

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. ω 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).

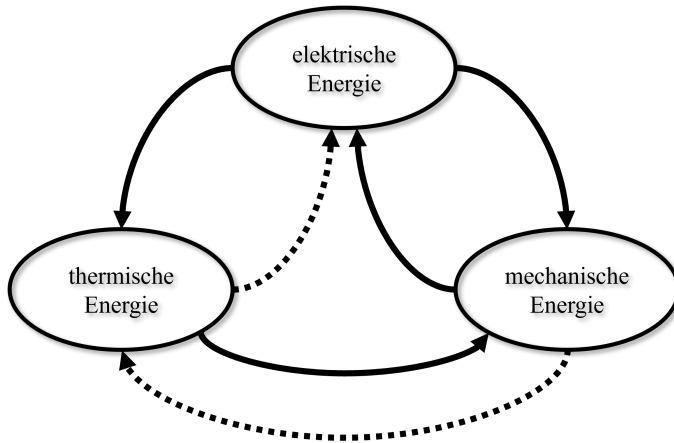


Bild 1.1 Speichersysteme befassen sich mit der Speicherung von mechanischer, elektrischer und thermischer Energie. Diese Energien können ineinander umgewandelt werden. Einige Transformationen sind recht effizient, d. h. es geht nur ein kleiner Teil der übertragenen Energie verloren. Die durchgezogenen 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_{in} , die wir wandeln oder übertragen wollen, und der Energie, die danach wirklich zur Verfügung steht, E_{out} .

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

Im nächsten Kapitel werden wir uns mit dem Wirkungsgrad η genauer befassen. Der Wirkungsgrad η 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 α 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 α 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.

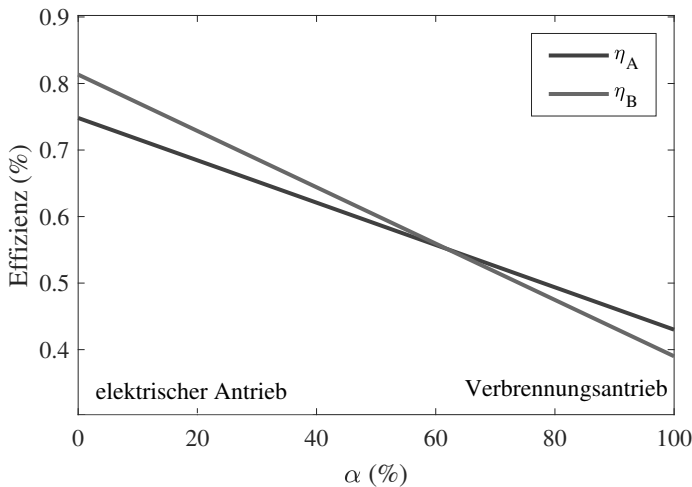


Bild 1.2 Wirkungsgrad der Konfiguration A und B als Funktion von α

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 α , 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 α . 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 α 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 Akkuschaubers 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.

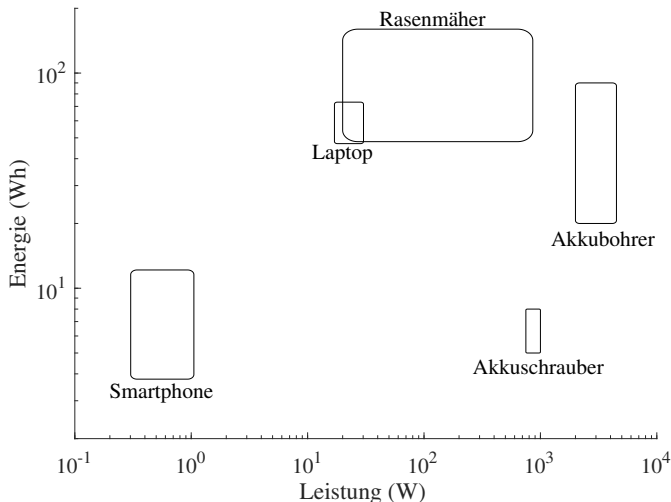


Bild 1.3 Energie- und Leistungsbedarf von verschiedenen mobilen Anwendungen [MV04, CH⁺10, APTM13, TE⁺16]

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⁺10, APTM13, TE⁺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 κ 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