

### Mehrere Dachflächen, mehr Details

Je nach Dach kann es zweckmäßig oder sogar notwendig sein, die PV-Module über mehrere Dachseiten zu verteilen. Der PVGIS-Rechner kann diesen Sonderfall leider nicht berücksichtigen. Das macht aber nichts: Führen Sie einfach zwei oder drei Berechnungen durch, und geben Sie die Eckdaten für jede Dachfläche an. Zum Schluss addieren Sie den so erzielten Ertrag.

Es gibt im Internet unzählige PV-Rechner, die auf die PVGIS-Daten zurückgreifen, aber unter Umständen weitere Faktoren mit in die Berechnung einbeziehen – z. B. die Verwendung eines Stromspeichers. Eine Übersicht über derartige Seiten finden Sie in Abschnitt 3.2, »Speicherdimensionierung«.

Beachten Sie, dass weder die PVGIS-Seite noch andere Online-Rechner Verschattungsprobleme berücksichtigen können. Wenn also vor Ihrem Haus ein großer Baum steht, wird der Ertrag spürbar sinken (siehe auch den folgenden Abschnitt »Das Verschattungsproblem«).

## 2.3 Das Verschattungsproblem

Es liegt auf der Hand, dass Ihre PV-Anlage nur einen sehr mäßigen Ertrag liefern wird, wenn die PV-Module stundenlang durch andere Gebäude oder Bäume abgeschattet werden. Der Begriff »Verschattungsproblem« bezieht sich allerdings auf einen (leider häufigen) Spezialfall: Selbst winzige Schatten, z. B. von einem Kamin, können den Ertrag einer PV-Anlage nachhaltig stören.

Sie wissen ja schon, dass PV-Module aus vielen kleinen Solarzellen bestehen. Jede Zelle liefert für sich eine Spannung von ca. 0,6 bis 0,7 V (Volt) – also sehr wenig. Für den Transport größerer Energiemengen ist eine höhere Spannung günstiger. Deswegen sind die Solarzellen eines PV-Moduls in Reihe geschaltet (siehe Abbildung 2.5). Üblich sind  $6 \times 10$  Zellen. Wenn die Sonne auf das ganze Modul scheint, ergibt sich eine Spannung von  $60 \times 0,6 \text{ V} = 36 \text{ V}$ . (Die schematischen Abbildungen in diesem Buch verwenden nur  $4 \times 7$  Zellen.)

Wenn nun einige Zellen verschattet sind, produzieren diese keinen Strom. Das wäre nicht weiter schlimm. Allerdings ist die betreffende Zelle jetzt elektrisch nicht mehr leitend. Sie blockiert also weitestgehend den Strom aller anderen Zellen. (Es gibt hierfür den klassischen Vergleich mit einem Gartenschlauch: Ist dieser auch nur an einer Stelle geknickt, fließt gar kein Wasser mehr.)

Es kommt noch schlimmer: Die verschattete Zelle wirkt wie ein Widerstand. Wenn die anderen Zellen oder zumindest benachbarte PV-Module von der Sonne angestrahlt werden und Strom produzieren, wird die verschattete Zelle immer heißer (»Hotspot«)

und kann auf Dauer sogar zerstört werden. (Für Hotspots kann es aber auch andere Ursachen geben, z. B. Produktionsfehler.)

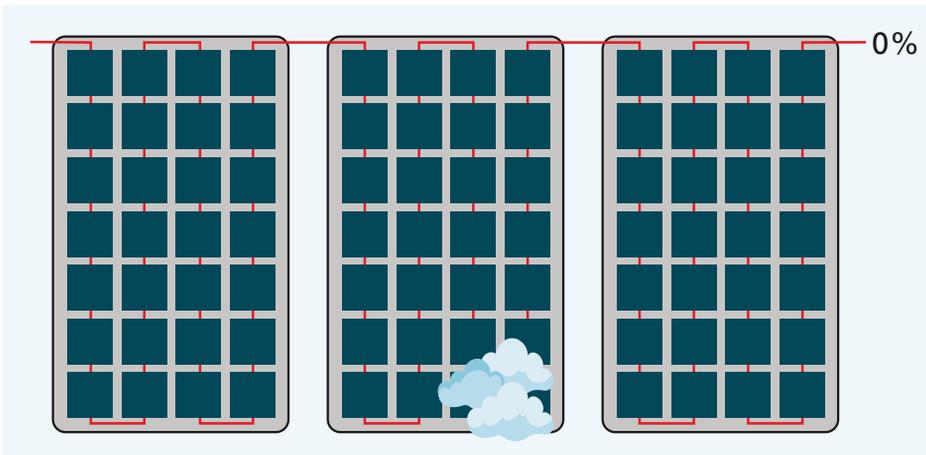


Abbildung 2.5 Ein winziger Schatten blockiert den Stromfluss von drei PV-Modulen.

### Elektrotechnische Hintergründe

Vielleicht fragen Sie sich, warum innerhalb eines PV-Moduls die Zellen in einer Reihe miteinander verbunden sind und warum auch die ganzen Module wiederum per Reihenschaltung verbunden werden.

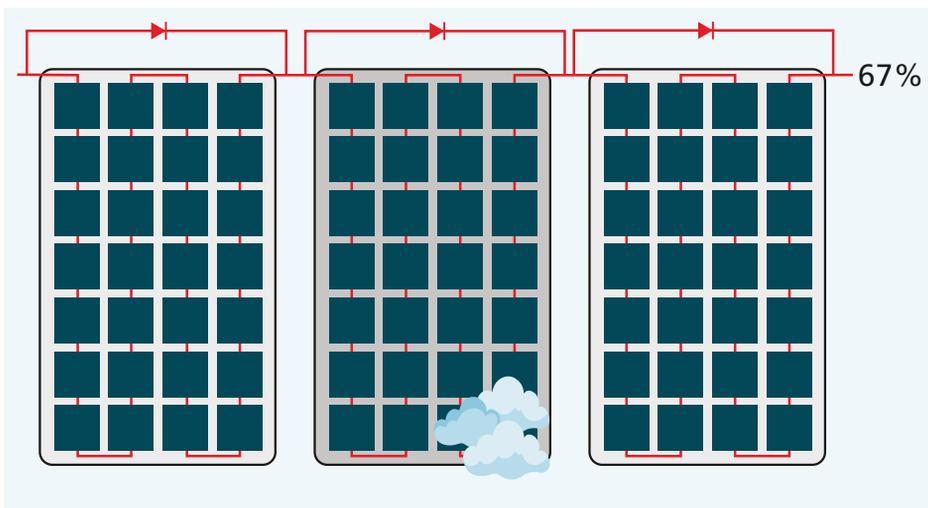
Die elektrische Leistung ist das Produkt aus Spannung mal Strom. Ein modernes PV-Modul hat eine maximale Leistung von 400 Wp. Würden im Modul alle Solarzellen parallel geschaltet, ergäbe sich eine Spannung von nur 0,6 V (Volt), aber ein extrem hoher Strom von 667 A (Ampere). Durch die Reihenschaltung addieren sich dagegen die Spannungen aller Zellen, dafür ist der Strom deutlich kleiner:  $36 \text{ V} \times 11,1 \text{ A}$ .

Die resultierende Leistung ist in beiden Fällen die gleiche, dennoch hat die Reihenschaltung zwei wesentliche Vorteile:

- Die erzeugte Energie muss vom PV-Modul zum Wechselrichter transportiert werden. Auch hochwertige Kabel haben einen kleinen Widerstand. Deswegen treten Verluste in Form von Wärme auf. Die Leitungsverluste sind aber proportional zum Quadrat des Stroms. (Beispielsweise kommt es bei einem Drittel Spannung, aber dem dreifachen Strom zu einer Verneunfachung der Verluste!) Eine höhere Spannung bei gleichzeitig niedrigerem Strom ergibt somit viel geringere Verluste. Oder, umgekehrt gerechnet: Bei einer höheren Spannung reichen viel dünnere Kabel aus, um einen vorgegebenen Verlust nicht zu überschreiten. Dieses Prinzip gilt auch für den Energietransport über große Strecken, der in *Hochspannungsleitungen* erfolgt.

- Der Verdrahtungsaufwand im Modul ist minimal. Es reicht aus, immer eine Zelle mit der nächsten zu verbinden. Das senkt die Produktionskosten und macht Defekte unwahrscheinlich.

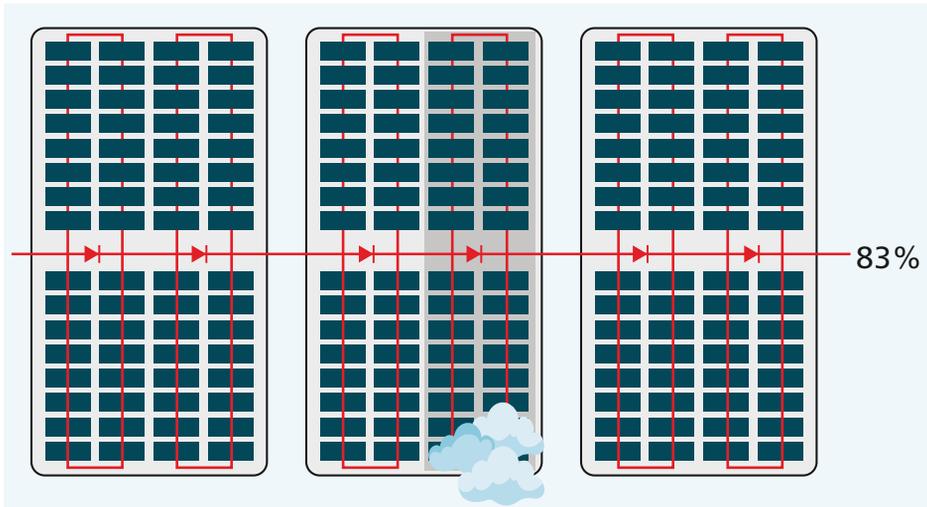
Ein erster Ausweg aus dem Verschattungsdilemma sind sogenannte Bypass-Dioden, die zwischen die Module geschaltet werden. Diese elektrischen Bauteile geben dem Strom quasi eine Umleitungsmöglichkeit: Wenn ein Modul durch die Verschattung blockiert ist, fließt der Strom durch die Diode. Das verschattete Modul liefert zwar keine Energie, blockiert aber zumindest die restlichen Module nicht mehr (siehe Abbildung 2.6).



**Abbildung 2.6** Bypass-Dioden zwischen den Modulen heben die Schattenblockade durch ein einzelnes Modul auf.

Moderne Halbzellenmodule verwenden anstelle von quadratischen Solarzellen halbierte Zellen (Half-Cut-Technologie). Auf einem Modul haben damit doppelt so viele Zellen Platz wie bisher. Damit können am Modul zwei Bereiche gebildet und parallel geschaltet werden, die jeweils die gleiche Schaltung wie bisher liefern. Durch in das Modul integrierte Bypass-Dioden wird der Verschattungseffekt nun auf einen Bereich des Moduls reduziert (siehe Abbildung 2.7).

Marktübliche Halbzellenmodule bestehen aus 120 Zellen, die in sechs Felder zu je 20 Zellen gruppiert sind. Anstelle von zwei Bypass-Dioden wie in Abbildung 2.7 kommen dann drei zum Einsatz. Je nach Modell und Platzierung der Bypass-Dioden kann das Modul in voneinander unabhängige vertikale oder horizontale Streifen gegliedert werden. Vereinzelt gibt es sogar schon Drittelzellenmodule.



**Abbildung 2.7** Moderne Halbzellenmodule mit integrierten Bypass-Dioden begrenzen den Schattenverlust auf einen Teilbereich des Moduls.

Module mit integrierten Bypass-Dioden werden oft als *Hotspot-free* vermarktet. Allerdings ist die Produktion solcher PV-Module etwas teurer. Deswegen gibt es nach wie vor viele PV-Module ohne die hier beschriebenen Maßnahmen, um den Verschattungseffekt zu reduzieren!

### Gegenmaßnahmen

Auch wenn moderne Module dem Verschattungsproblem ein wenig den Schrecken genommen haben, führt die teilweise Verschattung von Modulen nach wie vor zu Leistungsabfällen. Diese sind gravierend, je nachdem, welche Module eingesetzt und wie diese miteinander verbunden sind.

- ▶ Montieren Sie keine Module, wo eine regelmäßige, dauerhafte Verschattung zu erwarten ist (nördlich von Kaminen oder Entlüftungsrohren, unmittelbar neben Dachgauben etc.).
- ▶ Bei der Montage von Modulen auf Ständern muss der Abstand groß genug sein, damit nicht eine Modulreihe die nächste abschattet.
- ▶ Wenn eine Verschattung nicht zu verhindern ist, müssen parallel zu den Modulen Bypass-Dioden eingebaut bzw. Hotspot-free-Module verwendet werden.
- ▶ Wenn es Bereiche gibt, wo mit Verschattung zu rechnen ist, und andere Bereiche ohne Verschattung, dann sollten die Module in zwei voneinander unabhängigen Strängen gesammelt werden, sodass zumindest die unverschatteten Module mit maximaler Leistung laufen. Was »Stränge« sind, erkläre ich Ihnen in Abschnitt 2.5, »Maximum Power Point Tracking (MPPT)«.

- Die individuelle Einzelansteuerung von Modulen über sogenannte »Leistungs-optimierer« kann den Ertrag von teilweise verschatteten PV-Anlagen steigern. Auf dieses Thema gehe ich ebenfalls in Abschnitt 2.5 ein.

## 2.4 Wechselrichter

PV-Module erzeugen Gleichstrom (*Direct Current*, kurz DC). Das bedeutet, dass der Strom immer in die gleiche Richtung fließt. (Genau genommen bewegen sich in der Leitung Elektronen vom negativen zum positiven Pol.)

Aus den Steckdosen im Haushalt fließt allerdings Wechselstrom (*Alternating Current*, kurz AC). Bei Wechselstrom fließen die Elektronen für einige Millisekunden in die eine Richtung. Danach dreht sich die Spannung, und die Elektronen fließen zurück in die andere Richtung. Auf den ersten Blick scheint das ein absurdes Verhalten zu sein. Tatsächlich hat Wechselstrom aber im Vergleich zu Gleichstrom diverse technische Vorteile, weswegen sich diese Art des Stroms im Hochvoltbereich durchgesetzt hat. (Elektronische Geräte wie Smartphones oder Computer arbeiten intern dagegen mit Gleichstrom.)

Die Aufgabe des Wechselrichters ist es, den Gleichstrom der PV-Module kompatibel zum Wechselstrom im Haus zu machen (siehe Abbildung 2.8). »Kompatibel« heißt, dass der Wechselstrom die gleiche Spannung (230 Volt) wie der Strom Ihres Energieversorgungsunternehmens (EVU) ausweist. Außerdem muss der PV-Strom exakt die gleiche Frequenz (50 Hertz) wie der EVU-Strom haben und zu diesem vollkommen synchron sein.

Das ist nicht nur wichtig, damit alle Ihre Elektrogeräte mit Solarstrom funktionieren, sondern auch, damit beim Einspeisen von Strom in das Netz des EVU keine Netzschwankungen auftreten.

Schließlich muss der Wechselrichter mit einer *Einrichtung zur Netzüberwachung mit zugeordneten Schaltorganen* (ENS, wem fallen solche Begriffe ein?) ausgestattet sein. Das bedeutet, dass sich der Wechselrichter bei einem Stromausfall im Netz sofort mit allen Leitungen (»allpolig«) vom Netz trennt. Das garantiert, dass der Wechselrichter keinen Strom in das ausgeschaltete bzw. ausgefallene Netz einleitet. Eine Ausnahme von dieser Regel sind Notstromfunktionen, auf die ich in Abschnitt 3.4, »Notstromfunktion und Inselanlagen«, näher eingehe.

Aus Sicherheitsgründen erlauben Netzbetreiber ausschließlich Wechselrichter mit einer nationalen oder EU-weiten Konformitätserklärung. Außerdem muss der Anschluss der PV-Anlage an das öffentliche Netz zwingend durch eine Elektrofachfirma erfolgen. (Eine Ausnahme sind diesbezüglich Balkonkraftwerke – siehe Kapitel 5.)

## 3.1 Speichertechnologien

In diesem Abschnitt erkläre ich Ihnen zuerst den Unterschied zwischen AC- und DC-Speichern und gehe dann auf die drei aktuell gängigen Technologien ein, um Energie in Form von Strom zu speichern: Umgangssprachlich werden diese Lithium-, Blei- und Salzwasser-Speicher genannt. Außerdem greife ich die Idee auf, statt eines hausinternen Speichers einen externen Speicher in Form eines Elektroautos zu verwenden.

### AC- oder DC-gekoppelte Speicher

Die Abkürzungen AC und DC stehen für *Alternating Current* (Wechselstrom) und *Direct Current* (Gleichstrom). Wenn Sie Ihr Haus mit einer PV-Anlage ausstatten, dann sind sowohl Gleich- als auch Wechselstrom im Spiel:

- ▶ Die PV-Module produzieren Gleichstrom.
- ▶ Die Verbraucher in Ihrem Haus werden aber mit Wechselstrom betrieben, in der Regel mit einer Spannung von 230 Volt. Jede Haushaltssteckdose (»Schuko-Steckdose«) entspricht diesem Standard.

Großverbraucher wie der Herd oder die Wallbox für das Elektroauto werden dagegen oft mit »Starkstrom« betrieben: Dreiphasiger Wechselstrom mit einer Gesamtspannung von 380 Volt ermöglicht hier eine deutlich höhere Leistung.

Sie wissen schon, dass sich wegen der unterschiedlichen Stromarten zwischen der PV-Anlage und dem Stromkreis ein Wechselrichter befinden muss. Er wandelt Gleichstrom in Wechselstrom um.

Alle gängigen Energiespeicher arbeiten ebenfalls mit Gleichstrom. Sie müssen also mit Gleichstrom geladen werden und liefern beim Entladen wiederum Gleichstrom. Die Frage ist nun, wo der Speicher in dieses System integriert wird: Im Gleich- oder im Wechselstromzweig, also vor oder nach dem Wechselrichter:

- ▶ **DC-Speicher:** Naheliegender und bei Neuinstallationen üblich ist die Integration in den Gleichstromzweig (siehe Abbildung 3.2). Das erfordert einen speziellen Wechselrichter (je nach Hersteller auch »Hybridwechselrichter«). Manche Wechselrichter sind speziell für das Zusammenspiel mit populären Energiespeichern optimiert.

Vorteile von DC-Speichern sind geringere Umwandlungsverluste und bessere Steuerungsmöglichkeiten, insbesondere die Entscheidung darüber, wann (je nach PV-Ertrag und Verbrauch) der Speicher ge- und entladen wird.

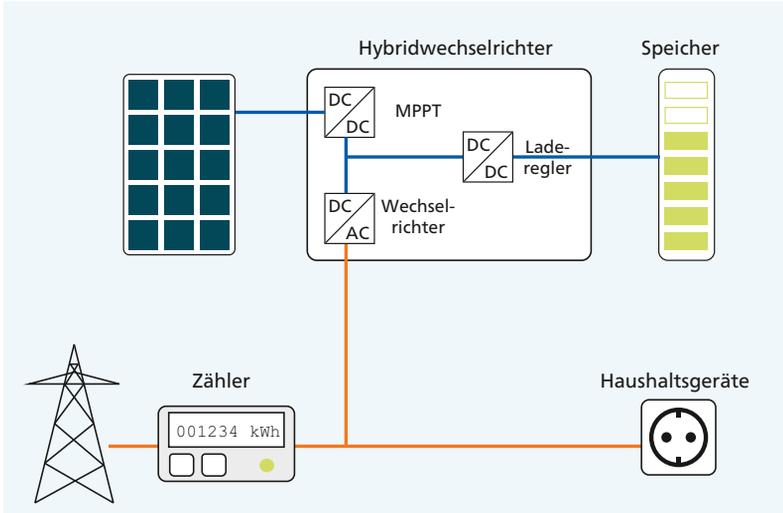


Abbildung 3.2 Schematischer Schaltplan für einen DC-Speicher

- **AC-Speicher:** Die Integration des Speichers in den Wechselstromkreis erfordert, dass der Stromspeicher einen eigenen Wechselrichter benötigt (siehe Abbildung 3.3). Effizienztechnisch ist das ein (kleiner) Nachteil, weil der Gleichstrom der PV-Module zuerst über den Wechselrichter der PV-Anlage in Wechselstrom umgewandelt und dann neuerlich zu Gleichstrom gemacht werden muss. Bei manchen Modellen sind der Wechselrichter und der Speicher in ein einziges Gerät integriert.

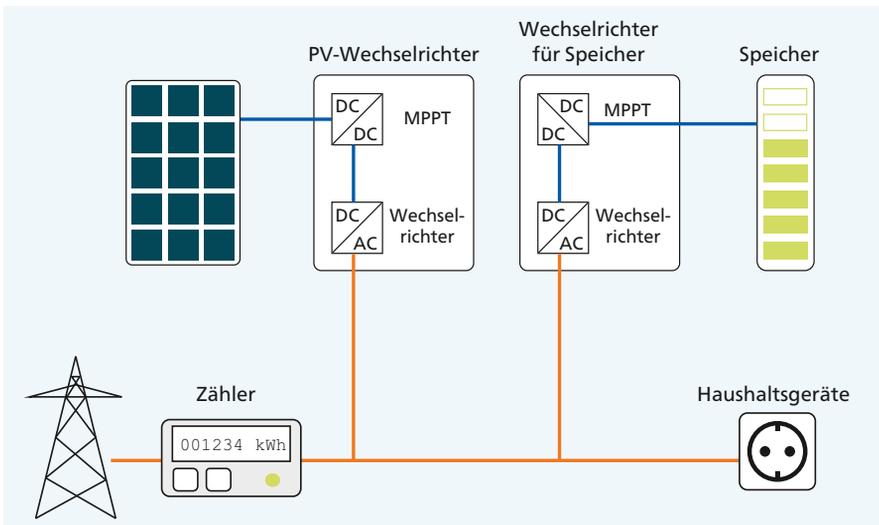


Abbildung 3.3 Schematischer Schaltplan für einen AC-Speicher

Der größte Vorteil von AC-Speichern besteht darin, dass sie relativ unkompliziert in bestehende Anlagen integriert werden können, bei denen der PV-Wechselrichter keine Funktionen zum Laden/Entladen eines Speichers enthält.

Die meisten Energiespeicher funktionieren bei gemäßigter Temperatur am besten. Es soll also weder besonders heiß noch sehr kalt sein (und schon gar nicht unter dem Gefrierpunkt). Aus diesem Grund werden PV-Speicher nach Möglichkeit innen platziert, idealerweise in einem trockenen Technikraum im Keller.

### Es gibt keinen »AC-Speicher«

Die Bezeichnungen *AC-* und *DC-Speicher* haben sich zwar in der Photovoltaikwelt als Begriffe etabliert, sind aber irreführend. Alle gängigen Akkumulatortypen arbeiten mit Gleichstrom, sind also DC-Speicher.

Im Kontext dieses Buchs differenzieren die Begriffe *AC-* und *DC-Speicher* nur, an welcher Stelle der Speicher in den Stromkreis integriert ist. Exakter, aber eben auch umständlicher wären die Bezeichnungen *DC-gekoppelter Speicher* bzw. *AC-gekoppelter Speicher*.

## Lithium-Ionen-Akkus

Losgelöst davon, wie der Speicher in den Stromkreis integriert wird, gibt es unterschiedliche Speichertechnologien. Bei Weitem am populärsten sind gegenwärtig Lithium-Ionen-Akkumulatoren (kurz Akkus). Der Name leitet sich vom zugrunde liegenden chemischen Prozess ab, bei dem sich Lithium-Ionen innerhalb des Akkumulators frei bewegen können.

Lithium-Ionen-Akkus zeichnen sich durch eine besonders hohe Energiedichte aus. Sie werden deswegen sowohl in Haushaltselektronik (Smartphones, Notebooks) als auch in Elektroautos verwendet – also immer dann, wenn viel Energie auf möglichst kleinem Platz gespeichert werden soll.

Innerhalb der Gruppe der Lithium-Ionen-Akkus gibt es diverse Varianten. Bei Speicher für PV-Anlagen ist die Platz- und Gewichtsoptimierung nicht so wichtig wie bei Smartphones oder Autos. Deswegen kommen für PV-Speicher oft Lithium-Eisenphosphat-Akkus zum Einsatz (Abkürzungen: LFP- oder  $\text{LiFePO}_4$ -Akku). Ein moderner LFP-Akku mit 10 kWh Kapazität beansprucht ca. 60 cm × 30 cm × 110 cm Platz und wiegt etwa 160 kg.

Zwar ist die Energiedichte von LFP-Akkus im Vergleich zu klassischen Lithium-Ionen-Zellen nicht ganz so hoch, dafür haben sie aber andere Vorteile: Sie sind chemisch stabiler, weniger anfällig für Brände und frei von Schwermetallen wie Kobalt. Das ändert allerdings nichts daran, dass der Abbau von Lithium und die Erzeugung von

Lithium-Ionen-Akkus – egal, welchen Typs – energieintensiv und nicht besonders umweltfreundlich sind.

Wenn wir schon bei den Nachteilen der Lithium-Ionen-Technik sind: Die Lebensdauer der Akkus ist begrenzt. Manche Hersteller gewähren eine Garantie von zehn Jahren, während der die Speichermenge auf einen bestimmten Prozentsatz sinken darf (typischerweise auf 60 bis 80 Prozent). Wenn Sie einen Speicher mit 10 kWh kaufen, bleiben davon nach zehn Nutzungsjahren womöglich nur noch 7 kWh übrig.

Kopfzerbrechen bereitet auch die von Lithium-Ionen-Akkumulatoren ausgehende Brandgefahr. Zwar kommt es statistisch gesehen äußerst selten zu einem Brand (ausgelöst zumeist durch defekte Batteriezellen), aber wenn ein derartiges Ereignis eintritt, ist der Schaden riesig. Deswegen sollten Sie vor allem ältere Speicher regelmäßig warten lassen.

#### **Bleiakkus**

Bei Bleiakkus befinden sich zwei Bleiplatten in einem Elektrolyt aus Schwefelsäure. Das elektrochemische Prinzip ist seit über 200 Jahren bekannt, entsprechend ausgereift und weit verbreitet ist die Technik: Nahezu jedes herkömmliche Auto verwendet einen Bleiakku als Starterbatterie.

Die Zutaten eines Bleiakkus sind giftig und ökologisch bedenklich, lassen sich aber immerhin leichter recyceln als die von Lithium-Ionen-Akkus. Dennoch werden Bleiakkus nur in Ausnahmefällen als PV-Speicher verwendet: Im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus sind sie schwerer, nehmen mehr Platz ein, altern schneller (weniger Ladezyklen), müssen belüftet werden, haben eine höhere Selbstentladung und können nur zu einem geringeren Ausmaß entladen werden (hohe Differenz zwischen Gesamtkapazität und nutzbarer Kapazität).

#### **Salzwasserspeicher und Natrium-Ionen-Akkus**

Salzwasserspeicher (Natrium-Ionen-Akkus, im Englischen *Sodium-ion Batteries*) sind die Zukunftshoffnung all jener, die auf der Suche nach einer ökologisch unbedenklichen Speichertechnologie sind. Die für den Akkutyp erforderlichen Grundmaterialien Wasser und Natrium stehen im Überfluss zur Verfügung und sind ungiftig.

Bisher konnte sich die Technik allerdings nicht in nennenswertem Ausmaß etablieren. Das liegt an dem im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus viel höheren Platzbedarf, der geringeren Leistungsabgabe (relativ langsames Laden/Entladen) und der geringeren Effizienz (höhere Verluste beim Laden/Entladen). Der Platzbedarf für einen am Markt erhältlichen Salzwasserspeicher mit 10 kWh Kapazität (dreiphasig, inklusive Wechselrichter) beträgt ca. 90 cm × 90 cm × 190 cm. Die Akkublöcke samt Steuerungselektronik haben ein Gewicht von etwa 300 kg.

Aktuell gibt es nur wenige Anbieter für Salzwasserspeicher, die wiederum mit Lieferproblemen kämpfen. Auch wenn Salzwasserspeicher also noch in der Experimentierphase stecken, ist es zu früh, die Technik als solche ganz abzuschreiben: Manche prinzipbedingten Nachteile, z. B. der höhere Platzbedarf und die geringere Lade-/Entladegeschwindigkeit, sind für den Einsatz als PV-Speicher zweitrangig. Aktuell scheitert der Einsatz primär an der Speichereffizienz sowie an der Produktion und Vermarktung einsatzfähiger Produkte.

Während Salzwasserspeicher ein wässriges Elektrolyt verwenden, werden auch Natrium-Ionen-Akkus mit organischen Elektrolyten intensiv erforscht. Sie haben in ihrer Bauweise und bei der Produktion starke Ähnlichkeiten mit den etablierten Lithium-Ionen-Speicher. Wenn man aktuellen Berichten glauben darf, sind die Chancen auf eine weite Verbreitung deutlich besser als bei Salzwasserspeichern:

<https://www.golem.de/news/akkutechnik-die-revolution-der-natrium-akkus-wird-absehbar-2210-168344.html>

#### Beinahe marktreif: Der Wunderakku!

Wenn Sie in Google nach Akku- und Speichertechnologien suchen, stoßen Sie unweigerlich auf Artikel, die über den neuen Wunderakku berichten: Er lässt sich schnell laden, verliert auch bei vielen Ladezyklen kaum an Kapazität, ist unbrennbar und wird umweltfreundlich aus kostengünstigen Materialien hergestellt. Der Akku ist zudem beinahe serienreif.

Leider gilt: Was zu gut ist, um wahr zu sein, ist meistens auch nicht wahr. Natürlich freue ich mich auch auf den nächsten technologischen Durchbruch. Dennoch sollten Sie sich nicht von Zukunftsversprechungen beeinflussen lassen, wenn Sie gerade vor der Entscheidung für den Kauf eines PV-Speichers stehen: Relevant sind nur Speicher(technologien), die ausgereift, erprobt und jetzt verfügbar sind.

### Das Elektroauto als PV-Speicher

Vielleicht besitzen Sie schon ein Elektroauto, oder Sie planen, in den nächsten Jahren eines anzuschaffen. Dann verfügen Sie je nach Modell über einen Akku mit einer Kapazität zwischen 20 und 70 kW. Das ist deutlich mehr, als bei einer privaten PV-Anlage üblich (und sinnvoll) ist. Was liegt näher, als den Akku des Autos als Speicher für Ihre PV-Anlage zu verwenden (siehe Abbildung 3.4) – nahezu ohne Zusatzkosten?

Die Idee ist verlockend, aber es gibt ein paar Hürden:

- **Zeitliche Verfügbarkeit:** Das Elektroauto als Speicher ist nur zweckmäßig, wenn es die meiste Zeit bei Ihrem Haus steht und über eine Wallbox mit dem Stromnetz verbunden ist – tagsüber zum Laden und nachts als Stromquelle. Wenn Sie oder andere Familienmitglieder täglich mit dem Auto in die Arbeit fahren, funktioniert

dieses Konzept nicht (oder nur in einem größeren Maßstab, siehe die folgende Überschrift »Vehicle-to-Grid«).

- ▶ **Ladeverluste:** Die Integration des Akkus eines Elektroautos funktioniert ähnlich wie ein AC-Speicher (siehe Abbildung 3.4). Beim Laden des Akkus wird Gleichstrom der PV-Anlage zuerst in Wechselstrom umgewandelt, zur Wallbox geleitet und dort oder im Auto wieder zurück in Gleichstrom umgewandelt. Beim Entladen fließt der Strom in die umgekehrte Richtung.
- ▶ **Kein etablierter Standard:** Aktuell sind nur wenige Elektroautos in der Lage, Strom aus den internen Akkus in größeren Mengen nach außen abzugeben. Der Fachbegriff dafür lautet *Vehicle-to-Home* (V2H). Die ganze Schaltungstechnik des Elektroautos ist zumeist nur dafür optimiert, den Strom *im* Auto zu nutzen (Antrieb, Heizung, Klimaanlage).

Dieses Dilemma spiegelt sich auch bei den Ladesteckern wider: Der internationale Ladestandard *Combined Charging System*, dem aktuell die meisten Elektroautos entsprechen, sieht nur einen unidirektionalen Energietransport vor (sprich: das Laden des Auto-Akkus). Eine Erweiterung des CCS-Standards im Hinblick auf bidirektionale Nutzung ist immerhin in Planung (ISO 15118).

Lediglich der in Japan entwickelte Standard *CHAdeMO* war von Anfang an für den bidirektionalen Transport vorgesehen. Autos mit CHAdeMO-Stecker könnten also in Kombination mit einer (teuren) bidirektionalen Wallbox als PV-Speicher verwendet werden.

Selbst unter diesen Voraussetzungen sind die Akkus von Elektroautos nicht als PV-Speicher ausgelegt. Durch die Zweckentfremdung können sich eine Menge zusätzlicher Lade-/Entlade-Zyklen ergeben, die die Lebensdauer der Akkus und eventuell auch der damit verbundenen Leistungselektronik verkürzen. Bei einer Schadensabwicklung wird der Auto-Hersteller womöglich argumentieren, dass eine vorschnelle Akku-Alterung aufgrund der unüblichen Verwendung nicht durch die Garantie abgedeckt ist.

Dessen ungeachtet ist die Verwendung eines Auto-Akkus als PV-Speicher natürlich ein wichtiges Forschungsthema, an dem sowohl Autohersteller als auch Energieversorgungsunternehmen ein großes Interesse haben. Zuletzt wurden Informationen über ein Pilotprojekt bekannt, das BMW und E.ON in München durchführen – wenn auch nur mit zwei (!) Testfamilien:

<https://www.pv-magazine.de/2022/09/07/bmw-und-eon-starten-pilotprojekt-zum-bidirektionalen-laden-in-privathaushalten>

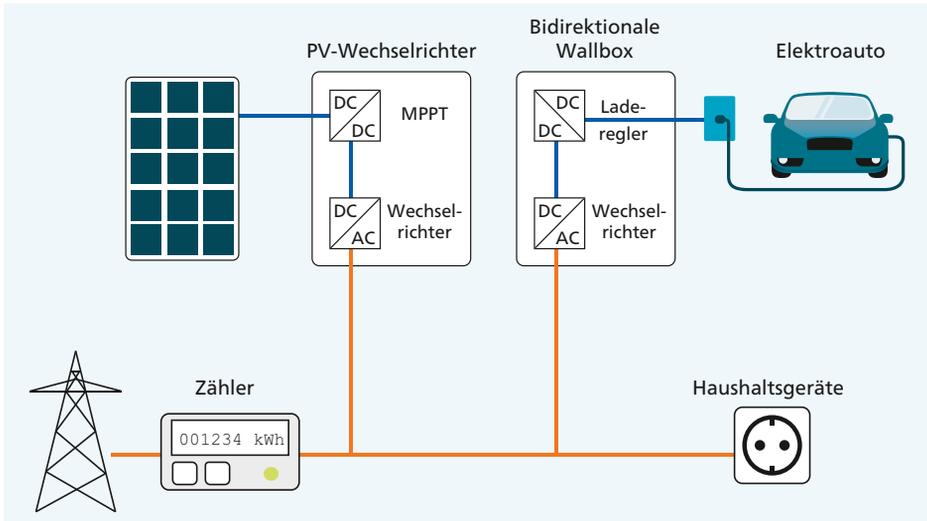


Abbildung 3.4 Das Elektroauto als PV-Speicher

### Vehicle-to-Grid (V2G)

Was noch nicht ist, kann vielleicht noch werden. Über das Potenzial von Hunderttausenden Elektroautos zur Stabilisierung von Stromnetzen wird schon seit einem Jahrzehnt nachgedacht. Die gesammelte Akkukapazität aller Elektroautos könnte durchaus helfen, Leistungsschwankungen im Stromnetz auszugleichen – also nicht nur privat bei Ihrer PV-Anlage, sondern volkswirtschaftlich gedacht in ganzen Regionen/Netzen. Für diesen Denkansatz hat sich der Begriff *Vehicle-to-Grid* (V2G) etabliert. Von diesem Konzept könnten alle Beteiligten profitieren, Betreiber von Energieversorgungsunternehmen ebenso wie Autobesitzerinnen.

Bevor es dazu kommt, gilt es einige Hindernisse zu überwinden: Zuerst muss der CCC-Standard um bidirektionale Funktionen ergänzt werden. Dann müssen E-Autos bzw. deren Akkus im Hinblick darauf, bei Bedarf Strom nach außen abzugeben, neu gedacht werden. Zuletzt sind zur Steuerung und Abrechnung der Be- und Entladung noch einmal neue Standards und APIs erforderlich. (Die Komplexität und der Entwicklungsaufwand von Software wurden schon oft unterschätzt.) Kurz und gut: Hier ist noch viel Geduld erforderlich.

### Warmes Wasser statt Strom speichern

Bevor Sie Geld in einen Stromspeicher investieren, sollten Sie überdenken, wie Sie Ihr Brauchwasser erwärmen. Wenn Sie dazu einen Elektroboiler oder eine Wärmepumpe verwenden, sollten Sie das Brauchwasser tagsüber erwärmen. Mit einem Pufferspeicher können Sie das Wasser ein, bei großen Modellen sogar zwei Tage lang warm

halten. Sie speichern also Wärme statt Strom. Der Vorteil: Sie brauchen dazu keine teuren Batterien (oder zumindest nur kleinere).

Ein Elektroboiler oder eine Warmwasserwärmepumpe kann eine sinnvolle Zusatzinvestition sein, wenn Sie das Brauchwasser mit Ihrer Gas-, Öl- oder Pelletheizung erwärmen: Dann können Sie die Heizung während der Sommermonate ganz ausschalten.

#### **Das Problem der Steuerung**

Die folgenden Fragen klingen trivial: Wann wird der Stromspeicher geladen? Wann wird das Warmwasser elektrisch erwärmt? Wann wird das E-Auto geladen?

Tatsächlich ist die optimale Steuerung bzw. Priorisierung umso schwieriger, je mehr Speicher es gibt (PV-Stromspeicher, Wärmespeicher, Auto-Akku). Die Grundregel lautet: Optionale Verbraucher sollten immer dann zugeschaltet werden, wenn die PV-Anlage mehr Strom produziert, als im Haushalt verbraucht wird. Üblicherweise kümmert sich der Wechselrichter um die zentrale Steuerung aller Komponenten (siehe auch Abschnitt 2.6, »PV-Strom messen und steuern«).

## **3.2 Speicherdimensionierung**

Welche PV-Speichergröße ist zweckmäßig? Die Beantwortung dieser Frage hängt natürlich stark davon ab, was Sie bezwecken möchten. Wenn Sie im Notfall tagelang autark sein möchten, brauchen Sie einen riesigen Speicher. Aus ökologischer bzw. ökonomischer Sicht ist das aber nicht zweckmäßig. (Entsprechende Kosten/Nutzen-Rechnungen folgen im nächsten Abschnitt.)

Stromspeicher für private PV-Anlagen haben häufig zwischen 5 und 15 kWh Kapazität. Abbildung 3.5 hilft dabei, die Energiemengen besser einzuordnen. Wie immer handelt es sich um Beispielgrößen: Es gibt natürlich auch Elektroautos mit kleineren oder größeren Akkus etc. Der Akku von einem Smartphone ist mit ca. 15 Wh = 0,015 kWh wiederum so klein, dass er in dem Diagramm gar nicht mehr sinnvoll dargestellt werden kann.

Üblicherweise besteht das Ziel eines Energiespeichers, den Eigenverbrauch zu erhöhen, also das eigene Haus zumindest während der Sommerhälfte des Jahres ganztägig mit PV-Strom zu versorgen. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Speicher ca. so viel Energie fassen, wie Sie zwischen 17 Uhr und 7 Uhr verbrauchen. 50 % des durchschnittlichen Tagesenergiebedarfs sind ein guter erster Richtwert – vorausgesetzt natürlich, dass Ihre PV-Anlage an einem Sonntag genug Energie erzeugt, um sowohl den aktuellen Bedarf zu decken als auch den Speicher zu füllen.

## 5.2 Welches Balkonkraftwerk passt zu mir?

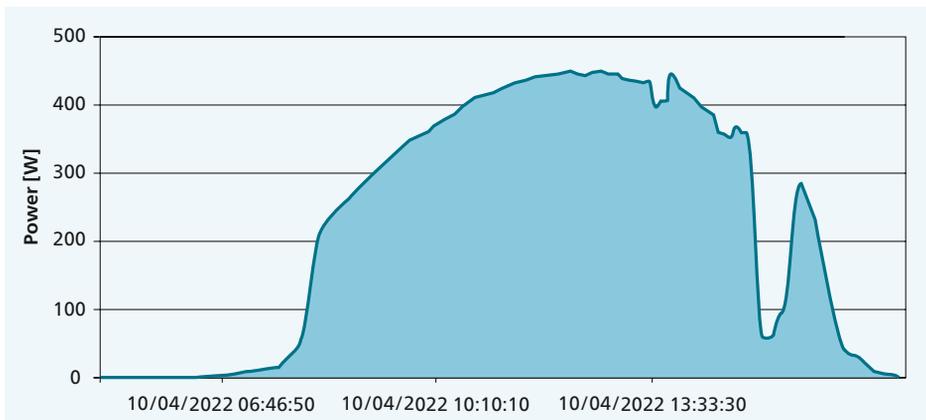
Damit sich ein Balkonkraftwerk lohnt, muss es in erster Linie zum eigenen Bedarf passen. Ein Modell mit zu geringer Leistung bringt insgesamt nur eine geringe Ersparnis. Zu viel Leistung jedoch kann im Haushalt nicht immer verbraucht werden und erzeugt Überschüsse, die einfach ins Stromnetz abfließen, ohne sich auf die eigene Rendite auszuwirken.

Dank des kräftigen Wachstums im Markt für Balkonkraftwerke ist in den letzten Jahren eine große Auswahl an Varianten entstanden. Diese unterscheiden sich in Leistung, Modultechnologie, Montagelösungen, Anschlussart und diversen technischen Ergänzungen wie Speicher-, Mess-, Kommunikations- und Steuertechnologie. Hier den Überblick zu bewahren, kann mitunter schwierig sein, aber es gibt klare Eckpunkte, an denen Sie sich bei der Auswahl orientieren können.

### Die eigene Ertrags- und Verbrauchskurve

Wie in Kapitel 3, »Speichersysteme«, bereits angeschnitten, bestimmen das eigene Verbrauchsverhalten sowie die Ertragskurve eines Kraftwerks die Rentabilität. Daher sollten Sie den Auswahlprozess bei diesen beiden Punkten beginnen.

Wenn man zunächst von einem gebräuchlichen Balkonkraftwerk ohne Speicher ausgeht, deckt sich die Ertragskurve in der Form mit derjenigen einer größeren PV-Anlage, wenn auch in kleinerem Maßstab (siehe Abbildung 5.1).

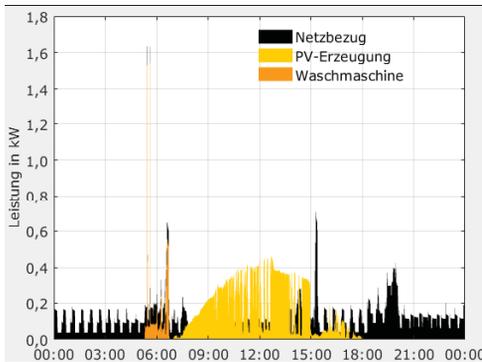


**Abbildung 5.1** Ertragskurve eines Balkonkraftwerks (Südausrichtung) im Tagesverlauf

Sie können deutlich den Sonnenverlauf ablesen, erkennen aber auch zeitweise Leistungseinbrüche aufgrund von Verschattungen. Anders als bei größeren Anlagen (siehe Abbildung 3.1) übersteigt die Erzeugungsleistung aber wesentlich seltener den Verbrauch (siehe Abbildung 5.2).

Hier wird schnell deutlich, dass ein Balkonkraftwerk nicht dem Zweck dienen kann, sich energetisch autark zu machen. Sobald Leistungsspitzen durch energiehungrige Verbrauchsgeräte (Waschmaschine, Herd, Wasserkocher, Föhn etc.) auftreten, reicht die Erzeugungsleistung nicht mehr aus.

Stattdessen dienen die Kleinkraftwerke dazu, den energetischen Grundbedarf zu bedienen. Da dieser häufig einen relevanten Teil der Stromkosten verursacht, helfen Balkonkraftwerke so bei der Kostenreduktion. Studien des Photovoltaik-Instituts Berlin und der HTW Berlin haben gezeigt, dass etwa 60 bis 80 % der Energie aus einem Balkonkraftwerk direkt im eigenen Haushalt verbraucht werden. Einige Kilowattstunden pro Jahr können aber nicht direkt genutzt werden und fließen stattdessen ohne Vergütungsanspruch ins öffentliche Netz. Um diese »verlorenen« Erträge zu reduzieren, gibt es verschiedene Stellschrauben. Die wichtigste ist dabei die richtige Dimensionierung des Kraftwerks in Hinsicht auf die Leistung.



**Abbildung 5.2** Reale Verbrauchs- und Ertragskurve eines Haushalts mit Balkonkraftwerk (Quelle: Nico Orth, HTW Berlin)

## Geräteleistung

Balkonkraftwerke gibt es mit Leistungen von 150 Watt bis über 1000 Watt. Sie unterscheiden sich entsprechend ihrer Leistung auch im Preis. Bevor Sie also blind zum leistungsstärksten oder aber zum günstigen Modell greifen, lohnt sich die Frage nach der richtigen Leistung für den eigenen Bedarf. Um den eigenen Gesamtverbrauch zu ermitteln, genügt eventuell ein Blick auf die Stromrechnungen, sicher aber ein Anruf beim Energieversorger. Den für das Balkonkraftwerk relevanten Grundbedarf hingegen können Sie nur selbst ermitteln. Aus ihm kann dann die sinnvolle Kraftwerkgröße berechnet werden. Die Stichprobenmessung ist die am häufigsten hierzu genutzte Methode. Sie funktioniert wie folgt:

- ▶ Schalten Sie sämtliche Verbrauchsgeräte aus, die nicht zum Grundverbrauch gehören, wie etwa Leuchten, Waschmaschinen, Geschirrspüler etc.

- ▶ Verschaffen Sie sich Zugang zum Stromzähler, und notieren Sie den genauen Zählerstand.
- ▶ Belassen Sie den Haushalt für einige Stunden in diesem Zustand.
- ▶ Notieren Sie den Zählerstand danach erneut, und teilen Sie die Differenz zum vorher gemessenen Wert durch die Zahl der Stunden zwischen den Messungen.
- ▶ Der Grundverbrauch pro Stunde in kWh multipliziert mit dem Faktor 2,5 entspricht in etwa der optimalen Geräteleistung in kWp.

Ein Rechenbeispiel verdeutlicht die Vorgehensweise: In einem Messzeitraum von 8 Stunden wurde ein Verbrauch von 2,4 kWh gemessen. Das entspricht einem Grundverbrauch von 0,3 kWh pro Stunde. Multipliziert mit dem Faktor 2,5 ergibt sich daraus eine optimale Geräteleistung von ca. 0,75 kWp, also 750 Wp.

In dem Haushalt aus dem Rechenbeispiel wird permanent eine Leistung von 300 Watt benötigt (0,3 kW). Damit ein Balkonkraftwerk diesen Bedarf möglichst häufig bedienen kann, sollte es bei Sonnenschein schnell auf diese Erzeugungsleistung kommen. Dass ein kleineres Kraftwerk, das insgesamt nur eine Spitzenleistung von 300 Watt hat, diese Anforderungen nicht erfüllen kann, ist naheliegend. Die Leistung steigt bei ausreichender Sonneneinstrahlung für das Erreichen des MPP-Bereiches zunächst steil an (siehe Abbildung 5.1). Ist die Modulleistung aber insgesamt zu gering, wird die notwendige Leistung zur Deckung des Grundbedarfs nicht sofort erreicht. Dadurch wird mögliches Einsparpotenzial nicht ausgeschöpft.

### Dimensionierung leicht gemacht

Eine zweite, gröbere, aber wesentlich einfachere Möglichkeit, die geeignete Kraftwerkleistung zu errechnen, ergibt sich aus dem Umstand, dass Balkonkraftwerke meist nur in zwei Leistungsklassen verfügbar sind: mit einem oder mit zwei Modulen à 330–400 Wp.

Bei einem Jahresverbrauch (nicht Grundverbrauch!) von bis zu ca. 2500 kWh genügt ein Modul. Liegen Sie darüber, lohnen sich auch zwei.

Aufgrund insgesamt steigender Modulleistungen und neuer Geräteklassen mit mehreren kleinen oder drei größeren Modulen verliert diese Faustformel zunehmend an Bedeutung. Wählen Sie aber ein klassisches Balkonkraftwerkmodell, dann ist sie noch immer eine gute Richtschnur.

Theoretisch wäre es auch denkbar, mithilfe von Messgeräten den Verbrauch sämtlicher Grundverbrauchsgeräte zu messen, um den Grundverbrauch wesentlich genauer und gegebenenfalls auch im Jahresverlauf zu berechnen. Da hierzu aber auch Geräte im Stand-by zählen, kann das sehr aufwendig werden und ist daher im Normalfall nicht zu empfehlen.

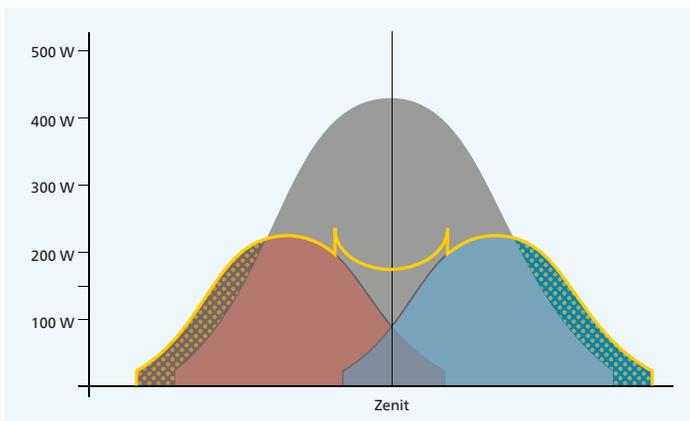
## Montage und Ausrichtung

Die optimale Ausrichtung für die maximale Ausbeute mit Solarmodulen wurde bereits in Abschnitt 2.2, »Ertrag je nach Lage und Ausrichtung«, behandelt. Auch für ein Balkonkraftwerk gelten die Südausrichtung und ein Neigungswinkel von 20° und 40° als optimal in Hinblick auf die erzielbaren Erträge. Das ist allerdings nicht immer auch mit der optimalen Eigenverbrauchsquote gleichzusetzen. Um diese und damit die Rentabilität eines Balkonkraftwerks zu optimieren, kann stattdessen ein Angleichen der Ertrags- an die Verbrauchskurve sinnvoll sein.

Eine Änderung der Ertragskurve erzielen Sie insbesondere durch eine angepasste Ausrichtung der Solarmodule. Anders als z. B. bei einer Aufdach-Montage, die von der Ausrichtung und Bauart des Hausdachs abhängig ist, haben Sie bei den Balkonkraftwerken häufig eine größere Auswahl bei Standort und Montageart. Das kann ein signifikanter Vorteil sein, insbesondere wenn es in erster Linie um die Deckung des Grundverbrauchs geht. Dieser verteilt sich schließlich gleichmäßig über den Tag. Leistungsspitzen zur Mittagszeit sind daher nicht immer wünschenswert.

Bei einem Balkonkraftwerk mit einem Modul haben Sie in dieser Hinsicht kaum eine Wahl. Die Südausrichtung ist hier der Königsweg. Je nachdem, ob vormittags oder nachmittags ein höherer Verbrauch vermutet wird, kann dem mit einer leichten Verschiebung um ca. 10° nach Osten oder Westen Rechnung getragen werden.

Sind allerdings mehrere Module vorhanden, so kann die Ost/West-Aufständigung eine sinnvolle Alternative darstellen. Hierbei werden jeweils ein oder mehrere Module eher in Richtung (Süd-)Osten hin ausgerichtet und das/die weiteren Module nach (Süd-)Westen. Meist wird hierbei eine Aufständigung verwendet, um steilere Winkel zu erreichen, die dem niedrigeren Sonnenstand Rechnung tragen.



**Abbildung 5.3** Idealisierter Ertrag aus Süd-Ausrichtung (grau) versus Südost/Südwest-Ausrichtung (rot/blau), gelbe Linie = gemeinsamer Ertrag Ost/West, gelb gepunkteter Bereich: Vorteil zu Südausrichtung

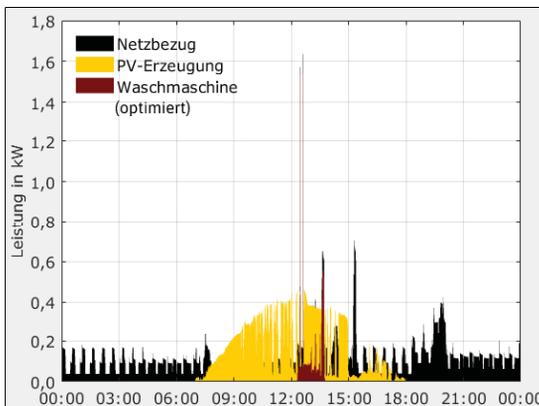
Sofern dies mit dem Sonnenverlauf und möglichen Schattenquellen vereinbar ist, ergibt sich dabei bei etwas weniger Gesamtertrag ein ausgeglicheneres Ertragsprofil (siehe Abbildung 5.3).

Es wird deutlich, dass das Balkonkraftwerk mit einer (Süd-)Ost/(Süd-)West-Ausrichtung potenziell über einen längeren Zeitraum einen Anteil am Grundverbrauch decken kann und weniger Energie verschenkt wird, als das bei einer reinen Südausrichtung der Fall wäre. Ob dies tatsächlich der Fall ist oder ob eine andere Ausrichtung nicht doch günstiger ist, hängt aber in erster Linie vom tatsächlichen Verbrauch ab.

### Verbrauchsverhalten und Lastverschiebung

Die Erzeugung von Energie für den Eigenverbrauch bringt als positive Nebenwirkung häufig einen neuen Blick auf das eigene Verbrauchsverhalten mit sich. Nicht nur unterziehen Nutzerinnen und Nutzer eines Balkonkraftwerks häufiger den Verbrauch ihrer Haushaltsgeräte, Leuchtmittel, Unterhaltungselektronik etc. einer genaueren Prüfung, sie passen oft auch ihren Verbrauch der Erzeugung an.

So ist es bei Geräten wie Waschmaschinen, Wäschetrocknern und Geschirrspülern neuerer Bauart etwa möglich, deren Startzeit einzustellen. Diese kann dann in eine sonnen-/ertragreiche Tageszeit gelegt werden. Auch der Verzicht auf warme Mahlzeiten in den Abendstunden gehört zur gelebten Praxis einiger Nutzer, um den hohen Energiebedarf von Elektro- und Induktionsherden außerhalb der Betriebszeiten des Balkonkraftwerks zu vermeiden. Das kann das zu einer besseren Deckung des Eigenverbrauchs führen (siehe Abbildung 5.4).



**Abbildung 5.4** Reale Verbrauchs- und Ertragskurve eines Haushalts mit Balkonkraftwerk mit optimiertem Betrieb der Waschmaschine (Quelle: Nico Orth, HTW Berlin)

Um Ihr Verbrauchsverhalten zu optimieren, müssen Sie wissen, wie und wann Sie überhaupt Ihren Strom verbrauchen. Viele Anbieter intelligenter Messsysteme für den Stromzähler sowie kostenintensiver Smarthome-Konzepte bedienen aktuell die-

sen Markt. Denselben Zweck erfüllen allerdings auch günstige Strommessgeräte in Form von Zwischensteckern, die zwischen ein Verbrauchsgerät und die Steckdose gesteckt werden und bereits für niedrige zweistellige Beträge im Handel zu finden sind. So kann nach und nach jeder Verbraucher im Haushalt in unterschiedlichen Szenarien gemessen und seine Verwendung überdacht werden. Die Anschaffung eines solchen Messgeräts ist für die Nutzung des Balkonkraftwerks ohnehin sinnvoll, wie ich in Abschnitt 5.7, »Zubehör«, weiter ausführen werde.

### 5.3 Nutzung von Überschüssen

Die Optimierung des Eigenverbrauchs ist gleichbedeutend mit der Vermeidung von Überschüssen bei der Erzeugung. Aber auch ohne entsprechende Maßnahmen hält sich die Menge der über den Eigenbedarf hinaus erzeugten Energie in Grenzen.

Eine betriebswirtschaftliche Analyse von Balkonkraftwerken der Hochschule Rosenheim in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie in Franken und Berlin-Brandenburg aus dem Jahr 2017 berechnete etwa Überschüsse von 5 % bis knapp 30 % der Gesamterzeugung pro Jahr. Die damaligen Berechnungen wurden allerdings mit Balkonkraftwerken einer frühen Generation durchgeführt, die nur etwa zwei Drittel der heute üblichen Leistung erzeugte. Zudem wurde lediglich ein einzelnes Modul verwendet, sodass Optionen wie die Ost/West-Ausrichtung nicht analysiert werden konnten.

Eine aktuellere, aber leider bisher unveröffentlichte Studie der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW) aus dem Jahr 2021 geht hier wesentlich mehr ins Detail. Sie ermittelt bei einer vergleichbaren Modellrechnung Quoten von 10 bis 40 % Übererzeugung bei den gängigen Kraftwerkgrößen. Sie gibt zudem die maximale Ausbeute mit bis zu 1200 Wh pro installiertem Wp pro Jahr bei optimaler Ausrichtung an. Dieser Wert kann bei weniger optimaler Ausrichtung allerdings auf wenige Hundert Wh sinken.

Aus diesen Daten lässt sich ablesen, dass der mögliche Jahresüberschuss mit Werten zwischen null und mehreren hunderttausend Wh sehr stark variiert. Bevor Sie sich also damit befassen, ob sich eine Nutzung des Überschusses für andere Zwecke lohnt, sollte zunächst dessen tatsächliche Größe bekannt sein. Da bei regulär betriebenen Balkonkraftwerken im Normalfall ein Zweirichtungszähler verbaut wird (siehe auch Abschnitt 5.8, »Anmeldung und Zählertausch«), kann dieser nach dem ersten Betriebsjahr des Balkonkraftwerks einfach dort abgelesen werden. Erst mit diesem Wert ergeben weitere Überlegungen Sinn.