

# 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



**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)

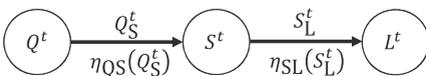
$\eta_{QS}(Q_S^t)$  beschrieben. Die Effizienz des Leistungstransports umfasst in dieser Beschreibung alle Verluste, die auf dem Weg von der Quelle  $Q^t$  zum Speicher  $S^t$  auftreten. In ihm steckt die Information über die verwendeten Technologien.

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 dort aber nur 500 W 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  $\kappa^t$  (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  $\kappa^t$  aus:

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

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



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


**Beispiel 2.1**

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

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

$$\kappa^T = \int_0^T \eta_{QS}(Q_S^t) Q_S^t dt = \int_0^{1\text{h}} 15\text{kW} \cdot 80\% dt + \int_{1\text{h}}^{1.5\text{h}} 5\text{kW} \cdot 10\% dt = 12\text{kWh} + 0,25\text{kWh}$$

$$= 12,25\text{kWh}$$

Um Speichersysteme miteinander zu vergleichen, wird unter anderem die Systemeffizienz herangezogen. Sie fasst die verschiedenen Einzelverluste zusammen. Um diese experimentell zu bestimmen, wird ein Speicher über einen definierten Zeitraum mit einer Leistung  $Q_S^t$  geladen. Danach wird der Speicher entladen. Diese Effizienz ist das Verhältnis der beiden Energiemengen.

$$\eta_{QS} = \frac{\int_0^T Q_S^t dt}{\int_0^T S_L^t dt} \quad (2.2)$$

Diese Messvorschrift hat den Nachteil, dass das Ergebnis von dem zeitlichen Verlauf der Be- und Entladung abhängt. Im Beispiel 2.1 liegt der gemessene Wirkungsgrad bei  $\eta_{QS} = \frac{12,25\text{kWh}}{15,75\text{kWh}} = 77,8\%$ . Wäre der Ladevorgang durchgehend mit 15kW erfolgt, läge der Wirkungsgrad bei 80%. Will man daher die Effizienz verschiedener Speichersysteme vergleichen, ist es notwendig, den Be- und Entladevorgang 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:

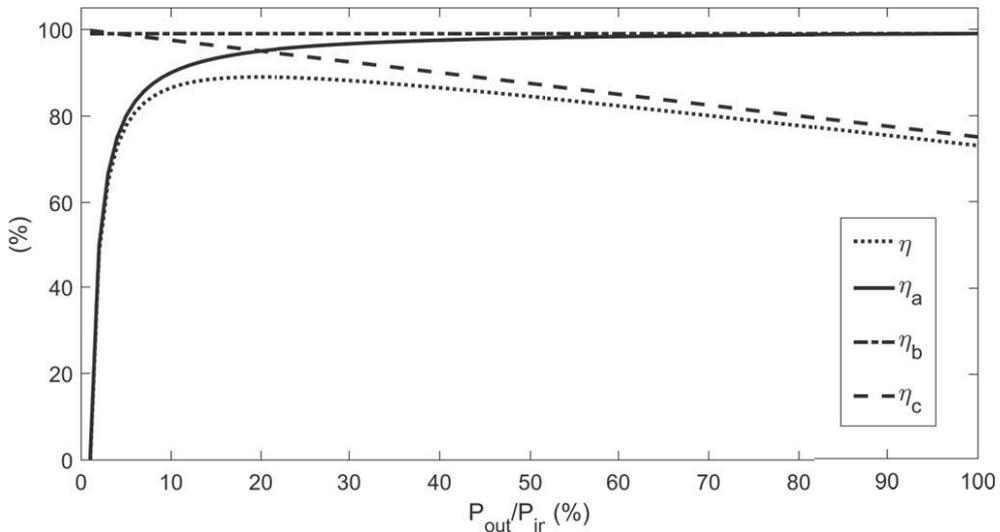
$$A_B^t \rightarrow A_B^t - \left( a_{AB} + b_{AB} A_B^t + c_{AB} A_B^{t^2} \right) \quad (2.3)$$

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

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

$$\eta_{AB}(A_B^t) = \int_0^T \left( 1 - \frac{a_{AB}}{A_B^t} - b_{AB} - c_{AB} A_B^t \right) dt \quad (2.4)$$

In Bild 2.3 ist für unterschiedliche Leistungsflüsse von  $A_B^t$  der Wirkungsgrad dargestellt. Der konstante Anteil  $a_{AB}$  sorgt für die charakteristische  $\frac{1}{x}$ -Form bei niedrigen Leistungen. Sie sorgt dafür, dass die Übertragung von Leistung im Schwachlastbetrieb in der Regel nicht effizient



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

sind. Der mit der Leistung lineare Anteil  $b_{AB}$  bleibt für den gesamten Wirkungsbereich konstant und deckelt die maximal zu erreichende Effizienz. Der in der Leistung quadratische Anteil  $c_{AB}$  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  $a_{AB}$  der Summe der konstanten Verluste, die durch die Aufrechterhaltung der Betriebsspannung (Netzteil), die Versorgung der Steuerelektronik, den Betrieb des Ventilators usw. entstehen. Lineare Verluste  $b_{AB}$  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  $c_{AB}$  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: ( $a = 1 \text{ kW}$ ,  $b = 0,07$ ,  $c = 10^{-6} \frac{1}{\text{kW}}$ ). Wie groß ist der Verlust, wenn von A nach B  $P_{AB} = 54 \text{ kW}$  übertragen werden soll? Welcher Effizienz entspricht dies?

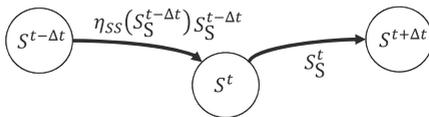
$$(a + b \cdot B + c \cdot B^2) = 1 \text{ kW} + 0,07 \cdot 54 \text{ kW} + 10^{-6} \frac{1}{\text{kW}} \cdot 54^2 \text{ kW}^2 = 4,78 \text{ kW}$$

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

### 2.1.2 Selbstentladung von Speichern

Die Aufgabe eines Speichers besteht darin, Leistung in die Zukunft „zu verschieben“. In dem hier verwendeten Leistungsflussbild entspricht dieser Vorgang einem Leistungsfluss aus der Vergangenheit in die Gegenwart  $S_S^{t-\Delta t}$  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  $\Delta t$  unterteilt wird.

Auch bei diesem Transport können Verluste auftreten, die durch einen Wirkungsgrad  $\eta_{SS}(S_S^t)$  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  $t + \Delta t$ .  $\eta_{SS}$  entspricht der Selbstentladung

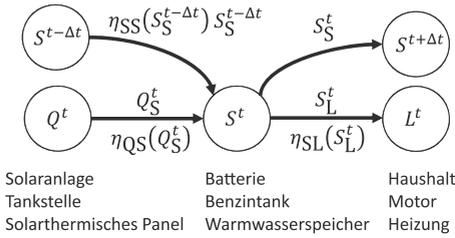
Auch hier reicht es, den in Gleichung (2.3) beschriebenen Ansatz zu verwenden. Konstante Verluste treten in der Regel eher bei Technologien auf, die zur Speicherung noch zusätzliche Hilfssysteme benötigen. Dies ist beispielsweise bei Schwungradspeicher oder bei Redox-Flow-Batterien der Fall. Ein linearer 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

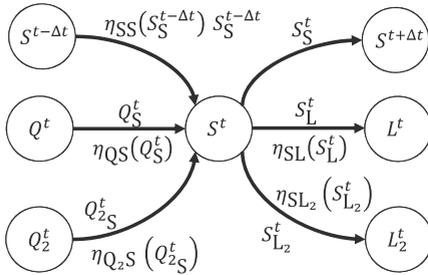
Um Speichersysteme zu beschreiben, wird in diesem Buch ein Leistungsflussbild verwendet. Dabei werden verschiedene Quellen, Senken oder Speicher durch Großbuchstaben beschrieben. Der Leistungstransport von  $A$  nach  $B$  zum Zeitpunkt  $t$  wird durch die Quelle  $A$  mit dem Ziel  $B$  als Subindex als  $A_B^t$  beschrieben.

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

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 Energiesektoren 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:

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

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 „ $\leq$ “- oder eine „ $=$ “-Relation gilt, ist technologieabhängig. Wäre die Quelle beispielsweise eine Photovoltaikanlage, bestünde stets die Möglichkeit nicht die volle Leistung der Anlage zu nutzen. Wäre die Quelle ein Dieselaggregat, würde das Wegfallen eines Verbrauchers ohne Änderung der Produktion des Dieselaggregats zu einer Erhöhung der Drehfrequenz und schlimmstenfalls zur Beschädigung des Geräts führen. Die Leistung 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 „ $\geq$ “-Relation verwendet werden.

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

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

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.

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

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 zur Verfügung stehende Leistung unter Beibehaltung der Randbedingungen verteilt werden sollen.

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

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

**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 3kWh geladen, d. h.  $S_S^{t+\Delta t} = 3\text{kWh}$ , während eine Abregelung konstant bei 10kW liegt:  $\widetilde{Q}^t - Q_S^t = 10\text{kW}$ . Wie groß sind die zu optimierenden Speicherkosten?

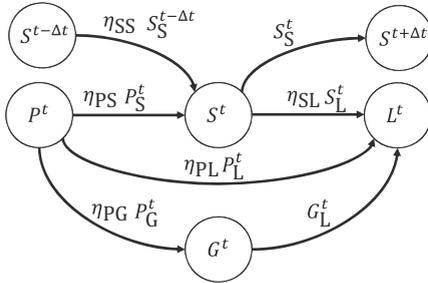
$$Y = \int_0^{T=2\text{h}} \left( 0,13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 3\text{kWh} + 0,01 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 10\text{kWh} \right) dt = 2 \cdot 0,49\text{€} = 0,98\text{€}$$

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  $\bar{P}^t$ . 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  $\bar{L}^t$ . 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. Ebenso ist eine Einspeisung von gespeichertem Strom nicht erlaubt.



**Bild 2.7** Leistungsfussdiagramm 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:

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

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. Die Einspeisung von Solarstrom wird mit der Einspeisevergütung von  $11 \frac{\text{€ct}}{\text{kWh}}$  bewertet.

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

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

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

Analog können die Werte der Speicherpfade definiert 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.

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

Mit diesen Werten lassen sich die Leistungspfade 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 die Last. Da die Solarstromerzeugung größer als der Leistungsbedarf ist, wird dieser Knoten komplett versorgt. Dieser Leistung, korrigiert um die Transferkosten, wird die dann noch zur Verfügung stehende Solarstromleistung bereitgestellt:

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

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.

$$\tilde{P}^{t''} := \tilde{P}^{t'} - P_S^t \quad (2.16)$$

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

$$\tilde{P}^{t'''} := \tilde{P}^{t''} - P_G^t = 0 \quad (2.17)$$

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.

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

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

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

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:

$$\tilde{L}^{t'''} := \tilde{L}^{t''} - G_L^t = 0 \quad (2.20)$$

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

# Index

## A

AC 109  
adiabatische Kompression 71  
Akkumulatoren 145  
allgemeine Gaskonstante 69  
Alternating Current 109  
Anforderungen 43  
Anforderungsphase 43  
Anode 144  
Anolyth 201  
Assoziation 45  
Aufbau einer Doppelschicht 126  
Auslegung 24  
Autarkierate 26

## B

Batterie-Management-System 159  
Batterien 145  
Batteriezelle 144  
Beginning of Life 153  
Beziehungendiagramm 46  
Block 45  
BMS 159  
BOL 153  
Boltzmann-Konstante 86  
Brennstoffzelle 217  
Brückengleichrichter 112  
Busbar 177

## C

Carnot-Prozess 89  
Coulomb 119  
Coulomb-Counting 149  
C-Rate 24

## D

DC 109

DC/DC-Wandler 110  
Demand Side Management 227  
Dielektrikum 119  
Diode 110  
Direct Current 109  
Direkter Eigenverbrauch 27  
Doppelschicht 127  
Doppelschichtkondensator 127  
Druckluftspeicher 68  
Durchtrittspolarisation 147

## E

Effizienzkurve 18  
elektrische Feldkonstante 119  
elektrochemische Grundreaktion 144  
Elektrolyse 214  
elektromechanisches Konversionssystem 53  
Elektromotor 55  
Elementarladung 119  
Emissionsgrad 85  
EMS 22, 159  
End of Life 153  
Energiedichte 38  
Energie-Management-System 159  
EOL 153  
E-Rate 24  
Erzeugungsmanagement 227  
<<Extend>> 53

## F

Faraday-Konstante 146  
Fertigungskosten 31  
freie Reaktionsenthalpie 145  
Frequenzumrichter 110

## G

Gesamtwirkungsgrad 18

Gleichrichter 110  
Gleichstrom 109  
Gleichstromnetz 110

**H**

Halbleiterbauelemente 110  
Helmholtzschicht 127  
Herstellkosten 31  
Hochtemperaturspeichermedien 102

**I**

ideales Gasgesetz 69  
indirekter Eigenverbrauch 27  
Induktivität 113  
innere Energie 70, 82  
innere Helmholtzschicht 127  
Investitionskosten 30  
isochore Kompression 70  
isothermen Kompression 70

**K**

kalendarische Alterung 154  
Kaltleiter 177  
kapazitives aktives Balancing 157  
katalytische Reaktionen 106  
Kathode 144  
Katholyth 201  
kinetische Energie 56  
Klimakontrolle 49  
Knallgas 213  
Kohlenstoff 209  
Komponenten 43  
Kondensator 110  
Kondensatorarten 123

**L**

Laderegler 163  
Ladeverfahren 164  
Lageenergiespeicher 60  
Lastmanagement 227  
Latentspeichermedien 102  
Latentwärmespeicherung 101  
LCO 173

LCOE 30  
Leerlaufspannung 148  
Leistungselektronik 110  
Leistungsflusskontrolle 49  
Leistungspfad 49  
LFP 173  
Lithium-Ionen-Batterie 172  
Lorentzkraft 54  
LTO 173

**M**

Materialkosten 31  
mechanische Speichersysteme 53  
mechanischer Aufbau 49  
Methanisierung 221

**N**

Natrium-Schwefel-Batterie 191  
NCA 173  
Nernst-Gleichung 146  
Netzanschlussbedingungen 181  
Niedertemperaturspeichermedien 102  
NMC 173  
NPV 34  
„Null“-Hypothese 34

**O**

Ohm'sches Gesetz 121

**P**

passives Balancing 157  
PEMEL 215  
PEMEL-Zelle 215  
Permittivität 119  
Phasenübergangstemperatur 103  
Photokatalyse 216  
Planck'sches Strahlungsgesetz 85  
Polarisationswiderstand 158  
potenzielle Energie 56  
Power-to-Gas 221, 223  
Primary Batteries 145  
Primärzellen 145  
Projektierungskosten 32

Proton Exchange Membran Electrolysis 215  
Pseudokapazität 128  
PTC 177  
PTC-Widerstand 131  
Pumpspeicherkraftwerk 57

**R**

Reaktionsenthalpie 145  
Reaktionswärme 145  
Redox-Flow-Batterie 199  
Redox-Reaktion 144  
Requirement Traceability Matrix 46  
Residuallast 26  
Rotationsspeicher 62  
rotatorische Bewegungsleistung 54  
RTM 46

**S**

Sauerstoff 209  
Schalter 110  
Schmelztemperatur 102  
Schmelzwärme 101  
Schwungradspeicher 61  
Secondary Batteries 145  
Sekundärzellen 145  
Selbstentladung 19  
Self Sufficiency 26  
Separator 145  
Smart Grid 227  
Smart Home 227  
SOC 38  
SOH 38  
Solarthermische Anlage 98  
Speichersystem 15  
spektrale Strahlungsdichte 85  
Spezialisierungen 45  
Spezifikation 43  
Spezifikationsphase 43  
spezifische Wärmekapazität 82  
Spule 110

starre Helmholtzschicht 127  
State of Charge 38  
State of Health 38  
Systems Engineering 43

**T**

Thermal Runaway 174  
thermische Arbeit 82  
thermische Dissoziation 106  
thermische Speicher 82  
thermochemische Speicheranlage 105  
Trägheitsmoment 54, 61  
Transformator 115  
Turbulatoren 85

**V**

Verbrauchsmanagement 227  
Verdampfungswärme 101  
volumenspezifische Wärmekapazität 95

**W**

Wärme 82  
Wärmefluss 84  
Wärmeleitkoeffizient 83  
Wärmespeicherszahl 95  
Wärmestrahlung 85  
Wärmetransport 84  
Wärmeübergangskoeffizient 84  
Wasserstoff 209  
Wasserstofftechnik 213  
Wechselstrom 109  
Wechselstromnetz 110  
Wirtschaftlichkeitsberechnung 33

**Z**

Zellbalancing 156  
Zykenalterung 164  
Zykenlebensdauer 177