

Armin U. Schmiegel



Energiespeicher für die Energiewende

Auslegung und Betrieb von Speichersystemen



3., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

Schmiegel
Energiespeicher für die Energiewende



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-ex933-kumy2

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Armin U. Schmiegel

Energiespeicher für die Energiewende

Auslegung und Betrieb von Speichersystemen

3., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

Der Autor:

Dr. Armin U. Schmiegel, Hochschule Reutlingen



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © stock.adobe.com/frank-peters

Satz: le-tex publishing services, Leipzig

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

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

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

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

1	Einleitung	15
2	Beschreibung von Speichertechnologien	17
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
3	Anforderungen und Systemkomponenten von Speichersystemen	45
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
4	Mechanische Speicher	55
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
5	Thermische Speicher	83
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
6	Elektrische Speichersysteme	111
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
7	Elektrochemische Speichersysteme	153
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
8	Chemische Speicher	219
8.1	Allgemeine Funktion und Anforderungen	220
8.2	Wasserstofftechnik	223
8.2.1	Speicherung von Wasserstoff	223
8.2.2	Techniken zur Wasserspaltung	227
8.2.3	Brennstoffzelle	232
8.2.4	Anwendungsbeispiel – Lastwagen mit Brennstoffzellenantrieb	236
8.3	Methanisierung	238
8.3.1	Grundreaktion	239
8.3.2	Anwendungsbeispiel – Windanlage und Methanisierung	239
8.4	Übungsaufgaben	242
8.5	Literatur	243
9	Lastmanagement	245
9.1	Grundfunktionen und Anforderungen	245
9.2	Anwendungsbeispiel – Lastmanagement für einen Gewerbe- und Wohnkomplex	250
9.3	Übungsaufgaben	254
9.4	Literatur	254
	Index	257

1

Einleitung

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

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

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

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

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

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

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

2

Beschreibung von Speichertechnologien

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

■ 2.1 Grundlegende Funktion, Aufbau von Speichersystemen und deren Beschreibung

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

2.1.1 Einspeichern, Ausspeichern oder Be- und Entladen

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

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



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 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:

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

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

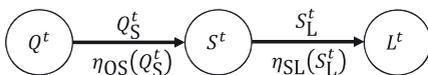


Bild 2.2 Grundlegende Beschreibung eines Speichersystems: Eine Leistung Q_S^t wird von einer Quelle Q^t zum Speicher S^t übertragen und dort gespeichert. Beim Entladen wird eine Leistung S_L^t vom Speicher zu einer Last L^t übertragen. Die Verluste werden jeweils durch die Effizienzen η_{QS} und η_{SL}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

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

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

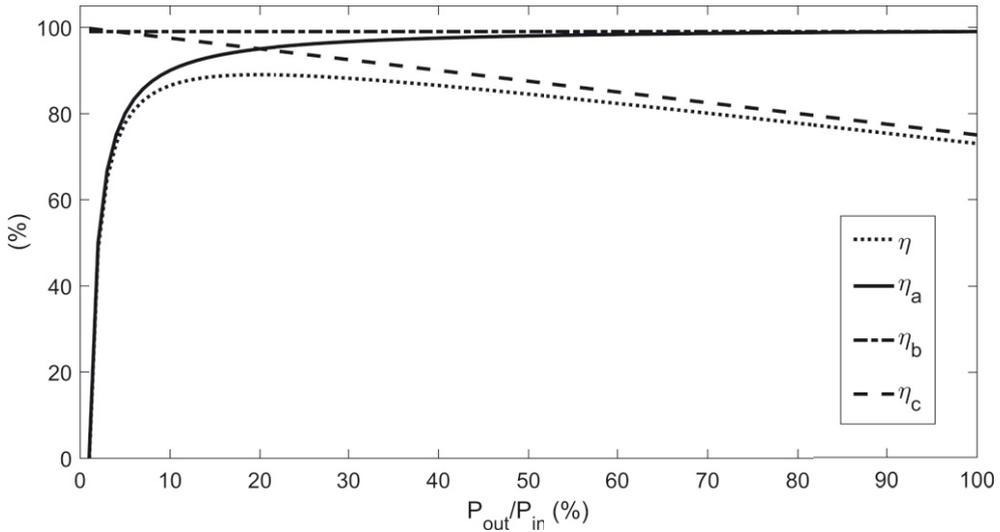


Bild 2.3 Beispiel für eine Effizienzkurve, die sich aus dem in Gleichung (2.3) dargestellten Ansatz ergibt: η stellt den Gesamtwirkungsgrad dar, $\eta_{(a,b,c)}$ den Wirkungsgrad, der sich aus den Einzeltermen ergibt

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 Δt 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.

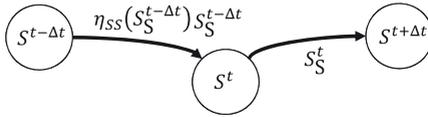


Bild 2.4 Beschreibung der Selbstentladung eines Speichers: Der Speicherinhalt vom Zeitpunkt $t - \Delta t$ füllt den Speicher zum aktuellen Zeitpunkt. Nicht genutzter Speicher fließt in den Speicher zum Zeitpunkt $t + \Delta t$. η_{SS} entspricht der Selbstentladung

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 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 η_{AB} beschrieben. Da diese von dem Leistungsfluss abhängig sind, ist η_{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 η_{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.

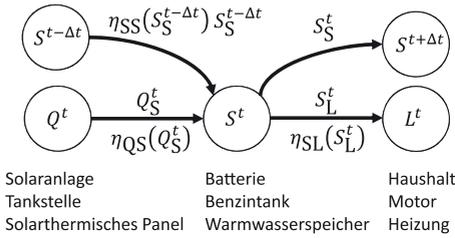


Bild 2.5 Beschreibung eines Energiespeichersystems mit verschiedenen Beispielen von Speichertechnologien bzw. Anwendungen

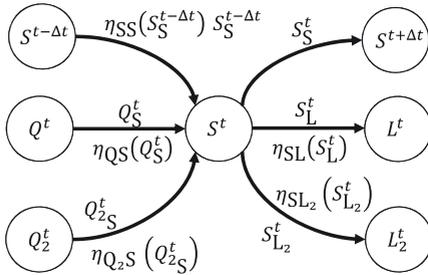


Bild 2.6 Beispiel für ein sektorenübergreifendes Energiespeichersystem: Die Quellen und Lasten vom Sektor 1 Q^t, L^t sind über den Speicher mit den Quellen und Lasten des 2. Sektors Q_2^t, L_2^t verknüpft

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.

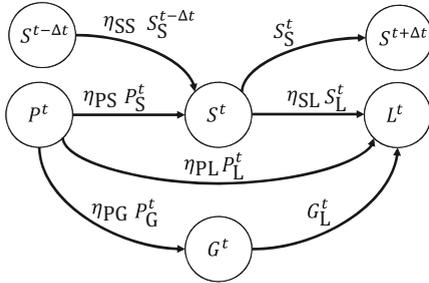


Bild 2.7 Leistungsflussdiagramm eines Solarstromspeichersystems [9]: P^t stellt die Produktion der Solarstromanlage dar. L^t fasst alle Verbraucher des Haushalts zusammen. S^t repräsentiert den Speicher und G^t den Netzanschluss

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:

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