

Impulse für die Energiewende

Rightsizing – aber richtig!

Auslegung von Batteriespeichern für mehr
Nachhaltigkeit in der Energiewende

White Paper

Marc Dusseldorp
Sebastian Heinz
Christopher Lange
Sebastian Pohl



High Performance Battery Technology GmbH (Hrsg.)
Schumannstr. 61
53113 Bonn
impulse@highperformancebattery.de

Twinprint Verlag
Königswinter, 2021
ISBN: 978-3-96856-030-4



Die High Performance Battery Technology GmbH mit Sitz in Bonn/ Deutschland ist auf die Erforschung und Entwicklung von High-Tech-Akkus spezialisiert.

Sie wurde doppelt nominiert für den Deutschen Nachhaltigkeitspreis in den Wettbewerben „Unternehmen 2022“ und „Design 2022“.

Inhalt

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 00 | Vorwort | |
| 01 | Einleitung | 1 |
| 02 | Batterie-Rightsizing: Mehr als Suffizienz | 3 |
| | Spezifische Energie und ihre Auswirkungen | |
| | Langlebigkeit: Ein entscheidender Faktor für nachhaltige Batteriespeicher | |
| | Schnellladefähigkeit: Nicht nur eine Frage des Ladekomforts | |
| | Tiefentladefestigkeit: Das verkannte Potential | |
| | Auf die Kombination der Eigenschaften kommt es an | |
| 03 | Auslegung von Batteriesystemen | 10 |
| | Betriebsstrategien müssen betrachtet werden | |
| | Anwendungsfall Lastspitzenreduktion | |
| | Auslegung von Batterien für die Lastspitzenreduktion | |
| 04 | Ökobilanzierung als Grundlage von Nachhaltigkeitsbewertungen | 16 |
| | Grundzüge der Ökobilanzierung | |
| | Ökobilanzierung von Batteriespeichern | |
| | Ökobilanzierung als Gütesiegel | |
| 05 | Fazit und Ausblick | 25 |
| 06 | Literatur | 26 |
| 07 | Autorenprofile | 30 |

00 Vorwort

Die Energiewende ist eine enorme Herausforderung. Sie rührt an die physischen Grundlagen unserer Gesellschaft, betrifft alle Lebensbereiche und verlangt dem entsprechend eine tiefgreifende und umfassende Transformation. Vieles ist in Bewegung, manches noch unklar; ein work in progress, mit experimentieren und forschen, abwägen und priorisieren.

Dies gilt auch für die Rolle von Batteriepeichern für die Energiewende. Unstrittig ist, dass diese für den Umstieg auf Erneuerbare Energien unerlässlich sind. Entsprechend groß ist der Hype aktuell. Gleichzeitig wird immer deutlicher, dass die Debatte über den Einsatz von Batteriespeichern für die Energiewende breiter geführt werden müsste, da es noch viele blinde Flecken, unreflektierte Zusammenhänge sowie unerkundete Möglichkeiten gibt.

Hier setzen wir mit unseren Impulsen für die Energiewende an.

Das vorliegende White Paper rückt das aufkommende Thema „Rightsizing von Batteriespeichern“ in den Fokus. Es skizziert die Eckpunkte einer Batterie-speicher-Auslegung, die über ein bloßes „Weniger genügt auch“ deutlich hinausgeht. Zusätzlich werden die einschlägigen Grundlagen der Batterieauslegung und Ökobilanzierung praxisrelevant vermittelt, da diese für eine Nachhaltigkeitsbewertung von Batteriespeichern unerlässlich sind.

In diesem Sinne soll das White Paper dazu beitragen, die notwendige Debatte über die Nutzung von Batteriespeichern für die Energiewende technologie-offen und nachhaltigkeitsorientiert zu führen – als Schlüssel zu einer tatsächlich zukunftsfähigen Energiewende.

Prof. Dr. Günther Hambitzer

Geschäftsführer der High Performance Battery Technology GmbH

Bonn, Oktober 2021

01 Einleitung

Batteriespeicher erleben einen enormen Hype. Sie werden als wesentlicher Baustein eines nachhaltigen Energiesystems propagiert. Das Spektrum möglicher Anwendungsfelder ist breit: Neben der Elektromobilität sind es gerade auch stationäre Anwendungen in Industrie und Haushalten, welche die Herausforderungen einer erneuerbaren Energieversorgung meistern helfen. Aktuell werden, befeuert durch massive politische Förderung, zahlreiche Gigafactories gebaut, die eine nie da gewesene Menge an Batteriespeichern auf den Markt bringen werden (CIC energiGUNE, 2021). Und schon bald werden diese Batterien ihren Siegeszug in E-Autos, Industriespeichern und Haushaltsanwendungen antreten. Eine Erfolgsgeschichte also – für eine nachhaltige Energieversorgung der Zukunft?

Die Kehrseite der Medaille lautet: Batterien herzustellen braucht grosse Mengen an Ressourcen und Energie. Damit einher gehen Treibhausgasemissionen sowie weitere Umweltbelastungen in erheblichem Umfang. Der Batterie-Hype von heute könnte sich somit als enormes Ressourcen- und Abfallproblem von morgen erweisen. Um die Nachhaltigkeitsprobleme unserer bisherigen Energieversorgung zu lösen, wären neue Nachhaltigkeitsprobleme geschaffen worden. Eine echte Erfolgsgeschichte müsste anders geschrieben werden. Dem entsprechend wird die Debatte um die Nebenfolgen der Batterie-nutzung lauter (Barske, 2020) (Flassbeck, 2020). Dabei werden zunehmend Ansätze präsentiert, die dazu dienen könnten, Batteriespeicher und ihre Anwendung stärker als zuvor an den Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung auszurichten.

Rightsizing ist einer dieser Ansätze (Henßler, 2020). Er wird aktuell im Bereich der Elektromobilität thematisiert und besagt im Kern, dass die Entwicklung bei Traktionsbatterien eigentlich zu einer Überdimensionierung – oversizing – geführt hat. Denn die meisten mit PKW zurückgelegten Fahrten gehen über vergleichsweise kurze Strecken. Viele Autofahrer benötigen kein Fahrzeug, welches mit einer Batterieladung 500 Kilometer oder mehr bewältigen kann. Warum also ein Batteriepaket mitschleppen, das mehrere hundert Kilogramm und mehrere tausend Euro schwer ist und dessen Herstellung die Umweltbilanz des Fahrzeugs wesentlich beeinträchtigt? „Weniger Reichweite genügt“: Das ist das schlichte Motto des Rightsizing-Ansatzes in seiner aktuellen Form.

Rightsizing kann jedoch mehr bedeuten – und mehr bewirken. Das wird deutlich, wenn man sich die Abhängigkeit der Batteriegröße nicht

Batteriespeicher erleben einen Hype – doch sind sie wirklich nachhaltig?

Eine echte Erfolgsgeschichte müsste anders geschrieben werden.

Oversizing verbraucht unnötige Ressourcen, Rightsizing korrigiert dies an den richtigen Stellen.

nur von der gewünschten Reichweite (oder einem sonstigen Nutzen), sondern insbesondere auch von der vorliegenden Batterietechnologie vor Augen führt. Langlebigkeit und spezifische Energie, Schnellladefähigkeit und Tiefentladefestigkeit sind Batterieeigenschaften, die im Zusammenspiel maßgeblich über die erforderliche Batteriegröße entscheiden. Damit bestimmt die Batterietechnologie nicht zuletzt durch ihren Einfluss auf die Speichergröße, welche Umweltbilanz die jeweiligen Anwendungen aufweisen.

Es braucht eine Debatte über Batterie-Rightsizing in diesem umfassenderen Sinne. Dabei geht es einerseits um ein Verständnis der zugrundeliegenden Zusammenhänge, andererseits um die damit verbundenen Nachhaltigkeitspotenziale. Batteriespeicher werden nur dann einen echten Beitrag zur Energiewende leisten können, wenn diese Nachhaltigkeitspotenziale systematisch gesucht und genutzt werden – als zentrales Kapitel der Erfolgsgeschichte, die es zu schreiben gilt.

Es kann weit mehr umfassen als bloßen Verzicht – wenn es die Optimierungspotenziale der Batterietechnologien nutzt.

Nur so können die Nachhaltigkeitspotenziale von Batteriespeichern gehoben werden.

02 Batterie-Rightsizing: Mehr als Suffizienz

Kleinere Batterien für eine geringere, aber doch genügend große Reichweite zu verbauen, entspricht dem klassischen Suffizienz-Ansatz der Nachhaltigkeit. Seit den frühen 1990er Jahren diskutiert, propagiert dieser eine Mäßigung der Ansprüche (Huber, 1994). Mehr Öko-effizienz würde für sich genommen nämlich nicht für eine nachhaltige Entwicklung ausreichen: Effizienzgewinne führten oft zu einer intensiveren Nutzung der jeweiligen Produkte, welche die ursprünglich intendierte Ressourceneinsparung zunichte machte. Deshalb gelte es, zugleich gegen übermäßige Konsumansprüche und stattdessen für ein gesundes, dauerhaft umweltverträgliches Maß an Konsum einzutreten.

Der Ansatz ist bestechend einfach: Geringere Ansprüche an Reichweite und somit an die Batteriekapazität führen zu geringerem Rohstoff- und Energieverbrauch für die Batterieherstellung, weniger Gewicht und Volumen des Speichers, geringeren Kosten sowie letztlich weniger Abfall. Was will man mehr? In der Tat kann Suffizienz einen großen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten (Bossert, et al., 2020). Allerdings tun sich viele Menschen schwer mit der Mäßigung ihrer Ansprüche – nicht jeder wird sich, unter den gegenwärtigen gesellschaftlichen Bedingungen, für Suffizienzmaßnahmen begeistern lassen. Und: Das Rightsizing von Batterien könnte noch weit größere Beiträge zur Nachhaltigkeit leisten, wenn es mehr umfasst als das bloße Verkleinern von Batterien einer gegebenen Technologie.

Der reine Suffizienz-Ansatz wird zudem der sozio-technischen Komplexität nicht ausreichend gerecht. So geht es bei der Reichweiten-Diskussion im Grunde nicht nur darum, welche Strecke mit einer einzigen Batterieladung zurückgelegt werden kann. Für die als nötig empfundene Reichweite spielt vielmehr der alltägliche Ladekomfort und so die Schnellladefähigkeit der Batterie eine entscheidende Rolle. Auf der anderen Seite müssen kleinere Batteriespeicher gegenüber größeren häufiger geladung und entladen werden und sind daher tendenziell stärker von den negativen Effekten der Batteriealterung betroffen. Die Lösung dieser praktischen Herausforderungen durch Oversizing von Batterien erscheint daher zunächst einfach, führt jedoch absehbar zu einem erheblichen Ressourcen- und Entsorgungsproblem. Ein ambitioniertes Rightsizing muss auch dieser Komplexität gerecht werden, damit die Energiewende langfristig finanzierbar wird (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2021).

„Weniger ist mehr“ – ein zentraler Gedanke der Nachhaltigkeitsdebatte seit den 1990er Jahren.

Suffizienz ist jedoch kein Selbstläufer, und Rightsizing kann mehr!

Die sozio-technische Komplexität der Batterie-nutzung muss in den Blick genommen werden.

Spezifische Energie und ihre Auswirkungen

Eine zentrale Kenngröße von Batteriespeichern ist ihre spezifische Energie: Die Menge maximal speicherbarer elektrischer Energie bezogen auf die Batteriemasse, angegeben in Wattstunden pro Kilogramm (Wh/kg). Während Blei-Säure-Akkus spezifische Energien von 30-40 Wh/kg und Nickel-Metallhydrid-Akkus von 60-80 Wh/kg aufweisen, werden für Lithium-Ionen-Akkus oft Werte von 120-180 Wh/kg angegeben – für Elektroautos sogar über 200 Wh/kg. Die spezifische Energie variiert also nicht nur zwischen verschiedenen Batterietechnologien, sondern auch innerhalb der jeweiligen Technologie-Familien stark. Tatsächlich ist die Bandbreite noch deutlich größer, als die oben wiedergegebenen Werte suggerieren. Eine Analyse der aktuell auf dem deutschen Markt verfügbaren stationären Batteriespeicher auf

Die spezifische Energie beschreibt das Verhältnis zwischen speicherbarer Energie und der Batteriemasse in Wh/kg.

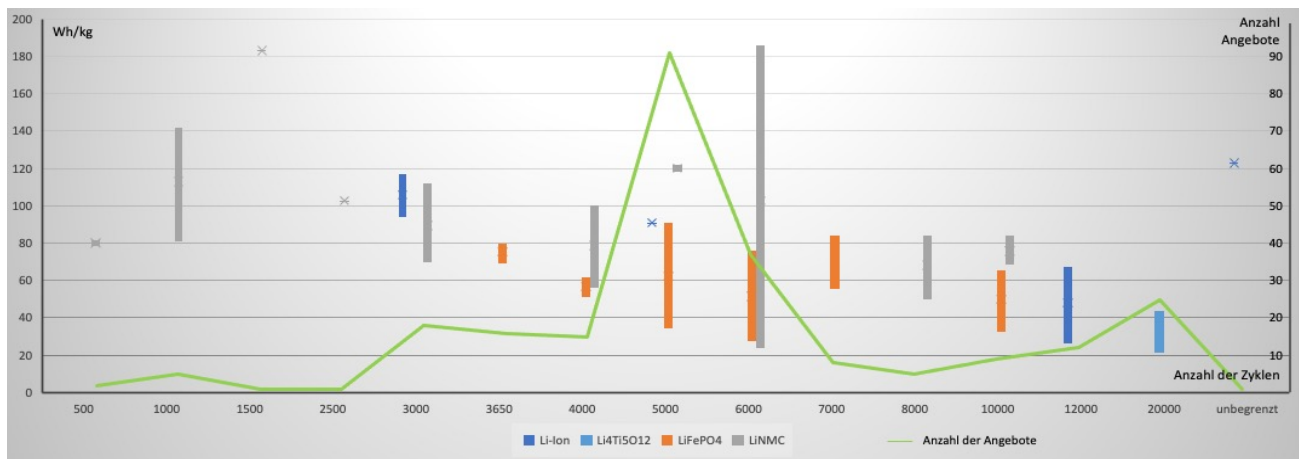


Abb. 1: Technologievergleich für stationäre Batteriespeicher auf Lithium-Basis.
Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von C.A.R.M.E.N. e. V. (C.A.R.M.E.N. e. V., 2021)

Lithium-Basis beispielsweise gibt das folgende Bild ab (Abbildung 1): Zu sehen ist, dass die spezifische Energie vieler der angebotenen Speicher weit unterhalb der Spanne von 120-180 Wh/kg liegt, nämlich im Bereich von 20-140 Wh/kg. Das heißt: Für einen Anwendungsfall, der eine Nennkapazität von 10 kWh verlangt, sind, je nach spezifischer Energie, Akkus mit einer Masse von 56 kg (bei 180 Wh/kg) bis zu 500 kg (bei 20 Wh/kg) erforderlich. Zur Masse des Batteriespeichers tragen alle seine Komponenten bei: Elektroden wie Elektrolyt, Separator und Gehäuse. Deren stoffliche Zusammensetzungen und Anteile an der Gesamtmasse variieren zwischen den verschiedenen Technologien. Für eine fundierte, quantitative Bewertung der jeweiligen Umwelt-

Je niedriger die spezifische Energie, desto schwerer der Batteriespeicher – mit Konsequenzen für Ressourcenbedarf und Umwelt.

wirkungen ist – auf der Basis einer adäquaten, technologieabhängigen Batteriespeicherauslegung – somit eine ökobilanzielle Betrachtung nötig.

Gleichwohl lässt sich als Faustregel festhalten, dass geringere spezifische Energien mit einem höheren Materialbedarf für einen gegebenen Anwendungsfall (d. h. eine gegebene erforderliche Energiemenge, oft auch „Kapazität“ genannt) einhergehen – und dieser wiederum mit tendenziell größerem Energieverbrauch, höheren CO₂-Emissionen und größeren sonstigen Umweltwirkungen bei der Herstellung. Dies ist der einfachste Zusammenhang zwischen der verwendeten Batterietechnologie, der „Größe“ (im Sinne der Masse) des Speichers und den nachhaltigkeitsrelevanten Folgen seiner Herstellung.

Size matters – die Größe hat einen wesentlichen Einfluss auf die Nachhaltigkeit des Batteriespeichers.

Langlebigkeit: Ein entscheidender Faktor für nachhaltige Batteriespeicher

Das gegenwärtige Angebot an stationären Batteriespeichern birgt jedoch laut Abbildung 1 noch eine weitere, wichtigere Botschaft: Mit zunehmender Lebensdauer sinkt die spezifische Energie. Speicher mit einer relativ hohen Lebensdauer von 7.000 und mehr Ladezyklen weisen allesamt relativ niedrige spezifische Energien von unter 90 Wh/kg auf. Auch hier liegen die Verbindungen zur Nachhaltigkeit auf der Hand: Wann immer Akkus mit hoher Lebensdauer benötigt werden (etwa für Anwendungen, die häufiges Be- und Entladen erfordern), sind nach gegenwärtiger Marktlage große, massereiche Speicher mit geringer spezifischer Energie unumgänglich. Mit anderen Worten: Akkugröße ist der Preis, der, bislang jedenfalls, für Langlebigkeit bezahlt werden muss. Und größere Akkus weisen die oben skizzierten Nachteile hinsichtlich Ressourcen- und Energieverbrauch bei der Herstellung auf.

Bei heutigen Speichern geht Langlebigkeit mit geringer spezifischer Energie einher.

Die Lebensdauer hat freilich weitreichendere Folgen für Nachhaltigkeit als die bloße Kopplung an große Speicher mit geringer spezifischer Energie. Sie ist, für sich genommen, ganz entscheidend dafür, die negativen Auswirkungen von Batteriespeichern auf Ressourcen- und Energieverbrauch zu verringern. Wenn ein Akku das Ende seiner Lebenszeit erreicht hat – das heißt, wenn seine Kapazität oder seine Leistung für den gegebenen Anwendungsfall nicht mehr ausreichen –, muss er durch einen neuen Akku ersetzt werden. Dessen Produktion geht wiederum mit einem erheblichen Energie- und Ressourcenaufwand einher, während die Entsorgung der Altbatterie zusätzlich ein Recycling- bzw. Abfallproblem schafft. Langlebige Akkus tragen also ganz entscheidend dazu bei, diesen Produktions- und Entsorgungsaufwand zu minimieren.

Langlebigkeit reduziert Austausch und Entsorgung und ist der Gegenspieler des absehbaren Recycling- und Abfallproblems.

Betrachtet man die Spanne der Akkulebenszeiten in Abbildung 1, zeigt sich, dass deren Einfluss enorm ist: Eine Lithiumeisenphosphat-(LiFePO₄)-Batterie, deren Lebenszeit sich auf 10.000 Ladezyklen beläuft, muss beispielsweise nur einmal produziert und entsorgt werden, wohingegen für denselben Anwendungsfall zwei LiFePO₄-Akkus mit einer Lebenserwartung von 5.000 Ladezyklen gebraucht werden – womit nur ein Teil der Spanne in Abbildung 1 betrachtet wäre.

Die Lebensdauer hat zudem einen entscheidenden Einfluss auf die möglichen Einsatzgebiete. Je besser die Langlebigkeit, desto attraktiver wird auch die Kombination verschiedener Anwendungsfälle auf derselben Infrastruktur (Plattform-Ansatz). Dies hat nicht nur einen unmittelbaren Einfluss auf die erforderliche Speicherdimensionierung: Diese fällt im Vergleich zur Einzelfallauslegung nämlich deutlich kleiner aus. Zudem ermöglicht der Plattform-Ansatz auch wirtschaftliche Synergien, die die Attraktivität des Speichereinsatzes insgesamt steigern (Müller, 2018).

Schnellladefähigkeit: Nicht nur eine Frage des Ladekomforts

Nicht immer ist der Einfluss der Batterieeigenschaften auf die Akkugröße so offensichtlich wie bei spezifischer Energie und Langlebigkeit. Die Eigenschaft der Schnellladefähigkeit ist hierfür das beste Beispiel. Ist sie gegeben, kann eine Batterie mit großen Ladeströmen, d.h. innerhalb relativ kurzer Zeit, geladen werden, ohne dass die Batteriechemie dabei Schaden nähme. Dies ist nämlich in der Tat keine Selbstverständlichkeit: Bei gegenwärtiger Lithium-Ionen-Technologie setzt Schnellladung den Akku grundsätzlich einem starken Alterungsstress aus. Deshalb empfehlen Hersteller für gewöhnlich, Batterien nur innerhalb eines begrenzten Ladekorridors – maximal zwischen Ladeständen von 20-80 Prozent – schnell zu laden. So kann der negative Einfluss der Schnellladung auf die Batteriealterung in vertretbaren Grenzen gehalten werden (Chargemap, 2021) (Sonnenberger, 2019).

Dieses Vorgehen hat jedoch eine Kehrseite: Wenn nur ein Teil der nutzbaren Batteriekapazität schnell geladen werden kann, so steht auch nur dieser Teil der Kapazität nach Schnellladung für die Anwendung zur Verfügung. Im Falle der Elektromobilität heißt das: Durch einen vergleichsweise kurzen Schnelllade-Stopp kann die Reichweite des Fahrzeugs nur um den besagten Anteil verlängert werden. Dies wird vom Nutzer vor allem als Komfort-Einschränkung wahrgenommen. In der gegenwärtigen Situation, in der große Reichweiten eine zentrale Rolle in der Debatte über E-Autos spielen, treibt dies die Hersteller

Der Einfluss von Langlebigkeit auf die Batterienachhaltigkeit ist enorm.

Die Lebensdauer entscheidet über mögliche Einsatzgebiete und somit auch über die Wirtschaftlichkeit des Batteriespeichers.

Bislang treibt Schnellladung die Batteriealterung voran und reduziert somit die Lebensdauer.

Mangelnde Schnellladefähigkeit führt in der Elektromobilität zum „Oversizing“ der Traktionsbatterien.

zu einem Vorgehen, das eingangs bereits erwähnt wurde: nämlich die Überdimensionierung der Traktionsbatterie. Denn wenn die Kapazität der gesamten Batterie z. B. um 50 Prozent erhöht wird, so erhöht sich im selben Zuge auch die Kapazität des schnellladefähigen Ladekorridors um 50 Prozent.

Mangelnde Schnellladefähigkeit ist somit ein Treiber für die Überdimensionierung von Batterien – zumindest in Fällen, in denen es auf Schnellladefähigkeit ankommt. Dies ist bei der Elektromobilität offensichtlich, gilt jedoch auch für andere Anwendungsfelder, im stationären Bereich etwa für den Netzausgleich der Primärregelung. Hier muss im Bedarfsfall über eine Viertelstunde hinweg eine bestimmte Leistung geliefert werden. Die erforderliche Speichergröße ist dabei wesentlich von seiner maximal zulässigen Lade- bzw. Entladegeschwindigkeit abhängig. Ein Beispiel: Für 1 MW Leistung über eine Leistungsdauer von einer Viertelstunde mit einer maximal zulässigen Lade- und Entladegeschwindigkeit von 1 C (einstündiges Be- und einstuändiges Entladen) muss der Batteriespeicher eine Größe von 4 MWh haben. Bei doppelter zulässiger Lade- und Entladegeschwindigkeit (2 C, halbstündiges Be- und halbstündiges Entladen) würden 2 MWh für dieselbe Leistung ausreichen. Eine verbesserte Schnelllade- bzw. Entladefähigkeit spart in diesem Beispiel unter ansonsten gleichen Annahmen die Hälfte der Ressourcen ([Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V., 2021](#)).

Auch stationäre Anwendungen sind von Überdimensionierung betroffen.

Tiefentladefestigkeit: Das verkannte Potenzial

Es existiert noch eine weitere Batterieeigenschaft, die in den Kontext des Rightsizing gestellt werden muss: Die Tiefentladefestigkeit. Herkömmliche Lithium-Ionen-Akkus müssen immer zu einem gewissen Grad geladen sein; andernfalls nähme die Batteriechemie irreversiblen Schaden. Der Anteil der Gesamtkapazität, der aus diesem Grund aus der Nutzung herausfällt, beläuft sich in der Regel auf bis zu 20 Prozent. Das heißt: Ein nennenswerter Teil der Batteriekapazität ist grundsätzlich nicht nutzbar. Gleichwohl muss er produziert und am Lebensende der Batterie entsorgt oder recycelt werden – und trägt, ebenso wie der nutzbare Teil der Kapazität, zum Energie- und Ressourcenbedarf des gesamten Batteriespeichers bei ([Wikipedia, 2021](#)).

Herkömmliche Akkus müssen immer zu einem gewissen Grad geladen sein.

Der nicht nutzbare Kapazitätssockel von Lithium-Ionen-Speichern wird selten im Kontext der Batterienachhaltigkeit thematisiert. Allerdings ist nicht gesagt, dass Batterien auch künftig noch dieselben Anforderungen an einen Alterungsschutz stellen wie die heute verfügbaren Akkus. Denn in Forschung und Entwicklung befinden sich

Bei tiefentladefesten Batterien kann derselbe Nutzen mit weniger Akku realisiert werden.

bereits Batterietechnologien auf Lithium-Ionen-Basis, die sich durch Tiefentladefestigkeit auszeichnen. Tiefentladefeste Akkus erlauben die Nutzung ihrer gesamten Kapazität; Tiefentladung führt hier nicht zur Schädigung der Batteriechemie. Der Einfluss auf die Batteriegröße ist offensichtlich: Dieselbe nutzbare Kapazität kann mit weniger Akku realisiert werden. Die Effizienz des Energie- und Ressourceneinsatzes ist dadurch erheblich gesteigert.

Auf die Kombination der Eigenschaften kommt es an

Wenn es um ambitioniertes Rightsizing von Batteriespeichern geht, spielen somit vier Eigenschaften eine zentrale Rolle: Spezifische Energie, Langlebigkeit, Schnellladefähigkeit sowie Tiefentladefestigkeit. Sie alle haben entscheidenden Einfluss auf die Speichergröße. Ihr volles Nachhaltigkeitspotenzial können sie freilich erst dann entfalten, wenn sie miteinander kombiniert werden. Dies setzt jedoch voraus, dass sie tatsächlich miteinander kombiniert werden können. Bei den aktuell verfügbaren Batterien ist dies, wie bereits skizziert, nicht der Fall: Sie zeichnen sich entweder durch (relative) Langlebigkeit oder durch hohe spezifische Energie aus, sind nur eingeschränkt schnellladefähig und nicht tiefentladefest. Allerdings schreitet die Batterieforschung schnell voran. Es stehen Technologien vor der Marktreife, die große Fortschritte bei der Realisierung aller oben genannten Batterieeigenschaften versprechen. Und auch mit bereits heute verfügbaren Akkus ist ambitioniertes Rightsizing möglich, das über den bloßen Suffizienz-Ansatz hinausgeht: Eben dadurch, dass das verfügbare Maß an Langlebigkeit, spezifischer Energie usw. bei der Technologiewahl und Speicherauslegung nachhaltigkeitsorientiert zum Tragen kommt.

Die Auslegung von Batteriespeichern ist keine triviale Aufgabe. Sie erfordert eine genaue Kenntnis des Anwendungsfeldes ebenso wie der operativen Betriebsstrategie. Auf dieser Basis kann in Verbindung mit den Merkmalen der zur Verfügung stehenden Batterietechnologien die jeweils erforderliche Speichergröße bestimmt werden. Bei Großanwendungen, wie z. B. Industriespeichern, lohnt sich in der Regel eine individuelle Batterieauslegung. Dabei gilt: Je besser die Batterieeigenschaften, desto stärker kann die Betriebsstrategie auf den operativen Betrieb abstellen; je schlechter, desto stärker fällt die Optimierung des Kompromisses zwischen Batteriealterung und Anwendungsfall ins Gewicht.

Rightsizing von Batteriespeichern hat schließlich einen erheblichen Einfluss auf deren Ökobilanz. Hier fließen die Umweltwirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus ein, von der Rohstoffgewinnung über die Veredelung, deren Verbau und Einsatz bis hin

Die Kombination der Eigenschaften ist entscheidend für das realisierbare Nachhaltigkeitspotenzial.

Die Betriebsstrategie des Anwendungsfalls bildet den Rahmen für die Batterieauslegung.

Aus der Batterieauslegung resultiert die erforderliche Mindestgröße als Grundlage einer vergleichbaren Ökobilanzierung.

zu Austausch und Entsorgung. Größere Batteriespeicher verbrauchen dabei offensichtlich mehr Rohstoffe als kleinere. Dennoch ist es von entscheidender Bedeutung, unterschiedliche Technologien vor dem Vergleich auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen. Dies ist in der Regel der Anwendungsfall und die daraus resultierende Batterieauslegung je nach Speichertechnologie. Ein Vergleich der Umweltwirkungen auf der Ebene des Energieinhalts gemessen in kWh ist dagegen bei ansonsten verschiedenen Batterietechnologien regelmäßig irreführend. Die Methode der Ökobilanzierung erlaubt hier in Verbindung mit der Batterieauslegung die Herstellung einer echten Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Speichertechnologien – auch über Batteriespeicher hinaus.

Die endgültige Speicherauswahl erfolgt schließlich in einem individuellen Spannungsfeld aus teilweise divergierenden Zielsetzungen. Dabei ist es mit Blick auf die Umweltwirkungen der Energiewende von gesamtgesellschaftlicher Relevanz, wie gut es gelingt, den Anforderungen der Batterieauslegung und der Umweltbilanz gleichermaßen nachhaltig durch ambitioniertes Rightsizing gerecht zu werden.

Die Entscheidung über die Speichertechnologie muss sich zukünftig viel mehr an der Nachhaltigkeit orientieren.

03 Auslegung von Batteriesystemen

Batteriespeicher finden im Kontext von Energiesystemen in zahlreichen Anwendungen ihren Einsatz. Dazu gehören zum Beispiel die Erhöhung der Eigennutzung von PV-Energie, die Reduktion von Lastspitzen, netzdienliche Betriebsweisen (Hesse, et al., 2017) oder kombinierte Ansätze (Müller, 2018). Bei diesen Anwendungen spielt die richtige Auslegung bzw. Dimensionierung der Parameter des Batteriesystems eine entscheidende Rolle, um die jeweilige übergeordnete Zielstellung – zum Beispiel Wirtschaftlichkeit, Effizienz oder Emissionsreduktion – zu erreichen.

Jede Batterietechnologie bringt spezifische Eigenschaften mit sich, welche die Auslegung beeinflussen. Ein elementarer Parameter ist dabei die Kapazität der Batterie, die den Energieinhalt limitiert, welcher der Anwendung zur Verfügung steht. Über die C-Rate (das Verhältnis des Be-/Entladestroms zur Batteriekapazität) (Bergholz, 2015) ist zudem die maximale Be- und Entladeleistung des Batteriesystems vorgegeben. Sie limitiert die verfügbare Leistung. Weitere Parameter, wie der arbeitspunktabhängige (d. h. von der abgerufenen Leistung abhängige) Wirkungsgrad der Wandler, die ladezustandsabhängige Maximalleistung der Batterie oder auch die Selbstentladungsrate des Batteriesystems, schränken die nutzbare Kapazität und Leistung in der Realität weiter ein. Diese Randbedingungen müssen bei der Auslegung von Batteriespeichern mitberücksichtigt werden.

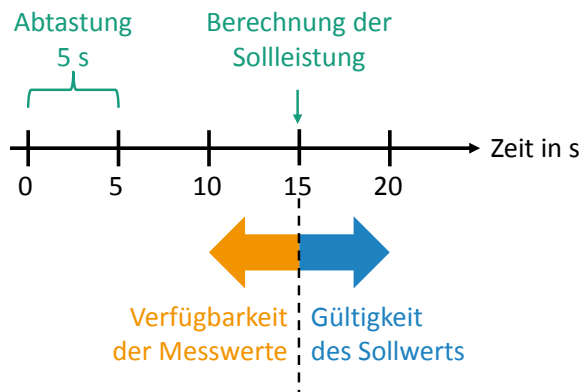
Betriebsstrategien müssen betrachtet werden

Für den Betrieb eines Batteriesystems ist eine Betriebsstrategie notwendig, welche die Leistungsanforderung an das System entsprechend der jeweils verfolgten Zielstellung berechnet. In der Betriebsstrategie tritt eine weitere Herausforderung auf: Während sich Messwerte aus dem Energiesystem (zum Beispiel die elektrische Bezugsleistung) stets auf ein bereits vergangenes Zeitintervall beziehen, liegt die Sollleistung eines Batteriesystems stets in der Zukunft (siehe Abbildung 2). Ob die Batterie diese Leistungsanforderung auch umsetzen kann, hängt von den oben beschriebenen Einschränkungen, vor allem vom Ladezustand des Speichers, ab. Wird also eine Leistungsanforderung an das Batteriesystem gestellt, muss anschließend geprüft werden, ob diese auch in der gewünschten Weise umgesetzt werden konnte und welche Auswirkungen sich auf die Regelgröße ergeben. Bei der Auslegung von Batterien muss die Betriebsstrategie somit mit abgebildet werden.

Batteriespeicher haben ein breites Anwendungsspektrum. Die richtige Auslegung ist entscheidend für die Erreichung der Zielstellung.

Eine Fülle von Parametern beeinflussen den praktischen Einsatz und damit die Auslegung der Batteriespeicher.

Entscheidend für jede Auslegung ist die Betriebsstrategie. Sie steckt den Rahmen für die Anforderungen an die jeweilige Batterietechnologie.



Beschreibung des Beispiels

- Annahme: Berechnung der Sollleistung bei 15 s
- Für die Berechnung stehen die vergangenen Messwerte zur Verfügung
- Bei einer Abtastung von 5 s kann beispielsweise der Mittelwert zwischen 10 und 15 s genutzt werden
- Der Sollwert ist dagegen ab dem Zeitpunkt der Berechnung gültig, hier zwischen 15 und 20 s

Abb. 2: Beispiel für die Verfügbarkeit von Messwerten und die Gültigkeit von Sollwerten bei einer Abtastung von 5 s

Anwendungsfall Lastspitzenreduktion

Industrieunternehmen und größere Verbraucher werden nach § 17 Abs. 6 StromNEV (Stromnetzentgeltverordnung) nicht nur nach der insgesamt vom Energieversorger bezogenen Energie abgerechnet. In die Abrechnung geht auch die jährliche – oder nach § 19 Abs. 1 StromNEV auch die monatliche, wenn ein sehr hoher zeitlich begrenzter Leistungsbezug vorliegt – Lastspitze mit ein. Diese entspricht dem höchsten im Abrechnungszeitraum aufgetretenen 15-Minuten-Mittelwert im Leistungsbezug. Für eine Lastspitze von 1,2 MW fallen bei einem Leistungspreis von 100 €/kW entsprechende leistungsbezogene Kosten in Höhe von 120.000 € an. Um Einsparungen in den leistungsbezogenen Kosten zu erzielen, müssen die Lastspitzen innerhalb eines Abrechnungszeitraums reduziert werden. Das Verhältnis zwischen den leistungs- und energiebezogenen Kosten hängt dabei vom zugrundeliegenden Lastgang ab: Bei einem Jahreslastgang mit wenigen sehr hohen Lastspitzen und einer geringen Grundlast spielt der Leistungspreis eine wesentlich größere Rolle als bei einem gleichmäßigeren Jahreslastprofil.

Sind bestimmte Voraussetzungen erfüllt, erlaubt die Stromnetzentgeltverordnung auch „individuelle Netzentgelte“, welche in § 19 Abs. 2 StromNEV geregelt sind. Diese ermöglichen eine Reduzierung des öffentlich ausgeschriebenen Netzentgelts um bis zu 90%. Eine Anwendung ist hierbei die atypische Netznutzung, bei welcher die Lastspitzenreduktion nur innerhalb vorgegebener Zeitfenster (sogenannte Hochlastzeitfenster) umgesetzt werden muss. Diese werden jährlich vom Netzbetreiber festgelegt. Im Gegensatz zur Ermittlung des allgemeinen Entgelts, bei welcher die Jahres- oder Monats-

Lastspitzenreduktionen sind wirtschaftlich attraktive Anwendungsfälle für stationäre Batteriespeicher.

Atypische und intensive Netznutzung lohnen sich sowohl für den Netzbetreiber als auch für den Stromkunden.

lastspitze ausschlaggebend ist, spielt bei der atypischen Netznutzung lediglich die höchste Lastspitze innerhalb der Hochlastzeitfenster eine Rolle. Die Lastspitzen müssen mindestens um eine festgelegte Mindestreduktion (sogenannte Erheblichkeitsschwelle) verringert werden. Eine weitere Möglichkeit für ein individuelles Netzentgelt ist die intensive Netznutzung, bei welcher die Erreichung von mindestens 7000 Jahresbenutzungsstunden angestrebt wird. Voraussetzung hierfür ist ein Energiebedarf über 10 GWh (Bundesnetzagentur, 2011). Liegt der erwartete Energiebedarf etwa bei 14 GWh, so wird diese Jahresbenutzungsdauer erreicht, wenn die Lastspitzen auf 2 MW reduziert werden. Grundsätzlich gilt: Je gleichmäßiger der Strombezug, desto höher ist die resultierende Jahresbenutzungsdauer t_{Benutz} .

$$P_{\text{max,15 min}} = \frac{E_{\text{Bezug}}}{t_{\text{Benutz}}} = \frac{14 \text{ GWh}}{7000 \text{ h}} = 2 \text{ MW}$$

Eine Lastspitzenreduktion führt bei erfolgreicher Anwendung auf Verbraucherseite zu Einsparungen bei den elektrischen Energiekosten. Darüber hinaus leistet sie aber auch einen Beitrag zur Entlastung der Stromnetze und Netzinfrastruktur, da diese für den maximalen Lastfall dimensioniert werden müssen. Die Reduktion der Lastspitzen trägt somit zur Vermeidung des Netzausbaus (Rahmann, et al., 2017) wie auch der Zuschaltung ineffizienter und teurer Spitzenlastkraftwerke (Van den Bergh & Delarue, 2015) bei.

Speicher können zu einer Reduktion des Netzausbaubedarfs beitragen und sind deswegen ein wichtiger Baustein für die Energiewende.

Auslegung von Batterien für die Lastspitzenreduktion

Um ein Batteriesystem optimal für die Lastspitzenreduktion einsetzen zu können, ist eine Dimensionierung unter Berücksichtigung der vorher beschriebenen Randbedingungen notwendig. Eine höhere Reduktion der Lastspitzen führt dabei nicht unbedingt zu einer höheren Wirtschaftlichkeit (Prasatsap, et al., 2017), weshalb auch das Preismodell in Betracht gezogen werden muss. Die Gegenüberstellung eines konventionellen („einfachen“) Auslegungsverfahrens, bei welchem ein ideales Batteriesystem und eine ideale Betriebsstrategie angenommen werden, mit einem Verfahren, bei welchem sämtliche Limitierungen modelliert und berücksichtigt werden, zeigt um bis zu 75 % unterdimensionierte Batteriekapazitäten sowie im Extremfall 43 % zu geringe Nennleistungen (Lange, et al., 2020). Die dabei verwendeten Lastgänge (siehe Abbildung 3) stellen verschiedene Szenarien dar:

Wirtschaftlichkeit und Zielerreichung der Betriebsstrategie hängen maßgeblich von der Dimensionierung der Speicher ab.

Lastprofil 1: Eine einzelne auftretende Lastspitze mit einer hohen Leistung, zum Beispiel durch Zuschaltung eines Großverbrauchers.

Lastprofil 2: Typisches Tageslastprofil, welches zum Teil stark von PV-Eigenerzeugung beeinflusst wird.

Lastprofil 3: Typisches Tageslastprofil mit periodischen Lastspitzen, zum Beispiel durch wiederholtes Zuschalten einer Produktionsanlage.

Lastprofil 4: Mehrere verschieden lange Lastspitzen mit unterschiedlicher Leistung als Kombination der Lastprofile 1 bis 3.

Das Auslegungsergebnis für die benötigte Kapazität basierend auf den skizzierten Lastgängen ist in Abbildung 4 dargestellt. Dabei wird die benötigte Batteriekapazität (y-Achse) abhängig von der gewählten Bezugsgrenze (x-Achse) aufgezeigt. Das einfache Auslegungsverfahren („konventionell“) zeigt gegenüber dem fortgeschrittenen Verfahren – bei diesem werden alle relevanten Randbedingungen der Batterie sowie ein Echtzeitalgorithmus berücksichtigt – stets zu geringe Kapazitäten auf. Die dabei verwendeten Betriebsstrategien wurden in einem Reallabor für dezentrale Energiesysteme am Fraunhofer IISB implementiert (Oechsner, et al., 2019) und erfolgreich validiert (Lange & Kucera, 2019). Weiterhin wird die Betriebsstrategie im Rahmen eines umfangreichen Lastmanagementsystems verwendet (Lange, et al., 2019).

Industriespeicher werden oftmals zu klein für die Zielerreichung ausgelegt. Dies gefährdet ihre Wirtschaftlichkeit.

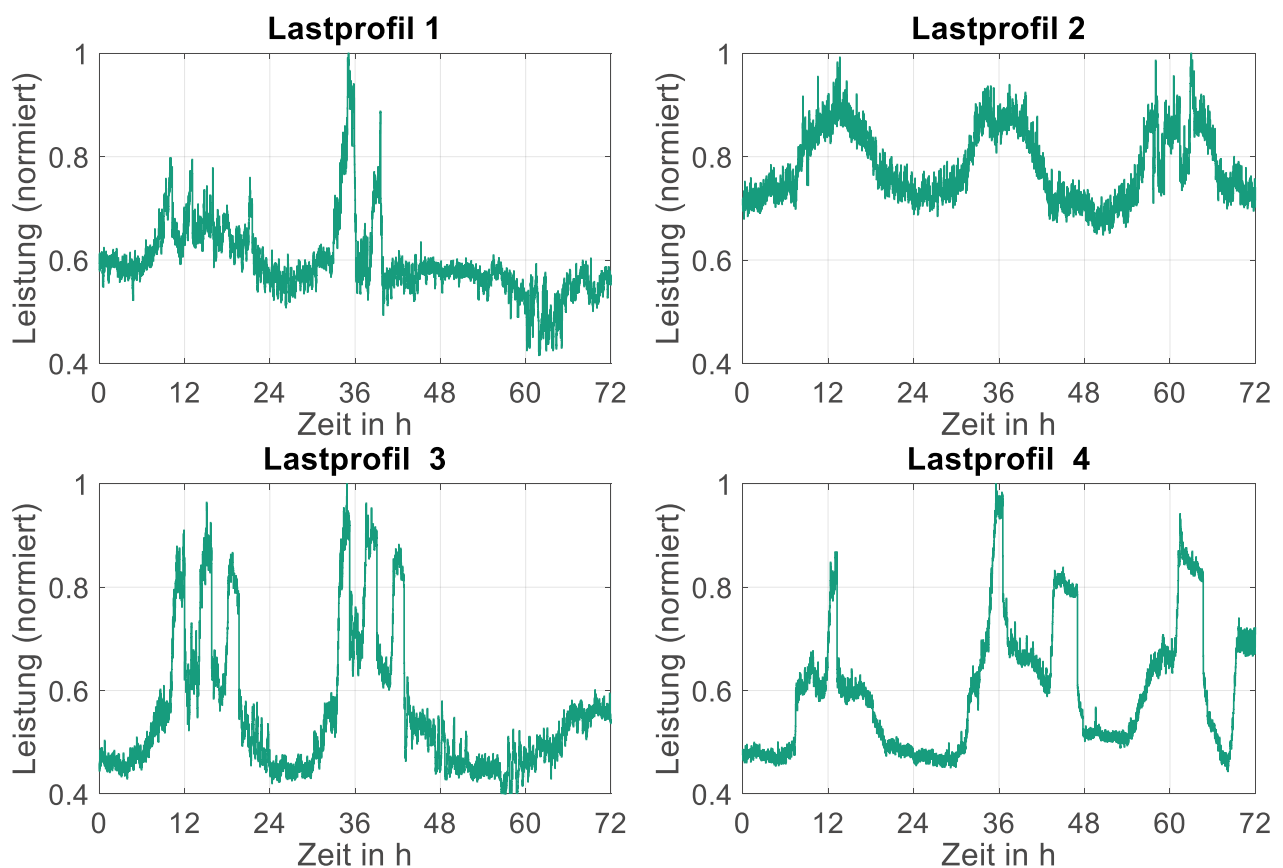


Abb. 3: Beispielhafte normierte Lastprofile als Grundlage für eine Auslegung eines Batteriesystems zur Lastspitzenreduktion, Darstellung übersetzt aus Lange et al. (Lange, et al., 2020)

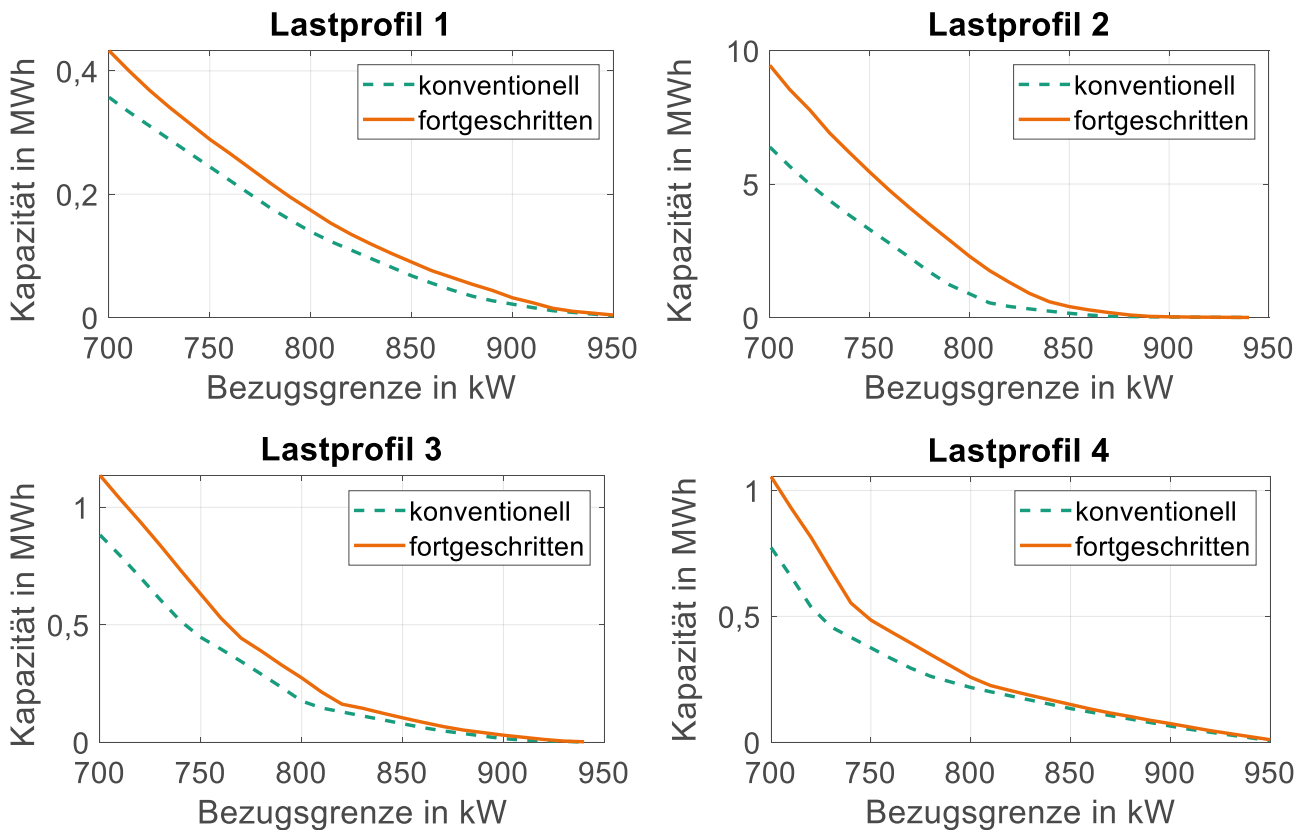


Abb. 4: Beispielhafte Auslegung der benötigten Batteriekapazität für vier Lastprofile auf Basis eines konventionellen und eines fortgeschrittenen Auslegungsverfahrens, Darstellung übersetzt aus Lange et al. (Lange, et al., 2020)

Berücksichtigung der Randbedingungen erhöht die Auslegungsgenauigkeit

Im Fall der beschriebenen Lastspitzenreduktionen kann eine unzureichende Batteriekapazität oder -leistung den bereits erfolgten Bemühungen des gesamten Abrechnungszeitraums entgegen spielen, wenn die entscheidende Lastspitze wegen fehlender Kapazität nicht erfolgreich reduziert werden konnte. Im Extremfall kann dies dazu führen, dass im Abrechnungszeitraum keine Einsparungen erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen somit, dass eine für den Anwendungsfall passende Auslegung unbedingt notwendig ist, um die angestrebten Ziele auch in der Realität zu erreichen. Dazu müssen sämtliche relevanten Randbedingungen abgebildet und eine umfassende Auswertung angestellt werden. Dies ist grundsätzlich auch auf andere Anwendungsfelder von Batteriespeichern sowie auf Kombinationen aus verschiedenen Zielstellungen übertragbar. Auch bei

Erst die Berücksichtigung aller Randbedingungen und spezifischen Eigenschaften ermöglicht eine Speicherauslegung im wirtschaftlichen Optimum.

Anwendungen wie der Eigenversorgungsoptimierung mit Energie aus PV und Wind ist diese Betrachtung essentiell und eröffnet im Kontext des gesamten Energiesystems hohe Potentiale für eine wirtschaftliche, aber auch umweltfreundliche Energieversorgung. Anstelle weniger großer Batteriespeicher ist ein Ansatz, dezentrale Speicher (umsetzbar zum Beispiel im Kontext der Ladeinfrastruktur, Stichwort „virtuelle Kraftwerke“) einzusetzen, um auch großflächige und „verteilte Energiesysteme“ optimal betreiben und nutzen zu können.

04 Ökobilanzierung als Grundlage von Nachhaltigkeitsbewertungen

Batteriespeicher für die Energiewende müssen zahlreiche Anforderungen erfüllen. Grundlegend sind technische und wirtschaftliche Aspekte wie Sicherheit, Langlebigkeit und Effizienz. Da sich die Energiewende am Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung orientiert, rücken weitere Anforderungen ins Blickfeld. Die ökologischen Nachhaltigkeitsziele Klima- und Ressourcenschutz stehen oftmals im Mittelpunkt der öffentlichen Debatte. Das Energiesystem der Zukunft soll nicht nur die problematischen Folgen der gegenwärtigen Energieversorgung lindern helfen, sondern auch keine neuen Probleme schaffen. Dies gilt selbstverständlich auch für die verwendeten Batteriespeicher.

Die Bewertung neuer Technologien mag auf den ersten Blick einfach erscheinen: Sind die leisen, (lokal) emissionsfreien Elektroautos nicht offensichtlich ökologisch vorteilhaft? Bei genauerer Betrachtung erweisen sich solche Aussagen jedoch als sehr anspruchsvoll. Denn oftmals sind Technikfolgen nicht offensichtlich: Sie können zeitlich oder räumlich weit entfernt auftreten oder durch ein komplexes Wechselspiel von Faktoren überhaupt erst entstehen. Batterierohstoffe werden in fernen Weltgegenden mit teilweise gravierenden Umweltfolgen gewonnen; für die künftige Entsorgung der Speicher müssen effektive Recyclingverfahren erst noch entwickelt werden. Vor diesem Hintergrund wird verständlich, dass Nachhaltigkeitsbewertungen wissenschaftlich fundiert sein müssen, um zu belastbaren Ergebnissen führen zu können.

Die Methode der Ökobilanzierung stellt eine solche wissenschaftliche Basis für Nachhaltigkeitsbewertungen zur Verfügung (Umweltbundesamt, 2018). Eine Ökobilanz hat den Anspruch, sämtliche relevanten Umweltwirkungen eines Untersuchungsgegenstandes zu bestimmen. Dies umfasst zweierlei: Erstens wird der gesamte Lebenszyklus des Untersuchungsgegenstands „von der Wiege bis zur Bahre“ in den Blick genommen, d. h. von der Produktion bis zur Entsorgung bzw. Wiederverwertung. Zweitens werden für jeden Abschnitt des Lebenszyklus die zugehörigen Stoff- und Energieflüsse so weit zurückverfolgt, wie sie relevant und maßgeblich sind. Nicht nur die Nutzungsphase etwa eines Elektroautos ist also von Belang, sondern ebenso seine Herstellung und Entsorgung; und nicht nur die Treibhausgas-Emissionen bei der Produktion der Traktionsbatterie werden in den Blick genommen, sondern auch jene, die bei der Gewinnung sämtlicher relevanter Vorprodukte anfallen.

Gut gemeint ist nicht zwingend gut gemacht: Nur mit fundierten Methoden gelangt man zu belastbaren Nachhaltigkeitsbewertungen.

Die Ökobilanzierung ermöglicht eine umfassende Berücksichtigung aller relevanten Umweltwirkungen und ist wissenschaftlich anerkannt.

Ökobilanzen dienen unterschiedlichen Zwecken. Zunächst einmal können sie dafür sorgen, relevante Umweltfolgen eines Produkts überhaupt erst ins Bewusstsein zu rufen. Dies ist – und darin liegt der zweite Anwendungszweck – eine wichtige Voraussetzung dafür, Produktionsprozesse und Nutzungsweisen nachhaltiger zu gestalten: Wenn bekannt ist, an welchen Stellen besonders hohe (oder besonders leicht zu vermeidende) Emissionen auftreten, können Verbesserungen auf effiziente Weise erreicht werden. Drittens werden Ökobilanzen für Vergleiche von Produkten und Verfahren angewandt. Sie sorgen dafür, dass Bewertungen nicht bei den offensichtlichen Technikfolgen stehen bleiben, sondern im wahrsten Sinne umfassend erfolgen: wissenschaftlich fundiert, unter Berücksichtigung aller relevanter Folgen über den gesamten Lebensweg.

Dies macht Ökobilanzen zu einem wertvollen Werkzeug gerade auch für gesellschaftliche Diskussionen und politische Entscheidungen. Hinzu kommt ein weiterer Pluspunkt der Methode: Sie wird seit den 1970er Jahren angewandt und ist seit langem auch in den ISO-Standards 14040 und 14044 international normiert (DIN EN ISO 14040, 2009) (DIN EN ISO 14044, 2018). Das heißt: Ökobilanzen, die diesen Normen entsprechen, weisen ein hohes Maß an Vergleichbarkeit auf, da Vorgehensweise und Datenbasis geteilt sind. Das bedeutet freilich nicht, dass ökobilanzielle Vergleiche zeigen könnten, welches Produkt in jeder Hinsicht und unbestreitbar das Bessere ist. Sie betreffen, wie ihr Name schon sagt, nur die ökologische Bewertungsdimension, nicht technische, wirtschaftliche oder andere Gesichtspunkte. Insbesondere aber müssen für jede Ökobilanz Annahmen und Setzungen getroffen werden, die das Ergebnis maßgeblich prägen.

Eingebettet in einen argumentativen Rahmen sind Ökobilanzen wertvolle Werkzeuge für gesellschaftliche Diskussionen und politische Entscheidungen.

Grundzüge der Ökobilanzierung

Jede normkonforme Ökobilanz umfasst vier Schritte: (1) Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, (2) Erstellung der Sachbilanz, (3) Abschätzung der Umweltwirkungen sowie (4) Interpretation und Auswertung.

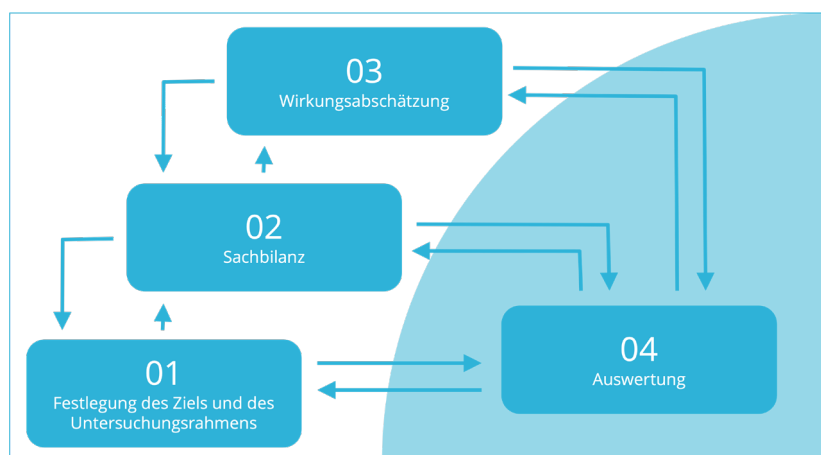


Abb. 5: Phasen einer Ökobilanz (in Anlehnung an DIN EN ISO 14040, 2009)
Quelle: Eigene Darstellung

(1) Die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen prägt den gesamten Gang der Untersuchung erheblich – sie muss deshalb mit besonderer Sorgfalt erfolgen. Dreh- und Angelpunkt vergleichender Ökobilanzen ist die so genannte funktionelle Einheit. Es handelt sich dabei um eine quantitative Bezugsgröße, auf die hin die alternativen Produkte oder Prozesse untersucht und letztlich miteinander verglichen werden (Graubner & Pohl, 2015). Geht es etwa um die ökologische Vorteilhaftigkeit von Stoff- oder Wegwerfwindeln, käme als funktionelle Einheit „eine Windel“ oder „eine Kindheit mit Windel“ in Frage. Der Unterschied ist beträchtlich: Kinder mit Stoffwindeln werden erheblich früher „trocken“, die Anzahl der Windeln pro Kindheit ist entsprechend geringer. Hier muss, wie immer in Ökobilanzen, reflektiert und begründet werden, welche funktionelle Einheit für den Anwendungsfall der Studie sinnvoll oder ggf. sogar obligatorisch ist.

Ferner geht es um die Systemgrenzen der Ökobilanz: Was liegt innerhalb, was außerhalb des Untersuchungsrahmens? Endet die Analyse mit der Entsorgung eines Produkts, oder sollen Recycling und (partielle) Wiederverwertung mit einbezogen werden? Begrenzend wirkt zudem die Wahl der Abschneidekriterien: Welche Inputs und welche Outputs können vernachlässigt werden und welche nicht? Beeinflusst ein Faktor die Aussage der Ökobilanz nicht mehr wesentlich, lässt sich Aufwand einsparen. Aufgrund ihrer prägenden Funktion für die gesamte Untersuchung ist eine transparente Dokumentation all dieser Setzungen unerlässlich.

(2) Im Rahmen der Sachbilanz werden alle maßgeblichen Input- und Output-Flüsse über den gesamten Lebensweg eines Produktsystems quantifiziert (Umweltbundesamt, 2018). Zu diesen Input-Flüssen zählen u. a. die Roh- und Grundstoffe für alle Teile des Produkts. Bei den Output-Flüssen werden nicht nur Treibhausgasemissionen, sondern auch Abfälle und sonstige Umweltwirkungen berücksichtigt. Diese Inventur des Untersuchungsgegenstands mündet in die Berechnung der entsprechenden Sachbilanzergebnisse.

Die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen prägt die folgenden Schritte einer Ökobilanz erheblich.

„From cradle to grave“: Die Sachbilanz leistet eine Inventur des Untersuchungsgegenstandes über dessen gesamten Lebensweg.

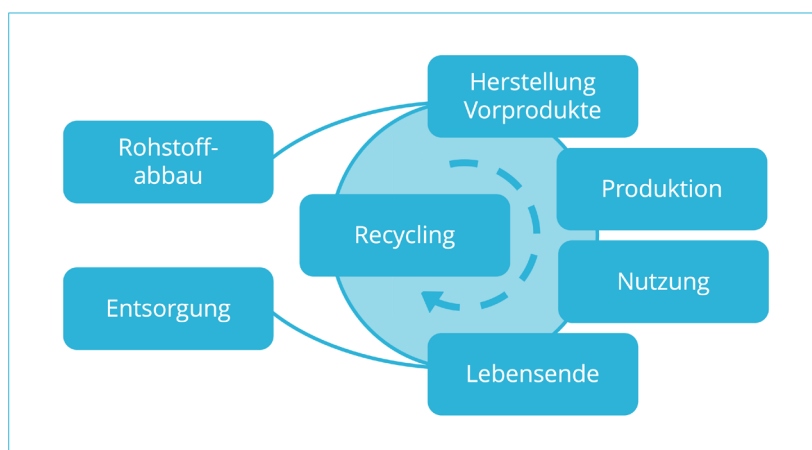


Abb. 6: Ganzheitliche Bilanzierung in Anlehnung an den Ökobilanz-Kreislauf (Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), 2020)
Quelle: Eigene Darstellung

(3) Bei der Wirkungsabschätzung werden die quantifizierten Sachbilanzdaten bestimmten ökologischen Wirkungskategorien zugeordnet. Zu den gängigen Wirkungskategorien gehören insbesondere:

- Primärenergie nicht-erneuerbar (PEne): Summe des Primärenergieverbrauchs nicht erneuerbarer Energien (Stein- und Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran) im Zusammenhang mit Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines ökonomischen Gutes.
- Primärenergiebedarf erneuerbar (PEe): Summe des Primärenergieverbrauchs erneuerbarer Energien (Biomasse, Sonnenstrahlung, Erdwärme, Wasser- und Windkraft) im Zusammenhang mit Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines ökonomischen Gutes. Zusammen mit PEne ergibt sich der Gesamtprimärenergieverbrauch eines ökonomischen Gutes.
- Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP): Summe der Gasemissionen, die zum Treibhauseffekt beitragen.
- Ozonschichtabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP): Summe der ozonschädigenden Potenziale der ozonabbauenden Stoffe (u.a. Halogenkohlenwasserstoffe wie FCKW und Stickoxide (NOX)).
- Ozonbildungspotential (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP): Summe der Potenziale bestimmter Spurengase (z.B. Stickoxide und Kohlenwasserstoffe), unter Einwirkung von UV-Strahlung bodennahes Ozon zu bilden. Sie entstehen bevorzugt bei unvollständiger Verbrennung, beim Umgang mit Ottokraftstoffen und bei Eintritt von organischen Lösungsmitteln in die Luft. Der resultierende Effekt wird auch als Sommermog bezeichnet.
- Versauerungspotential (Acidification Potential, AP): Wirkung von Emissionen (u.a. Schwefeldioxid und Stickoxide) auf die Versauerung der Böden durch Auswaschung aus der Atmosphäre.
- Überdüngungspotential (Eutrophication Potential, EP): Summe des Eintrags von Emissionen (u.a. Phosphor- und Stickstoffverbindungen) als Nährstoffe in Böden und Gewässer.

Diesen Vorgang der Verknüpfung von Sachbilanzdaten mit Wirkungskategorien bezeichnet man auch als Klassifizierung. Zum Treibhausgaspotential beispielsweise gehören nicht nur Emissionen von CO₂, sondern auch von Methan und einigen weiteren Klimagasen. Anschließend werden die Wirkungskategorien im Zuge der sogenannten Charakterisierung in adäquate Wirkungskategorie-Indikatoren übersetzt. So wird beispielsweise das Treibhauspotential in CO₂-Äquivalenten (CO₂-eq.) ausgedrückt. Dieser Indikator

Die Wirkungsabschätzung ordnet die Sachbilanz-ergebnisse bestimmten Umweltwirkungen zu. Anerkannte Datensätze sorgen für Vergleichbarkeit.

Indikatoren können verschiedene Effekte derselben Wirkungskategorie auf einen gemeinsamen Nenner bringen.

umfasst somit sämtliche Klimagasemissionen, gleichsam auf einen gemeinsamen Nenner gebracht.

Ein Beispiel: Das Treibhauspotential (GWP) einer kWh Strom nach deutschem Strommix wird vom einschlägigen Ökobilanz-Datensatz mit 0,54kg CO₂-eq. pro kWh charakterisiert ([Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat \(BMI\), 2020](#)). Mittlerweile gibt es für viele Produkte allgemein anerkannte Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declaration, EPD), die diese Charakterisierung für eine Verwendung in der Ökobilanzierung enthalten.

(4) Die abschließende Auswertung und Interpretation einer Ökobilanz dient in erster Linie der Ableitung von Schlussfolgerungen und der verständlichen Ergebnisdarstellung. Berichterstattung und kritische Prüfung als integrale Bestandteile einer Ökobilanz sind wichtig für die Kommunikation von Ökobilanz-Ergebnissen und deren Integration in Handlungsentscheidungen.

Auswertung, Interpretation, Berichterstattung und kritische Prüfung sind integrale Bestandteile einer Ökobilanzierung und wichtig für die Kommunikation der Ergebnisse.

Ökobilanzierung von Batteriespeichern

Möchte man Batterietechnologien miteinander vergleichen, muss die funktionelle Einheit die spezifischen Eigenschaften der betrachteten Technologien berücksichtigen. Herausforderungen ergeben sich dabei vor allem aus den unterschiedlichen Alterungseffekten: Jede Technologie hat spezifische maximal erreichbare Zyklenzahlen, Degradationsmechanismen sowie Lade- und Entladeverluste. So kann es ökobilanziell einen entscheidenden Unterschied machen, ob die zwischengespeicherte Energie pro Ladezyklus oder die zwischengespeicherte Energie über die gesamte Lebensdauer des Batteriespeichers betrachtet wird.

Eine funktionelle Einheit, die all diese Faktoren auf einen gemeinsamen Nenner bringen kann, ist die effektiv zwischengespeicherte Energie über die gesamte Nutzungsphase, gemessen in kWh (kWh_{eff.}). Sie ermöglicht den Vergleich der Umweltwirkungen nicht nur zwischen unterschiedlichen Batterietechnologien, sondern auch zwischen verschiedenen Speichertechnologien. Dabei geht es um die Frage, wieviel Energie für den betrachteten Anwendungsfall tatsächlich aus dem Speichersystem (netto) entnommen werden kann. Beim Vergleich eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs mit einem batterieelektrischen Fahrzeug (Battery-Electric Vehicle, BEV) kommt es also nicht auf einen Reichweitenvergleich einer Tankfüllung an. Vielmehr ergeben sich die Umweltwirkungen aus allen Schritten, die für die effektiv erzielte Fahrleistung erforderlich sind – von den Rohstoffen über Herstellung und Gebrauch bis hin zur Entsorgung.

Die effektiv über die Nutzungsphase zwischengespeicherte Energie (kWh_{eff.}) eignet sich als funktionelle Einheit, um unterschiedliche Technologien vergleichbar zu machen.

Vor der Festlegung des Untersuchungsrahmens (und damit auch der zu analysierenden Prozessschritte) muss entschieden werden, welcher Anwendungsfall überhaupt in den Blick genommen werden soll. Es kann keine pauschale Ökobilanz für alle Anwendungsfälle einer Speichertechnologie geben: Die Assemblierung einer Vielzahl einzelner Speicherzellen zu Speichermodulen, die Integration des erforderlichen Speichermanagementsystems und der Einbau in die Applikation (z.B. in ein Fahrzeug oder in eine Immobilie) müssen immer für den konkreten Anwendungsfall betrachtet werden. Für Vergleiche bietet es sich an, auf die Ebene der Speicherzellen zu gehen. Diese sind eigens spezifiziert und können in unterschiedlichen Speicheraufbauten verwendet werden. In Verbindung mit einer angemessenen Modellierung des gesamten Lebenszyklus kann die Zellebene somit als universelle Bezugsbasis für ökobilanzielle Technologievergleiche dienen.

Die ISO-Normen zur Ökobilanzierung nehmen nur eine recht grobe Gliederung von Lebenszyklen vor. Für die Anwendung in Studien, etwa zur Analyse von Energiespeichern, ist es zweckmäßig, eine Detaillierung vorzunehmen. Hierzu bietet es sich an, auf eine Struktur zurückzugreifen, die im Feld der Ökobilanzierung von Gebäuden entwickelt worden ist. Sie stellt auch darüber hinaus einen anerkannten Bezugsrahmen dar (s. Abb. 7). Zudem lassen sich den Arbeiten aus der Baubranche eine Fülle an detaillierten Basis-Datensätzen entnehmen (DIN EN 15978, 2012) (DIN EN 15804, 2020).

Der Anwendungsfall bestimmt den Untersuchungsrahmen, die einzelne Batteriezelle steht dann im Zentrum des Technologievergleichs.

Die Baubranche ist ein wichtiger Vorreiter der Ökobilanzierung: Sie liefert einen anerkannten Bezugsrahmen, der auch für Technologievergleiche von Batterietechnologien eingesetzt werden kann.



Abb. 7: Lebenszyklusphasen (in Anlehnung an DIN EN 15978, 2012 und DIN EN 15804, 2020) Quelle: Eigene Darstellung

Die Herstellungsphase bildet die erste zu betrachtende Lebenszyklusphase. Darunter fallen (1) die Gewinnung aller für die Speicherzelle erforderlichen Roh- und Grundstoffe, (2) deren Transport zum Ort der Produktion und (3) die Weiterverarbeitung und Zusammensetzung zur fertigen Zelle. Sowohl für die Rohstoffgewinnung (z. B. Nickel, Lithium etc.) als auch für Transportwege (See- und Binnenschifffahrt, Bahn, Flugzeug und Straße einschließlich Auslastungsgrade und Leerfahrten) sind Basisdaten für Ökobilanzen verfügbar. Neben der Zutatenliste einer Batterietechnologie beeinflussen auch deren Energiedichte und Tiefentladefähigkeit die benötigten Rohstoffmengen. Sie wirken damit vor allem in der Herstellphase. Mit Blick auf den Prozessschritt der Zusammensetzung der Speicherzelle werden der nötige Einsatz an Energie und Betriebsmitteln (Inputs) sowie die Entstehung und Entsorgung von Nebenprodukten (Outputs) wie z. B. Abfällen berücksichtigt.

Die Nutzungsphase bildet die zweite und zentrale zu betrachtende Lebenszyklusphase. Hier wird vor allem der Energieverbrauch im Betrieb des Batteriespeichers betrachtet. Kapazitätsabnahme, Innenwiderstandszunahme, Schnellladefähigkeit und Zyklenfestigkeit haben Auswirkungen auf das Alterungsverhalten der Batterie und wirken sich damit vor allem auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase aus. Je länger der Betrachtungszeitraum, desto dominanter wird der Effekt der Nutzungsphase auf die Ökobilanz. Bereits für kurze Lebenszyklen zeigt der Vergleich von Speichertechnologien, dass die Nutzungsphase der Haupttreiber der Umweltwirkungen ist – nicht der viel zitierte „Rucksack“, mit dem die Technologien aus der Herstellphase herauskommen.

Die Entsorgungsphase modelliert schließlich das Ende des Lebenszyklus der Speicherzellen: Dazu zählen (1) der Ausbau und Rückbau der Batterien, (2) der Transport zur Sammelstelle, (3) die eigentliche Abfallbehandlung und schließlich (4) die Deponierung der nicht wiederzuverwertenden Bestandteile.

Werden die bis hierher betrachteten Speicherzellen in einen konkreten Anwendungsfall verbaut, so macht dies eine Erweiterung der ökobilanziellen Betrachtung erforderlich. Hinzu kommt etwa die Errichtungsphase, die den Transport zum Aufstellort des Speichers und dessen Aufbau umfasst. Die Nutzungsphase erweitert sich um die Bausteine (1) Inspektion, Wartung und Reinigung, (2) Reparatur, (3) Austausch und Ersatz sowie (4) Modernisierung. Auch der zusätzliche Wasserverbrauch wird miterfasst.

Vor allem die Berücksichtigung des unterschiedlichen Alterungsverhaltens verschiedener Speichertechnologien über den Nutzungszeit-

Die verwendeten Rohstoffe sowie die Batterieeigenschaften Energiedichte und Tiefentladefähigkeit wirken vor allem in der Herstellphase.

Die Batterieeigenschaften Kapazitätsabnahme, Innenwiderstandszunahme, Schnellladefähigkeit und Zyklenfestigkeit beeinflussen das Alterungsverhalten und bestimmen den Energieverbrauch in der Nutzungsphase.

raum kann Austausch und Ersatz erfordern. Normiert man die Betrachtung auf dieser Basis, so stellt sich die Frage, wieviel Kapazität der jeweiligen Technologie effektiv benötigt wird, um dasselbe Zwischenspeicherergebnis zu erzielen. Ein Beispiel: Vergleicht man Batterietechnologien, die mit Ausnahme der Alterung ähnlich sind, so ist es naheliegend, dass man für dieselbe Speicherleistung mehr kurzlebige als langlebige Batterien benötigt. Entsprechend muss die Ökobilanz der schnell alternden Technologie mehr Speicherzellen für denselben Anwendungsfall berücksichtigen. Für den konkreten Austauschbedarf im Technologievergleich gilt: Je intensiver die Nutzung des Batteriespeichers, desto höher ist der Austauschbedarf der Batteriezellen mit den ungünstigeren Eigenschaften. Entflammbarkeit und Explosionsgefahr wirken nur im Schadensfall und werden in der Logik einer Ökobilanzierung aufgrund der Vielzahl von Präventionsmaßnahmen nicht weiter berücksichtigt.

Schließlich gibt es weitere Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze: Etwaige sekundär- und/oder energierohstoffliche Potentiale aus der Wiederverwertung, Rückgewinnung und dem Recycling liegen nicht mehr innerhalb der Systemgrenzen und sind ökobilanziell ggf. einem neuen Produkt oder Prozess zuzuordnen.

Wie wichtig die abschließende Auswertung und Interpretation einer Ökobilanz ist, zeigt sich in der Debatte um die Mobilität der Zukunft. Ein gutes Beispiel dafür bietet die Studie des deutschen Ökonomen Hans Werner Sinn und seiner Co-Autoren über den Vergleich von Diesel-Motoren und Elektromobilität (Buchal, 2019) sowie die daran anschließende Kontroverse (Diethelm, 2019) (Hajek, 2019). Kritik wurde vor allem an der Auswahl der Fahrzeuge, dem Laborwert-Verfahren, der angenommenen Batterie-Lebensdauer, dem End-of-life-Szenario, der Berücksichtigung der Bauteile und der zugrunde gelegten Energiequellen geäußert (Schwierz, 2019). Die Abweichungen dieser zu den Ergebnissen anderer Studien unterstreichen die Bedeutung einer sorgfältigen Auswahl und transparenten Kommunikation der Prämissen für jeden Technologievergleich (Agora Verkehrswende, 2019).

Für den Technologievergleich ist die Frage entscheidend, wieviel Kapazität der jeweiligen Speichertechnologie effektiv benötigt wird, um dasselbe Zwischenspeicherergebnis zu erzielen. Entflammbarkeit und Explosionsgefahr wirken nur im Schadensfall.

Die Ergebnisse von Ökobilanzen werden kontrovers diskutiert. Umso wichtiger ist eine sorgfältige Prämissensetzung bei der Festlegung der Ziele und des Untersuchungsrahmens.

Ökobilanzierungen als Gütesiegel

Eine Ökobilanzierung ist kein Selbstzweck. Sie hat nicht nur die Aufgabe, eine umfassende Umweltbewertung zu ermöglichen und die getroffenen Aussagen nachvollziehbar und damit überprüfbar zu machen. Darüber hinaus entwickelt sie sich zunehmend zum Differenzierungsfaktor und Alleinstellungsmerkmal im Wettbewerbsvergleich von Technologien. Eignen sich wasserstoffbasierte oder rein batterieelektrische Antriebe unter ökologischen Gesichtspunkten besser für den LKW-Verkehr? Und, mit Blick auf rein batterieelektrische Antriebe: Welche Batterie (Technologie, verwendete Rohstoffe, Produktionsverfahren usw.) ist ökologisch die vorteilhafteste? Diese Arten von Fragen lassen sich mit Hilfe von Ökobilanzen umfassend und wissenschaftlich fundiert beantworten. Dadurch lassen sich Alleinstellungsmerkmale generieren, die sowohl auf der Anbieter- als auch auf der Konsumentenseite nutzbar sind.

Speichertechnologien können sich die Ökobilanzierung auch in Form eines Gütesiegels zu Eigen machen – sogar auf der Ebene derselben Technologie: Erfolgt durch einen Hersteller die Verwendung von Rohstoffen aus kritischer Herkunft, bedeutet dies einen Nachteil im Vergleich zu einem Wettbewerber, der seine Rohstoffe aus nachhaltigeren Quellen bezieht. Mit einer verpflichtenden Ökobilanzierung haben Technologieanbieter damit ein wichtiges Gestaltungselement in der Hand, um den Energiewandel in jeder Hinsicht nachhaltig zu beeinflussen.

Auch hier kann die Bauindustrie als Vorbild dienen: Das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen hat sich zum führenden Zertifizierungssystem für nachhaltige Gebäude entwickelt. Dabei geht es um die Bewertung von Gebäuden z.B. hinsichtlich ihrer ökologischen Nachhaltigkeit – ein Themenfeld also, dem eine gewisse Nähe zu einer Vielzahl von Anwendungsfällen von Speichertechnologien unterstellt werden kann.

Eine Ökobilanzierung kann entscheidende Wettbewerbsvorteile schaffen: Immer häufiger sind die mit einem Produkt verbundenen Umweltwirkungen entscheidungsrelevant.

Auch bei der Verwendung von Gütesiegeln kann die Bauindustrie Vorbild für Speichertechnologien sein.

05 Fazit und Ausblick

Rightsizing ist ein wichtiger Baustein für die nachhaltigkeitsorientierte Nutzung von Batteriespeichern. Um sein volles Potenzial auszuschöpfen, muss Rightsizing jedoch über bloße Suffizienz hinausgehen – indem die Rolle von spezifischer Energie, Langlebigkeit, Schnellladefähigkeit und Tiefentladefestigkeit für die Batteriedimensionierung reflektiert und in der Praxis berücksichtigt wird. Dies ist bereits bei heute verfügbaren Akkus möglich und wünschenswert. Insbesondere jedoch sollte es darum gehen, in der Batterieforschung und -entwicklung ebendiesen Eigenschaften einen gebührenden Stellenwert zuzuordnen.

Ambitioniertes Rightsizing kann dazu beitragen, den Energie- und Ressourcenbedarf von der Wiege bis zur Bahre deutlich zu senken. Zugleich erhöht sich auch die praktische und wirtschaftliche Attraktivität der verwendeten Batterietechnologie ganz erheblich: Die Reduktion von Größe und Masse des Batteriespeichers sind für zahlreiche (nicht nur mobile) Anwendungen von entscheidendem Vorteil. Und neue Anwendungsfelder und -möglichkeiten (etwa die Bündelung verschiedener Anwendungsfälle auf einer geteilten Infrastruktur, Plattform-Ansatz) können erschlossen werden.

Die Forderung der Automobilindustrie nach Batterien zu einem Preis von 60 USD/kWh stellt im gegenwärtigen Technologieumfeld einen deutlichen Gegenentwurf dazu dar, da derartige Preispunkte vor allem zulasten der Langlebigkeit gehen. Gleichzeitig ist die Kompensation der Umweltwirkungen in diesem Preis nicht enthalten. Vielmehr werden die Kosten auf die Allgemeinheit übertragen ([Deloitte, 2020](#)).

Der Realisierung der technischen und ökonomischen Synergiepotenziale des Plattformansatzes steht jedoch vielfach die aktuelle Regulierung entgegen. Bis dato werden Speicher nämlich als Verbraucher eingestuft und damit sowohl beim Laden als auch beim Entladen mit Netzentgelten belastet – ein Umstand, der für eine erfolgreiche Energiewende dringend behoben werden muss. Für eine adäquate Nutzung von Speichertechnologien ist deren Akzeptanz als vierte Säule der Energieversorgung notwendig. Nur so können Erzeugung und Verbrauch bei wachsendem Anteil erneuerbarer Energien im Energiemix zum Ausgleich gebracht und damit eine bezahlbare Versorgungssicherheit gewährleistet werden ([Bundesverband Energiespeichersysteme e.V. \(BVES\), 2020](#)).

06 Literatur

Agora Verkehrswende, 2019. Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial.. [Online]

Available at: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf

[Zugriff am 08 09 2021].

Barske, H., 2020. Die Energiewende zwischen Wunsch und Wirklichkeit: die Natur setzt unserer Freiheit Grenzen. München: oekom verlag.

Bergholz, T., 2015. Lithiumbatterien für stationäre und mobile Anwendungen: Benchmarking und experimentelle Umsetzung. ISBN: 978-3-95806-07: RWTH Aachen.

Bossert, L., Voget-Kleschin, L. & Meisch, S., 2020. Damit gutes Leben mit der Natur einfacher wird: Suffizienzpolitik für Nachhaltigkeit. Marburg: Metropolis-Verlag.

Buchal, C. K. H.-D. S. H.-W., 2019. Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz?. [Online]

Available at: https://www.hanswernersinn.de/dcs/sd-2019-08-sinn-karl-buchal-motoren-2019-04-25_0.pdf

[Zugriff am 08 09 2021].

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), 2020. Ökobau.dat. [Online]

Available at: www.oekobaudat.de

[Zugriff am 08 09 2021].

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2021. Unsere Energiewende: sicher, sauber, bezahlbar. [Online]

Available at: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html>

[Zugriff am 08 09 2021].

Bundesnetzagentur, 2011. Leitfaden zur Genehmigung von individuellen Netzentgelten nach § 19 Abs. 2 S. 1 StromNEV und von Befreiungen von den Netzentgelten nach § 19 Abs. 2 S. 2 StromNEV.. [Online]

Available at: <https://www.bonn-netz.de/Stromnetz/Preisblaetter/Preisblaetter/201109-Leitfaden-19-StromNEV-NetzA.pdf>

[Zugriff am 08 09 2021].

Bundesverband Energiespeichersysteme e.V. (BVES), 2020. BVES legt Branchenzahlen 2019 der Energiespeicherindustrie vor. [Online]

Available at: https://www.bves.de/bves_branchenzahlen_2020/

[Zugriff am 08 09 2021].

C.A.R.M.E.N. e. V., 2021. Marktübersicht Batteriespeicher 2021. [Online]
Available at: <https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktuebersicht-batteriespeicher/>
[Zugriff am 17 08 2021].

Chargemap, 2021. Elektroauto-Batterie: 6 Fehler, die Sie vermeiden sollten, um sie zu schonen. [Online]
Available at: <https://blog.chargemap.com/de/elektroauto-batterie-fehler-sie-vermeiden-sollten/>
[Zugriff am 08 09 2021].

CIC energiGUNE, 2021. Gigafactories: Europe's major commitment to economic recovery through the development of battery factories. [Online]
Available at: <https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories>
[Zugriff am 08 09 2021].

Deloitte, 2020. Elektromobilität in Deutschland. Studie: Marktentwicklung bis 2030 und Handlungsempfehlungen. [Online]
Available at: <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/consumer-industrial-products/articles/elektromobilitaet-in-deutschland.html>
[Zugriff am 08 09 2021].

Diethelm, M., 2019. Studie zu Klima-Folgen. Ifo-Institut rechnet E-Autos schlecht – und macht dabei viele Fehler. [Online]
Available at: https://www.focus.de/auto/elektroauto/studie-zu-klima-folgen-ifo-institut-rechnet-e-autos-schlecht-und-macht-dabei-viele-fehler_id_10611851.html
[Zugriff am 08 09 2021].

DIN EN 15804, 2020. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag.

DIN EN 15978, 2012. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag.

DIN EN ISO 14040, 2009. Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag.

DIN EN ISO 14044, 2018. Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag.

Flassbeck, H., 2020. Der begrenzte Planet und die unbegrenzte Wirtschaft: lassen sich Ökonomie und Ökologie versöhnen? Frankfurt/Main: Westend .

Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), 2020. Ökobilanzierung. [Online]
Available at: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/ganzheitliche-bilanzierung/methoden-ganzheitliche-bilanzierung/oekobilanzierung.html>

[Zugriff am 08 09 2021].

Graubner, C.-A. & Pohl, S., 2015. Ist vereinfacht vollständig genug? – Spannungsfeld der Ökobilanzverfahren des Deutschen Gütesiegels Nachhaltiges Bauen. Bauingenieur, Band 90.

Hajek, S., 2019. Ist das E-Auto ein Rückschritt? Was Hans-Werner Sinn bei seiner Elektroauto-Studie übersehen hat. [Online]

Available at: <https://www.wiwo.de/technologie/mobilitaet/ist-das-e-auto-ein-rueckschritt-was-hans-werner-sinn-bei-seiner-elektroauto-studie-uebersehen-hat/24237236.html>

[Zugriff am 08 09 2021].

Henßler, S., 2020. Mazda MX-30 setzt auf Rightsizing – sowohl beim Akku als auch beim Preis. [Online]

Available at: <https://www.elektroauto-news.net/2020/mazda-mx-30-rightsizing-akku-preis>

[Zugriff am 08 09 2021].

Hesse, H., Schimpe, M., Kucevic, D. & Jossen, A., 2017. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. Energies 10 (12), p. 2107.

Huber, J., 1994. Nachhaltige Entwicklung durch Suffizienz, Effizienz und Konsistenz, Halle (Saale): Institut für Soziologie.

Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V., 2021. C-Koeffizient. [Online]

Available at: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/c-koeffizient/>

[Zugriff am 08 09 2021].

Lange, C. & Kucera, G., 2019. Erfolgreiche Lastspitzenreduktion durch modulare Batteriespeicher. Elektronikpraxis, 17 06, pp. 48-51.

Lange, C. et al., 2020. Dimensioning battery energy storage systems for peak shaving based on a real-time control algorithm. Applied Energy 280.

Lange, C. et al., 2019. Intelligentes Energiemanagementsystem. In: M. M. u. R. Öchsner, Hrsg. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, pp. 173-241.

Müller, M., 2018. Stationary Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems. A Multi-Purpose Technology. [Online]

Available at: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1388076/file.pdf>

[Zugriff am 06 09 2021].

Öchsner, R., Nuß, A., Lange, C. & Rueß, A., 2019. Research Platform: Decentralized Energy System for Sector Coupling. *Chem. Eng. Technol.* 42 (9), p. 1886–1894.

Prasatsap, U., Kiravittaya, S. & Polprasert, J. (. D. o. O. E. S. S. f. P. S. t. R. E. C. i. a. U. I. E. P. 1. S. 9. D. 1., 2017. Determination of Optimal Energy Storage System for Peak Shaving to Reduce Electricity Cost in a University. *Energy Procedia* 138, p. 967–972.

Rahmann, C., Mac-Clure, B., Vittal, V. & Valencia, F., 2017. Break-Even Points of Battery Energy Storage Systems for Peak Shaving Applications. *Energies* 10, p. 833.

Schwierz, P., 2019. Experten entlarven Elektroauto-„Studie“ von Hans-Werner Sinn als unwissenschaftliche Meinungsmache. [Online] Available at: <https://www.electrive.net/2019/04/20/experten-entlarven-elektroauto-studie-von-hans-werner-sinn-als-unwissenschaftliche-meinungsmache/> [Zugriff am 08 09 2021].

Sonnenberger, R., 2019. Herausforderungen für das thermische Batteriemangement bei Schnellladung. *ATZ Extra* 24, p. 28–33.

Umweltbundesamt, 2018. Ökobilanz. [Online] Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz> [Zugriff am 08 09 2021].

Van den Bergh, K. & Delarue, E., 2015. Cycling of conventional power plants: Technical limits and actual costs. *Energy Conversion and Management* 97, June, pp. 70-77.

Wikipedia, 2021. Tiefentladung. [Online] Available at: <https://de.wikipedia.org/wiki/Tiefentladung> [Zugriff am 08 09 2021].

07 Autorenprofile

Dr. phil. Marc Dusseldorp, Dipl.-Geoökol., ist seit Januar 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter der High Performance Battery Technology GmbH. Dort ist er v. a. mit Fragen der Nachhaltigkeit von Batteriespeichern für die Energiewende befasst. Zuvor war er seit 2004 am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des KIT sowie beim Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag beschäftigt, unter anderem als Koordinator einer internationalen Graduiertenschule zu Energiezukünften. Seit 2005 ist er Lehrbeauftragter am KIT. Neben seiner Anstellung ist Marc Dusseldorp als freiberuflicher Wissenschaftler tätig. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen im Bereich der Methodologie von Nachhaltigkeitsbewertungen, wie bereits in seiner Dissertation zum Thema „Zielkonflikte der Nachhaltigkeit“, sowie der Nachhaltigkeitstransformation.

Dr. rer. pol. Sebastian Heinz, MSc Human Geography, ist seit Juni 2018 Chief Sales Officer der High Performance Battery Holding AG. Zuvor verantwortete er im Geschäftskundenvertrieb der Telekom Deutschland das Thema Internet der Dinge (IoT). Mit seiner Dissertation zur Markterschließung im Kooperationsmodell entwickelte er eine alternative Strategie zur freiwilligen Einführung intelligenter Strommesssysteme in Deutschland. Die darin entwickelten Ansätze eignen sich ebenso für den Einsatz von Batteriespeichern und erschließen dabei die Potenziale von Plattform-Modellen für die Energiewirtschaft. 2018 gründete er zudem das Institut für Innovations- und Kooperationsmanagement (Incoom), das sich auf eine in jeder Hinsicht nachhaltige Geschäftsmodellentwicklung spezialisiert hat.

Dr.-Ing. Christopher Lange, M.Eng. in Electrical and Microsystems Engineering, ist seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IISB in Erlangen, wo er sich mit der Automatisierung, Simulation und Optimierung von sektorengesetzten Energiesystemen beschäftigt. Sein Schwerpunkt ist die Entwicklung und Umsetzung von intelligenten Betriebsstrategien für den optimalen Einsatz energietechnischer Komponenten (z. B. Batteriespeicher, BHKW, Wärme-/Kältespeicher, H₂-Komponenten) zur Lastspitzenreduktion, Eigenversorgungsoptimierung und/oder Effizienzerhöhung. Diese Betriebsstrategien finden beispielsweise im Energiemanagementsystem, in der Gebäudeleittechnik oder in Anlagensteuerungen ihren Einsatz. Im Rahmen seiner wissenschaftlichen Tätigkeit promovierte Christopher Lange zum Thema der Energiesektoren-übergreifenden Lastspitzenreduktion.

Dr.-Ing. Sebastian Pohl, Dipl.-Wirtsch.-Ing., DGNB Senior Auditor, WiredScore AP, Auditor GEFMA 160, ist seit 2015 Mitglied der Geschäftsleitung und Gesellschafter der LCEE, einem Spin-off der TU Darmstadt. Dort befasst er sich mit Fragestellungen des Nachhaltigen Bauens, v.a. auch der Baustoff- und Bauzulieferindustrie. Insbesondere begleitet er Ökobilanzierungs- und Zertifizierungsprojekte von Bauvorhaben nach nationalen und internationalen Systemen und berät Kunden aus der Immobilienwirtschaft. Nach seinem Studium des Wirtschaftsingenieurwesens war er zunächst für eine namhafte Unternehmensberatung tätig und wechselte 2010 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an die TU Darmstadt, wo er 2014 auch seine Promotion abschloss. Er ist Autor zahlreicher Fachbeiträge und Lehrbeauftragter an der TU Darmstadt und der FH Münster.

High Performance Battery Technology GmbH (Hrsg.)
Schumannstr. 61
53113 Bonn
impulse@highperformancebattery.de

Twinprint Verlag
Königswinter, 2021
ISBN: 978-3-96856-030-4

