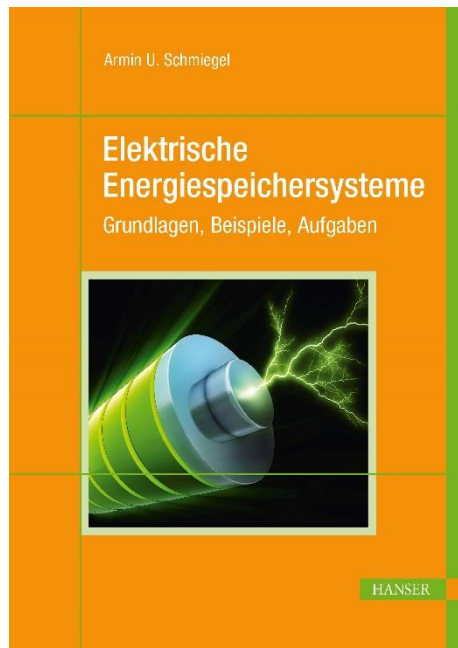


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Elektrische Energiespeichersysteme

von Armin U. Schmiegel

Print-ISBN: 978-3-446-47681-3

E-Book-ISBN: 978-3-446-47932-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476813>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Die Idee zu diesem Buch ist aus meinen Vorlesungen „Energiespeichersysteme“ und „Elektrische Speichersysteme“ hervorgegangen. Diese Vorlesungen werden im Rahmen des Masterstudiengangs „Dezentrale Energieerzeugung und Energiemanagement“ an der Hochschule Reutlingen angeboten. Es ist eine Erweiterung zu dem ebenfalls im Hanser Verlag erschienenen Buch „Energiespeicher für die Energiewende“ und nah an meinem englischsprachigen Werk „Energy Storage Systems“, erschienen bei Oxford University Press. Beides, Vorlesung und Bücher, sind geprägt durch meine langjährige Berufserfahrung: zunächst als Projektleiter und Entwicklungsingenieur für solare Heimspeicher, später als Entwicklungsleiter bei der REFU Elektronik, später REFUdrive. Hier entwickeln wir Batteriesysteme, Solar- und Batteriewechselrichter und Antriebsumrichter. Die Anwendungen reichen von stationären Batteriekraftwerken für den Regelenergiemarkt bis zur Elektrifizierung von mobilen Arbeitsmaschinen.

Als ich mit der Arbeit an diesem Buch begann, war es mir zunächst nur ein Anliegen, die verschiedenen Speichertechnologien vorzustellen. Es zeigte sich aber, dass es nicht ausreicht zu erklären, was eine Bleibatterie von einer Lithium-Ionen-Batterie unterscheidet. Meine berufliche Erfahrung hatte gezeigt, dass die Auslegung von elektrischen Speichersystemen eine komplexe Aufgabe darstellt. Viele Designwidersprüche müssen erkannt und aufgelöst werden. So habe ich in der Ausarbeitung meiner Vorlesung einen Werkzeugkasten erarbeitet, der es erlaubt, die Designaufgabe strukturiert zu lösen. Manch Leser mag einwenden, dass Kochrezepte der Kreativität nicht förderlich sind. Dem widerspreche ich. Ein guter Koch, der sein Handwerk gelernt hat, arbeitet die einzelnen Schritte eines Rezeptes strukturiert ab und kann dennoch kreativ in der Gestaltung der Mahlzeit sein. Die Struktur schafft Freiräume für die Kreativität.

Es gibt eine Reihe sehr guter Lehrbücher über Energiespeicher. Die meisten von ihnen konzentrieren sich auf die zugrunde liegende Technologie. Je nach Vorliebe setzen die Autoren unterschiedliche Schwerpunkte bei der Diskussion der Technologie und ihrer physikalischen und chemischen Funktionsprinzipien. Diese Lehrbücher sind sehr wichtig, und ich habe hohen Respekt vor den vielen Details, die sich beim Studium dieser Werke eröffnen.

Ich habe daher versucht, wo immer ich dies konnte, auf diese Werke in der Literatur hinzuweisen. Bitte nutzen Sie diese wertvollen Ressourcen. Das Thema „Speicher“ entwickelt sich extrem schnell.

Was jedoch in den meisten Büchern als Randthema behandelt wird, ist die Herausforderung, die verschiedenen Technologien in Systeme zu integrieren. Die einfache Frage: „Was

muss ich tun, um die Speichertechnologie X in mein System Y zu integrieren, damit es funktioniert?“, wird selten beantwortet. Unzählige, sehr schöne Diskussionen mit Studenten, Forschern, Mitarbeitern und Kunden zeigen, dass die Herausforderungen oftmals gerade in dieser Fragestellung liegen. Daher versuche ich in diesem Buch, dem Leser Werkzeuge an die Hand zu geben, um auf diese Fragen Antworten zu finden.

Das Rezept für die Auslegung von elektrischen Speichersystemen besteht aus drei Schritten. Zunächst werden die Anforderungen an das Energiespeichersystem gesammelt. In diesem Buch formuliere ich Anforderungen als User-Stories. Diese aus dem SCRUM entwickelte Form ist nicht jedem geläufig, doch sie hat sich in meiner beruflichen Praxis bewährt. Sie verschafft Klarheit darüber, wer was wofür möchte. Zusätzlich unterstützt sie den Autor, Anforderungen besser von Spezifikationen zu unterscheiden. Eine Aufgabe, die auch mir im Alltag immer wieder schwer fällt, da wir als Entwickler dazu ausgebildet wurden, möglichst schnell in Lösungen zu denken.

Nachdem die Anforderungen bekannt sind, befasse ich mich mit der Fragestellung, wie die Leistung im Energiespeichersystem verteilt wird. Hierzu werden die Leistungsflüsse des Energiespeichersystems in einem Leistungsflussdiagramm beschrieben. Diese einfache Darstellung ist unabhängig von der technischen Realisierung und lässt sich so anpassen, dass jede technische Realisierung darin enthalten ist. Diese abstrakte mathematische Methode hat sich vor allem bei der Bestimmung von optimalen Systemkonfigurationen bewährt. Ingenieure – mich eingeschlossen – neigen dazu, sich manchmal auch zu früh auf eine technische Realisierung festzulegen. Es liegt vielleicht in unserer Persönlichkeit oder in unserer Ausbildung, dass wir, haben wir uns erst einmal festgelegt, diese Idee verteidigen. Aber der Weg in die Hölle ist gepflastert mit guten Absichten. Oftmals musste ich feststellen, dass im Nachhinein eine andere Realisierung besser gewesen wäre. Daher entwickelte ich diese Technik, die es erlaubt, erst dann eine Entscheidung zu treffen, wenn die Fakten ermittelt worden sind.

Der letzte Schritt ist das konkrete Systemdesign, das dann auch mit den Anforderungen abgeglichen wird. In der Systemarchitektur gibt es in der Regel kein „Falsch“, es gibt immer nur ein „Anders“. Es gibt sehr viele Möglichkeiten, dieselbe Entwicklungsaufgabe zu lösen. Fokussieren wir uns nur auf die Technik – was wir in diesem Buch auch tun –, vergessen wir andere Randbedingungen wie Preis, Effizienz, Produktstrategie, Marktzugänge, die ebenfalls die Auslegung beeinflussen. Die hier gezeigten Werkzeuge helfen auch hier, reduzieren die Zahl der Möglichkeiten und geben Hinweise, was eine gute Auslegung darstellt.

Dieses Rezept findet sich in jedem Kapitel wieder. Ich habe versucht, sehr viele Anwendungsbeispiele einzubringen. Die Erfahrung in meiner Vorlesung zeigt, dass das gemeinsame Gestalten den Studenten und mir Freude bereitet. Es ist eine Entschädigung für das mühsame Erlernen der neuen Werkzeuge. Ich hoffe, den Lesern dieses Buches machen diese Anwendungsbeispiele ebenfalls Spaß.

Ich möchte die Einleitung mit einigen Hinweisen für verschiedene Leser abschließen. Ich habe mich bei diesem Buch an meiner eigenen Vorlesung orientiert. Die zwei wichtigsten Kapitel sind Kapitel 2 und 3. Hier werden die Werkzeuge vorgestellt. Wenn man als Leser bereits solide Kenntnisse über Leistungselektronik hat, wird Kapitel 4 keine neuen Erkenntnisse geben. Allerdings sollte man sich mit der Beschreibung von leistungselektronischen Komponenten aus der Sicht eines Systemingenieurs in Abschnitt 4.3 vertraut machen. Nachdem der Werkzeugkasten zusammengestellt ist, beginnen wir in Kapitel 5 mit

den mechanischen Speichern und lernen danach Schritt für Schritt weitere Speichertechnologien kennen.

Ich habe mich entschieden, Übungsaufgaben direkt in den Text einzuarbeiten und die Lösungen auch sogleich vorzurechnen. Wer mag und wer die nötige Selbstdisziplin besitzt, kann nach dem Lesen der Aufgabe die Lösung verdecken und die Aufgabe selber lösen. Man kann die Aufgaben aber auch als Beispiele sehen und verstehen. Beide Wege sind gangbar. Ich rate dazu, die Lösung erst nach eigener Aktivität zu lesen. Ansonsten könnte beim Leser der Eindruck von Leichtigkeit entstehen, die sich aber erst nach vielen Übungsstunden und nicht nach einmaligen Lesen einstellt.

Ich wünsche allen Leserinnen und Lesern viel Freude und viele neue Erkenntnisse. Dieses Buch ist eine gemeinsame Reise, und so sollten wir uns nun auf den Weg machen, Staunen und Lernen.

Reutlingen, im Oktober 2023

*Dr. Armin Schmiegel*



# Inhalt

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Verwendung von Energiespeichern .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Einleitung .....  | 1         |
| 1.2      | Wofür Speicher genutzt werden .....   | 1         |
| 1.2.1    | Energie und Leistung.....   | 2         |
| 1.2.2    | Effizienz – Die Kosten der Umwandlung.....  | 4         |
| 1.2.3    | Lade- und Entladeleistung .....   | 6         |
| 1.3      | Energiespeichersysteme in der Anwendung .....   | 7         |
| 1.3.1    | Mobile Geräte – Vom Smartphone bis zum Rasenmäher .....   | 7         |
| 1.3.2    | Elektromobilität und mobile Maschinen .....   | 12        |
| 1.3.3    | Mobile Arbeitsmaschinen .....   | 18        |
| 1.3.4    | Stationäre Speicheranwendungen .....  | 23        |
| 1.4      | Zusammenfassung .....   | 31        |
| <b>2</b> | <b>Allgemeine Beschreibung von Energiespeichersystemen .....</b>  | <b>33</b> |
| 2.1      | Einleitung .....  | 33        |
| 2.2      | Mathematische Beschreibung des Aufbaus und der Funktion<br>von Speichersystemen .....                                 | 36        |
| 2.2.1    | Der Wirkungsgrad eines Leistungstransfers.....  | 37        |
| 2.2.2    | Selbstentladung von Speichersystemen .....  | 42        |
| 2.3      | Beschreibung eines Speichersystems durch das Leistungsflussdiagramm.....  | 44        |
| 2.3.1    | Bestimmung der technischen Rahmenbedingungen .....  | 48        |
| 2.3.2    | Bestimmung der Verlustleistungen .....  | 49        |
| 2.3.3    | Definition der Zielfunktion .....   | 56        |
| 2.3.4    | Bestimmung der optimalen Betriebsführung .....  | 59        |
| 2.3.5    | Vergleich der technischen Lösungsvarianten.....   | 64        |
| 2.4      | Bewertung von Systemkonzepten unter finanziellen Gesichtspunkten .....  | 72        |
| 2.4.1    | Materialkosten, Produktions- und Produktkosten – Wie<br>die Kosten eines Energiespeichersystems ermittelt werden..... | 73        |
| 2.4.2    | Einführung in die Investitionskostenrechnung .....  | 78        |
| 2.5      | Zusammenfassung .....   | 86        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>3</b> | <b>Einführung in die Anforderungsanalyse und den Systementwurf</b>   | <b>89</b>  |
| 3.1      | Einführung .....   | 89         |
| 3.2      | Anforderungen und Komponenten .....  | 90         |
| 3.3      | Basisanforderungen an Energiespeichersysteme .....   | 105        |
| 3.4      | Basiskomponenten eines Energiespeichersystems .....  | 108        |
| 3.5      | Zusammenfassung .....  | 110        |
| <b>4</b> | <b>Einführung in die Leistungselektronik</b> .....   | <b>113</b> |
| 4.1      | Einführung .....   | 113        |
| 4.2      | Elektronische Komponenten für leistungselektronische Wandler .....   | 115        |
| 4.2.1    | Realisierung eines Tiefsetzstellers mithilfe von<br>ohmschen Widerständen – Der Spannungsteiler .....            | 115        |
| 4.2.2    | Realisierung eines Tiefsetzstellers mit einem Kondensator<br>und elektrischen Schaltern – Die Ladungspumpe ..... | 118        |
| 4.2.3    | Der synchrone Tiefsetzsteller –<br>Eine Realisierung mit Spule und Schalter .....                                | 127        |
| 4.2.4    | Wie man Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt –<br>Die Diode als Gleichrichter .....                             | 138        |
| 4.2.5    | Wie man Wechselstrom umwandelt .....   | 143        |
| 4.2.6    | Wenn die Frequenz gleich bleibt –<br>Der Transformator als Wechselstromwandler .....                             | 144        |
| 4.2.7    | Wenn alles eingestellt werden muss – Der Frequenzumrichter .....   | 146        |
| 4.2.8    | Elektrische Antriebstechnik – Wie aus Bewegung<br>elektrische Leistung wird und umgekehrt .....                  | 155        |
| 4.3      | Beschreibung der leistungselektronischen Komponenten<br>aus Sicht des Systemingenieurs .....                     | 167        |
| 4.4      | Anforderungen an Speichersysteme, die elektrische Komponenten verwenden  | 172        |
| 4.5      | Zusammenfassung .....  | 175        |
| <b>5</b> | <b>Mechanische Speicher</b> .....  | <b>177</b> |
| 5.1      | Anforderungen an mechanische Speichersysteme .....   | 178        |
| 5.2      | Energiespeicherung durch potenzielle Energie – Pumpspeicherkraftwerke<br>und andere Konzepte .....               | 179        |
| 5.3      | Energiespeicherung durch Nutzung der Rotationsenergie –<br>Der Schwungradspeicher .....                          | 187        |
| 5.4      | Energiespeicherung mit potenzieller Energie Teil 2 – Rückstellkraft einer Feder                                  | 198        |
| 5.5      | Anwendungsbeispiel – Aufrüstung eines Pumpspeicherkraftwerks<br>für den Leistungsmarkt .....                     | 207        |
| 5.6      | Zusammenfassung .....  | 213        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>6</b> | <b>Elektrische Speicher</b> .....  | <b>215</b> |
| 6.1      | Einführung .....   | 215        |
| 6.2      | Das Speichern von elektrischem Strom .....   | 216        |
| 6.2.1    | Grundlegender Mechanismus der Stromspeicherung .....   | 216        |
| 6.2.2    | Anforderungen an einen Stromspeicher .....   | 219        |
| 6.2.3    | Supraleitung in Kürze .....  | 219        |
| 6.2.4    | Beispiel für die Realisierung eines supraleitenden<br>magnetischen Energiespeichers (SMES) ..... | 223        |
| 6.2.5    | Zusammenfassung .....  | 225        |
| 6.3      | Spannungsspeichersysteme .....   | 227        |
| 6.3.1    | Aggregation von Kondensatoren – Wie eine<br>Kondensatorbatterie aufgebaut sind .....             | 227        |
| 6.3.2    | Doppelschicht- und Pseudokapazität – Wie Supercaps super werden ..                               | 232        |
| 6.3.3    | Anforderungen für Kondensatorbatterien mit Supercaps .....                                       | 237        |
| 6.4      | Anwendungsbeispiel – Rekuperation eines Personenaufzugs .....                                    | 244        |
| 6.4.1    | Anforderungsanalyse .....  | 246        |
| 6.4.2    | Erstellen eines ersten Systementwurfs .....  | 248        |
| 6.4.3    | Das Leistungsflussdiagramm des rekuperierenden Personenaufzugs ..                                | 251        |
| 6.4.4    | Energiemanagement des rekuperierenden Aufzugs<br>mit Spannungssteuerung .....                    | 253        |
| 6.4.5    | Auslegung der Superkondensatorbatterie .....   | 254        |
| 6.4.6    | Systemkomponenten und Requirement Traceability Matrix .....                                      | 259        |
| 6.5      | Zusammenfassung .....  | 263        |
| <b>7</b> | <b>Elektrochemische Speichersysteme</b> .....  | <b>265</b> |
| 7.1      | Einführung .....   | 265        |
| 7.2      | Allgemeine Überlegungen zu elektrochemischen Speichertechnologien .....                          | 265        |
| 7.2.1    | Die grundlegende elektrochemische Reaktion .....   | 266        |
| 7.2.2    | Anforderungen und Systemkomponenten .....  | 273        |
| 7.2.3    | Die Leiden des Alterns – Batterielebensdauer<br>und Kapazitätsmanagement .....                   | 280        |
| 7.2.4    | Balancing-Systeme .....  | 285        |
| 7.2.5    | Soft turn-off und Alterungsreserven –<br>Kapazitätsmanagement von Batteriesystemen .....         | 289        |
| 7.2.6    | Systemkomponenten elektrochemischer Speichersysteme .....  | 291        |
| 7.2.7    | Zusammenfassung .....  | 295        |
| 7.3      | Bleisäurebatterie .....  | 295        |
| 7.3.1    | Primäre und sekundäre Reaktionen .....   | 296        |
| 7.3.2    | Verhalten und Anforderungen – Vom Umgang mit Bleibatterien .....                                 | 300        |
| 7.3.3    | Anwendungsbeispiel – Versorgung eines<br>mobilen Funkübertragungsmastes .....                    | 307        |
| 7.3.4    | Zusammenfassung .....  | 324        |



|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 7.4      | Lithium-Ionen-Batterien .....   | 324        |
| 7.4.1    | Die Zellchemie von Lithium-Ionen-Batterien .....  | 325        |
| 7.4.2    | Verhalten und Anforderungen – Vom Umgang<br>mit Lithium-Ionen-Batterien .....                             | 327        |
| 7.4.3    | Anwendungsbeispiel – Solarstromspeichersystem für Wohngebäude ..  | 335        |
| 7.4.4    | Zusammenfassung .....   | 357        |
| 7.5      | Hochtemperaturbatterien .....   | 358        |
| 7.5.1    | Primärreaktion .....  | 358        |
| 7.5.2    | Anforderungen und Komponenten .....   | 360        |
| 7.5.3    | Anwendungsbeispiel – Integration einer Natrium-Schwefel-Batterie<br>in einen Windpark .....               | 366        |
| 7.5.4    | Zusammenfassung .....   | 384        |
| 7.6      | Redox-Flow-Batterien .....  | 385        |
| 7.6.1    | Hauptreaktionen .....   | 385        |
| 7.6.2    | Anforderungen und Verhalten von Redox-Flow-Batterien .....  | 387        |
| 7.6.3    | Anwendungsbeispiel – Integration einer Redox-Flow-Batterie<br>in einen Windpark in einem Inselnetz .....  | 394        |
| 7.6.4    | Zusammenfassung .....   | 395        |
| 7.7      | Zusammenfassung .....   | 396        |
| <b>8</b> | <b>Chemische Speichersysteme .....</b>  | <b>397</b> |
| 8.1      | Einleitung .....  | 397        |
| 8.2      | Allgemeine Funktion und Anforderungen .....   | 399        |
| 8.3      | Wasserstoff als Speichertechnologie .....   | 402        |
| 8.3.1    | Die Gewinnung von Wasserstoff .....   | 409        |
| 8.3.2    | Die Brennstoffzelle – Wie wir aus gespeichertem<br>Wasserstoff Strom gewinnen .....                       | 414        |
| 8.3.3    | Anwendungsbeispiel – Auslegung eines mit Brennstoffzellen<br>und Batterie betriebenen Nutzfahrzeugs ..... | 419        |
| 8.3.4    | Zusammenfassung .....   | 437        |
| 8.4      | Methanisierung – „Power to Gas“ oder „Power to Liquid“ .....  | 438        |
| 8.4.1    | Die Grundreaktion für Leistung zu Gas .....   | 438        |
| 8.4.2    | Anwendungsbeispiel – Integration von „Power to Gas“ in das Inselnetz                                      | 440        |
| 8.5      | Zusammenfassung .....   | 444        |
|          | <b>Tabellenverzeichnis .....</b>  | <b>445</b> |
|          | <b>Literatur .....</b>  | <b>449</b> |
|          | <b>Stichwortverzeichnis .....</b>   | <b>461</b> |

# 1

# Verwendung von Energiespeichern

## ■ 1.1 Einleitung

Bevor wir uns mit der mathematischen Beschreibung und Modellierung von Speichersystemen befassen, wollen wir uns in diesem Kapitel zunächst anschauen, wie und wo überall Speicher verwendet werden. Es gibt kaum einen Bereich in unserem Leben, wo keine Energiespeicher genutzt werden.

Wir beginnen mit den Anwendungen von Speichern und deren Funktionsweise im Allgemeinen. Wir können Energiespeicher nicht beschreiben, ohne die Begriffe „Energie“ und „Leistung“ verwenden zu müssen. Daher gehen wir zunächst auf diese Begriffe ein. Danach betrachten wir verschiedene Anwendungen von Speichersystemen. Wir beginnen bei kleineren Speichersystemen, die in mobilen Geräten verwendet werden. Dann betrachten wir Mobilitätsanwendungen wie elektrifizierte oder hybridisierte Fahrzeuge, mobile Nutzfahrzeuge und Arbeitsmaschinen.

Bei Mobilitätsanwendungen geht es in der Regel darum, Energie vor dem Fahrtantritt zu speichern, um diese Energie während der Fahrt zu nutzen. Der Energiespeicher wird als Wegzehrung verwendet, damit wir die Reise durchstehen können. Eine weitere Anwendung von Speichersystemen sind die stationären Speichersysteme. Deren Nutzung ist mit unserem Stromnetz und seinen Eigenschaften verbunden. Daher befassen wir uns mit der Struktur des Stromnetzes und den unterschiedlichen Arten, wie Energiespeicher hier genutzt werden können.

## ■ 1.2 Wofür Speicher genutzt werden

Das Speichern ist ein allgemeines Prinzip in der Natur. Pflanzen speichern Wasser, um Trockenzeiten zu überstehen. Eichhörnchen und andere Nagetiere sammeln Nahrung, um im Winter auf diese Vorräte zurückzugreifen. Andere Tiere verstecken nicht ihre Nahrung oder vergraben die Wintervorräte, sondern tragen ihren Wintervorrat als Winterspeck direkt im Körper. Und stellen so sicher, dass ihr Körper im Winter nahrungsarme Zeiten überstehen kann.

Wir Menschen „speichern“ oder horten Geld, das wir jetzt nicht brauchen, um es später auszugeben. Wir füllen den Tank unseres Autos, bevor wir eine lange Reise antreten, und setzen leider auch etwas Körperfett an, wenn wir zu viel essen, damit wir auch in schlechten Zeiten noch genug Kraftreserven haben.

Den Beispielen ist gemeinsam, dass der Vorgang des Speicherns stets mit dem Ziel verbunden ist, einen Überschuss in der Gegenwart zu nutzen, um einen Mangel in der Zukunft zu decken. Mit Speichern kann man die Produktion und den Verbrauch von etwas zeitlich trennen. Dabei kann auch die räumliche Trennung von Produktion bzw. Bezug und Verbrauch durch Speicher realisiert werden. Das gesunde Frühstück am Morgen zu Hause deckt den Energiebedarf während meiner Arbeit. Das Auto wird an der Tankstelle betankt und verbraucht die Energie des Treibstoffes während der Fahrt übers Land.

Es gibt noch eine dritte Anwendung. Wenn der Transport die gesamte Menge von etwas nicht sofort und vollständig ermöglicht, kann die Differenzmenge zunächst zwischengespeichert werden, sodass der eigentliche Transportvorgang in mehreren Schritten erfolgen kann.

### 1.2.1 Energie und Leistung

In diesem Buch betrachten wir Speichersysteme, die Energie speichern sollen. Mit dem Begriff Energie bezeichnen wir eine physikalische Größe, die Auskunft darüber gibt, wie viel Leistung über einen Zeitraum einem physikalischen System entnommen oder hinzugefügt werden kann. Betrachten wir ein System, das bei  $t = 0$  s den Energiegehalt  $E_0$  hat. Während einer Zeitspanne von  $t = 0$  s bis  $t = T$  s wird diesem System Energie zugeführt oder entzogen. Die Zeitreihe, die diesen Vorgang beschreibt, heißt  $P(t)$ .  $P(t)$  ist die Leistung die einem System entnommen oder zugeführt wird. Zum Zeitpunkt  $t = T$  s kann die Energiemenge des Systems berechnet werden, indem über die entnommene und zugeführte Energie integriert wird:

$$E(T) = E_0 + \int_{t=0}^{t=T} P(s) \, ds \quad (1.1)$$



#### Übung 1.1 Laden eines Smartphones

Wir betrachten ein Smartphone, das einen Ladezustand von 24 Wh hat. Das Handy wird während der Nacht (8 h) mit 15 W geladen und über den Arbeitstag (12 h) mit 10 W entladen. Wie hoch ist der Energiegehalt am Ende des Arbeitstages?

**Lösung:** Unter Verwendung von Gleichung 1.1 ist der Energiegehalt:

$$E(T) = 24 \text{ Wh} + 8 \text{ h} \cdot 15 \text{ W} - 12 \text{ h} \cdot 10 \text{ W} = 24 \text{ Wh} + 120 \text{ Wh} - 120 \text{ Wh} = 24 \text{ Wh}$$

Die in Gleichung 1.1 dargestellte Definition von Energie zeigt uns, dass im Prinzip jedes physikalische System, dem eine Energie zugeordnet werden kann, auch eine Art Energiespeicher ist. Wir müssen nur in der Lage sein, dem System zu einem bestimmten Zeitpunkt Energie zuzuführen und zu einem anderen Zeitpunkt Energie zu entnehmen.

**Tabelle 1.1** Verschiedene Arten von Energie, die in diesem Buch behandelt werden, und deren Definition

| Energie                    | math. Definition                         | Beschreibung  |
|----------------------------|--|---|
| potenzielle Energie        | $E_{\text{pot}} = mg\Delta h$            | Die Energie, die benötigt wird, um eine Masse $m$ von der Höhe $h_1$ auf $h_2$ zu heben. $g$ ist die Erdbeschleunigung, die vom Ort abhängt. $\Delta h = h_2 - h_1$ ist der Höhenunterschied.               |
| Translationsenergie        | $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} mv^2$      | Die Energie, die in einer Masse $m$ gespeicherte Energie, die sich eine Geschwindigkeit $v$ bewegt.   |
| Rotationsenergie           | $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} J\omega^2$ | Die in einem rotierenden Körper gespeicherte Energie. $J$ ist das Trägheitsmoment, das die Massenverteilung um die Drehachse widerspiegelt. $\omega$ ist die Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Körpers. |
| elektrische Energie        | $E_{\text{el}} = UIt$                    | Energie, die benötigt wird, um einen Stromfluss $I$ auf einem bestimmten Spannungsniveau $U$ über eine Zeitspanne $t$ bereitzustellen.  |
| Energie eines Kondensators | $E_C = \frac{1}{2} CU^2$                 | Die in einem Kondensator mit der Kapazität $C$ und der Spannungshöhe $U$ gespeicherte Energie.  |
| Energie einer Induktivität | $E_L = \frac{1}{2} LI^2$                 | Die elektrische Energie, die in einer Spule mit der Induktivität $L$ gespeichert ist, während ein Strom $I$ durch die Spule fließt.   |

Leider können nicht alle physikalischen Systeme als Energiespeicher dienen. Denn es ist notwendig, dass Energie über einen ausreichend langen Zeitraum gespeichert werden kann, wie das folgende Beispiel verdeutlicht.



### Übung 1.2 Translationsenergie als Energiespeicher

Wir wollen 3Wh in Form von kinetischer Energie in einem Objekt mit einer Masse von 12kg speichern. Nach einem Tag soll die gespeicherte Energie entnommen werden. Welche Strecke hat das Objekt in dieser Zeit zurückgelegt?

**Lösung:** Die kinetische Energie ergibt sich aus

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} mv^2 = 3\text{Wh} = 3 \cdot 3,6\text{kJ} = 10,8\text{kJ}$$

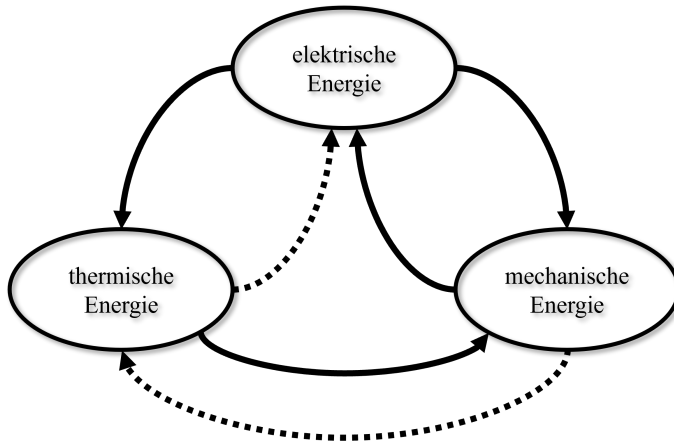
Das Objekt hat also eine Geschwindigkeit von

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10,8\text{kJ}}{12\text{kg}}} = 42 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 151,2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Je länger diese Energie in dem Objekt gespeichert ist, desto länger bewegt sich das Objekt mit einer Geschwindigkeit von  $151,2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Wenn die Energie nach einem Tag abgerufen werden soll, hat das Objekt bereits eine Strecke von 3.628,8km zurückgelegt. Die Translationsenergie ist daher eigentlich nur geeignet, Energie über eine kurze Zeit zu speichern.

## 1.2.2 Effizienz – Die Kosten der Umwandlung

Wie Übung 1.2 zeigt, ist nicht jede Energieform für jede Speicheranwendung gleichermaßen geeignet. Daher besteht die Notwendigkeit, Energie von einer Energieform in eine andere, besser geeignete Energieform zu transformieren. In diesem Buch sind die wichtigsten Energieformen die mechanischen, elektrischen und die thermischen Energieformen. Diese können ineinander umgewandelt werden (Bild 1.1).



**Bild 1.1** Speichersysteme befassen sich mit der Speicherung von mechanischer, elektrischer und thermischer Energie. Diese Energien können ineinander umgewandelt werden. Einige Transformationen sind recht effizient, d. h. es geht nur ein kleiner Teil der übertragenen Energie verloren. Die durchgezogenen Linien markieren diese effizienten Umwandlungen. Die gestrichelten Linien markieren Umwandlungen, die höhere Wandlungsverluste aufweisen und in Energiespeichersystemen üblicherweise nicht verwendet werden.

Nicht jede Energieform lässt sich gut in eine andere Energieform transformieren. Elektrische und mechanische Energie sind beispielsweise sehr gut in einander transformierbar, da die Bewegung eines Magneten über die Lorentzkraft einen elektrischen Strom erzeugt. Mithilfe eines Elektromotors lässt sich aus einem elektrischen Strom Bewegung und aus einer Bewegung elektrischer Strom erzeugen.

Elektrische Energie lässt sich auch einfach in thermische Energie umwandeln, da jeder elektrische Strom über den Widerstand eines Leiters stets auch Wärme erzeugt. Strom kann aber auch dafür genutzt werden, Wärmestrahlung zu erzeugen, die von einem anderen Körper aufgenommen werden kann. Dies nutzt man bei Infrarotheizungen und elektrischen Grills aus.

Für die Umwandlung von thermischer Energie in elektrische Energie kann der thermoelektrische Effekt genutzt werden. Hier führt die Erwärmung eines Leiters dazu, dass Strom fließt. Allerdings ist dieser Effekt sehr schwach, daher erfolgt in der Regel die Umwandlung über den Zwischenschritt einer Wandlung von thermischer Energie in mechanische Energie. Ein Beispiel hierfür ist die Verbrennung von fossilen Energieträgern, deren Wärme Wasser zum Verdampfen bringt und mit diesem Dampf eine Dampfturbine angetrieben wird. Die Rotation der Turbine treibt wiederum einen Generator an und erzeugt so elektrischen Strom.

Die Qualität dieser verschiedenen Umwandlungen wird über den Wirkungsgrad beschrieben. Vereinfacht ist der Wirkungsgrad das Verhältnis zwischen der Energie  $E_{\text{in}}$ , die wir wandeln oder übertragen wollen, und der Energie, die danach wirklich zur Verfügung steht,  $E_{\text{out}}$ .

$$\eta = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \quad (1.2)$$

Im nächsten Kapitel werden wir uns mit dem Wirkungsgrad  $\eta$  genauer befassen. Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist eine wichtige Kennzahl, die wir benötigen, um Speichersysteme zu beschreiben und auszulegen. Denn um ein Energiespeichersystem zu beschreiben, müssen wir uns im Klaren werden, welche Energieformen auftreten und wie diese ineinander überführt werden. Für die Entscheidung, welche Form dann die richtige Wahl ist, ist die Effizienz ein wichtiges Kriterium. In der Praxis bestimmt die Anwendung oftmals, welche Energieformen vorhanden sind. Wenn wir ein Fahrzeug mit Verbrennungs- oder Hybridantrieb betrachten, stehen die verwendeten Energieformen bereits fest: Der Verbrennungsantrieb wird dazu genutzt, Wärme in mechanische Energie umzuwandeln. Die mechanische Energie wird dann dafür genutzt, die Achse in Rotation zu versetzen und so das Auto in Bewegung zu versetzen, was einer Transformation von thermischer Energie in mechanische Energie entspricht. Der Verbrennungsmotor kann allerdings auch die Achse eines Generators antreiben, der aus der Bewegung Strom erzeugt, der die Batterie lädt. In diesem Fall wird also thermische Energie in Bewegungsenergie und dann in elektrische Energie umgewandelt. Wird der Verbrennungsmotor nicht genutzt, sondern lediglich die Batterie und der Elektromotor, wird gespeicherte elektrische Energie in Bewegungsenergie gewandelt.

Für die Auslegung der Systemkomponenten des Fahrzeuges stellt sich die Frage, welche Verluste bei diesen Wandlungen auftreten. Diese werden durch die technische Realisierung beeinflusst.

**Tabelle 1.2** Wirkungsgrade der zur Verfügung stehenden Fahrzeugkomponenten

| Komponente          | Wirkungsgrad                   |
|---------------------|--------------------------------|
| Verbrennungsmotor A | $\eta_{\text{Verb.}} = 43\%$   |
| Verbrennungsmotor B | $\eta_{\text{Verb.}} = 39\%$   |
| Elektromotor A      | $\eta_{\text{Antrieb}} = 74\%$ |
| Elektromotor B      | $\eta_{\text{Antrieb}} = 81\%$ |



### Übung 1.3 Design eines hybriden Antriebsstrangs

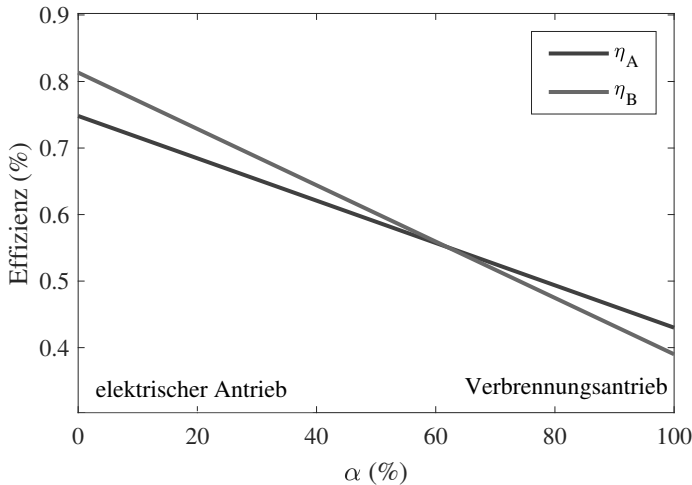
Es stehen für den Verbrennungsmotor, den Elektromotor und die Batterie zwei unterschiedliche Typen A, B zur Verfügung, die einen unterschiedlichen Wirkungsgrad haben. In Tabelle 1.2 sind die Wirkungsgrade dargestellt. Für die Auslegung soll nun die effizienteste Systemkonfiguration verwendet werden. Dabei soll berücksichtigt werden, dass der Anteil der Nutzung des Verbrennungsmotors und des elektrischen Antriebs unterschiedlich sein kann. Hierfür wird der Gewichtungsfaktor  $\alpha$  herangezogen, dessen Wertebereich zwischen 0 und 1 liegt.  $\alpha = 1$  entspricht der alleinigen Nutzung des Verbrennungsmotors. Bei  $\alpha = 0$  wird ausschließlich elektrisch gefahren.

**Lösung:** Fährt das Fahrzeug rein elektrisch, d. h.  $\alpha = 0$ , ist der Wirkungsgrad das Produkt aus dem Wirkungsgrad des Elektroantriebs und der der Batterie  $\eta_{\text{Antrieb}} \cdot \eta_{\text{Bat}}$ . Für

den Fall, dass wir nur mit dem Verbrennungsmotor fahren, ergibt sich der Wirkungsgrad zu  $\eta_{\text{Verb},i}$ . Bei einer Kombination von beiden Antrieben müssen wir die gewichtete Summe betrachten:

$$\eta_i = \alpha \eta_{\text{Verb},i} + (1 - \alpha) \eta_{\text{Antrieb},i} \eta_{\text{Bat},i}$$

Dabei ist  $i = (A, B)$  die jeweilige Konfiguration. In Bild 1.2 ist der Verlauf der Effizienz für die beiden Konfigurationen bei unterschiedlicher Gewichtung dargestellt. Konfiguration A ist bei  $\alpha = 1$  besser als Konfiguration B. Dies ist nicht überraschend, denn bei hohen  $\alpha$  überwiegt die Nutzung des Verbrennungsmotors, und der Verbrennungsmotor A ist effizienter als Motor B. Bei  $\alpha = 0$  hingegen ist B besser, hier dominiert die Nutzung des elektrischen Antriebsstrangs, und dieser ist bei B effizienter, als A.



**Bild 1.2** Wirkungsgrad der Konfiguration A und B als Funktion von  $\alpha$

### 1.2.3 Lade- und Entladeleistung

Die Berechnungen in Übung 1.3 zeigen, dass für die Auslegung wichtig ist, wie das Fahrzeug genutzt wird. Soll es primär durch den Verbrennungsmotor angetrieben werden, ist eine andere Konfiguration besser als für den Fall, dass das Fahrzeug komplett elektrisch betrieben werden kann. Bei einem Fahrzeug, das beide Systemkomponenten, d. h. den elektrischen Antriebsstrang und einen Verbrennungsmotor integriert hat, bestimmen zwei Größen, wie stark elektrisch und wie stark mit einem Verbrennungsmotor gefahren wird: der Energieinhalt der Fahrzeugbatterie und ihre Be- und Entladeleistung.

Die Be- und Entladeleistung gibt an, wie viel Energie pro Zeit dem Speicher zugeführt oder entnommen werden kann. Auch diese Größe hat einen Einfluss die Frage, wie groß der Anteil der Nutzung des Verbrennungsmotors und des elektrischen Antriebes ist. Ist die Batterie so ausgelegt, dass sie nur mit geringer Entladeleistung betrieben werden kann, muss der Verbrennungsmotor zur Unterstützung genutzt werden, wenn höhere Beschleunigungen

benötigt werden. Wann immer der Fahrer „Gas gibt“, würde dann neben dem Elektromotor auch der Verbrennungsmotor genutzt. Dies hat natürlich einen Einfluss auf  $\alpha$ , dessen Wert sich in Richtung eins verschieben würde. Es gibt aber noch einen weiteren Effekt. Ein Elektromotor arbeitet sowohl als Antrieb und als Generator, d. h. er kann dazu genutzt werden, die Batterie zu laden, indem Bewegungsenergie in elektrische Energie umgewandelt wird. Ist die Ladeleistung der Batterie eingeschränkt, bedeutet dies, dass nicht die gesamte Leistung, die bei einem Bremsvorgang zum Laden der Batterie genutzt werden könnte, auch genutzt werden kann. Der nicht speicherbare Anteil wird je nach Aufbau des Fahrzeuges durch eine mechanische Bremse in Reibung und Wärme umgewandelt oder mithilfe eines Bremswiderstandes in Wärme umgewandelt. Die Ladeleistung hat somit einen Einfluss auf den Wert von  $\alpha$ . Ist die Ladeleistung klein, wird weniger Bremsenergie zurück in die Batterie überführt und muss verbrannt werden. Dies reduziert den Anteil am reinen elektrischen Fahren und verschiebt den Wert für  $\alpha$  in Richtung eins.

Speichersysteme und deren Anwendungen lassen sich also durch drei Aspekte beschreiben: Welche Energieformen treten auf und werden gespeichert? Wie groß ist der Energieinhalt, den der Speicher zur Verfügung stellen muss, um die Anforderung der Anwendung zu erfüllen? Welche Be- und Entladeleistung wird für die Anwendung benötigt?

## ■ 1.3 Energiespeichersysteme in der Anwendung

Energiespeichersysteme finden ein sehr breites Feld an Anwendungen. In diesem Abschnitt betrachten wir einige der Anwendungen und beschreiben diese anhand dreier Kriterien: Energieinhalt, Be- und Entladeleistung und welche Energieformen verwendet werden. Wir beginnen mit mobilen Geräten, danach betrachten wie die Elektrifizierung von Fahrzeugen und mobilen Maschinen. Beide Anwendungsfelder zeichnen sich dadurch aus, dass das Speichersystem bewegt wird. Abschließend betrachten wir stationäre Anwendungsfelder. Hier wird der Speicher nicht bewegt und kann daher auch erheblich größer sein.

### 1.3.1 Mobile Geräte – Vom Smartphone bis zum Rasenmäher

In diesem Abschnitt betrachten wir die Verwendung von Speichern für mobile Geräte. Genauer gesagt Unterhaltungselektronik, Werkzeuge und Gartengeräte. Ende des 20. Jahrhunderts wurden die Energie- und Leistungsdichten von primären und sekundären Energiespeichern so hoch, dass es möglich war, Geräte, die an ein Stromnetz angeschlossen wurde, auch mit Batterien auszustatten. Werkzeuge, die bisher mit einem Kabel genutzt werden mussten, wurden kabellos. Ein Beispiel hierfür sind batteriebetriebene Akuschrauber oder Akkubohrer. Gleichzeitig entwickelte sich der Markt an mobiler Unterhaltungselektronik. Laptops und Smartphones wurden zu Technologietreibern für Energie- und Leistungsdichte von Energiespeichern. Der Anwendungsfall ist stets eine räumlich und zeitliche Verschiebung der Nutzung von Energie.

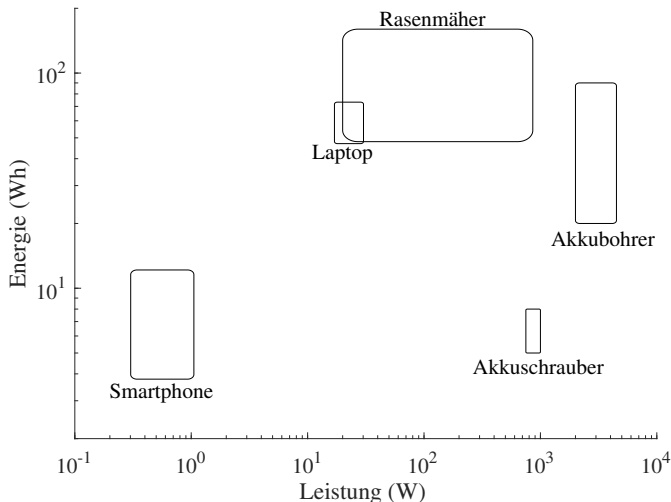


Ich lade mein Smartphone über Nacht zu Hause, um während des Tages überall und jederzeit über E-Mail, Telefon, Online-Messenger erreichbar zu sein, um jederzeit und überall Katzenvideos schauen oder um meinen Lieblingssong aus meiner Schallplattensammlung oder Playlist hören zu können. Der Speicher im Laptop wird in der Bibliothek oder in der Docking-Station geladen, um in der Vorlesung oder im Transit von einem Arbeitsort zum anderen genutzt zu werden.

Dank des Akkuschraubers ist es nun möglich, ihn an Orten ohne Steckdose zu nutzen. Und wer einen Rasen mähen muss, auf dem viele Bäume und Sträucher plus Tische und Planschbecken stehen, weiß es einfach zu schätzen, wenn er sich nicht mehr mit einem Kabel herumschlagen und auch nicht ständig Benzin nachfüllen muss.

Wollen wir einen Energiespeicher für ein mobiles Gerät entwickeln, so müssen wir eine Lösung für die widersprüchlichen Produkthanforderungen Tragbarkeit, Preis, Betriebs- und Lebensdauer finden. Je kleiner der Energiespeicher, desto höher ist die Tragbarkeit des Gerätes, denn Volumen und Gewicht erhöhen sich, wenn sich der Energieinhalt erhöht. Eine Erhöhung der abrufbaren Leistung erhöht ebenfalls das Volumen und Gewicht. Gleiches gilt auch für den Preis: Je mehr Energie in dem Speicher zur Verfügung steht oder je mehr Leistung abrufbar wird, desto höher wird der Preis.

Betriebs- und Lebensdauer werden zum einen durch die Wahl der Speichertechnologie beeinflusst. Bei gleicher Speichertechnologie reduzieren sich die Einflussgrößen allerdings im Wesentlichen auf die Kapazität des Energiespeichers. Je größer diese ist, desto länger kann das Gerät betrieben werden, bevor eine Neuladung notwendig ist. Auch die Lebensdauer verlängert sich, da eine altersbedingte Reduzierung der Speicherkapazität dem Nutzer nicht so schnell bewusst wird. Leider bedeutet aber die Erhöhung der Speicherkapazität eine Erhöhung der Kosten und des Volumens. Dies bedeutet, dass wir zwei widersprüchliche Anforderung haben, die gegeneinander abgewogen werden müssen.



**Bild 1.3** Energie- und Leistungsbedarf von verschiedenen mobilen Anwendungen [MV04, CH<sup>+</sup>10, APTM13, TE<sup>+</sup>16]

So vielfältig die Anwendungen sind, so unterschiedlich sind auch die Anforderungen an Energieinhalt und Leistungsbedarf. In Bild 1.3 sind diese für die oben genannten Anwendungen dargestellt. Während der Energieinhalt nur über zwei Zehnerpotenzen reicht, reicht die Spanne des Leistungsbedarfs über ganze 10 Zehnerpotenzen. Anwendungen mit hohem Leistungsbedarf sind mobile Werkzeuge. Akkuschauber und Akkubohrer benötigen eine Leistung, die zwischen 750 W und 2.000 W liegt. Diese Leistung liegt allerdings nicht dauerhaft an. Ein Akkuschauber benötigt die Leistung nur kurzzeitig, während des Ein- oder Rausdrehens der Schraube. Dieser Vorgang kann je nach Länge der Schraube, Beschaffenheit des Werkstückes, Geschicklichkeit des Nutzer zwischen 2 und 30 s liegen.



#### Übung 1.4 Arbeiten mit einem Akkuschauber

Ein Akkuschauber hat einen Speicher mit einem Energieinhalt von 5,4 Wh. Beim Ein- bzw. Ausdrehen von Schrauben wird für 2 s eine Leistung von 100 W benötigt. Wir wollen mehrere Wandregale zusammenbauen. Der Bausatz eines Wandregals hat 25 Schrauben. Wie viele Wandregale können mit dem Akkuschauber gebaut werden, bevor der Akkuschauber wieder geladen werden muss, wenn beim Zusammenbau keine Fehler gemacht werden?

**Lösung:** Der Energieinhalt eines Schraubvorgangs liegt bei

$$100 \text{ W} \cdot 2 \text{ s} = 200 \text{ Ws} = \frac{200 \text{ Ws} \cdot 1 \text{ h}}{3.600 \text{ s}} = 0,05 \text{ Wh}$$

Somit kann der vollgeladene Akkuschauber ohne Nachladung ca.

$$N = \frac{5,4 \text{ Wh}}{0,05 \text{ Wh}} = 108$$

Schrauben eindrehen. Dies würde für ca. 4 Schränke in Folge ausreichen.

Beim Akkuschauber und Akkubohrer hängt der Leistungsbedarf von der konkreten Anwendung ab. Das Eindrehen einer 10 cm langen Schraube benötigt länger. Handelt es sich um weiches oder hartes Material, wirkt sich dies auf den Leistungsbedarf aus. Wesentlich ist bei dieser Anwendung, dass die Belastung nicht dauerhaft anliegt.

Beim batteriebetriebenen Rasenmäher liegt der Leistungsbereich des Energiespeichers zwischen 20 und 1.600 W und der zur Verfügung stehende Speicher bei 20–160 Wh. Beim Rasenmäher handelt es sich um eine Anwendung, bei der ein kontinuierlicher Betrieb mit einer gleichmäßigen Entladung stattfindet. Der Leistungsbedarf hängt von den Umweltbedingungen ab. Nasses, hochstehendes Gras fordert dem Rasenmäher mehr ab als kurzes, trockenes Gras. Dies ist auch ein Grund, warum Rasenmäherroboter täglich den Rasen mähen und nicht nur einmal in der Woche den Garten abfahren. Kurzes Gras zu schneiden verbraucht weniger Energie. Die Spitzenleistung wird bei einem Rasenmäher selten abgerufen.

Der Energie- und der Leistungsbedarf von Laptops überlappt sich mit dem Bereich des Rasenmähers. Dies ist nicht überraschend, denn hier kommt oftmals nicht nur dieselbe Speichertechnologie, sondern auch dieselben Komponenten zum Einsatz: Lithium-Ionen-Batterien unter Verwendung von Rundzellen der Bauform 16850. Der Elektronikmarkt setzt sehr stark auf die Verwendung von Komponenten, die in hohen Stückzahlen in unterschiedliche Geräte verbaut werden. Das hat zur Folge, dass die Energiespeicher für

Laptops in ihren technischen Eigenschaften sehr ähnlich sind. Das Gleiche können wir auch bei Smartphones beobachten. Die Datenblätter der Laptopbatterien weisen den gleichen Spannungsbereich und die gleiche Elektrochemie auf. Der Vorteil ist, dass sich durch die höhere Stückzahl und geringere Produktvielfalt die Kosten für einen Energiespeicher verringern.

Beim Laptop liegt der Energieinhalt zwischen 45Wh und 75Wh. Auch hier gilt es, einen Kompromiss zwischen Volumen, Gewicht, Entladedauer und Preis zu finden. Die benötigte Entladeleistung hängt von der Verwendung des Laptops ab. Das Abspielen einer CD oder das kontinuierliche Herunterladen von Dateien benötigt ca 18W. Wird der Laptop für 3D-Spiele oder numerische Simulationen verwendet, so schwankt der Leistungsbedarf zwischen 21 W bis 30 W [MV04].

Bei Smartphones ist der Energieinhalt und der Leistungsbedarf geringer. Die zur Verfügung stehende Kapazität liegt bei 4Wh bis 13Wh. Der Leistungsbedarf liegt bei 0,4W bis 1 W [CH<sup>+</sup>10, APTM13, TE<sup>+</sup>16]. Der Anwendungsfall für ein Smartphone besteht darin, dass es die ganze Zeit empfangsbereit ist, damit der Nutzer angerufen werden kann, bzw. damit der Nutzer über aktuellste Informationen aus dem Internet jederzeit an jedem Ort informiert wird. Dies bedeutet, dass eine dauerhafte Entladung des Energiespeichers erfolgt. Da die Größe und das Volumen eines Smartphones beschränkt bleiben, wird sehr viel Entwicklungsarbeit in die Reduzierung des Leistungsbedarfes gesteckt.

Energiespeicheranwendungen lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Energieanwendungen und Leistungsanwendungen. Das Smartphone und der Laptop sind Energieanwendungen, d. h. der Speicher wird dafür genutzt, über einen langen Zeitraum Energie bereitzustellen. Der Schraubendreher ist eine Leistungsanwendung. Der Speicher wird genutzt, um kurzfristig eine hohe Leistung abzurufen. Es geht hier nicht um eine dauerhafte, niedrige Leistungsentnahme, sondern um punktuelle, hohe Leistungsentnahmen. Die zweidimensionale Einteilung von Anwendungen in Energiebedarf und Leistungsbedarf in Bild 1.3 erlaubt es leider nicht, zwischen diesen beiden Anwendungsarten zu unterscheiden.

Die E-Rate ist das Verhältnis aus dem Leistungsbedarf  $P_L$  und der zur Verfügung stehenden Speicherkapazität  $\kappa$  einer Anwendung bezogen auf eine Stunde.

$$E = \frac{P_L \cdot 1 \text{ h}}{\kappa} \quad (1.3)$$

Bei E-Raten oberhalb von 1 spricht man von Leistungsanwendungen, d. h. hier wird der Energiespeicher für die Bereitstellung von Leistung genutzt. Bei E-Raten unterhalb von 1 spricht man hingegen von Energieanwendungen, d. h. hier wird der Speicher für die Bereitstellung von möglichst viel Energie über einen langen Zeitraum genutzt. Diese Unterscheidung hat direkte Konsequenzen für den Aufbau eines Speichersystems. Nicht alle Speichertechnologien sind in der Lage, hohe Be- und Entladeleistungen zur Verfügung zu stellen.



#### Übung 1.5 Berechnung von E-Raten

Wir haben einen Speicher mit einer Speicherkapazität von  $\kappa = 14\text{kWh}$ . Wie sieht die E-Rate der Anwendung aus, wenn wir den Speicher mit  $P_L = 480\text{kW}$  entladen und mit 18 W laden?

**Lösung:** Die E-Rate für den Ladevorgang ergibt sich zu:

$$E_{\text{Laden}} = \frac{0,018\text{kW} \cdot 1 \text{ h}}{14\text{kWh}} = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ E}$$

# Stichwortverzeichnis

## A

- AC/AC
  - Spezifikation 171
- Aggregation 91
- Akkuschrauber
  - Anforderungen 99
  - Komponenten 98
- Alterung
  - kalendarisch 281
  - Zyklenlebensdauer 281
- Aluminiumoxid 358
- AM 312
- Anforderung
  - Extend-Relation 95
  - Formulierung 94
  - Include-Relation 95
  - Requirement Traceability Matrix 101
- Annuitätswert 80
- Anolyth 385
- Arrhenius-Gesetz 284
- Asynchronmotor 160
  - Drehmoment 165
  - Ersatzschaltbild 163
  - Grundprinzip 160
  - Schlupf 162, 163
  - Verluste 164

## B

- Balancing 286
  - aktiv 286
  - Algorithmus 240
  - passiv 239, 286
- Batterie
  - Anforderungen 273
  - Blockdiagramm 291
  - Ersatzschaltbild 272
  - Spannung 301

- Batteriealterung
  - Beginning of Life 283
  - BOL 283
  - End of Life 282
  - EOL 282
  - Kalendarische Alterung 284
  - Modellbildung 284
- Batteriesystem
  - Blockdiagramm 278
  - Optimierung 279
- Batteriezelle
  - Grundreaktion 267
  - Struktur 266
- Bio-Savart-Gesetz 129
- Bleibatterie
  - Spannung 301
  - Zykenalterung 307
- Bleisäurebatterie 295
  - Primärreaktion 297
  - Sekundärreaktion 298
- BOL 283
- Brakechopper 249
  - Blockdiagramm 250
- Brennstoffzelle
  - Aufbau 415
  - Blockdiagramm 418
  - Dekan 416
  - Kohlenmonoxyd 416
  - Methan 416
  - Propan 416
  - Spannung 416, 417
- Buckconverter 115, 116
  - Blockdiagramm 134
  - Schaltplan 134
  - Spannungsripple 136
  - Stromripple 136

Buckconverter, synchron  
– Blockdiagramm 134

## C

CAS 205  
Cashflow 79  
Chemische Speicher  
– Grundgleichung 399  
CHO-Dreiecksdiagramm 397  
Claude-Verfahren 406  
Compressed air storage 205  
Cooper-Paar 221  
Coulomb Counting 275  
– Fehler 276  
C-Rate 303  
Cyclelife 281

## D

Dampfreformierung 410  
DC/AC  
– Spezifikation 170  
DC/DC-Wandler 114, 115  
– Spezifikation 167  
DC-Motor  
– H-Brücke 158  
Depth of Discharge 281  
Diode  
– Aufbau 139  
DoD 281  
Doppelschicht 232  
Drehmoment 157  
Druckluftspeicher 205  
– Anforderungen 205  
– Blockdiagramm 206  
– Energiefluss 205

## E

Einkauf 93  
Elektrische Feldkonstante 119  
Elektrischer Antriebsstrang  
– Blockdiagramm 166  
elektrochemische Zelle  
– Anforderungen 273  
– Ersatzschaltbild 272  
– Grundreaktion 267  
– Struktur 266  
Elektromotor 156  
– AC-Motor 155  
– DC-Motor 155  
– Gleichstrommotor 155  
– Grundprinzip Asynchronmotor 160  
– Klassifizierung 156

– Spezifikation 172  
– Wechselstrommotor 155  
Energie  
– Energie eines Kondensators 227  
– Energie in einer Spule 131  
– Energieinhalt einer Spule 216  
– Induktivität 216  
– Isothermische Kompression 201  
– Rotationsenergie 187  
Energieumwandlung 113  
Enthalpie  
– freie 268  
– Reaktion 268  
Entwicklung 93  
Entwicklungsingenieur 93  
EOL 282  
E-Rate 303  
Erzeugungsprofil  
– Solar 346

## F

Faraday-Konstante 269  
Federenergie 198  
Flywheelstorage 191  
Frequenzumrichter 154  
FWS 191

## G

Gasgesetz  
– ideales 200  
Gaskonstante 200, 269  
Gegen-EMK 159  
– Konstante 159  
Gleichrichter  
– Blockdiagramm 139  
– dreiphasig 142  
– einphasig 142  
– Symbol 138  
Gleichstrommotor  
– H-Brücke 158  
Glykose 399  
Grid Code 27, 29

## H

Halbbrücke 149  
– Blockdiagramm 151  
– Schaltplan 151  
H-Brücke 158  
Helmholtzschicht  
– innere Schicht 233  
– starre Schicht 233  
Heptan 399  
Hexan 399

- Hybrid-Nutzfahrzeug
- Antriebsstrang 436
- Blockdiagramm 436

**I**

- Ideales Gasgesetz 200
- Induktivität 128, 131
- Entladekurve 134
- Ladekurve 132
- Innere Energie 202
- Installateur 93

**K**

- kalendarische Alterung 281
- Kapazität eines Kondensators 120
- Kapazitätsmanagement 290
- Kapitalwert 79
- Kardinalität 91
- Katholyt 385
- Klirrfaktor 170
- Kohle 398
- Kohlenmonoxid 398
- Kohlenstoff 397
- Kohlenstoffdioxid 398
- Komponente
- Leistungsflusssteuerung 108
- Leistungsverteilung 108
- Relais 108
- Schalter 108
- Speicher 108
- Temperaturkontrolle 109
- Verallgemeinerung 90
- Kompression
- adiabatisch 202
- isotherm 201
- isothermisch 200
- Kondensator 119
- Aufbau 119
- Entladekurve 122
- Kapazität 120
- Kondensatorbatterie 227
- Ladekurve 122
- optimierte Auslegung der Kondensatorbatterie 230
- Verschaltung 229
- kostenoptimierte Steuerung 59

**L**

- Ladevorgang
- *I*-Ladung 302
- Konstantspannungsladen 302

- Konstantstromladen 302
- *U*-Ladung 302
- Ladezustand 270
- Ladungspumpe 118
- Blockdiagramm 125
- Funktion 124
- Schaltung 124
- Tastverhältnis 125
- Lastprofil
- Haushalt 345
- Kleinstadt 367
- LCOE 85, 373
- Leistungsschwankungen 372
- Kompensation 372
- Levelised Cost of Energy 373
- Linde-Verfahren 406
- Lithium-Ionen-Batterie
- Anodenmaterial 326
- interner Kurzschluss 330
- Kalendarische Alterung 333
- Kathodenmaterial 326
- LCO 327
- LFP 326
- NCA 327
- NMC 327
- Primärreaktion 326
- Thermal Runaway 329
- thermisches Durchgehen 329
- Zellaufbau 325
- Zykluslebensdauer 333
- Luftmasse 312

**M**

- Magnetfeld 128, 129
- magnetische Permeabilität 129
- magnetischer Fluss 129
- magnetisches Feld 128
- Maschenregel 116
- Maximum Power Point Tracker 312, 313
- Mechanische Speichersysteme
- Anforderungen 178
- Energie 179
- Meissner-Effekt 221
- Merrit Order 28
- Metallhybride
- Grundreaktion 407
- Methan 398
- Methanisierung 438
- Grundreaktion 439
- Prozess 439
- Missing Load Ratio 433
- MPPT 312, 313

**N**

- Natrium-Schwefel-Batterie
  - Aufbau 359
  - Lade- und Entladecharakteristik 361
  - Separator 358
- Net Present Value 79
- Netzanschlussbedingungen 27, 29
- NPV 79
- Nutzer 94

**O**

- Ohmsches Gesetz 115
- Opportunity Charger 33
- Ortho-Wasserstoff 406

**P**

- Parametersweep 86
- Parametervariation 86
- Para-Wasserstoff 406
- Peak shaving 340
- PEMEL 412
  - Aufbau einer Zelle 413
  - Reaktion 413
- Pentan 399
- Positive temperatur conductor 241
- positiver Temperaturkoeffizient 330
- Potenzielle Energie 179
- Power to Gas 438
- Power to Liquid 438
- Produktion 93
- Produktmanager 93
- Protonenaustausch-Membran-  
Elektrolyse 412
- Pseudokapazität 232, 234
- PTC 241, 330
- Pulsweitenmodulation 151
- Pumpspeicherkraftwerk 181
  - Blockdiagramm 184
  - Kapazität 182
- PWM 151

**R**

- Redox-Flow-Batterie 384
  - Aufbau 386
  - Blockdiagramm 393
  - Eisen-Chrom 386
  - Laden und Entladen 388
  - Polysulfid-Bromid 386
  - Reaktion, allgemeine Form 385
  - Spannung 387
  - Vanadium-Brom 386
  - Vanadiumoxid 386

- Verluste 390
- Zink-Cerium 386
- Regulierer 93
- relative Permittivität 119
- Requirement Traceability Matrix 101
- Roundtrip-Effizienz 268
- RTM 101
- Rückstellkraft 198
  - Energie 198

**S**

- Sauerstoff 397
- Schlupf 162, 163
- Schwungradspeicher
  - Anforderungen 191
  - Blockdiagramm 193
  - Leistung 190
- Servicetechniker 94
- SMES 223
  - Blockdiagramm 226
  - Grundschialtung 224
- SOC 270
- SOH 284
- Solarstromspeichersystem
  - Blockdiagramm 351
- Spannungsspeicher
  - Blockdiagramm 243
- Spannungsteiler 115, 116
- Speichersystem; Basiskomponenten 108
- Spule 128
- Standardtestbedingungen 312
- Stärke 399
- State of Charge 270
- State of health 284
  - Modell 284
- STC 312
- Stromnetz
  - AC 114
  - DC 114
- Stromspeicher
  - Anforderungen 219
- Superkondensator 227
  - Anforderungen 237
  - Balancing 239
  - Blockdiagramm 243
  - Ersatzschaltbild 235
- supraleitende magnetische  
Energiespeicher 223
  - Blockdiagramm 226
  - Grundschialtung 224
- Supraleitfähigkeit 219
  - Meissner-Effekt 221

Supraleitung 219  
– Cooper-Paar 221  
Systems Engineering 89

**T**

Tastverhältnis 125  
THD 170  
Thermal Runaway 329  
Thermodynamik  
– Erster Hauptsatz 202  
– Innere Energie 202  
– Wärme 202  
Tiefsetzsteller 115, 116  
– Blockdiagramm 134  
– synchron 127  
Tiefsetzsteller, synchron  
– Blockdiagramm 134  
Total Harmonic Distortion 170  
Trägheitsmoment 188  
Transformator 144  
Transistor  
– Struktur 148

**U**

Umrichter  
– Blockdiagramm 147  
– Spezifikation 171  
– Symbol 147  
User 94

**V**

van der Walls-Gasgesetz  
– Koeffizienten für Wasserstoff 404  
Van-der-Waals-Gasgesetz 404  
– isotherme Verdichtung 405

verlustoptimierte Steuerung 59, 62  
Vertrieb 93

**W**

Wärme 202  
Wärmeenergie 202  
Wasserstoff 397  
Wasserstofftechnik  
– Allgemeine Reaktion 402  
– Ortho-Wasserstoff 406  
– Para-Wasserstoff 406  
– Verflüssigung von Wasserstoff 406  
Wasserstofftechnologie 402  
– Aufbau eines Elektrolyseurs 411  
– Dampfreformierung 410  
– Elektrolyse 411  
– Metallhybride 407  
Wechselrichter 154  
– Spezifikation 170  
Windgeschwindigkeitsprofil 367  
Winkelgeschwindigkeit 187  
Wirkungsgrad 38  
– Roundtrip 268

**X**

XpYs Verschaltung 228

**Z**

Zink-Chlor 386  
Zinssatz 79  
Zykenalterung  
– Modell 283  
Zykenlebensdauer 281