leistung von der einen in eine andere Energieform auf. Diese werden durch die Transporteffizienz