

Armin U. Schmiegel



Energiespeicher für die Energiewende

Auslegung und Betrieb von Speichersystemen



2., aktualisierte Auflage

HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

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

plus-zfl16-a01w2

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

2., aktualisierte Auflage

HANSER

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, 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.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Anne Kurth

Covergestaltung: Max Kostopoulos

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

Titelbild:

Satz: le-tex publishing services, Leipzig

Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-46405-6

E-Book-ISBN 978-3-446-46634-0

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

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. Glücklicher Weise 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 Nutzfahrzeubereich, 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

Inhalt

1	Einleitung	13
2	Beschreibung von Speichertechnologien	15
2.1	Grundlegende Funktion, Aufbau von Speichersystemen und deren Beschreibung	15
2.1.1	Einspeichern, Ausspeichern oder Be- und Entladen	15
2.1.2	Selbstentladung von Speichern	19
2.1.3	Beschreibung eines Speichersystems	19
2.1.4	Entwicklung einer wirtschaftlich optimierten Betriebsführung	22
2.2	Auslegung von Speichersystemen	24
2.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	30
2.3.1	Investitionskosten	30
2.3.2	Wirtschaftlichkeitsberechnungen	33
2.3.3	Wirtschaftliche Bewertung von Speichersystemen	35
2.4	Weitere Begriffe	37
2.5	Übungsaufgaben	40
2.6	Literatur	41
3	Anforderungen und Systemkomponenten von Speichersystemen	43
3.1	Anforderungen und Systemkomponenten	43
3.2	Anforderungen für Speichersysteme	47
3.3	Systemkomponenten eines Speichersystems	49
3.4	Übungsaufgaben	51
3.5	Literatur	52
4	Mechanische Speicher	53
4.1	Konversion von mechanischer Energie in elektrische Energie	53
4.2	Verwendung potenzieller Energie I – Pumpspeicherkraftwerke und alternative Konzepte	55
4.3	Verwendung von Rotationsenergie – Schwungradspeicher	61
4.4	Verwendung potenzieller Energie II – Druckluftspeicher	68

4.5	Anwendungsbeispiel – Ertüchtigung eines Pumpspeicherkraftwerks für den sekundären Energiemarkt	75
4.6	Übungsaufgaben	78
4.7	Literatur	79
5	Thermische Speicher	81
5.1	Grundlagen	82
5.2	Sensible Wärmespeicher	93
5.3	Latentwärmespeicher	100
5.4	Thermochemische Speicher	105
5.5	Übungsaufgaben	107
5.6	Literatur	108
6	Elektrische Speichersysteme	109
6.1	Leistungselektronische Komponenten und Transformatoren	109
6.2	Anforderungen	115
6.3	Kondensator	117
6.4	Doppelschichtkondensatoren	126
6.5	Anforderungen an Doppelschichtkondensatoren	129
6.6	Anwendungsbeispiel – Rekuperation eines Personenaufzugs	132
6.7	Übungsaufgaben	141
6.8	Literatur	141
7	Elektrochemische Speichersysteme	143
7.1	Allgemeine Betrachtungen	144
7.1.1	Elektrochemische Reaktionsgleichungen	144
7.1.2	Anforderungen und Auslegung	147
7.1.3	SOC, SOH und Alterung	152
7.1.4	Modellierung von Zellen	158
7.1.5	Systemkomponenten EMS und BMS	159
7.2	Bleibatterien	161
7.2.1	Haupt- und Nebenreaktionen	161
7.2.2	Anforderungen und Systemkomponenten von Bleibatteriesystemen	162
7.2.3	Anwendungsbeispiel – Versorgung eines Mobilfunkendemasts	166
7.3	Lithium-Ionen-Batterien	172
7.3.1	Chemie von Lithium-Ionen-Batterien	172
7.3.2	Anforderungen und Systemkomponenten für den Gebrauch von Lithium-Ionen-Batterien	174

7.3.3	Alterung und Betriebsführung	177
7.3.4	Anwendungsbeispiel – Solarstromspeichersystem	179
7.4	Hochtemperaturbatterien	191
7.4.1	Hauptreaktion	191
7.4.2	Anforderungen und Systemkomponenten	193
7.4.3	Anwendungsbeispiel – Einbindung einer Natrium-Schwefel-Batterie an einen Windpark in einem Inselnetz	195
7.5	Redox-Flow-Batterien	199
7.5.1	Chemie und Hauptreaktionen	199
7.5.2	Anforderungen an Redox-Flow-Batterien	202
7.5.3	Anwendungsbeispiel – Einbindung einer Redox-Flow-Batterie an einen Windpark in einem Inselnetz	205
7.6	Übungsaufgaben	206
7.7	Literatur	207
8	Chemische Speicher	209
8.1	Allgemeine Funktion und Anforderungen	210
8.2	Wasserstofftechnik	213
8.2.1	Techniken zur Wasserspaltung	213
8.2.2	Brennstoffzelle	216
8.2.3	Anwendungsbeispiel – Lastwagen mit Brennstoffzellenantrieb	218
8.3	Methanisierung	221
8.3.1	Grundreaktion	221
8.3.2	Anwendungsbeispiel – Windanlage und Methanisierung	222
8.4	Übungsaufgaben	225
8.5	Literatur	225
9	Lastmanagement	227
9.1	Grundfunktionen und Anforderungen	227
9.2	Anwendungsbeispiel – Lastmanagement für einen Gewerbe- und Wohnkomplex	232
9.3	Übungsaufgaben	236
9.4	Literatur	236
Index		239

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:

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

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

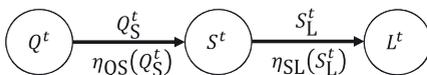


Bild 2.2 Grundlegende Beschreibung eines Speichersystems: Eine Leistung Q_S^t wird von einer Quelle Q^t zum Speicher S^t übertragen und dort gespeichert. Beim Entladen wird eine Leistung S_L^t vom Speicher zu einer Last L^t übertragen. Die Verluste werden jeweils durch die Effizienzen η_{QS} und η_{SL}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

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

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 $\eta_{QS} = \frac{12,25\text{kWh}}{15,7\text{kWh}} = 77,7\%$. Wäre der Ladevorgang durchgehend mit 15 kW erfolgt, läge der Wirkungsgrad bei 80 %. Will man daher die Effizienz verschiedener Speichersysteme vergleichen, ist es notwendig, den Be- und 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

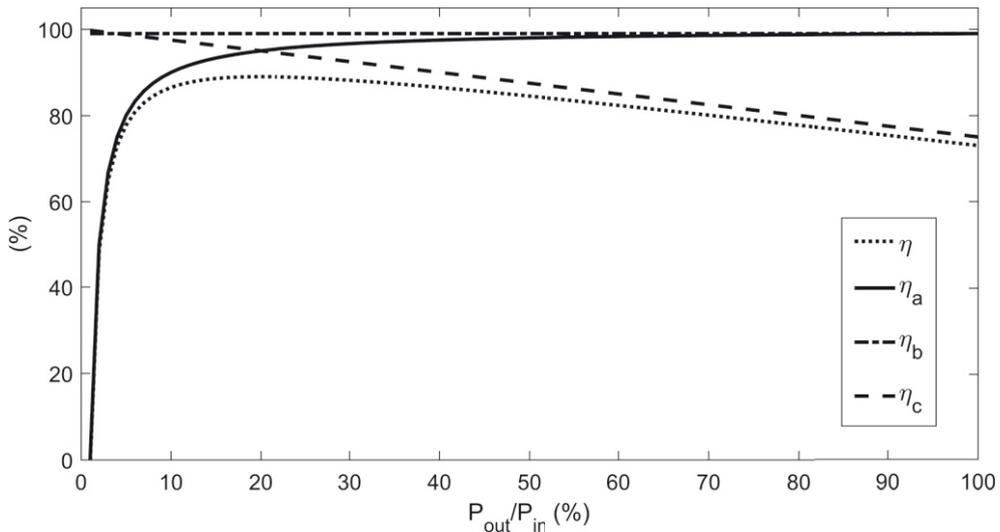


Bild 2.3 Beispiel für eine Effizienzkurve, die sich aus dem in Gleichung (2.3) dargestellten Ansatz ergibt: η stellt den Gesamtwirkungsgrad dar, $\eta_{[a,b,c]}$ den Wirkungsgrad, der sich aus den Einzeltermen ergibt

sind. Der mit der Leistung lineare Anteil b_{AB} bleibt für den gesamten Wirkungsbereich konstant und deckt 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.

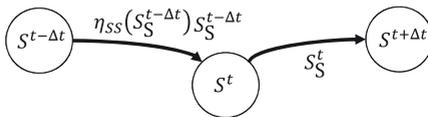


Bild 2.4 Beschreibung der Selbstentladung eines Speichers: Der Speicherinhalt vom Zeitpunkt $t - \Delta t$ füllt den Speicher zum aktuellen Zeitpunkt. Nicht genutzter Speicher fließt in den Speicher zum Zeitpunkt $t + \Delta t$. η_{SS} entspricht der Selbstentladung

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.

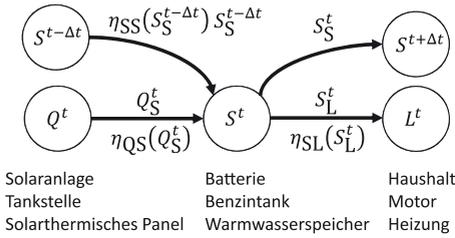


Bild 2.5 Beschreibung eines Energiespeichersystems mit verschiedenen Beispielen von Speichertechnologien bzw. Anwendungen

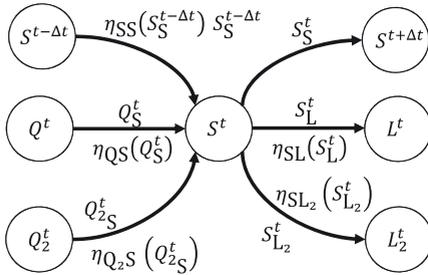


Bild 2.6 Beispiel für ein sektorenübergreifendes Energiespeichersystem: Die Quellen und Lasten vom Sektor 1 Q^t, L^t sind über den Speicher mit den Quellen und Lasten des 2. Sektors Q_2^t, L_2^t verknüpft

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?

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

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.

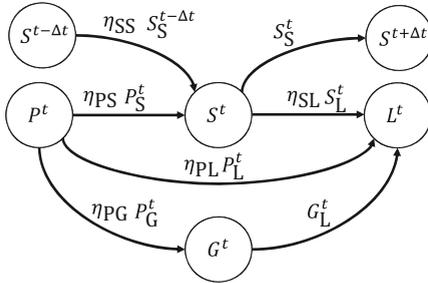


Bild 2.7 Leistungsfussdiagramm eines Solarstromspeichersystems [9]: P^t stellt die Produktion der Solarstromanlage dar. L^t fasst alle Verbraucher des Haushalts zusammen. S^t repräsentiert den Speicher und G^t den Netzanschluss

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:

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

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

■ 2.2 Auslegung von Speichersystemen

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

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

Die Bestimmung der C-Rate erfolgt analog. Hier wird die Kapazität in Ah im Verhältnis zum Ladestrom ermittelt. Bei einem Speicher mit einer Kapazität von 6 Ah entspricht eine einstündige Ladung mit 3 A einer C-Rate von $\frac{3}{6} = 0,5$.

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

Eine weitere Zielgröße ist die Eigendeckungsrate ED . Sie beschreibt das Verhältnis zwischen der aus dem System erbrachten Energie, die die Leistung über einem Zeitraum deckt, und dem in diesem Zeitraum T in Summe benötigten Verbrauch. Angenommen ein System besteht aus M Lasten und hat N Quellen zur Verfügung, dann ergibt sich die Eigendeckungsrate ED_Q , die durch die Quellen gedeckt wird, aus der Summe aller Leistungen, die von diesen Quellen zu