

Mittlerer Wirkungsgrad des SMA Flexible Storage System



Der mittlere Wirkungsgrad eines Systems zur Zwischenspeicherung von Energie, z. B. des SMA Flexible Storage System, ermöglicht eine Aussage darüber, wie effizient dieses System Energie zwischenspeichert. Derzeit gibt es aber keine standardisierten Vorgaben, welche Messwerte unter welchen Bedingungen für die Berechnung des mittleren Wirkungsgrades verwendet werden müssen. Wie dieses Dokument beispielhaft zeigt, können jedoch viele Einflussfaktoren das Ergebnis einer Wirkungsgradberechnung beeinflussen. Ohne standardisierte Vorgaben sind Berechnungen zum mittleren Wirkungsgrad verschiedener Systeme zur Zwischenspeicherung von Energie nur bedingt vergleichbar. Deshalb gibt dieses Dokument einen Einblick in die Berechnung des Wirkungsgrads und zeigt Faktoren auf, die den mittleren Wirkungsgrad eines SMA Flexible Storage System beeinflussen.

1 Berechnung des mittleren Wirkungsgrads

Der mittlere Wirkungsgrad η des SMA Flexible Storage System wird von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Wirkungsgrad des Sunny Island beim Laden
- Wirkungsgrad der Batterie
- Wirkungsgrad des Sunny Island beim Entladen
- Energieverluste, z. B. in Leitern, Sicherungen und Steuerungs- oder Regelungskomponenten
- Zeiten im Schonbetrieb* (Leerlauf)

Diese ganzen Faktoren werden automatisch berücksichtigt, wenn die vom SMA Flexible Storage System aus dem Haushaltsnetz aufgenommene Energiemenge E_{charge} und die in das Haushaltsnetz abgegebene Energiemenge $E_{\text{discharge}}$ miteinander ins Verhältnis gesetzt werden.

$$\eta = \frac{E_{\text{discharge}}}{E_{\text{charge}}}$$

Die beiden Energiemengen können sehr einfach im Sunny Portal auf der Seite **Energiebilanz** abgelesen werden, pro Tag, pro Monat und pro Jahr. Dabei wird die Energiemenge E_{charge} als **Batterieladung** und die Energiemenge $E_{\text{discharge}}$ als **Batterieentladung** angezeigt.

Dabei kann es Tage geben, an denen die Batterie zwar aufgeladen ist, aber aufgrund eines geringen elektrischen Verbrauchs nicht entladen wird. Am Ende des Tages wäre dann die gesamte Menge geladener Energie noch in der Batterie zwischengespeichert. Wenn Sie an so einem Tag den mittleren Wirkungsgrad mit der oben dargestellten Formel bestimmen, dann geht der mittlere Wirkungsgrad gegen Null. Andererseits kann es auch Tage, geben an denen zwar entladen aber nicht geladen wird. Würde an einem solchen Tag der mittlere Wirkungsgrad bestimmt, würde er gegen unendlich gehen. Es muss also neben der Lade- und Entladeenergie für die Berechnung des Wirkungsgrades immer auch die in der Batterie noch zwischengespeicherte Energie mit berücksichtigt werden.

* Der Sunny Island geht automatisch in den Schonbetrieb, wenn die Batterie bis zur unteren Entladeschwelle entladen worden ist. Hierdurch verringert sich der Leerlaufverbrauch des Sunny Island von 27 Watt auf 7 Watt

2 Ladezustand der Batterie zu Beginn und zum Ende der Messung

Beim SMA Flexible Storage System ist es aufwendig die Messwerte so zu erfassen, dass die Ladezustände der Batterie zu Beginn und am Ende der Messung gleich sind. Um die Effizienz des SMA Flexible Storage System möglichst unabhängig vom Anfangs- und Endladezustand der Batterie zu berechnen, sollten die Messwerte für die Batterieladung und -entladung sehr viel größer sein als die Batteriekapazität. Dies ist z. B. der Fall wenn sie über einen Monat oder noch besser über ein Jahr summierte Werte nutzen. Über einen Tag gemittelte Werte ohne Berücksichtigung des Ladezustandes führen hingegen zu mittleren Wirkungsgraden, die kaum aussagefähig sind.

Der Ladezustand der Batterie ist somit vergleichbar mit dem Füllstand eines Kraftstofftanks. Wenn Sie den Verbrauch Ihres Autos über die Kraftstoffmenge beim Tanken berechnen, müssen die Füllstände des Kraftstofftanks zu Beginn und zum Ende der Kilometermessung gleich sein.

Die Differenz im Ladezustand zwischen dem Anfangs- und Endzeitpunkt des berechneten Wirkungsgrades ermöglicht es, auch die noch zwischengespeicherte Energie in der Berechnung zu berücksichtigen. Dies wird im Folgenden genauer erläutert.

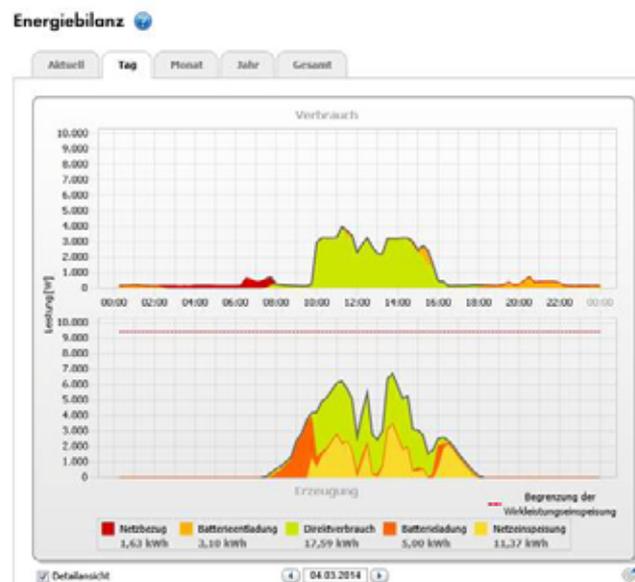


Abbildung 1: Energiebilanz eines realen SMA Flexible Storage System vom 04.03.2014 (Beispiel)

2.1 Berechnung des Wirkungsgrades ohne Betrachtung der Ladezustände

$$\eta = \frac{E_{\text{discharge}}}{E_{\text{charge}}}$$

Am 04.03.2014 wurden bezogen auf diesen Tag folgende Werte gemessen und im Sunny Portal angezeigt:

- **Batterieentladung** = $E_{\text{discharge}} = 3,10 \text{ kWh}$
- **Batterieladung** = $E_{\text{charge}} = 5,00 \text{ kWh}$

Laut Berechnung ergibt sich daraus ein mittlerer Wirkungsgrad von $\eta = 62 \%$.

2.2 Berechnung der Effizienz mit Betrachtung der Ladezustände

Beispiel:

Bezogen auf das betrachtete SMA Flexible Storage System seien zum Ladezustand der Batterie folgende Werte gegeben:

- Gesamte Batteriekapazität: $Q = 5,50 \text{ kWh}$
- Ladezustand der Batterie am 04.03.2014 um 00:00 Uhr: $\text{SOC}_{\text{start}} = 38 \%$

- Ladezustand der Batterie am 04.03.2014 um 24:00 Uhr: $\text{SOC}_{\text{end}} = 53 \%$

Der Ladezustand der Batterie ist um 15 Prozentpunkte gestiegen. 15 % der Batteriekapazität dieses SMA Flexible Storage Systems mit 5,50 kWh entspricht einer Energie E_{delta} von 0,83 kWh.

Wenn der Wirkungsgrad ohne Betrachtung der Ladezustände berechnet wird, geht die Energie E_{delta} als Verlustenergie in die Berechnung ein. Die Energie E_{delta} ist aber nicht verloren, sondern zwischengespeichert. Die Energie E_{delta} kann am nächsten Tag mit dem Wirkungsgrad des Sunny Island entladen werden. Wenn sich die Energiemenge $E_{\text{discharge}}$ mit der Energiemenge E_{delta} summiert, ergibt sich aus der oben genannten Formel ein Wirkungsgrad von $\eta = 78 \%$.

Im hier betrachteten Beispiel führt die Berücksichtigung des Anfangs- und Endladezustandes der Batterie dazu, dass das Ergebnis der Berechnung 16 Prozentpunkte höher ausfällt als ohne die Berücksichtigung der Ladezustände. Statt einem Wirkungsgrad von $\eta = 62 \%$ ergibt sich ein Wirkungsgrad von $\eta = 78 \%$.

3 Ungenauigkeiten bei der Messwerterfassung

Die Ergebnisse aus der Berechnung des mittleren Wirkungsgrads können nur so genau sein wie die Messwerte, die der Berechnung zu Grunde liegen. Die Messwerte für die **Batterieladung** und **Batterieentladung** werden auf der AC-Seite des Sunny Island gemessen. Die Sensoren sind für den Betrieb des Sunny Island optimiert und nicht für die präzise Erfassung von Energiemengen. Beim Auto würde der berechnete mittlere Wirkungsgrad aus den Messwerten für die **Batterieladung** und **Batterieentladung** der Verbrauchsanzeige entsprechen. Die Verbrauchsanzeige im Auto beruht auf den Messwerten von Sensoren, die nicht für die präzise Messung des Verbrauchs optimiert sind. Dadurch ergeben sich Abweichungen zu den realen Werten, analog den Abweichungen des berechneten mittleren Wirkungsgrades zum realen mittleren Wirkungsgrad beim SMA Flexible Storage System.

Der Eingangsbereich des Sunny Island 6.0H / 8.0H ist $\pm 120 \text{ A}$. Bei einer Messgenauigkeit von $\pm 1 \%$ ergibt sich ein Messfehler von bis zu 270 W bei 230 V_{AC}. Geräteinterne Maßnahmen verringern diesen Messfehler auf 10 W bis 20 W im langfristigen Durchschnitt. Innerhalb eines Jahres können sich die Messfehler aber auf 90 kWh bis 180 kWh summieren.

Beispiel:

Innerhalb eines Jahres werden für ein SMA Flexible Storage System folgende Werte im Sunny Portal angezeigt:

- **Batterieentladung** = $E_{\text{discharge}} = 1.190 \text{ kWh}$
- **Batterieladung** = $E_{\text{charge}} = 1.700 \text{ kWh}$

Daraus ergibt sich ein Wirkungsgrad von $\eta = 70 \%$.

Der Messfehler der Batterieentladung beträgt 90 kWh und die Batterieentladung liegt in Wirklichkeit bei $E_{\text{discharge}} = 1.280 \text{ kWh}$. Mit 1.280 kWh ergibt sich ein Wirkungsgrad von $\eta = 75 \%$. Im Beispiel liegt der tatsächliche Effizienzwert 5 Prozentpunkte höher als der aus den Messwerten des Sunny Portals berechnete Wirkungsgrad.

Für die Interpretation des berechneten mittleren Wirkungsgrades muss deshalb immer die relativ hohe Abweichung vom realen Wirkungsgrad mit berücksichtigt werden. Typischerweise ist hier von einem Fehler von $\pm 5 \%$ auszugehen, der in besonderen Fällen auch bis zu $\pm 10 \%$ betragen kann.

4 Die wichtigsten Einflussfaktoren auf den realen Wirkungsgrad

Der reale Wirkungsgrad eines Systems zur Zwischenspeicherung von Energie hängt vor allem auch davon ab, wie das System ausgelegt und betrieben wird. Beim SMA Flexible Storage System haben vor allem folgende Faktoren einen großen Einfluss auf die Effizienz der Energieumwandlungen und damit auf den mittleren Wirkungsgrad:

- Jahresenergiebedarf
- Verteilung des Leistungsbezugs über den Tag und das Jahr
- Installierte PV-Leistung
- Lage und Ausrichtung der PV-Anlage
- Typ und Speicherkapazität der angeschlossenen Batterie

Das SMA Flexible Storage System ist für einen Jahresenergiebedarf von 3.000 kWh bis 7.000 kWh und für PV-Anlagen in Deutschland mit 3 kWp bis 10 kWp installierter PV-Leistung und Batterien von 3 kWh bis 10 kWh gut geeignet.

Optimal arbeitet das SMA Flexible Storage System bei einem Jahresenergiebedarf von 5.000 kWh, einer PV-Erzeugung von 5.000 kWh und einer nutzbaren Batteriekapazität von 5 kWh oder mehr. Die prinzipiellen Zusammenhänge verdeutlichen die folgenden 3 Beispiele. Diese sind jeweils nur für die unter dem Diagramm festgelegten Rahmenbedingungen gültig.

Beispiel 1: Mittlerer Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Jahresenergiebedarf

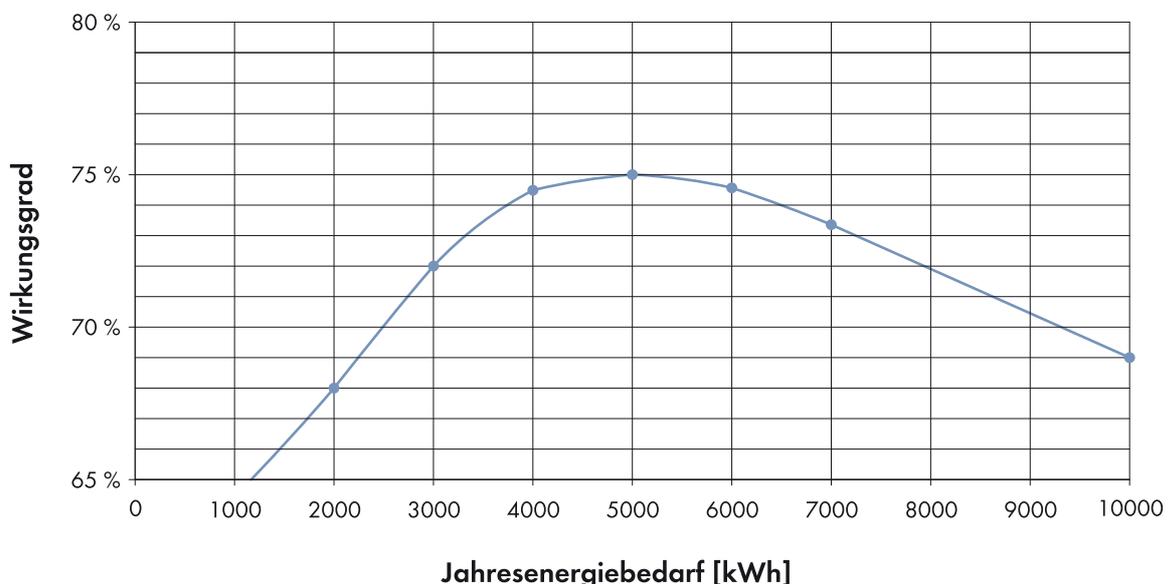


Abbildung 2: Mittlerer Wirkungsgrad eines SMA Flexible Storage System mit einem Sunny Island 6.0H, einer Bleibatterie mit 5 kWh nutzbarer Batteriekapazität und einer PV-Erzeugung von 5.000 kWh pro Jahr

Der Jahresenergiebedarf hat vor allem einen Einfluss auf das Verhalten des SMA Flexible Storage System beim Entladen. Die Abbildung zeigt, dass der Wirkungsgrad sowohl bei einem sehr geringen Jahresenergiebedarf von unter 3.000 kWh pro Jahr deutlich reduziert ist, aber auch bei einem sehr hohen Jahresenergiebedarf geringer wird. Dies liegt zum einen am Sunny Island, der einen optimalen Wirkungsgrad bei ca. 30 % der Nennleistung und einen optimalen Arbeitsbereich zwischen 10 % und 50 % der Nennleistung hat. Wird der Sunny Island bei sehr geringem Energiebedarf sehr häufig außerhalb dieses Arbeitsbereiches betrieben, sinkt der mittlere Wirkungsgrad deutlich ab. Gleiches gilt bei sehr hohem Energiebedarf. Hier kommt aber vor allem noch ein anderer Effekt zum Tragen. Der Batteriewirkungsgrad ist ebenfalls stark abhängig von der Lade- und Entladeleistung. Die reinen Batterieverluste steigen quadratisch mit dem Lade- und Entladestrom. Wird also die Batterie immer mit relativ hohen Strömen entladen, sinkt der mittlere Batteriewirkungsgrad. Dies zeigt sich beim mittleren Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Jahresenergiebedarf durch ein Absinken des mittleren Wirkungsgrades bei sehr hohem Jahresenergiebedarf.

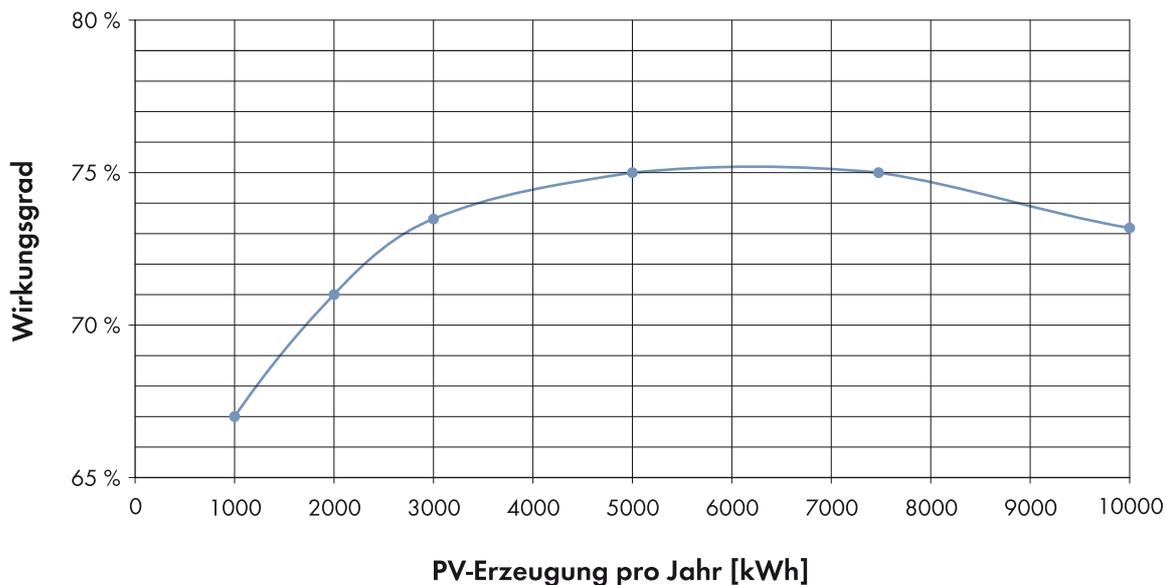
Beispiel 2: Mittlerer Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der PV-Erzeugung

Abbildung 3: Mittlerer Wirkungsgrad eines SMA Flexible Storage System mit einem Sunny Island 6.0H, einer Bleibatterie mit 5 kWh nutzbarer Batteriekapazität und einem Jahresenergiebedarf von 5.000 kWh pro Jahr

Der Verlauf des mittleren Wirkungsgrades über die PV-Erzeugung ist dem Verlauf des mittleren Wirkungsgrades über den Jahresenergiebedarf sehr ähnlich. Hierfür gelten dieselben Gesetzmäßigkeiten, nur dass die PV-Erzeugung in der Hauptsache das Ladeverhalten des SMA Flexible Storage System bestimmt. Bei sehr kleiner PV-Erzeugung haben die Leerlaufverluste einen sehr hohen Anteil und führen dazu, dass der mittlere Wirkungsgrad des SMA Flexible Storage System gering ist. Bei sehr großer PV-Erzeugung ist der Ladestrom sehr hoch. Damit arbeitet der Sunny Island auch nicht mehr mit einem optimalen mittleren Wirkungsgrad, wobei sich zusätzlich der mittlere Wirkungsgrad der Batterie verschlechtert.

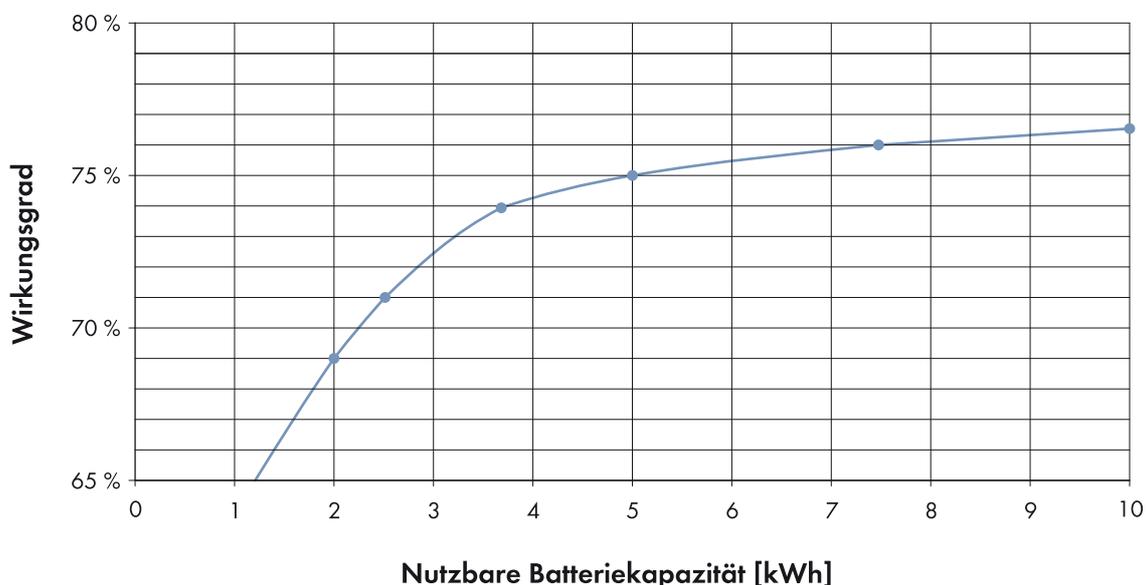
Beispiel 3: Mittlerer Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der nutzbaren Batteriekapazität (Bleibatterie)

Abbildung 4: Mittlerer Wirkungsgrad eines SMA Flexible Storage System mit einem Sunny Island 6.0H, einem Jahresenergiebedarf von 5.000 kWh pro Jahr und einer PV-Erzeugung von 5.000 kWh pro Jahr

Die nutzbare Batteriekapazität hat den deutlichsten Einfluss auf den mittleren Wirkungsgrad des SMA Flexible Storage System. Der Innenwiderstand einer Batterie sinkt linear mit zunehmender Batteriekapazität. Die Verluste hingegen steigen quadratisch mit der Leistung beim Laden und Entladen. Konkret bedeutet dies, bei einer

Batteriekapazität von 2,5 kWh anstatt einer Batteriekapazität von 5 kWh vervierfachen sich die Verluste in der Batterie. Bei Lithium-Ionen-Batterien ist dieser Effekt von geringerer Bedeutung, da diese Batterien von Natur aus einen deutlich geringeren Innenwiderstand aufweisen.

Die Beispiele zeigen, dass der reale mittlere Wirkungsgrad des SMA Flexible Storage System bei Bleibatterien zwischen 65 % und 77 % liegt. Wenn sich zwei oder drei der oben genannten Effekte summieren, z. B. ein Jahresenergiebedarf kleiner als 2.000 kWh, PV-Erzeugung kleiner als 2.000 kWh und/oder einen Batteriekapazität kleiner als 2 kWh, sind auch mittlere Wirkungsgrade von 60 % möglich. Dieser Zusammenhang kann in fast allen Systemen zur Zwischenspeicherung von Energie im Winter beobachtet werden. Durch den sehr geringen PV-Ertrag von November bis Januar liegt der Wirkungsgrad in diesen Monaten häufig bei 50 % bis 60 % und steigt mit zunehmender Nutzung in den Übergangs- und Sommermonaten deutlich an. Dies liegt wiederum daran, dass das System zur Zwischenspeicherung von Energien immer eine gewisse Energiemenge für den eigenen Betrieb verbraucht, ob es gerade genutzt wird oder nicht.

Eine häufige Nutzung der Zwischenspeicherung von Energie mit einem entsprechend hohen Energiedurchsatz verbessert prinzipiell den Wirkungsgrad des gesamten SMA Flexible Storage System. Ähnlich einem Auto im Leerlauf verbraucht das SMA Flexible Storage System elektrische Energie unabhängig davon, ob und wie diese Energie genutzt wird. Wenn die Batterie viel geladen und entladen wird, dann sind die Leerlaufverluste des Sunny Island und die Selbstentladung der Batterie im Verhältnis zum gesamten Energiedurchsatz relativ gering. Je weniger Energie in der Batterie zwischengespeichert wird, desto mehr sinkt der Wirkungsgrad des SMA Flexible Storage System.

Die Leerlaufverluste und die Selbstentladung der Batterie kommen immer mehr zum Tragen. Um die Verluste an Tagen mit einer sehr geringen Nutzung der Batterie zu minimieren, wechselt der Sunny Island in einen Energiesparmodus. Dies ist vergleichbar mit der Start-Stopp-Automatik eines Autos. Dadurch verringert z. B. der Sunny Island 6.0H seinen Verbrauch im Leerlauf von 27 W auf 7 W.

Die Verluste durch die Selbstentladung der Batterie kann der Sunny Island nicht beeinflussen. Diese liegen bei Bleibatterien bei nur 3 % bis 5 % pro Monat und sind somit kaum relevant.

Bei Lithium-Ionen-Batterien bezieht das in der Batterie integrierte Batteriemangement zusätzliche Energie aus der Batterie. Der typische Verbrauch von 5 W und 15 W ist hier durchaus relevant und sorgt übers Jahr für Verluste von 40 kWh bis 130 kWh. Die Angaben zur Selbstentladung und dem Wirkungsgrad von Lithium-Ionen-Batterien berücksichtigen diese Verluste in der Regel nicht. Diese Verluste von bis zu 130 kWh pro Jahr können dazu führen, dass der eigentlich fast 8 % bis 10 % bessere Wirkungsgrad von Lithium-Ionen-Batterien komplett fürs Batteriemangement benötigt wird. In extremen Fällen kann der mittlere Systemwirkungsgrad bei einer Lithium-Ionen-Batterie sogar geringer ausfallen als bei einer Bleibatterie. Aus diesem Grunde sollte bei der Auswahl einer Lithium-Ionen-Batterie auf einen möglichst geringen Stromverbrauch des Batteriemangement geachtet werden (siehe Dokumentation des Batterieherstellers).

5 Zusammenfassung

Der mittlere Wirkungsgrad eines Flexibel Storage System hängt deutlich von der Auslegung und dem Betrieb des Systems ab. So kann der mittlere Wirkungsgrad der Batterie von dem typischen Wirkungsgrad von 75 % bei Bleibatterien und 84 % mit Lithium-Ionen-Batterie abweichen, z. B. wenn wenig Energie im Speicher zwischengespeichert werden kann. Dieser Fall tritt meist in den Wintermonaten ein, kann aber auch durch die Systemauslegung hervorgerufen werden. Bei einem sehr kleinen Jahresenergieverbrauch, einer sehr geringen PV-Erzeugung oder sehr geringen Batteriekapazität erreicht das System zu selten den optimalen Betriebspunkt. Dann sind bei Bleibatterien auch mittlere Wirkungsgrade von 60 % bis 65 % möglich. Für Lithium-Ionen-Batterie hängt der mittlere Wirkungsgrad zusätzlich vom Energieverbrauch des Batteriemagements ab. Bei einem elektrischen Verbrauch von mehr als 10 W und geringen Energiedurchsätzen durch die Batterie, ist die Lithium-Ionen-Batterie weniger effizient als eine Bleibatterie mit gleicher nutzbarer Batteriekapazität.

Die Berechnung des mittleren Systemwirkungsgrades ist anhand der im Sunny Portal dargestellten Energiewerte für die **Batterieladung** und **Batterieentladung** sehr einfach. Bei den so berechneten Werten gilt es aber immer die in der Batterie noch zwischengespeicherte Energie mit zu berücksichtigen oder einen entsprechend großen Zeitraum zu wählen, damit der Fehler durch noch in der Batterie zwischengespeicherte Energie nicht zu groß wird. Auch müssen die Messungenauigkeiten bei der Beurteilung dieser Werte mit berücksichtigt werden. Hier sind Fehler von ± 5 % typisch und können in Extremfällen durchaus auch ± 10 % betragen.