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 Flauten 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.

Bild 2.1 Um Speichersysteme zu beschreiben, muss nicht nur der Be- und Entladevorgang betrachtet werden, sondern auch, wann, wohin und wie viel Leistung transportiert werden soll. Die Speicheraufgabe ist stets auch eine Transportaufgabe (Illustration: Hüter/Schmiegel)

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 Leistungsverluste durch den Transport oder die Umwandlung der Leistung von der einen in eine andere Energieform auf. Diese werden durch die Transporteffizienz $\eta_{QS}(Q_S^t)$ beschrieben. Die Effizienz des Leistungstransports umfasst in dieser Beschreibung alle Verluste, die auf dem Weg von der Quelle Q^t zum Speicher S^t auftreten. In ihm steckt die Information über die verwendeten Technologien.

Für die einheitliche Beschreibung der Leistungsflüsse wird vereinbart, dass die Transportverluste stets beim Empfänger berechnet werden. Dies entspricht der intuitiven Beschreibung eines Vorgangs: Eine Quelle speichert beispielsweise 1 kW in einem Speicher, durch den schlechten Wirkungsgrad von 50 % kommen aber nur 500 W dort an.

Unabhängig davon, welche Technologie verwendet wird: Kein Speichersystem hat ein beliebiges Fassungsvermögen. Auch kann nicht beliebig viel Energie aus einem Speicher entnommen werden. Es ist daher notwendig, den Energieinhalt κ^t(kWh) zu ermitteln. Dieser trifft eine Aussage darüber, wie viel Energie zu einem Zeitpunkt t im Speicher vorhanden ist. Für den in Bild 2.2 dargestellten Fall berechnet sich κ^t aus:

$$\kappa^t = \int_0^t Q_S^\tau \eta_{QS}(Q_S^\tau) - S_L^\tau \, \mathrm{d}\tau \tag{2.1}$$

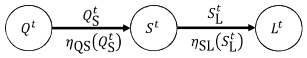

Bild 2.2 Grundlegende Beschreibung eines Speichersystems: Eine Leistung Q_S^t wird von einer Quelle Q^t in einem Speicher S^t gespeichert. Beim Entladen wird eine Leistung S_L^t vom Speicher zu einer Last L^t übertragen. Die Verluste werden jeweils durch die Effizienzen η_{QS} und η_{SL} beschrieben

Der Energieinhalt κ^t ergibt sich aus der Summe der Zu- und Abflüsse in einem Speicher.

Beispiel 2.1

Ein leerer Speicher wird eine Stunde lang mit 15 kW geladen, danach mit 5 kW für eine weitere Stunde. Die Effizienz des Speichervorgangs liegt bei einer Ladeleistung von 15 kW bei 80 %, bei einer Ladeleistung von 5 kW bei 10 %. Wie groß ist der Ladezustand am Ende des Ladevorgangs?

$$Q_\mathrm{S}^t = \begin{cases} 15\,\mathrm{kW}; & t \in [0,1\,\mathrm{h}] \\ 5\,\mathrm{kW}; & t \in]1\,\mathrm{h}, 1.5\,\mathrm{h}] \end{cases}, \quad \eta_\mathrm{QS}(Q_\mathrm{S}^t) = \begin{cases} 80\,\%; & Q_\mathrm{S}^t \geq 10\,\mathrm{kW} \\ 10\,\%; & Q_\mathrm{S}^t < 10\,\mathrm{kW} \end{cases}$$

$$\kappa^T = \int_0^T Q_\mathrm{S}^t \eta_\mathrm{QS}(Q_\mathrm{S}^t)\,\mathrm{d}t = \int_0^{1\,\mathrm{h}} 15\,\mathrm{kW} \cdot 80\,\%\,\mathrm{d}t + \int_{1\,\mathrm{h}}^{1{,}5\,\mathrm{h}} 5\,\mathrm{kW} \cdot 10\,\%\,\mathrm{d}t = 12\,\mathrm{kWh} + 0{,}75\,\mathrm{kWh}$$
$$= 12{,}75\,\mathrm{kWh}$$

Um Speichersysteme miteinander zu vergleichen, wird unter anderem die Systemeffizienz herangezogen. Sie fasst die verschiedenen Einzelverluste zusammen. Um diese experimentell zu bestimmen, wird das Verhältnis einer kommenden Leistung Q_S^t und der später entnommenen Leistung S_L^t bestimmt.

$$\eta_\mathrm{QS} = \int_0^T \frac{Q_\mathrm{S}^t}{S_\mathrm{L}^t}\,\mathrm{d}t \tag{2.2}$$

Diese Messvorschrift hat den Nachteil, dass das Ergebnis von dem zeitlichen Verlauf der Be- und Endladung abhängt. Im Beispiel 2.1 liegt der gemessene Wirkungsgrad bei $\eta_\mathrm{QS} = \frac{17{,}5\,\mathrm{kWh}}{12{,}5\,\mathrm{kWh}} = 71{,}4\,\%$. Wäre der Ladevorgang durchgehend mit 15 kW erfolgt, läge der Wirkungsgrad bei 80 %. Will man daher die Effizienz verschiedener Speichersysteme vergleichen, ist es notwendig, den Be- und Endladevorgang genau festzulegen. Dies wird beispielsweise bei der Bewertung von Solarwechselrichtern beim europäischen Wirkungsgrad [1] oder bei der Messung der Effizienz von Solarstromspeichern so durchgeführt [2, 3].

Um eine vom Be- und Entladevorgang unabhängige Beschreibung der Effizienz zu erhalten, ist es sinnvoll, die tatsächlich auftretenden Verluste für die Bestimmung des Wirkungsgrads heranzuziehen. Wenn A_B^t den Leistungsfluss von A nach B darstellt, reicht es in der Regel aus, die Verluste bis zur zweiten Potenz zu erfassen. Es gilt dann:

$$A_\mathrm{B}^t \rightarrow A_\mathrm{B}^t - \left(a_{\mathrm{A_B}} + b_{\mathrm{A_B}} A_\mathrm{B}^t + c_{\mathrm{A_B}} {A_\mathrm{B}^t}^2\right) \tag{2.3}$$

Dabei beschreiben $a_{\mathrm{A_B}}$, $b_{\mathrm{A_B}}$ und $c_{\mathrm{A_B}}$ die konstanten, linearen und quadratischen Konversionsverluste.

Setzt man diese Verluste in die Definition des Wirkungsgrads ein und hält den Leistungsfluss konstant, so gilt:

$$\eta_\mathrm{AB}\left(A_\mathrm{B}^t\right) = \int_0^T 1 - \frac{a_{\mathrm{A_B}}}{A_\mathrm{B}^t} - b_{\mathrm{A_B}} - c_{\mathrm{A_B}} A_\mathrm{B}^t\,\mathrm{d}t \tag{2.4}$$

In Bild 2.3 ist für unterschiedliche Leistungsflüsse von A_B^t der Wirkungsgrad dargestellt. Der konstante Anteil $a_{\mathrm{A_B}}$ sorgt für die charakteristische $\frac{1}{x}$-Form bei niedrigen Leistungen. Sie sorgt

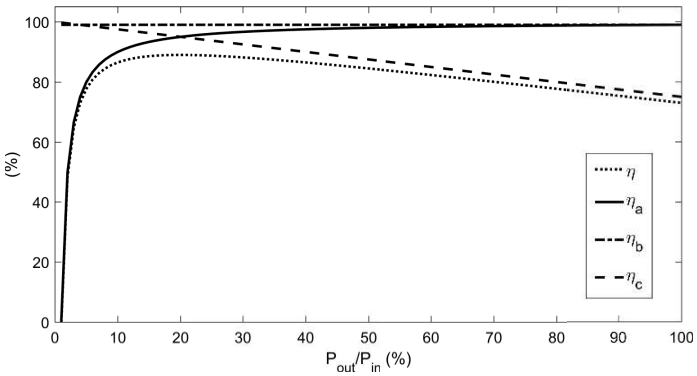

Bild 2.3 Beispiel für eine Effizienzkurve, die sich aus dem in Gleichung (2.3) dargestellten Ansatz ergibt: η stellt den Gesamtwirkungsgrad dar, $\eta_{(a,b,c)}$ den Wirkungsgrad, der sich aus den Einzeltermen ergibt

dafür, dass Konversionen im Schwachlastbetrieb in der Regel nicht effizient sind. Der mit der Leistung lineare Anteil $b_{\mathrm{A_B}}$ bleibt für den gesamten Wirkungsbereich konstant und deckelt die maximal zu erreichende Effizienz. Der in der Leistung quadratische Anteil $c_{\mathrm{A_B}}$ dominiert die Effizienz bei hohen Leistungen.

Dieser Kurvenverlauf ist typisch für alle Transport- und Wandlungstechnologien. Jede Technologie hat in der Regel konstante Verluste, sei es Abwärme oder einfach nur ein grundlegender Energieverbrauch. Die linearen Anteile haben ihren Ursprung in dem normalen Betrieb. Die quadratischen Anteile hingegen entstehen durch Wärmeverluste, die überproportional mit der Leistung steigen. Bei einer elektrotechnischen Komponente entspricht $a_{\mathrm{A_B}}$ der Summe der konstanten Verluste, die durch die Aufrechterhaltung der Betriebsspannung (Netzteil), die Versorgung der Steuerelektronik, den Betrieb des Ventilators usw. entstehen. Lineare Verluste $b_{\mathrm{A_B}}$ entstehen in diesem Fall durch den elektrischen Widerstand der Leitungen und durch den durch Kondensatoren bzw. Induktivitäten erzeugten Widerstand bei Strom- und Spannungssprüngen. Quadratische Verluste $c_{\mathrm{A_B}}$ ergeben sich durch nichtlineare Effekte in den beteiligten Induktivitäten und Kapazitäten. Man sieht, dass der in Gleichung (2.3) dargestellte Ansatz die vielen unterschiedlichen physikalischen Vorgänge beschreiben kann.

Beispiel 2.2

Eine Transport- und Übertragungstechnologie hat die folgenden Verluste: ($a = 1\,\mathrm{kW}$, $b = 0{,}07$, $c = 10^{-6}\,\frac{1}{\mathrm{kW}}$). Wie groß ist der Verlust, wenn von A nach B $P_{AB} = 54\,\mathrm{kW}$ übertragen werden soll? Welcher Effizienz entspricht dies?

$$(a + b \cdot B + c \cdot B^2) = 1\,\mathrm{kW} + 0{,}07 \cdot 54\,\mathrm{kW} + 10^{-6}\,\frac{1}{\mathrm{kW}} \cdot 54^2\,\mathrm{kW}^2 = 4{,}78\,\mathrm{kW}$$

$$\eta_{AB} = \frac{54\,\mathrm{kW} - 4{,}78\,\mathrm{kW}}{54\,\mathrm{kW}} = \frac{49{,}22\,\mathrm{kW}}{54\,\mathrm{kW}} = 91{,}15\,\%$$

2.1.2 Selbstentladung von Speichern

Die Aufgabe eines Speichers besteht darin, Energie in die Zukunft „zu verschieben“. In dem hier verwendeten Leistungsflussbild entspricht dieser Vorgang einem Leistungsfluss aus der Vergangenheit in die Gegenwart $S_{\mathrm{S}}^{t-\Delta t}$ und einem Leistungsfluss in die Zukunft S_{S}^{t} nach $S^{t+\Delta t}$ (Bild 2.4). Dabei wird von einer zeitdiskreten Beschreibung ausgegangen, wobei die Zeit in Zeitschritte der Größe Δt unterteilt wird.

Auch bei diesem Transport können Verluste auftreten, die durch einen Wirkungsgrad $\eta_{SS}(S_{\mathrm{S}}^{t})$ beschrieben werden. In diesem Fall handelt es sich aber nicht um Übertragungsverluste. Vielmehr geht es hier um Vorgänge, die die Speicherung selbst betreffen und durch den Sammelbegriff Selbstentladung beschrieben werden.

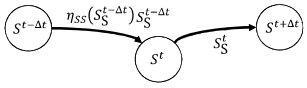

Bild 2.4 Beschreibung der Selbstentladung eines Speichers: Der Speicherinhalt vom Zeitpunkt $t-\Delta t$ füllt den Speicher zum aktuellen Zeitpunkt. Nicht genutzter Speicher fließt in den Speicher zum Zeitpunkt $t+\Delta t$. η_{SS} entspricht der Selbstentladung

Auch hier reicht es, den in Gleichung (2.3) beschriebenen Ansatz zu verwenden. Konstante Verluste treten in der Regel eher bei Technologien auf, die zur Speicherung noch zusätzliche Unterstützung benötigen. Dies ist beispielsweise bei Flywheels der Fall oder bei Redox-Flow-Batterien. Ein linearer Verlust ist hingegen bei Batterien zu beobachten. Dieser rührt daher, dass proportional zum Speicherinhalt auch die Wahrscheinlichkeit einer ungewollten chemischen Reaktion steigt.

2.1.3 Beschreibung eines Speichersystems

Um Speichersysteme zu beschreiben, wird in diesem Buch ein Energie- bzw. Leistungsflussbild verwendet. Dabei werden verschiedene Quellen, Senken oder Speicher durch Großbuchstaben beschrieben. Der Leistungstransport von A nach B wird durch die Quelle A mit dem Ziel B als Subindex als A_{B}^{t} beschrieben.

Die Transport- und Wandlungsverluste von Knoten A nach B werden durch die Funktion η_{AB} beschrieben. Da diese von dem Leistungsfluss abhängig sind, ist η_{AB} eine Funktion des Leistungsflusses von A nach B, d. h. $\eta_{\mathrm{AB}} = \eta_{\mathrm{AB}}(A_{\mathrm{B}}^{t})$. Da der Gebrauch dieser Konversionsverluste stets eindeutig ist, wird zur Vereinfachung lediglich η_{AB} verwendet.

In Bild 2.5 und Bild 2.6 werden mit diesen Elementen Speichersysteme beschrieben. Dabei wird in Bild 2.5 zur Veranschaulichung jeweils eine Realisierung beschrieben. Bild 2.6 beschreibt hingegen einen sektorenübergreifenden Energiespeicher. Dabei sind die Quellen und Senken auf zwei Sektoren verteilt, können aber über den Speicher und die dort verwendeten Konversionstechniken Leistung transferieren. Unter die Sektoren fällt zum Beispiel der Strom-, Wärme- und Mobilitätssektor. Ein elektrochemischer Speicher, der elektrische Energie speichern kann, könnte beim Entladen sowohl elektrische Lasten bedienen als auch Wärme erzeugen. Zum Laden kann der elektrische Strom einer Windkraftanlage oder eines Blockheizkraftwerks genutzt werden. Letzteres bedient gleichzeitig den Wärme- und den Stromsektor.

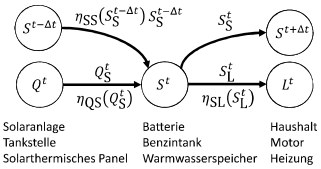

Bild 2.5 Beschreibung eines Energiespeichersystems mit verschiedenen Beispielen von Speichertechnologien bzw. Anwendungen

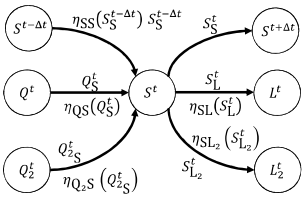

Bild 2.6 Beispiel für ein sektorenübergreifendes Energiespeichersystem: Die Quellen und Lasten vom Sektor 1 Q^t, L^t sind über den Speicher mit den Quellen und Lasten des 2. Sektors Q_2^t, L_2^t verknüpft

Um ein Speichersystem mathematisch zu beschreiben, werden die folgenden Schritte durchgeführt:

- Aufstellen der Bilanzgleichung für die beteiligten Systemkomponenten,
- Festlegen von Randbedingungen,
- Definition der Zielfunktion.

Für das in Bild 2.5 dargestellte System sollen diese Schritte durchgeführt werden. Zunächst kommen die Bilanzgleichungen für die Quelle. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Quelle Q zum Zeitpunkt t einen definierten Wert $\tilde{Q}^t$ hat. Es gilt dann:

$$\widetilde{Q^t} \leq Q_S^t \tag{2.5}$$

Die zu speichernde Leistung Q_S^t kann genauso groß sein wie die zum Zeitpunkt t durch die Quelle zur Verfügung stehende Leistung $\tilde{Q}^t$, aber auch weniger betragen. Mehr Leistung, als die Quelle zur Verfügung stellt, kann nicht gespeichert werden.

Ob hier eine „≤“- oder eine „=“-Relation gilt, hängt von der Technologie ab. Wäre die Quelle beispielsweise eine Photovoltaikanlage, bestünde stets die Möglichkeit nicht die volle Leistung der Anlage zu nutzen. Wäre die Quelle ein Dieselaggregat, so würde das Wegfallen eines Verbrauchers ohne Änderung der Produktion des Dieselaggregats zu einer Erhöhung der Frequenz und schlimmstenfalls zur Beschädigung des Geräts führen. Es müsste daher abgeregelt werden.

Für die Last wird analog angenommen, dass zum Zeitpunkt t ein bestimmter, definierter Bedarf $\tilde{L}^t$ vorhanden ist. Es gilt dann:

$$\tilde{L}^t = \eta_{SL} S_L^t \tag{2.6}$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass die benötigte Last zu jedem Zeitpunkt gedeckt sein muss. Ist dies nicht der Fall, kann hier eine „≥“-Relation verwendet werden.

Für die Beschreibung des Speichers S^t müssen nun die Zu- und Abflüsse zusammengefasst werden:

$$\underbrace{\eta_{QS} Q_S^t + \eta_{SS} S_S^{t-\Delta t}}_{\text{Zuflüsse}} - \underbrace{\left(S_L^t + S_S^{t+\Delta t}\right)}_{\text{Abflüsse}} = 0 \tag{2.7}$$

Ein Leistungsfluss ergibt sich durch die Ladung des Speichers Q_S^t und durch die bereits gespeicherte Energie, repräsentiert durch den Leistungsfluss aus der Vergangenheit $S_S^{t-\Delta t}$. Beide Leistungsflüsse werden jeweils um die Konversionsverluste korrigiert.

Der Leistungsabfluss ergibt sich aus dem Leistungsfluss zum Verbraucher S_L^t und jenem Anteil, der für eine zukünftige Entladung zur Verfügung steht.

Als Nächstes werden die Randbedingungen festgelegt. Das sind Einschränkungen für den Leistungstransport. Diese können vielfältiger Natur sein. In der in diesem Buch verfolgten Darstellung sind grundsätzlich alle Leistungsflüsse positiv.

$$\begin{aligned} Q_S^t &\in \left[0, Q_{S_{max}}^t\right] \\ S_L^t &\in \left[0, S_{L_{max}}^t\right] \\ S_S^t &\in [0, \kappa_{max}] \end{aligned} \tag{2.8}$$

Die Obergrenzen können konstant, zeitabhängig oder auch von anderen Zustandsvariablen abhängig sein. Konstanten oder von Zustandsvariablen abhängige Grenzen ergeben sich oftmals durch physikalische Randbedingungen, etwa den mechanischen Aufbau.

Im nächsten Schritt muss eine Zielfunktion definiert werden. Diese Zielfunktion gibt an, nach welchem Kriterium zum jeweiligen Zeitpunkt die Leistungsflüsse unter Beibehaltung der Randbedingungen geregelt werden sollen.

In dem obigen Beispiel könnten dies die Speicherkosten c_S und die Verschleißkosten bei Abregelung der Quelle c_Q sein:

$$\min Y = \int_0^T \underbrace{c_S S_S^t}_{\text{Speicherkosten}} + \underbrace{c_Q \left(\widetilde{Q^t} - Q_S^t\right)}_{\text{Verschleißkosten}} \mathrm{d}\, t \tag{2.9}$$

Beispiel 2.3

Die Speicherkosten liegen bei $c_S = 13 \frac{\text{€ct}}{\text{kWh}}$. Eine Abregelung führt zu Verschleißkosten in Höhe von $c_Q = 1 \frac{\text{€ct}}{\text{kWh}}$. Für eine Dauer von 2 Stunden bleibt die Batterie mit 3 kWh geladen, d. h. $S_S^{t+\Delta t} = 3\,\text{kW}$, während eine Abregelung konstant bei 10 kW liegt: $\widetilde{Q^t} - Q_S^t = 10\,\text{kW}$. Wie groß sind die zu optimierenden Speicherkosten?

$$Y = \int_0^{T=2\text{h}} \left(0{,}13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 3\,\text{kW} + 0{,}01 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 10\,\text{kW}\right) \mathrm{d}t = 2 \cdot 0{,}49\,\text{€} = 0{,}98\,\text{€}$$

Bilanzgleichungen, Randbedingungen und Zielfunktion beschreiben ein Speichersystem vollständig. Da es sich allerdings um eine Reihe von Ungleichungen handelt, gibt es in der Regel unterschiedliche Lösungen und Lösungsstrategien. Es existieren verschiedene Möglichkeiten, diese Gleichungen zu lösen. Zum einen kann das Gleichungssystem analytisch gelöst werden.

Alternativ können Heuristika verwendet werden. Die Aufgabe, eine geeignete Lösungsstrategie umzusetzen, wird in der Regel einem Energie-Management-System (EMS) zugeordnet. Die dabei verwendete Methodik ist vielseitig [4–7].

2.1.4 Entwicklung einer wirtschaftlich optimierten Betriebsführung

Im Folgenden soll eine wirtschaftlich optimierte Betriebsführung für ein Solarstromspeichersystem anhand des dargestellten Formalismus entwickelt werden. Das Flussdiagramm ist in Bild 2.7 dargestellt [8, 9]. P^t stellt die Solarstromanlage dar. Diese produziert zu einem Zeitpunkt t eine Leistung von $\tilde{P}^t$. Solarstrom kann ins Netz G^t eingespeist werden. Dann wird eine Einspeisevergütung gezahlt. Alternativ kann der Solarstrom im Speicher S^t gespeichert oder direkt zur Versorgung der Lasten des Haushalts L^t genutzt werden. Die zum Zeitpunkt t benötigte Last liegt bei $\tilde{L}^t$. Der Netzstrom wird in diesem Beispiel nur für die Deckung der Lasten im Haushalt verwendet. Eine Ladung des Speichers aus dem Netz sei nicht erlaubt.

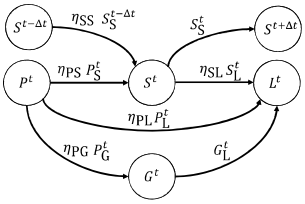

Bild 2.7 Leistungsflussdiagramm eines Solarstromspeichersystems [9]: P^t stellt die Produktion der Solarstromanlage dar. L^t fasst alle Verbraucher des Haushalts zusammen. S^t repräsentiert den Speicher und G^t den Netzanschluss

Die Leistungsflussgleichungen lauten:

$$\begin{aligned} \tilde{P}^t &\geq P_L^t + P_S^t + P_G^t \\ \tilde{L}^t &= \eta_{PL} P_L^t + \eta_{SL} S_L^t + G_L^t \\ 0 &= \eta_{PS} P_S^t + \eta_{SS} S^{t-\Delta t} - \left(S_L^t + S_S^{t+\Delta t}\right) \end{aligned} \tag{2.10}$$

Ein einfacher Algorithmus für eine geeignete EMS-Strategie besteht darin, den Bedarf mit der jeweils billigsten Energie zu benutzen. Hierzu müssen die Leistungspfade mit Kosten oder Erträgen verknüpft werden. Der Leistungspfad aus dem Netz wird hier mit $28\frac{\text{€ct}}{\text{kWh}}$ bewertet. Analog kann die Einspeisung von Solarstrom mit der Einspeisevergütung von $11\frac{\text{€ct}}{\text{kWh}}$ bewertet werden:

$$c_{G_L^t} = -28\frac{\text{€ct}}{\text{kWh}}, \quad c_{P_G^t} = 11\frac{\text{€ct}}{\text{kWh}} \tag{2.11}$$

Der Wert des Pfads P_L^t entspricht der Kostenersparnis, die dadurch erzielt wird, dass kein Netzbezug stattfindet, wobei die Effizienzverluste den Wert reduzieren.

$$c_{P_L^t} = -c_{G_L^t} = 28\frac{\text{€ct}}{\text{kWh}}\eta_{P_L} \tag{2.12}$$

Analog können die Speicherpfade ermittelt werden:

$$c_{S_L^t} = -c_{G_L^t}\eta_{SL} = 28\frac{\text{€ct}}{\text{kWh}}\eta_{SL} \tag{2.13}$$

Der Wert von P_S ergibt sich aus der Annahme, dass hiermit zukünftige Erträge realisiert werden können.

$$c_{P_S^t} = -c_{G_L^t}\eta_{PS}\eta_{SL} = 28\frac{\text{€ct}}{\text{kWh}}\eta_{PS}\eta_{SL} \tag{2.14}$$

Mit diesen Werten lassen sich die Phasen monetär ordnen:

1. Deckung der Haushaltslasten durch die Produktion von Solarstrom: $P_L^t, c_{P_L}^t$
2. Deckung der Haushaltslasten durch die im Speicher vorhandene Energie: $S_L^t, c_{S_L^t}$
3. Speicherung von noch vorhandenen Überschüssen von Solarstrom: $P_S^t, c_{P_S}^t$
4. Einspeisung von Solarstrom ins Netz: $P_G^t, c_{P_G}^t$
5. Deckung von Haushaltslasten durch das Netz: G_L^t

Die Idee ist nun, die vorhandene Leistung stets über den jeweils wertvollsten Pfad laufen zu lassen. Im Folgenden sollen zwei Situationen betrachtet werden: $\tilde{P}^t \geq \tilde{L}^t$ und $\tilde{P}^t < \tilde{L}^t$.

$\tilde{P}^t \geq \tilde{L}^t$: Die erste Senke, die zu füllen ist, ist der Lastknoten. Da die Solarstromerzeugung größer als der Leistungsbedarf ist, wird dieser Knoten komplett versorgt. Dieser Leistung, korrigiert um die Transferkosten, wird die zur Verfügung stehende Solarstromleistung bereitgestellt:

$$\tilde{P}^{t'} := \tilde{P}^t - \frac{\tilde{L}^t}{\eta_{PL}} \tag{2.15}$$

Der zweite Knoten, der zu befüllen ist, ist der Speicher, wenn dieser noch nicht voll ist. Da der Leistungspfad aus dem Netz negativ bewertet wurde, die Ladung über die Solarstromanlage positiv, kann der Speicher über die Solarstromanlage geladen werden.

$$\tilde{P}^{t''} := \tilde{P}^{t'} - P_S^t \tag{2.16}$$

Sollte dann noch Leistung zur Verfügung stehen, wird diese ins Netz eingespeist.

$$\tilde{P}^{t'''} := \tilde{P}^{t''} - P_G^t = 0 \tag{2.17}$$

Für den Fall $\tilde{P}^t < \tilde{L}^t$ geht man analog vor. Die gesamte Leistung aus der Solarstromanlage wird für die Deckung des Haushaltsbedarfs verwendet.

$$\begin{aligned} P_L^t &= \tilde{P}^t \\ \tilde{L}^{t'} &:= \tilde{L}^t - P_L^t\eta_{PL} \end{aligned} \tag{2.18}$$

Der zweite Pfad ist die Batterie. Hier wird so viel Leistung genutzt, wie in der Batterie verfügbar ist:

$$\tilde{L}^{t''} := \tilde{L}^{t'} - S_L^t\eta_{SL} \tag{2.19}$$

Sollte $\tilde{L}^{t''}$ noch nicht null sein, weil beispielsweise nicht genug Kapazität vorhanden oder die Entladeleistung limitiert war, wird der Rest durch das Netz gedeckt:

$$\tilde{L}^{t'''} := \tilde{L}^{t''} - G_L^t = 0 \tag{2.20}$$

Die hier durchgeführten Überlegungen führen zu einer sehr einfachen Vorschrift für das Energiemanagement von Solarstromspeichersystemen:

- Ist die aktuelle Solarstromproduktion größer als der aktuelle Verbrauch, wird zunächst der Verbrauch gedeckt und der Rest gespeichert. Sollte der Speicher voll sein, wird der Rest ins Netz eingespeist.
- Ist die aktuelle Solarstromproduktion kleiner als der aktuelle Verbrauch, wird zunächst der Verbrauch aus der aktuellen Solarstromproduktion gedeckt, der Rest kommt aus dem Speicher. Sollte der Speicher leer sein, wird aus dem Netz eingespeist.
- Eine Ladung des Speichers aus dem Netz erfolgt nicht.

Diese Form der Regelung wird in fast allen Solarstromspeichersystemen umgesetzt. Mittlerweile haben einige Hersteller verbesserte Methoden entwickelt, um die Leistungsflüsse zu erweitern. Diese erweitern die Bewertung um Produktions- und Lastprognosen oder machen den Leistungsfluss von und zur Batterie vom Batteriezustand abhängig, um die Nutzungsdauer der Batterie zu verlängern [10–15].

2.2 Auslegung von Speichersystemen

Ziel einer Auslegung ist es, die bereitzustellende Kapazität κ sowie die maximale Größe der Leistungspfade festzulegen. Ausgangspunkt wird dabei oftmals eine Beschreibung des zeitlichen Produktionsverlaufs $\tilde{Q}^t$ und des Verbrauchsverlaufs $\tilde{L}^t$ sein. Des Weiteren werden eine Zielsetzung, Aufgabe oder ein Geschäftsmodell definiert sein. Diese liefern die Antwort auf die Frage „Welchem Zweck dient das Speichersystem?“ und mündet bei vollständiger Beschreibung des Systems in die zu optimierende Zielfunktion.

Eine wichtige charakteristische Größe ist bei Speichersystemen die „E“- und die „C“-Rate. Aus systemtechnischer Sicht ist die „E“-Rate eine charakterisierende Größe für ein Speichersystem. Sie ist der bei elektrochemischen Speichern verwendeten „C“-Rate entlehnt. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der Beladeleistung in kW und der vorhandenen Kapazität in kWh. Bei einem Speicher mit einer Kapazität von 1200 Wh entspricht eine Entladung mit 200 W einer E-Rate von $\frac{0{,}2}{1{,}2} = 0{,}16$.

Die E-Rate ist unabhängig von der vorhandenen Technologie und deren Realisierung. Sie erlaubt eine erste Kategorisierung der Anwendung. So sind Anwendungen mit E-Raten $\leq 1{,}5$ Energiespeicheranwendungen. Sind die E-Raten höher, wird der Speicher als Leistungsspeicher verwendet, d. h., die Be- und Endladevorgänge erfolgen sehr schnell. Diese Unterscheidung ist wichtig für die Auswahl der Speichertechnologie und der Übertragungs- und Umwandlungstechnologie. Gerade bei leistungselektronischen Systemen bedeuten hohe Übertragungsleistungen zugleich hohe Ströme und verursachen damit größere Verluste und höhere Kosten.

Eine weitere Zielgröße ist die Eigendeckungsrate *ED*. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen der aus dem System erbrachten Energie, die die Leistung über einem Zeitraum deckt, und dem in diesem Zeitraum T in Summe benötigten Verbrauch. Angenommen ein System besteht aus M Lasten und hat N Quellen zur Verfügung, dann ergibt sich die Eigendeckungsrate ED_{Q}, die durch die Quellen gedeckt wird, aus der Summe aller Leistungen, die von diesen Quellen zu den vorhandenen Lasten geflossen sind, geteilt durch die insgesamt benötigte Menge:

$$ED_{\mathrm{Q}} = \frac{\int_0^T \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \eta_{\mathrm{Q}_i\mathrm{L}_j} Q_{i,\mathrm{L}_j}^t \,\mathrm{d}\,t}{\int_0^T \sum_{j=1}^{M} \tilde{L}_j^t \,\mathrm{d}\,t} \tag{2.21}$$

Index

A
AC 109
adiabatische Kompression 70
Akkumulatoren 145
allgemeine Gaskonstante 68
Alternating Current 109
Anforderungen 41
Anforderungsphase 41
Anode 144
Anolyth 201
Assoziation 43
Aufbau einer Doppelschicht 126
Auslegung 22
Autarkierate 23

B
Batterie-Management-System 159
Batterien 145
Batteriezelle 144
Beginning of Life 153
Beziehungsdiagramm 44
Block 43
BMS 159
BOL 153
Boltzmann-Konstante 86
Brennstoffzelle 219
Brückengleichrichter 112
Busbar 178

C
Carnot-Prozess 89
Coulomb 118
Coulomb-Counting 149
C-Rate 22

D
DC 109
DC/DC-Wandler 110
Demand Side Management 229
Dielektrikum 119
Diode 110
Direct Current 109
Direkter Eigenverbrauch 25
Doppelschicht 126
Doppelschichtkondensator 127
Druckluftspeicher 67
Durchtrittspolarisation 147

E
Effizienzkurve 16
elektrische Feldkonstante 118
elektrochemische Grundreaktion 144
Elektrolyse 216
elektromechanisches Konversionssystem 51
Elektromotor 53
Elementarladung 118
Emissionsgrad 85
EMS 20, 159
End of Life 153
Energiedichte 35
Energie-Management-System 159
EOL 153
E-Rate 22
Erzeugungsmanagement 229
<<Extend>> 51

F
Faraday-Konstante 146
Fertigungskosten 29
freie Reaktionsenthalpie 145
Frequenzumrichter 110

G
Gesamtwirkungsgrad 16
Gleichrichter 110
Gleichstrom 109
Gleichstromnetz 110

H
Halbleiterbauelemente 110
Helmholtzschicht 126
Herstellkosten 29
Hochtemperaturspeichermedien 102

I
ideales Gasgesetz 67
indirekter Eigenverbrauch 25
Induktivität 113
innere Energie 70, 82
innere Helmholtzschicht 126
Investitionskosten 28
isochore Kompression 68
isothermen Kompression 68

K
kalendarische Alterung 154
Kaltleiter 178
kapazitives aktives Balancing 157
katalytische Reaktionen 106
Kathode 144
Katholyth 201
kinetische Energie 54
Klimakontrolle 47
Knallgas 215
Kohlenstoff 211
Komponenten 41
Kondensator 110
Kondensatorarten 123

L
Laderegler 164
Ladeverfahren 165
Lageenergiespeicher 58
Lastmanagement 229
Latentspeichermedien 102
Latentwärmespeicherung 101
LCO 174
LCOE 28
Leerlaufspannung 148
Leistungselektronik 110
Leistungsflusskontrolle 47
Leistungspfad 47
LFP 174
Lithium-Ionen-Batterie 173
Lorentzkraft 52
LTO 174

M
Materialkosten 29
mechanische Speichersysteme 51
mechanischer Aufbau 47
Methanisierung 223

N
Natrium-Schwefel-Batterie 192
NCA 174
Nernst-Gleichung 146
Netzanschlussbedingungen 182
Niedertemperaturspeichermedien 102
NMC 174
NPV 32
„Null"-Hypothese 31

O
Ohm'sches Gesetz 120

P
passives Balancing 157
PEMEL 217
PEMEL-Zelle 217
Permittivität 118
Phasenübergangstemperatur 103
Photokatalyse 218
Planck'sches Strahlungsgesetz 85
Polarisationswiderstand 158
potenzielle Energie 53
Power-to-Gas 223, 225
Primary Batteries 145
Primärzellen 145
Projektierungskosten 30
Proton Exchange Membran Electrolysis 217
Pseudokapazität 127
PTC 178
PTC-Widerstand 131
Pumpspeicherkraftwerk 55

R
Reaktionsenthalpie 145
Reaktionswärme 145
Redox-Flow-Batterie 201
Redox-Reaktion 144
Requirement Tracability Matrix 44
Residuallast 24
Rotationsspeicher 60
rotatorische Bewegungsleistung 52
RTM 44

S
Sauerstoff 211
Schalter 110
Schmelztemperatur 102
Schmelzwärme 101
Schwungradspeicher 59
Secondary Batteries 145
Sekundärzellen 145
Selbstentladung 17
Self Sufficiency 23
Separator 145
Smart Grid 229
Smart Home 229
SOC 36
SOH 36
Solarthermische Anlage 98
Speichersystem 14
spektrale Strahlungsdichte 85
Spezialisierungen 43
Spezifikation 41
Spezifikationsphase 41
spezifische Wärmekapazität 82
Spule 110
starre Helmholtzschicht 126
State of Charge 36
State of Health 36
Systems Engineering 41

T
Thermal Runaway 175
thermische Arbeit 82
thermische Dissoziation 106
thermische Speicher 82
thermochemische Speicheranlage 105
Trägheitsmoment 52, 60
Transformator 114
Turbulatoren 85

V
Verbrauchsmanagement 229
Verdampfungswärme 101
volumenspezifische Wärmekapazität 94

W
Wärme 82
Wärmefluss 84
Wärmeleitkoeffizient 83
Wärmespeicherzahl 94
Wärmestrahlung 85
Wärmetransport 84
Wärmeübergangskoeffizient 84
Wasserstoff 211
Wasserstofftechnik 215
Wechselstrom 109
Wechselstromnetz 110
Wirtschaftlichkeitsberechnung 31

Z
Zellbalancing 156
Zyklenalterung 154
Zyklenlebensdauer 178