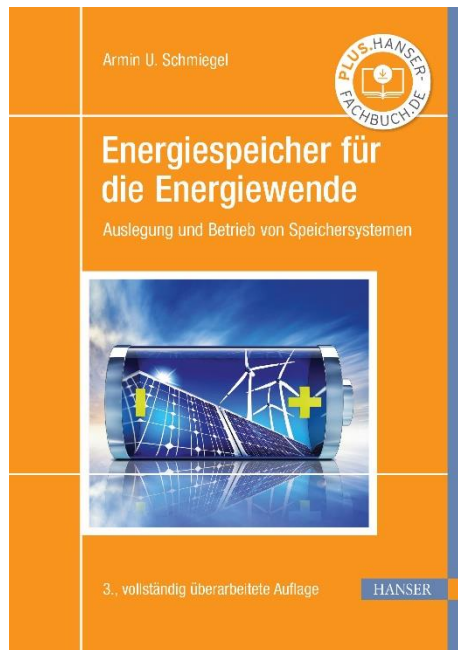


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Energiespeicher für die Energiewende

von Armin U. Schmiegel

Print-ISBN: 978-3-446-47582-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47694-3

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446475823>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Dieses Buch entstand parallel zur Vorlesung „Speichertechnologie“ im Studiengang „Dezentrale Energieerzeugung und Energiemanagement“ an der Hochschule Reutlingen. Es befasst sich mit einem aktuell hoch spannenden Thema, das leider zu oft auf die Bereiche „Energie-wende“ und „E-Mobilität“ reduziert wird. Beide Aspekte waren in den letzten Jahren sicherlich die medienwirksamsten Treiber. Aber es gibt noch andere Anwendungen, die unspektakulär unseren Alltag auf die eine oder andere Weise verändert haben. Ein bekanntes Beispiel ist die enorme Steigerung der Energiedichte bei Lithium-Ionen-Akkus, die zum einen batteriegetriebene Werkzeuge, zum anderen aber auch Mobiltelefone mit langer Laufzeit ermöglichten.

Mittlerweile gibt es eine Reihe von guten Lehrbüchern zum Thema Speichertechnologie. Sie alle beschreiben umfassend die verschiedenen grundlegenden Technologien, mit denen Energie gespeichert werden kann. Je nach Neigung setzen die Autoren verschiedene Schwerpunkte in der Diskussion der Technologie und deren physikalisch-chemischen Funktionsprinzipien. Was jedoch in den meisten Büchern als Randthema betrachtet wird, ist die Frage nach der Einbindung der Speichertechnologien in einem Gesamtsystem. Die vermeintlich einfache Frage: „Was muss ich tun, um die Speichertechnologien X in mein System Y einzubauen, sodass es funktioniert?“ wird selten beantwortet.

Das Buch legt den Schwerpunkt auf das Design und die Auslegung von Speichersystemen. Die physikalisch-technischen Grundlagen werden dargestellt, aber nur insoweit, wie sich aus ihnen technologiespezifische Anforderungen ableiten lassen: Anforderungen, die für das System bei der Auslegung oder dem Betrieb berücksichtigt werden müssen. Aus diesem Grund wird an manchen Stellen nicht in die naturwissenschaftlichen Tiefen eingetaucht. Manch Experte wird gar den Eindruck haben, dass hier nur oberflächlich, ja vielleicht sogar simplifizierend, über wesentliche Aspekte gesprochen wird und die sprachliche Darstellung ungenau ist. Ich habe versucht, in diesem Buch einen Spagat zwischen all den sehr interessanten fachlichen Domänen und der Sicht eines Systemingenieurs, für den alles nur Komponenten mit Anforderungen und Funktionen verkörpert, zu finden.

An dieser Stelle möchte ich meinem Lektor Manuel Leppert und dem gesamten Verlagsteam des Carl Hanser Verlags für die Unterstützung danken, ebenso unserem Illustrator Michael Hüter, der einige meiner handgezeichneten Skizzen aus meinem Vorlesungsskript in ansprechende Formen brachte und das Buch um eigene Ideen bereicherte. Von der ursprünglichen Idee, der Zusage zu dem Projekt und dem Beginn der Arbeiten an ging hier alles sehr schnell. Die größte Last trug meine Familie, meine drei Kinder Jonas, Joscha und Lara und meine Frau Karin, denen ich danke, dass sie doch ein wenig Geduld haben walten lassen. Ich möchte aber auch meinem Arbeitgeber, der Firma REFU Elektronik, danken, dass sie ein Umfeld geschaffen hat, in dem ich dieses Buch mit sinnhaftem Inhalt füllen konnte.

Man hat mich gefragt, wie ein Entwicklungsleiter trotz seiner intensiven Arbeit noch die Zeit finden kann, ein solches Werk zu schreiben. Ich möchte gerne diese Antwort hier niederschreiben als Ansporn für all jene, die den Schritt noch nicht gewagt haben: „Es ist ganz einfach: Ich stehe morgens um fünf Uhr auf und versuche zwei bis drei Seiten zu schreiben. Mal habe ich

einen guten Tag, dann sind es sogar vier bis fünf Seiten, mal habe ich einen schlechten Tag, dann gehe ich mit dem Wissen zur Arbeit, dass auf meinem Schreibtisch ein leeres Blatt Papier liegt. Aber das ist OK. Am nächsten Morgen mache ich weiter.“

Nun, da ich dieses Buch in den Händen halte, ist mein Schreibtisch wieder leer. Bis auf ein leeres Blatt Papier.

Reutlingen, im August 2018

*Dr. Armin Schmiegel*

## Vorwort zur 2. Auflage

Nicht jeder Mensch hat die Möglichkeit einen zweiten Eindruck zu hinterlassen. Eine Reihe von kleineren Fehlern hatte sich in die erste Auflage reingeschlichen. Glücklicherweise war das Interesse an diesem Buch so groß, dass ich die Möglichkeit bekommen habe, die Fehler zu korrigieren, die meine Leser und ich fanden.

Das Thema Energiespeicher bleibt ein spannendes Thema. Mittlerweile findet ein öffentlicher Diskurs darüber statt, welche Speichertechnologien für die verschiedenen Energiesektoren genutzt werden können. Viel spricht dafür, dass für PKWs die Lithium-Ionen Technologie dominierend bleibt, während im Nutzfahrzeugbereich, aber auch zur Energieversorgung in Industriebetrieben die Wasserstofftechnik, sei in Kombination mit der Brennstoffzelle oder in zur Verbrennung, im Gespräch ist. Auch die Zahl der Studenten, die an der Hochschule Reutlingen die Vorlesung zu diesem Buch hören, ist gestiegen. Was ich gerne so interpretiere, dass es für junge Menschen wichtig ist, aktiv an der Energiewende teilzunehmen.

Ich wünsche den Lesern dieser zweiten Auflage, dass die Lerninhalte ihnen helfen, Lösungen zu finden.

Reutlingen, im August 2020

*Dr. Armin Schmiegel*



## Vorwort zur 3. Auflage

Wir leben in aufregenden Zeiten. Die Ereignisse des Jahres 2022 zeigen uns, dass die Energiewende kein Projekt von Idealisten mehr ist, sondern das Leben aller Menschen betrifft. Um so wichtiger ist es, die Rolle der möglichen Speichertechnologien in diesem Kontext zu bewerten. In diesen Zusammenhang freue ich mich, die Möglichkeit zu haben, die 3. Auflage dieses Buches um ein paar Themen zu erweitern.

Auch die dritte Auflage behebt einige Fehler. Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei all jenen Lesern bedanken, die sich die Mühe gemacht haben, diese Fehler zu finden und mir mitzuteilen. Natürlich ärgere ich mich über jeden Fehler, den ich selber übersehen habe. Doch es freut mich, dass aufmerksame Leser gibt, die mich daran erinnern, dass wir gemeinsam Dinge schaffen, die besser sind als das, was wir allein tun.

Ich habe die dritte Auflage in zwei Bereichen erweitert: Die elektrischen Speicher wurden um supraleitenden magnetischen Speicher ergänzt. Die Verwendung dieser Technologie wurde in der Vergangenheit immer wieder diskutiert und beispielsweise in Teilchenbeschleunigern genutzt, aber erst in jüngerer Zeit denkt man darüber nach, diese Technologie breiter zu verwenden.

Die Beschreibung der Wasserstofftechnik habe ich deutlich ergänzt. Ich bin der Meinung, dass im öffentlichen Diskurs der eine oder andere physikalische Zusammenhang nicht erklärt wird. Dies betrifft insbesondere die Frage, wie Wasserstoff erzeugt und gespeichert werden kann und welche Arten es gibt, diesen effizient zu nutzen. Diese Aspekte sind aber für die Bewertung dieser Speichertechnologie wichtig.

Reutlingen, im Oktober 2022

*Dr. Armin Schmiegel*



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Beschreibung von Speichertechnologien</b> .....	<b>17</b>
2.1	Grundlegende Funktion, Aufbau von Speichersystemen und deren Beschreibung .....	17
2.1.1	Einspeichern, Ausspeichern oder Be- und Entladen .....	17
2.1.2	Selbstentladung von Speichern .....	21
2.1.3	Beschreibung eines Speichersystems .....	21
2.1.4	Entwicklung einer wirtschaftlich optimierten Betriebsführung .....	24
2.2	Auslegung von Speichersystemen .....	26
2.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen .....	32
2.3.1	Investitionskosten .....	32
2.3.2	Wirtschaftlichkeitsberechnungen .....	35
2.3.3	Wirtschaftliche Bewertung von Speichersystemen .....	37
2.4	Weitere Begriffe .....	39
2.5	Übungsaufgaben .....	42
2.6	Literatur .....	43
<b>3</b>	<b>Anforderungen und Systemkomponenten von Speichersystemen</b> .....	<b>45</b>
3.1	Anforderungen und Systemkomponenten .....	45
3.2	Anforderungen an Speichersysteme .....	49
3.3	Systemkomponenten eines Speichersystems .....	51
3.4	Übungsaufgaben .....	53
3.5	Literatur .....	54
<b>4</b>	<b>Mechanische Speicher</b> .....	<b>55</b>
4.1	Konversion von mechanischer Energie in elektrische Energie .....	55
4.2	Verwendung potenzieller Energie I – Pumpspeicherkraftwerke und alternative Konzepte .....	57
4.3	Verwendung von Rotationsenergie – Schwungradspeicher .....	63
4.4	Verwendung potenzieller Energie II – Druckluftspeicher .....	70



---

4.5	Anwendungsbeispiel – Ertüchtigung eines Pumpspeicherkraftwerks für den sekundären Energiemarkt .....	77
4.6	Übungsaufgaben .....	80
4.7	Literatur .....	81
<b>5</b>	<b>Thermische Speicher .....</b>	<b>83</b>
5.1	Grundlagen .....	84
5.2	Sensible Wärmespeicher .....	95
5.3	Latentwärmespeicher .....	102
5.4	Thermochemische Speicher .....	107
5.5	Übungsaufgaben .....	109
5.6	Literatur .....	110
<b>6</b>	<b>Elektrische Speichersysteme .....</b>	<b>111</b>
6.1	Leistungselektronische Komponenten und Transformatoren .....	111
6.2	Anforderungen .....	117
6.3	Die Spule als Stromspeicher .....	119
6.3.1	Anforderungen an einem Stromspeicher .....	123
6.3.2	Beispiel für die Realisierung eines supraleitenden magnetischen Energiespeichers .....	124
6.4	Der Kondensator als Spannungsspeicher .....	128
6.5	Doppelschichtkondensatoren .....	135
6.5.1	Anforderungen an Doppelschichtkondensatoren .....	138
6.5.2	Anwendungsbeispiel – Rekuperation eines Personenaufzugs .....	142
6.6	Übungsaufgaben .....	150
6.7	Literatur .....	151
<b>7</b>	<b>Elektrochemische Speichersysteme .....</b>	<b>153</b>
7.1	Allgemeine Betrachtungen .....	154
7.1.1	Elektrochemische Reaktionsgleichungen .....	154
7.1.2	Anforderungen und Auslegung .....	157
7.1.3	SOC, SOH und Alterung .....	162
7.1.4	Modellierung von Zellen .....	168
7.1.5	Systemkomponenten EMS und BMS .....	169
7.2	Bleibatterien .....	171
7.2.1	Haupt- und Nebenreaktionen .....	171
7.2.2	Anforderungen und Systemkomponenten von Bleibatteriesystemen ....	172
7.2.3	Anwendungsbeispiel – Versorgung eines Mobilfunksendemasts .....	176

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
<b>8</b>	<b>Chemische Speicher .....</b>	<b>219</b>
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
<b>9</b>	<b>Lastmanagement .....</b>	<b>245</b>
9.1	Grundfunktionen und Anforderungen .....	245
9.2	Anwendungsbeispiel – Lastmanagement für einen Gewerbe- und Wohnkomplex .....	250
9.3	Übungsaufgaben .....	254
9.4	Literatur .....	254
	<b>Index .....</b>	<b>257</b>



# 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)

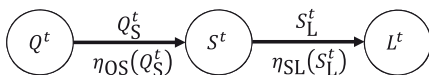
$\eta_{QS}(Q_S^t)$  beschrieben. Die Effizienz des Leistungstransports umfasst in dieser Beschreibung alle Verluste, die auf dem Weg von der Quelle  $Q^t$  zum Speicher  $S^t$  auftreten. In ihm steckt die Information über die verwendeten Technologien.

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 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  $\kappa^t$  (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:

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

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.

$$\eta_{QS} = \frac{\int_0^T s_1^t dt}{\int_0^T Q_S^t dt} \tag{2.2}$$

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  $\eta_{QS} = \frac{17,5\text{kWh}}{12,25\text{kWh}} = 71,4\%$ . 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:

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

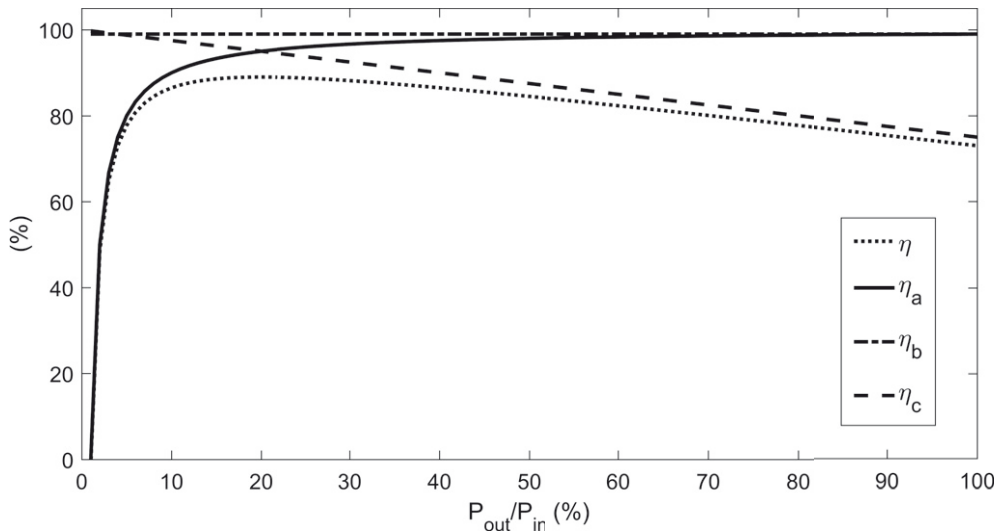
Dabei beschreiben  $a_{AB}$ ,  $b_{AB}$  und  $c_{AB}$  die konstanten, linearen und quadratischen Konversionsverluste.

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

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

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?

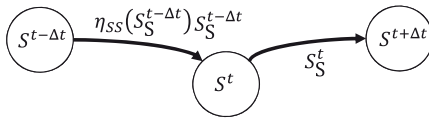
$$(a + b \cdot B + c \cdot B^2) = 1 \text{ kW} + 0,07 \cdot 54 \text{ kW} + 10^{-6} \frac{1}{\text{kW}} \cdot 54^2 \text{ kW}^2 = 4,78 \text{ kW}$$

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

### 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

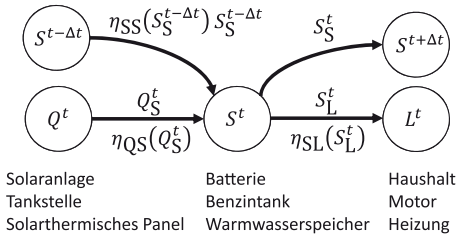
Auch hier reicht es, den in Gleichung (2.3) beschriebenen Ansatz zu verwenden. Konstante Verluste treten in der Regel eher bei Technologien auf, die zur Speicherung noch zusätzliche Hilfssysteme benötigen. Dies ist beispielsweise bei Schwungradspeicher oder bei Redox-Flow-Batterien der Fall. Ein linearer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

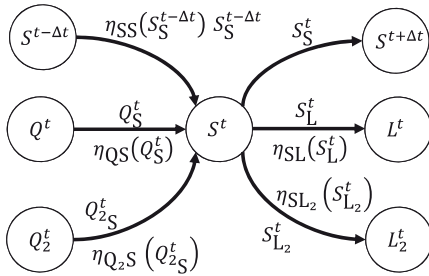
Um Speichersysteme zu beschreiben, wird in diesem Buch ein Leistungsflussbild verwendet. Dabei werden verschiedene Quellen, Senken oder Speicher durch Großbuchstaben beschrieben. Der Leistungstransport von  $A$  nach  $B$  zum Zeitpunkt  $t$  wird durch die Quelle  $A$  mit dem Ziel  $B$  als Subindex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

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



**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:  $\tilde{Q}^t - Q_S^t = 10\text{kW}$ . Wie groß sind die zu optimierenden Speicherkosten?

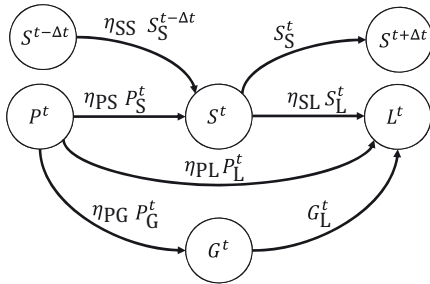
$$Y = \int_0^{T=2\text{h}} \left( 0,13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 3\text{kW} + 0,01 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 10\text{kW} \right) dt = 2 \cdot 0,49\text{€} = 0,98\text{€}$$

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** 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:

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

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:

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

# Index

## A

AC 111  
adiabatische Kompression 73  
Akkumulatoren 155  
allgemeine Gaskonstante 71  
Alternating Current 111  
Anforderungen 45  
Anforderungsphase 45  
Anode 154  
Analyth 211  
Assoziation 47  
Aufbau einer Doppelschicht 136  
Auslegung 26  
Autarkierate 28

## B

Batterie-Management-System 169  
Batterien 155  
Batteriezelle 154  
Beginning of Life 163  
Beziehungendiagramm 48  
Block 47  
BMS 169  
BOL 163  
Boltzmann-Konstante 88  
Brennstoffzelle 232  
Brückengleichrichter 114  
Busbar 187

## C

Carnot-Prozess 91  
Coulomb 128  
Coulomb-Counting 159  
C-Rate 26

## D

Dampfreformation 227  
DC 111  
DC/DC-Wandler 112  
Demand Side Management 245  
Dielektrikum 129  
Diode 112  
Direct Current 111  
Direkter Eigenverbrauch 29  
Doppelschicht 136  
Doppelschichtkondensator 111, 137  
Druckluftspeicher 70  
Durchtrittspolarisation 157

## E

Effizienzkurve 20  
elektrische Feldkonstante 128  
elektrochemische Grundreaktion 154  
Elektrolyse 228  
elektromechanisches Konversionssystem 55  
Elektromotor 57  
Elementarladung 128  
Emissionsgrad 87  
EMS 24, 169  
End of Life 163  
Energiedichte 40  
Energie-Management-System 169  
EOL 163  
E-Rate 26  
Erzeugungsmanagement 245  
<<Extend>> 55

## F

Faraday-Konstante 156  
Fertigungskosten 33  
freie Reaktionsenthalpie 155  
Frequenzumrichter 112

**G**

Gesamtwirkungsgrad 20  
Gleichrichter 113  
Gleichstrom 111  
Gleichstromnetz 112

**H**

Halbleiterbauelemente 113  
Helmholtzschicht 136  
Herstellkosten 33  
Hochtemperaturspeichermedien 104

**I**

ideales Gasgesetz 71  
indirekter Eigenverbrauch 29  
Induktivität 115  
innere Energie 72, 84  
innere Helmholtzschicht 136  
Investitionskosten 32  
isochore Kompression 72  
isothermen Kompression 72

**K**

kalendarische Alterung 164  
Kaltleiter 187  
kapazitives aktives Balancing 167  
katalytische Reaktionen 108  
Kathode 154  
Katholyth 211  
kinetische Energie 58  
Klimakontrolle 51  
Kohlenstoff 219  
Komponenten 45  
Kondensator 112  
Kondensatorarten 133

**L**

Laderegler 173  
Ladeverfahren 174  
Lageenergiespeicher 62  
Lastmanagement 245  
Latentspeichermedien 104

Latentwärmespeicherung 103  
LCO 183  
LCOE 32  
Leerlaufspannung 158  
Leistungselektronik 112  
Leistungsflusskontrolle 51  
Leistungspfad 51  
LFP 183  
Lindeverfahren 225  
Lithium-Ionen-Batterie 182  
Lorentzkraft 56  
LTO 183

**M**

Materialkosten 33  
mechanische Speichersysteme 55  
mechanischer Aufbau 51  
Methanisierung 238

**N**

Natrium-Schwefel-Batterie 201  
NCA 183  
Nernst-Gleichung 156  
Netzanschlussbedingungen 191  
Niedertemperaturspeichermedien 104  
NMC 183  
NPV 36  
„Null“-Hypothese 36

**O**

Ohm'sches Gesetz 130

**P**

partielle Oxidation 228  
passives Balancing 167  
PEMEL 230  
PEMEL-Zelle 231  
Permittivität 128  
Phasenübergangstemperatur 105  
Planck'sches Strahlungsgesetz 87  
Polarisationswiderstand 168  
potenzielle Energie 58  
Power-to-Gas 239, 241

Primary Batteries 155  
 Primärzellen 155  
 Projektierungskosten 34  
 Pseudokapazität 137  
 PTC 187  
 PTC-Widerstand 140  
 Pumpspeicherkraftwerk 59

## R

Reaktionsenthalpie 155  
 Reaktionswärme 155  
 Redox-Flow-Batterie 209  
 Redox-Reaktion 154  
 Requirement Traceability Matrix 48  
 Residuallast 28  
 Rotationspeicher 64  
 rotatorische Bewegungsleistung 56  
 RTM 48

## S

Sauerstoff 219  
 Schalter 112  
 Schmelztemperatur 104  
 Schmelzwärme 103  
 Schwungradspeicher 63  
 Secondary Batteries 155  
 Sekundärzellen 155  
 Selbstentladung 21  
 Self Sufficiency 28  
 Separator 155  
 Smart Grid 245  
 Smart Home 245  
 SMES 124  
 SOC 40  
 SOH 40  
 Solarthermische Anlage 100  
 Speichersystem 17  
 spektrale Strahlungsdichte 87  
 Spezialisierungen 47  
 Spezifikation 45  
 Spezifikationsphase 45  
 spezifische Wärmekapazität 84  
 Spule 112  
 starre Helmholtzschicht 136  
 State of Charge 40

State of Health 40  
 Supercap 111  
 superconducting magnetic energy storage  
 124  
 Supraleitung 123  
 Systems Engineering 45

## T

Thermal Runaway 184  
 thermische Arbeit 84  
 thermische Dissoziation 108  
 thermische Speicher 84  
 thermochemische Speicheranlage 107  
 Trägheitsmoment 56, 63  
 Transformator 117  
 Turbulatoren 87

## V

Van der Waals Gas 224  
 Verbrauchsmanagement 245  
 Verdampfungswärme 103  
 volumenspezifische Wärmekapazität 97

## W

Wärme 84  
 Wärmefluss 86  
 Wärmeleitkoeffizient 85  
 Wärmespeicherzahl 97  
 Wärmestrahlung 87  
 Wärmetransport 86  
 Wärmeübergangskoeffizient 86  
 Wasserstoff 219  
 Wasserstoffshift-Reaktion 228  
 Wasserstofftechnik 223  
 Wechselstrom 111  
 Wechselstromnetz 112  
 Wirtschaftlichkeitsberechnung 35

## Z

Zellbalancing 166  
 Zyklenalterung 164  
 Zyklenlebensdauer 187