



## Solar am Fahrradwohnen – Top oder Flop?

Von:  
Jati AC

E-Mail:  
[jatiac92@gmail.com](mailto:jatiac92@gmail.com)

Website:  
[www.jati-ac.de](http://www.jati-ac.de)

Zuletzt aktualisiert am: 26. März 2022

Dieses Dokument dient nicht als Anleitung. Alle Nachbauten erfolgen ausdrücklich auf eigenes Risiko. Weiterhin wird keine Garantie für die Richtigkeit und Vollständigkeit des Inhaltes gegeben.

Dieses Dokument darf weder in Teilen noch als Ganzes verändert oder für kommerzielle Zwecke verwendet werden.



# Vorwort

In der Mitte des Jahres 2020 fing es, inspiriert durch diverse YouTube-Videos, als kleiner Gedanke an. Ein Gedanke, welcher sich schnell zu vielen Ideen und schließlich auch zu einem konkreten Projekt wandelte: Ich möchte mir einen Fahrradwohnwagen bauen!

Da ich während der Umsetzung dieses Projektes von zahlreichen Erfahrungen in Form von Videos, Blog- und Forenbeiträgen profitieren konnte, möchte ich euch mit dieser Ausführung etwas zurückgeben und euch an meinen Gedanken auf eine für mich bisher unbeantwortete Frage teilhaben lassen: Lohnt sich eine Solaranlage am Fahrradwohnwagen?

Da ich häufig eine eher überschwängliche Euphorie gegenüber der Ausstattung eines Fahrradwohnwagens mit Solarzellen beobachten kann, möchte ich dieses Thema etwas genauer beleuchten. Insbesondere begegnen mir aber zudem immer wieder dieselben Fragen und Trugschlüsse zu diesem Thema, welche ich im Folgenden hoffentlich ebenfalls beantworten kann.

Ich habe bewusst die Textform gewählt, auch wenn es mir so scheint, dass eine Dokumentation in Form von Videos aktuell das bevorzugte Medium darstellt. Sollte ich mich jemals dazu durchringen können ein Video meines Wohnwagens oder einer Tour zu veröffentlichen, so wird dieses auf dem YouTube Kanal „Jati AC“ zu finden sein. Insgesamt bin ich jedoch der Überzeugung, dass ein Bericht in Textform zwar weniger unterhaltend, dafür aber deutlich nachhaltiger zum Erfahrungsaustausch beitragen kann und besser als Nachschlagewerk geeignet ist.

Ich freue mich dennoch auf Feedback, Anmerkungen, Lob und Kritik und hoffe euch mit diesem Bericht für eure eigenen Eigenbauten etwas weiterhelfen oder euch zumindest ein wenig Inspiration mit auf den Weg geben zu können.

Gerne könnt ihr mich per E-Mail an [jatiac92@gmail.com](mailto:jatiac92@gmail.com) kontaktieren und euch so auch die neuste Version dieses Dokuments zukommen lassen. Diese und viele weitere Informationen sind ebenfalls auf meiner Webseite unter [www.jati-ac.de](http://www.jati-ac.de) zu finden.

# I Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>i</b>
<b>1</b>	<b>Wie bewerte ich, ob sich eine Solaranlage lohnt?</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Wie integriere ich eine Solaranlage in meinen Fahrradwohnwagen?</b> .....	<b>5</b>
	2.1.1 Szenario 1: Fertigpedelec mit zusätzlichem Akku im Wohnwagen .....	5
	2.1.2 Szenario 2: Ein gemeinsamer Akku für Pedelec und Wohnwagen .....	7
	2.1.3 Szenario 3: Hauptakku mit zusätzlichem Zweitakku im Wohnwagen.....	8
<b>3</b>	<b>Wie viel Energie liefert mein Solarpanel?</b> .....	<b>10</b>
	3.1 Herleitung von Umwandelverlusten sowie des Energieertrags für Solarpanele .....	11
	3.1.1 Lichtleistung in Deutschland:.....	12
	3.1.2 Wirkungsgradverlust durch Erwärmung:.....	15
	3.1.3 Verluste durch Ladeelektronik und Spannungswandler .....	20
	3.1.4 Tagesertrag einer Solaranlage am Fahrradwohnwagen .....	23
<b>4</b>	<b>Gewicht und Kosten für Akkus und Solarsysteme</b> .....	<b>25</b>
	4.1.1 Gewicht und Kosten eines Akkus .....	25
	4.1.2 Gewicht und Kosten einer Solaranlage.....	26
<b>5</b>	<b>Akku Vs. Solar - Beispiele</b> .....	<b>27</b>
	5.1 100 Wp Solarpanel mit Powerbank und Fertigpedelec .....	27
	5.1.1 Das Solarsetup.....	27
	5.1.2 Energieertrag des Solarsetups .....	28
	5.1.3 Energie der Akkualternative .....	28
	5.1.4 Fazit .....	29
<b>II</b>	<b>Quellen und Links</b> .....	<b>vi</b>
<b>III</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>viii</b>

## 1 Wie bewerte ich, ob sich eine Solaranlage lohnt?

Normalerweise gibt es auf diese Frage zwei einfache Antworten:

„Wenn sie sich finanziell rentiert, sie also mehr Geld erwirtschaftet als Kosten verursacht hat, oder wenn sie einen positiven Beitrag zur Energiewende leisten kann und somit zu einer geringeren Umweltbelastung führt.“

In Bezug auf unsere Fahrradwohnwägen sieht die Welt jedoch ein wenig anders aus. Aufgrund der kurzen Ausfahrtszeiten wird sich unsere Anlage in rein finanzieller Sicht niemals rentieren können. Sie hat schlicht zu wenig Zeit in der Sonne, um genügend Energie umzuwandeln. Wir müssten schon eine Gesamtfahrtzeit von mehreren Jahren bis Jahrzehnten zusammenbekommen, was die Lebensspanne unserer Gefährte wohl weit übersteigt. Auch der positive Umweltaspekt ist aufgrund dieser geringen Energieerzeugung eher fraglich, steht dieser erwirtschafteten Energie weiterhin die Herstellung der Panele und Ladeelektronik entgegen.

In unserem Fall geht es also um andere Kriterien. Diese möchte ich so zusammenfassen: **„Eine Solaranlage lohnt sich, sobald sie während einer Ausfahrt mehr Energie erwirtschaftet als alternativ mit einem zusätzlichen Akku gleichen Gewichts bzw. gleicher Kosten hätte mitgeführt werden können.“**

Dieser Definition liegt die Tatsache zu Grunde, dass eine Solaranlage in der Anschaffung Kosten verursacht als auch zusätzliches Gewicht für unseren Wohnwagen bedeutet. Beide Faktoren sind nicht zu vernachlässigen. Gleichzeitig sind wir zur Energieerzeugung auf die Sonne angewiesen, was große Unsicherheit für längere Ausflüge bedeuten kann. Wir sind also stets besser beraten, wenn wir statt einer Solaranlage einfach einen weiteren Akku mitnehmen können, welcher uns die benötigte Energie unabhängig vom Sonnenstand jederzeit zur Verfügung stellen kann. Je nachdem, ob das zusätzliche Gewicht oder die anfallenden Kosten für uns entscheidend sind, müssen wir die Solaranlage also immer mit entsprechend schweren bzw. entsprechend teuren Akkus vergleichen. Erst, wenn die Solaranlage auf unserer Ausfahrt mehr Energie erwirtschaften kann als wir alternativ mit einem Akku ohnehin dabeigehabt hätten, war es eine kluge Idee, auf eine Solaranlage zu setzen.

Die während einer Ausfahrt generierte Energiemenge hängt dabei insbesondere von folgenden Faktoren ab:

- Größe der Solarpanele
- Lade- und Umwanderverluste
- Abschattung
- Sonnenstrahlung und Bewölkung
- Dauer der Ausfahrt

Je größer wir unsere Solarpaneele dimensionieren, desto mehr Leistung können diese liefern. Gleichzeitig steigen jedoch auch das Gewicht und die Kosten der Anlage, weshalb wir alternativ ebenfalls einen schwereren und teureren Akku hätten mitnehmen können. Eine reine Vergrößerung der Solaranlage scheint pauschal also keine Lösung zu sein, damit unsere Anlage einen Mehrwert im Vergleich zu einem zusätzlichen Akku bringt.

Ladeverluste wiederum hängen insbesondere von der Art ab, wie wir die Solaranlage in unseren Wohnanhänger integrieren können. Je nach Anzahl und Qualität der benötigten Komponenten zum Laden unseres Akkus fallen diese Verluste mehr oder weniger stark ins Gewicht. Gänzlich vermeiden lassen sie sich jedoch nicht, weshalb eine Minimierung der Verluste zwar wünschenswert, häufig aber nur sehr bedingt möglich ist. Genaueres hierzu beschreibe ich in Kapitel 3.1.3.

Neben Ladeverlusten führt eine hohe Abschattungsrate während der Ausfahrt ebenfalls zu einem verminderten Energieertrag. Dieser Faktor kann zwar in die Routenplanung mit einbezogen werden, in der Regel haben wir während der Fahrt jedoch nur sehr begrenzten Einfluss auf die Abschattung unserer Strecke. Während einer Ruhepause sollte hingegen immer darauf geachtet werden, dass sich das Solarpanel möglichst in der Sonne befindet.

Da wir das Wetter leider nicht beeinflussen können, bleibt als letzte Stellgröße zur Steigerung unseres Solar-Energieertrags nur eine Erhöhung unserer Ausfahrtszeit. Desto länger wir mit unserem Wohnwagen unterwegs sind, desto mehr Zeit hat unsere Solaranlage, um unseren Akku mit Sonnenenergie aufzuladen. Bei der alternativen Mitnahme eines zusätzlichen Akkus profitieren wir hingegen nicht von einer längeren Ausfahrtszeit. Die im Akku mitnehmbare Energie bleibt gleich, egal wie lange die Ausfahrt dauert. Eine Solaranlage wird mit ausreichend langer Zeit also stets der Gewinner dieses Vergleichs sein.

In Summe ist die entscheidende Frage also nicht, **ob** eine Solaranlage den Vergleich mit einem Akku gewinnen kann, sondern **wann** sie diesen Vergleich gewinnt.

Um zu bestimmen, ab wann sich unsere Solaranlage lohnt, müssen wir also abschätzen, wie viel Energie sie über einen Tag hinweg generieren wird. Anschließend können wir die Kosten und Gewicht der Anlage in Relation zu einem Akku gleichen Gewichts bzw. gleicher Kosten setzen und schauen, ob der Energieertrag höher liegt als die Kapazität des entsprechenden Akkus.

### **Anmerkung:**

In der Praxis gibt es selbstverständlich noch eine weitere, einfache Möglichkeit die eigene Reichweite zu erhöhen: das Laden an Ladesäulen oder 230V Anschlüssen. Da diese Variante jedoch eigene Vor- und Nachteile mit sich bringt, gehe ich im Folgenden davon aus, dass uns keine solche Nachlademöglichkeiten auf unserer Route zur Verfügung stehen. In der Praxis sollte sich eine Tour in Deutschland jedoch immer so gestalten lassen, dass mindestens eine Ladesäule am Tag angefahren werden kann. Aufgrund der niedrigeren Kosten und des geringen Gewichts eines Ladeadapters wird diese Möglichkeit also für die meisten Fahr-

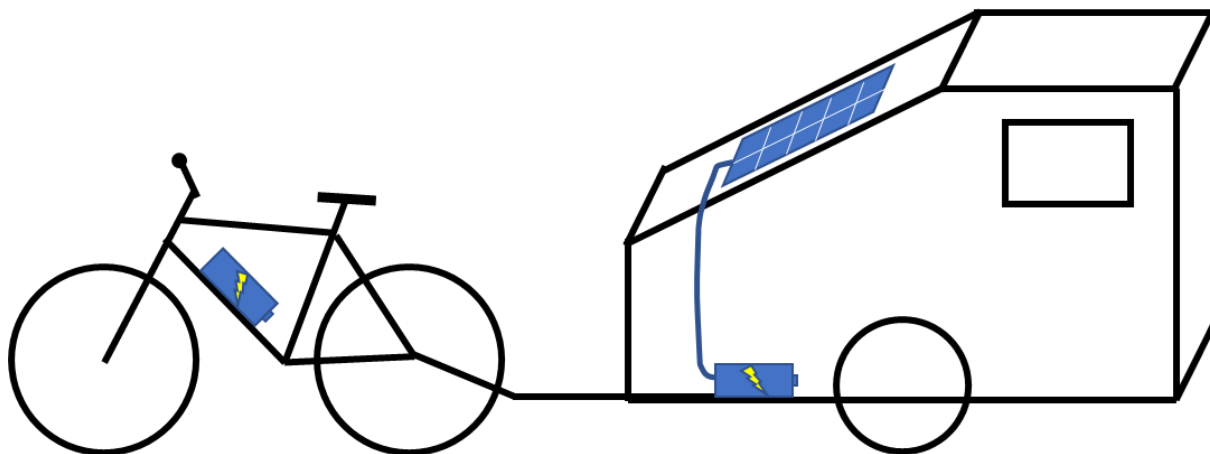
radwohnwagenbesitzer die wohl sinnvollste Methode sein, um längere Ausfahrten anzutreten und hohe Reichweiten zu erzielen.

## 2 Wie integriere ich eine Solaranlage in meinen Fahrradwohnwagen?

Bevor wir die Dimensionierung, Kosten, Gewicht und Sinnhaftigkeit einer Solaranlage näher betrachten können, müssen wir zunächst verstehen, wie eine solche Anlage überhaupt in unserem Fahrradwohnwagen betrieben werden kann. Je nach Ausgangssituation unterscheiden sich hierbei die Möglichkeiten und bieten ganz eigene Vor- und Nachteile. Aus diesem Grund werde ich den Einbau anhand der gängigsten Szenarien beschreiben.

### 2.1.1 Szenario 1: Fertigpedelec mit zusätzlichem Akku im Wohnwagen

Die Kombination aus einem fertig zu kaufenden Pedelec mit eigenem Akku und einem Fahrradwohnwagen mit einem weiteren Akku ist das wohl gängigste Gespann (vgl. Abb. 1). Gleichzeitig bringt es leider auch die meisten Nachteile mit sich, wenn es um den Betrieb einer Solaranlage geht.



**Abb. 1: Szenario 1 mit jeweils einem Akku für Wohnwagen und Pedelec, wobei der Wohnwagen Akku als Ladeakku dient**

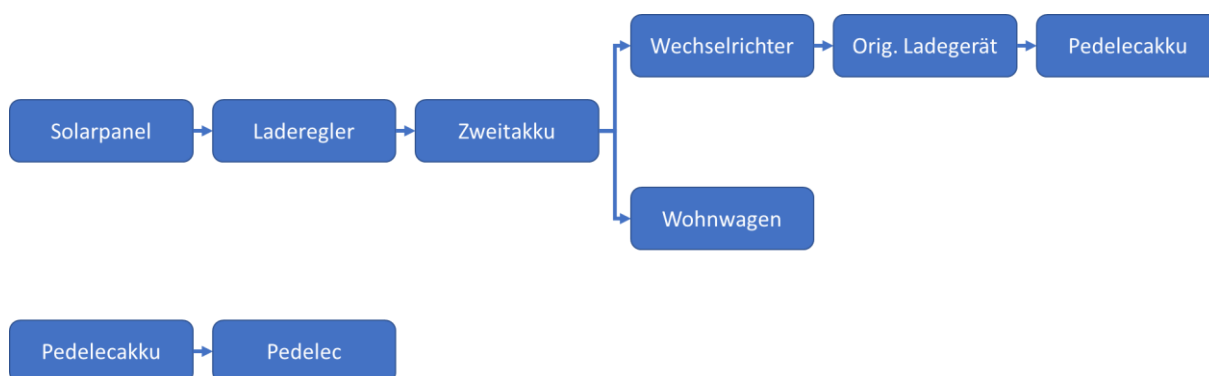
Die meisten Pedelechersteller bieten eigene Akkusysteme für ihre jeweiligen Fahrräder an. Diese Akkus kommen in speziellen Gehäusen, welche für die Fahrt meist in den Rahmen des Fahrrads eingesteckt und verriegelt werden. Gleichzeitig liefern die Hersteller eigene Ladegeräte für diese Akkus mit, welche für den unkomplizierten Betrieb in normalen 230V Steckdosen geeignet sind. Durch die Befestigung am Fahrradrahmen besteht in eingebauten Zustand jedoch kein Zugang zu den elektrischen Kontakten des Akkus. Zusätzlich ist im Akku fast immer eine Platine integriert, welche das Aufladen mit fremden Ladegeräten verhindern soll. Diese ist zudem für den Betrieb des Akkus am Fahrrad notwendig. Somit ist es ebenfalls nicht möglich, einen normalen Akku an Stelle des Originalakkus zum Betrieb des Pedelecs zu verwenden.



Sicherlich können einige dieser Umstände mit ein wenig oder viel Fachwissen gelöst oder umgangen werden. Im Normalfall ist jedoch davon auszugehen, dass es für den durchschnittlichen Nutzer nicht ohne weiteres möglich ist, die genannten Sperrungen und Probleme zu umgehen. Aus diesem Grund wird zum Betrieb der Elektrik des Fahrradwohnwagens ein separater Akku benötigt, welcher nicht für den Betrieb des Pedelecs genutzt werden kann.

Für die Integration einer Solaranlage in dieses Szenario bleibt aufgrund der starken Restriktionen seitens des Pedelecherstellers nur wenig Freiraum. Um die Energie der Solarpaneele in den Pedelecakku zu bekommen, muss dieser vom Fahrrad getrennt und an das originale Ladegerät gesteckt werden. Das originale Ladegerät benötigt jedoch 230V, zu deren Erzeugung ein sog. Wechselrichter benötigt wird. Der Wechselrichter kann mit Hilfe des im Wohnwagen befindlichen Zweitakkus betrieben werden, welcher zuvor wiederum durch die Solarpaneele aufgeladen wurde. Grundsätzlich können Solarpaneele jedoch nicht direkt mit einem solchen Akku verbunden werden, hierfür benötigt es einen passenden Solarladeregler. Der Zweitakku darf selbstverständlich kein weiterer Pedelecakku sein, da dieser nicht mit einem Solarladeregler geladen werden kann.

Die Anschlussreihenfolge sieht wie folgt aus:



**Abb. 2: Einbauschema für Szenario 1**

Um auch während der Fahrt laden zu können kann noch ein zusätzlicher Pedelecakku mitgenommen werden. Während der eine Akku das Pedelec mit Strom versorgt, kann der zweite Pedelecakku im Anhänger wie beschrieben geladen werden. Insgesamt hätte man in diesem Beispiel dann drei Akkus dabei.

**Anmerkung:** Dieses Szenario entspricht ebenfalls der Mitführung einer 230V-Solarpowerbank. Diese großen Powerbanks vereinen einen Solarladeregler, Akku und Wechselrichter in einem gemeinsamen Gehäuse. Häufig sind zusätzliche Ausgänge wie USB- oder 12V-Buchsen sowie ein Display zur Ladezustandsanzeige integriert.

### 2.1.2 Szenario 2: Ein gemeinsamer Akku für Pedelec und Wohnwagen

Im Gegensatz zu Szenario 1 setzt die Verwendung eines einzelnen Akkus für Wohnwagen und Pedelec voraus, dass der Akku keine Sperren gegen die Verwendung mit Drittanbieterhardware integriert hat. In der Regel bedeutet dies, dass das Fahrrad mit Hilfe eines Nachrüstsatzes selbst zum Pedelec umgerüstet werden muss und ein passender Akku separat zu beschaffen oder selbst zu konfektionieren ist. Die Art der Unterbringung der Akkus kann nun frei gewählt werden. Hierbei besteht die Möglichkeit den Akku in ein Gehäuse zu setzen, welches an eine am Pedelec nachgerüstete Halteschiene geschoben wird. Alternativ kann der Akku als „Rucksackakku“, welcher über ein Kabel an das Pedelec angeschlossen wird, ausgeführt werden. Zur bequemerer Mitnahme von Rucksackakkus gibt es zudem die Möglichkeit, spezielle Akkutaschen am Fahrrad zu montieren.

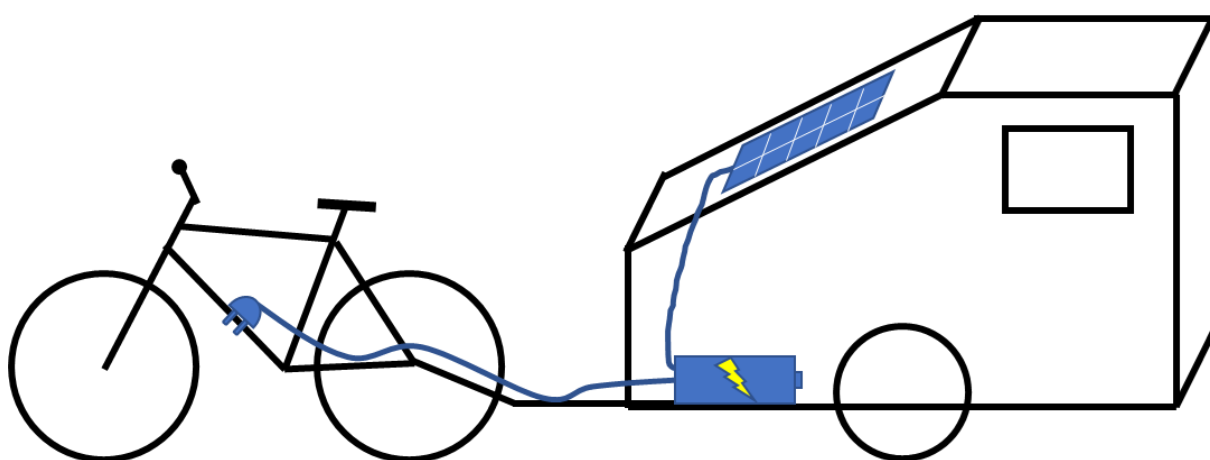


Abb. 3: Szenario 2 mit einem gemeinsamen Akku für Pedelec und Wohnwagen

Insbesondere bei der Verwendung von Rucksackakkus hat man durch ein einfaches Adapterkabel (Y-Kabel) die Möglichkeit, mehr als nur einen Verbraucher parallel an den Akku anzuschließen. Die Notwendigkeit eines separaten Wohnwagenakkus entfällt somit, da dieser direkt vom Hauptakku gespeist werden kann. Aufgrund der hohen Spannung des Pedelecakkus wird zu Betrieb der Anhängerelektronik jedoch ein zusätzlicher Spannungswandler benötigt.

Die Solarpaneele bzw. der Solarladeregler kann nun ebenfalls direkt am Hauptakku angeschlossen werden. Entgegen einem häufig auftretenden Irrglauben muss der Akku zum Aufladen über die Solaranlage nicht vom Pedelec oder Anhänger getrennt werden, sondern kann auch während der Fahrt geladen werden. Benötigt der Pedelecmotor weniger Leistung als die Solaranlage zur Verfügung stellen kann, so fließt der überschüssige Teil in den Akku und lädt diesen somit auf. Benötigt der Motor jedoch mehr Leistung, so liefert der Akku nur den noch fehlenden Teil an den Motor und wird somit weniger schnell entladen als ohne den Einsatz einer Solaranlage.

Die Anschlussreihenfolge sieht wie folgt aus:

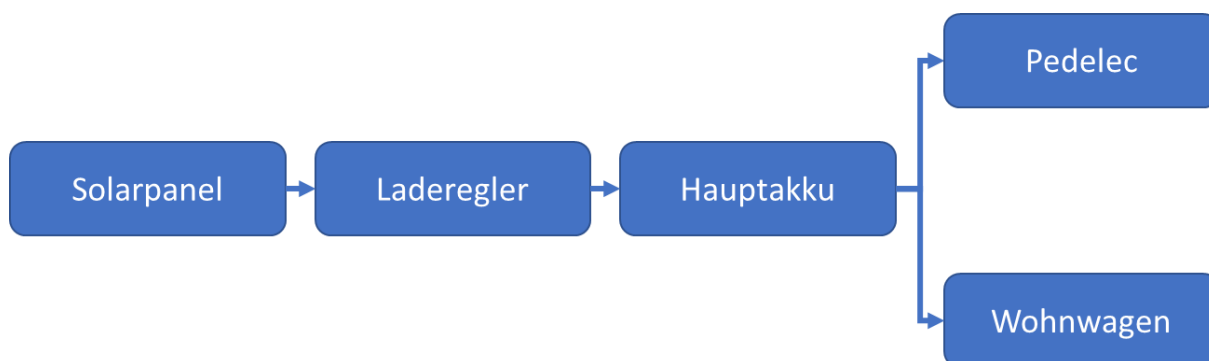


Abb. 4: Einbauschema für Szenario 2

### 2.1.3 Szenario 3: Hauptakku mit zusätzlichem Zweitakku im Wohnwagen

Häufig scheint das Bauchgefühl der „ein Akku für Alles Lösung“ zu misstrauen. Diesem Misstrauen kann die Angst zugrunde liegen, den Pedelecakku durch die Verbraucher im Wohnanhänger zu entladen, sodass dieser anschließend nicht mehr genug Reserven für die geplante Fahrt zur Verfügung hat. In diesem Fall kann ein zweiter Akku im Wohnwagen mitgeführt werden, wie in Abb. 5 dargestellt.

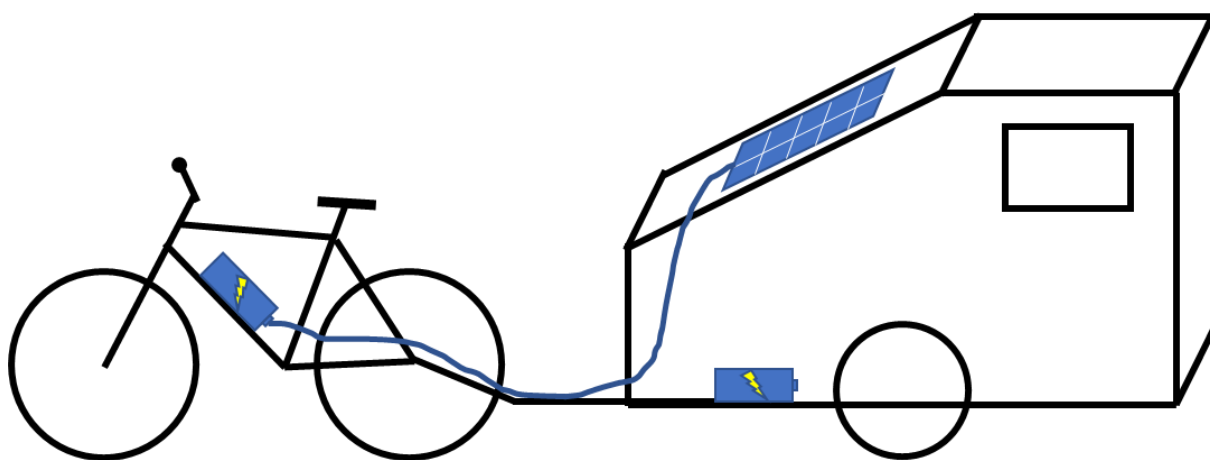
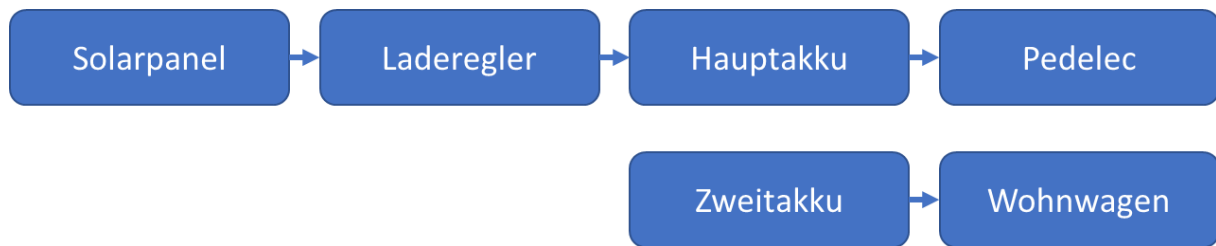


Abb. 5: Szenario 3 mit getrennten Akkus für Pedelec und Wohnwagen, wobei der Pedelecakku direkt geladen wird

Rein rechnerisch bietet es jedoch keine Vorteile, einen zweiten Akku mitzuführen. Genaugenommen wird die Reichweite durch einen zweiten Akku sogar reduziert, da die Energie des Zweitakkus nicht zur Verwendung im Pedelec zur Verfügung steht. So kann es passieren, dass der Zweitakku zwar noch fast komplett geladen ist und die Energiemenge für die weitere Strecke ausreichend wäre, der Hauptakku jedoch so weit entladen ist, dass man auf eine Lademöglichkeit, ob per Ladesäule oder eine längere Sonnenpause, angewiesen bleibt. Betreibt man jedoch größere Verbraucher im Wohnwagen und möchte deren Energiever-

brauch nicht gesondert im Auge behalten, so kann die Verwendung eines Zweitakkus sinnvoll sein. Um unnötige Ladeverluste sowie unnötiges Gewicht zu vermeiden, sollte die Solaranlage weiterhin zum Aufladen des Hauptakkus verwendet werden. Für den eher seltenen Fall eines leeren Zweitakkus ist es sinnvoller, diesen dann mit Hilfe des Hauptakkus aufzuladen, anstatt regelmäßig den Hauptakku mit Hilfe des Zweitakkus aufladen zu müssen. Zudem erlaubt dieses Vorgehen eine deutlich kleinere Dimensionierung des Zweitakkus, da dieser ausschließlich die Energie für den Wohnwagen speichern muss und keine Reserven zur Ladung des Hauptakkus benötigt.

Die Anschlussreihenfolge sieht wie folgt aus:



**Abb. 6: Einbauschema für Szenario 3**

### 3 Wie viel Energie liefert mein Solarpanel?

Eine Frage, welche mit einem Satz zu beantworten sein sollte – schließlich ist eine Leistungsangabe doch auf jedem Panel zu finden und dient den Verkäufern als größter Eyecatcher. Wird diese Leistung mit dem Nutzungszeitraum multipliziert, sollte sich dann wohl der Energieertrag ergeben – oder etwa nicht?

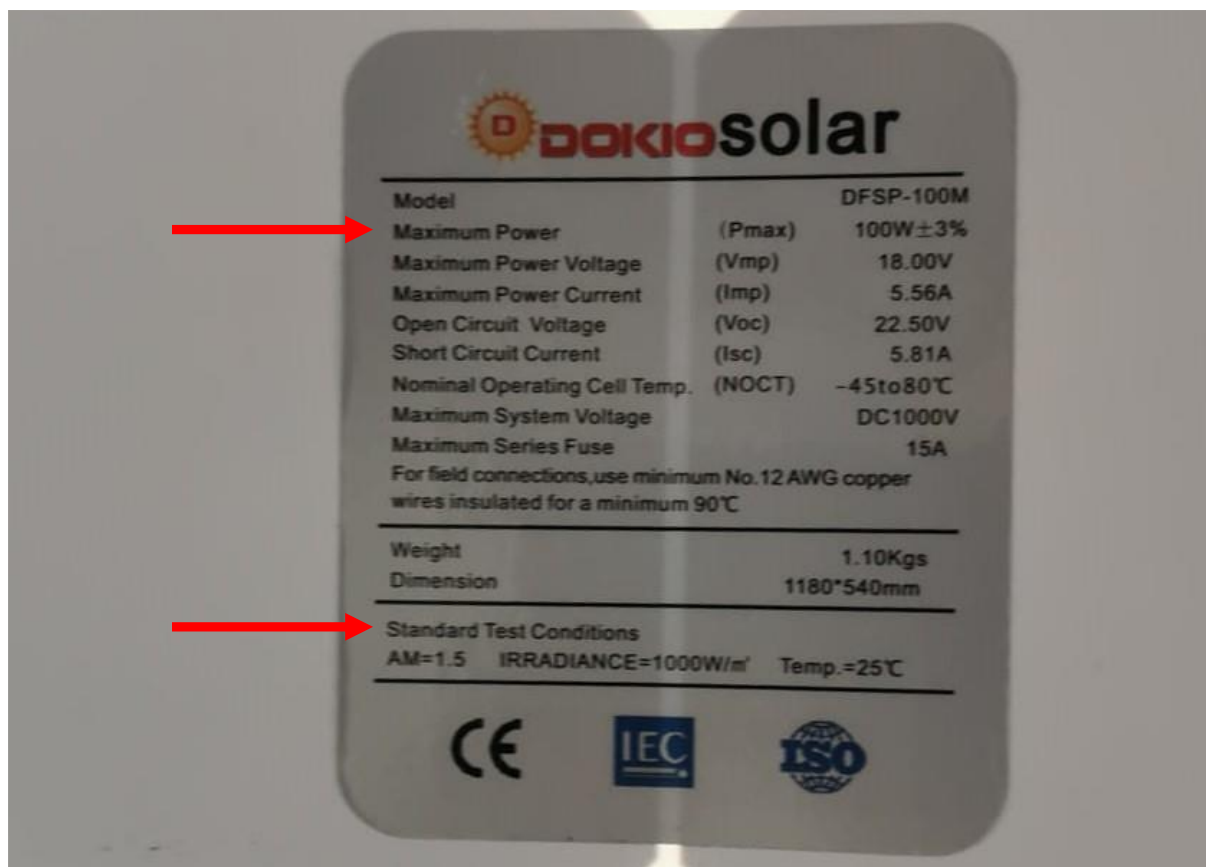


Abb. 7: Technische Daten eines Solarpanels unter „Standard Test Conditions“ (=STC)

So einfach ist die Thematik leider nicht, weshalb ich im Folgenden erklären möchte, mit welchen Erträgen realistisch zu rechnen ist.

Schauen wir uns zunächst die groß gedruckte Leistungsangabe unserer Panele an und fragen uns, was diese überhaupt bedeutet. Die Angabe erfolgt dabei üblicherweise in Watt-Peak (Formelzeichen „Wp“) und nicht in Watt (Formelzeichen „W“). Dies deutet bereits darauf hin, dass es sich bei der Angabe um einen Maximal- bzw. eben um einen Peakwert zu handeln scheint. Da das Solarpanel einen Teil der Sonnenstrahlung in elektrische Energie umwandelt, wissen wir intuitiv, dass es im Schatten oder bei bewölkten Bedingungen weniger Energie liefert. In diesen Situationen ist es also logisch, dass der angegebene Peakwert nicht erreicht wird. Doch auch bei wolkenlosem Himmel leisten die Panele meist weniger, woran liegt das? Schummeln die Hersteller etwa bei Ihren Angaben?

Die Sonnenenergie, welche am Erdboden ankommt, muss zunächst durch unsere Atmosphäre gelangen, wo sie teilweise absorbiert und reflektiert wird. Dieser Einfluss ändert sich sowohl mit der Tages- und Jahreszeit, der geografischen Lage, der Luftfeuchte und zig. weiteren Faktoren. Auch verlieren Solarzellen mit zunehmender Temperatur an Effizienz, sodass sie weniger der Sonnenenergie in elektrische Energie umwandeln können. Es ist also nur schwierig möglich, die tatsächliche Peakleistung eines Solarpanels pauschal anzugeben.

Aus diesem Grund werden Solarpanele in Laboraufbauten unter sogenannten Standard-Testbedingungen, kurz „STC“ (aus dem englischen: Standard Test Conditions) vermessen, sodass sie anhand der aufgedruckten Angaben überhaupt miteinander verglichen werden können. Diese Bedingungen schreiben unter anderem eine Lichtleistung von  $1000 \text{ W/m}^2$  und eine Paneltemperatur von  $25^\circ\text{C}$  vor. Dies sind Bedingungen, welche im praktischen Einsatz in Deutschland meist nicht oder nur sehr kurz erreicht werden können. Um also die im Einsatz zu erwartende Solarleistung möglichst genau abzuschätzen, müssen wir wissen, welche Lichtleistung auf unsere Solarzellen fällt, wie stark sich die Zellen durch die Sonneneinstrahlung aufheizen und wie hoch der Wirkungsgradverlust durch diese Aufheizung ist.

Zu dieser Betrachtung kommt der weitere Umstand hinzu, dass wir die Energie nicht ohne Verluste vom Solarpanel in einen Akku leiten können. Jedes weitere Bauteil, sei es ein Laderegler, ein Wechselrichter oder sogar ein Akku selbst, bringt größere oder kleinere Verluste mit sich. Diese Verluste wandeln wertvolle Energie in nutzlose Hitze um. Selbst wenn ein Solarpanel zu einem bestimmten Zeitpunkt also echte  $100 \text{ W}$  leistet, so können wir diese  $100 \text{ W}$  nicht vollständig in unseren Akku leiten.

In Summe lassen sich die wesentlichen Unterschiede, ausgehend von der aufgedruckten Peakleistung des Panels bis zur Leistung die wirklich in unserem Akku ankommt, wie folgt zusammenfassen:

- Weniger (oder mehr) Lichtleistung als unter STC vorgesehen
- Höhere (oder niedrigere) Temperatur als unter STC vorgesehen, damit ein schlechterer (oder besserer) Wirkungsgrad
- Verluste durch zusätzliche Bauteile wie Laderegler und Spannungswandler

#### **3.1 Herleitung von Umwanderverlusten sowie des Energieertrags für Solarpanele**

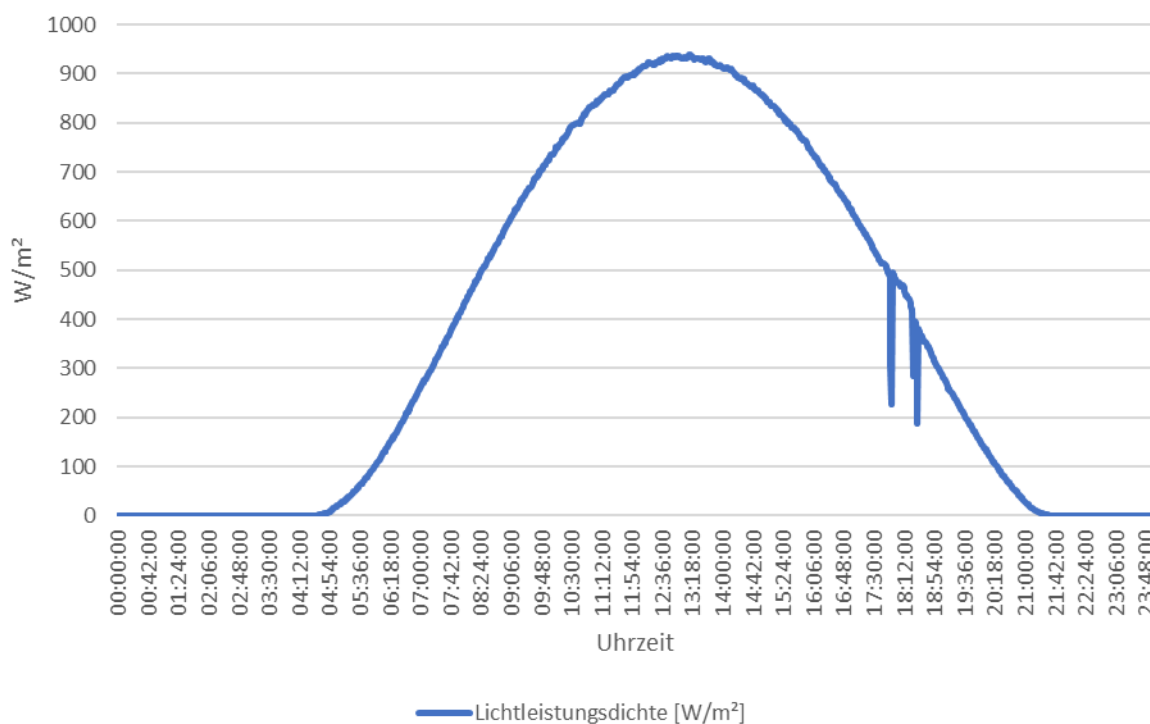
Achtung, dieses Kapitel ist sehr theorielastig! Leider ist die Angabe der tatsächlich zu erwartenden Leistung eines Solarpanels nicht ohne weiteres möglich. Im Folgenden beschreibe ich daher meinen Ansatz, einen möglichst guten Schätzwert für den Betrieb an einem Fahrradwohnwagen in Deutschland zu ermitteln. Dieses Kapitel kann jedoch auch übersprungen werden, sollten euch die vielen Details zu Sonneneinstrahlung, Erwärmung und Energieverluste einzelner Bauteile nicht interessieren. Wichtig ist nur zu verstehen, dass die ermittelten Werte lediglich Schätzwerte für „normale“ als auch „sehr gute“ Sommertage in Deutschland

darstellen, basierend auf Messdaten des Jahres 2020. Eine Zusammenfassung der Berechnungen findet sich in Kapitel 3.1.4.

### 3.1.1 Lichtleistung in Deutschland:

Zur Abschätzung der tatsächlich am Boden eintreffenden Lichtleistung verwende ich im Folgenden Messdaten des Jahres 2020 welche von der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Berlin (HTW Berlin) öffentlich zugänglich zur Verfügung gestellt werden [1]. Die Daten werden für verschiedene Ausrichtungen mit Hilfe spezieller Sensoren einer Wetterstation in Berlin Schöneeweide erfasst. Hierbei verwende ich ausschließlich die Messdaten für eine horizontale Ausrichtung, da diese die im Mittel beste Ausrichtung eines Solarpanels auf dem Fahrradwohswagen während der Fahrt darstellt.

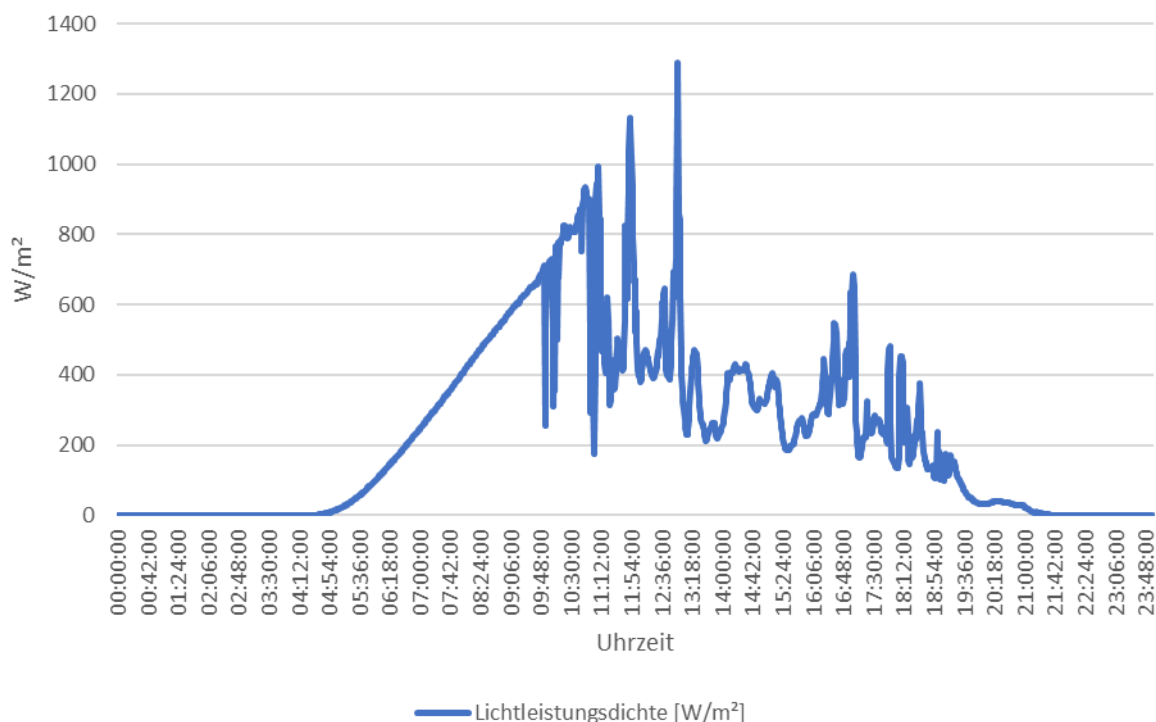
Abb. 8 zeigt beispielhaft den Verlauf der horizontalen Lichtleistung über die Uhrzeit für einen fast wolkenlosen Tag im Juni 2020. Es ist zu erkennen, dass die Leistung ab etwa 5:00 Uhr langsam ansteigt, bis sie um ca. 13 Uhr ihr Maximum mit knapp über 900 W/m<sup>2</sup> erreicht. Anschließend fällt sie langsam wieder ab, wobei zwischen 17 Uhr und 19 Uhr kleinere Wolken zu einer kurzzeitigen Reduktion der Leistung geführt haben. Ab etwa 21 Uhr steht die Sonne so tief, dass keine nennenswerte Lichtleistung mehr zu verzeichnen ist.



**Abb. 8: Leistungsdichte der horizontalen Sonnenstrahlung am 23.06.2020**

Über den gesamten Tagesverlauf von 0:00 Uhr bis 23:59 betrachtet lag die mittlere Lichtleistungsdichte bei etwa 370 W/m<sup>2</sup>.

Zum Vergleich zeigt Abb. 9 den Lichtleistungsverlauf des Folgetages. Es ist zu erkennen, dass die eintreffende Leistung ab etwa 9:30 Uhr stark schwankt. Diese Schwankungen sind auf zunehmende Bewölkung zurückzuführen.



**Abb. 9: Leistungsdichte der horizontalen Sonnenstrahlung am 24.06.2020**

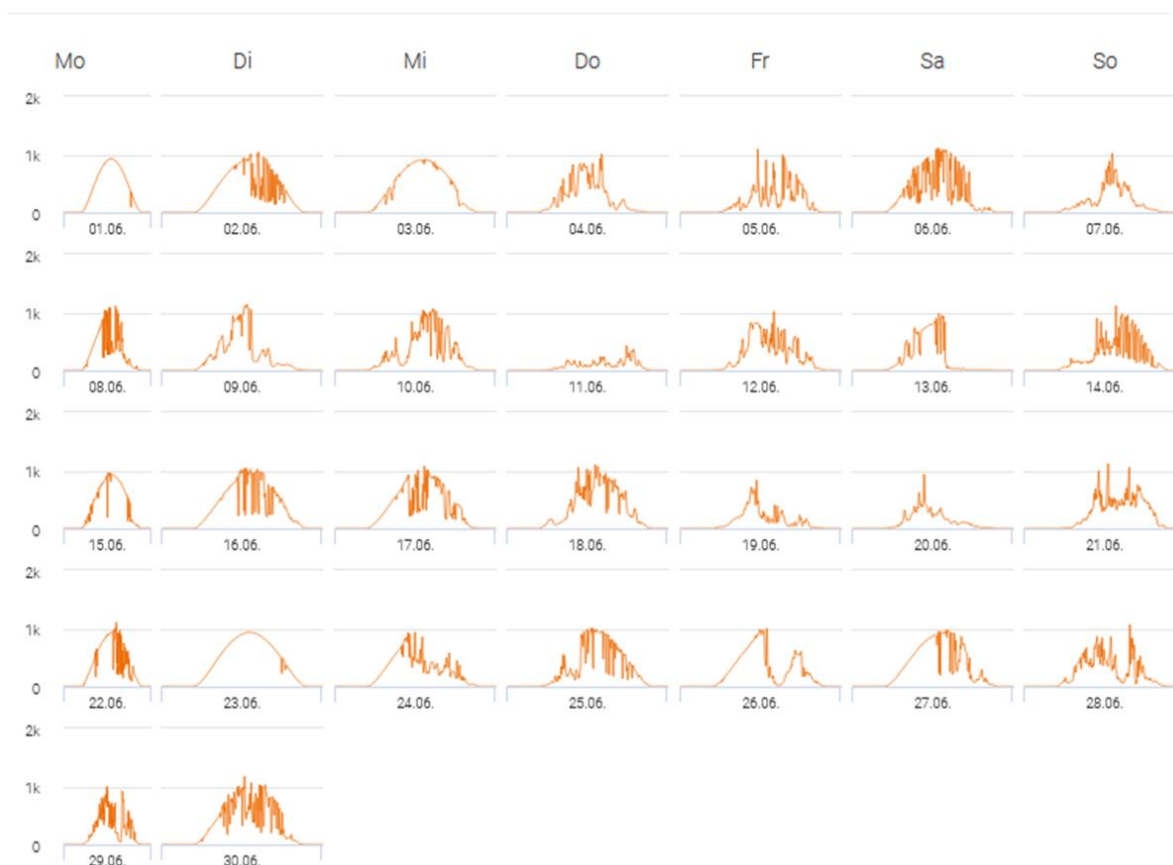
Über den gesamten Tagesverlauf hinweg lag die mittlere Lichtleistung an diesem bewölkteren Tag bei nur ca. 230  $W/m^2$  und damit etwa 40 % niedriger als am Tag zuvor. Auffällig ist jedoch, dass kurzzeitig Leistungsspitzen von über 1200  $W/m^2$  erreicht wurden, welche deutlich höher liegen als die maximalen ca. 950  $W/m^2$  des Vortages. Diese Auffälligkeit lässt sich auf Reflektionen und Diffusstrahlung durch die Wolkendecke zurückführen, welche das Licht kurzzeitig bündeln. Bei bewölktem Wetter sind daher häufig kurze Leistungsspitzen auch oberhalb von 1000  $W/m^2$  zu beobachten [24]. Diese liegen somit höher als die maximale Leistung bei wolkenlosem Wetter. Über den gesamten Tag hinweg betrachtet ist die am Boden eintreffende Gesamtenergie bei bewölktem Wetter dennoch deutlich niedriger als bei klarem Wetter.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Aus diesem Grund sollten die Aussagen so mancher Youtuber und Produkttester kritisch betrachtet werden, welche einem Panel aufgrund eines einzelnen Momentanmesswertes eine „überdurchschnittliche Leistung sogar bei eher bewölktem Wetter“ zusprechen.



Um eine möglichst realitätsnahe Abschätzung der zur erwartenden Lichtleistung im Sommer zu ermöglichen, habe ich alle Tage im Zeitraum vom 01. Mai 2020 bis zum 31 August 2020 wie in den obigen Beispielen ausgewertet. Um ein besseres Gefühl für „normale“ Tagesverläufe bekommen zu können ist zudem eine Gesamtübersicht für den Juni 2020 in Abb. 10 dargestellt. Hierbei kann ich jedoch nicht beurteilen, ob das allgemeine Wetter in diesem Monat durchschnittlich, besonders gut oder besonders schlecht im Vergleich zu anderen Jahren war.



**Abb. 10: Leistungsdichte der horizontalen Sonneneinstrahlung im Juni 2020**

Die Ergebnisse der Auswertung aller vier Monate ist in Abb. 11 zusammengefasst. Der sonnenreichste Monat war der Juni 2020, in welchem im Mittel eine Strahlungsleistung von  $244 \text{ W/m}^2$  den Boden erreicht hat. Über alle vier Monate hinweg ergibt sich eine durchschnittliche Leistungsdichte von ca.  $226 \text{ W/m}^2$ . Der ertragreichste Tag war hierbei der bereits betrachtete 23. Juni, in welchem im Mittel knappe  $370 \text{ W/m}^2$  erzielt werden konnten.

Monat:	Durchschnittliche Lichtleistungsdichte [W/m <sup>2</sup> ]:	Lichtleistungsdichte des besten Tages [W/m <sup>2</sup> ]:
	gemittelt von 0:00 bis 23:59 Uhr	gemittelt von 0:00 bis 23:59 Uhr
Mai 2020:	228,15	327,18
Juni 2020:	244,92	369,32
Juli 2020:	228,69	320,42
August 2020:	204,80	308,28
<b>Durchschnitt:</b>	<b>226,64</b>	<b>331,30</b>

**Abb. 11: Von 0:00 Uhr bis 23:59 Uhr gemittelte Leistungsdichte der Sonneneinstrahlung für ausgewählte Monate im Jahr 2020**

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass eine Strahlungsleistung von 1000 W/m<sup>2</sup>, wie sie durch die STC zur Vermessung von Solarpanelen zu Grunde gelegt wird, in Deutschland auch zum jeweiligen Sonnenhöchststand für horizontal ausgerichtete Panele nicht erreicht werden kann. Lediglich bei bewölktem Wetter kann es zu kurzen Leistungspeaks von über 1000 W/m<sup>2</sup> kommen. Über 24 Stunden hinweg werden im Sommer durchschnittlich nur ca. 226 W/m<sup>2</sup> erzielt. Nur an den besten Sonnentagen des Jahres können über 24 Stunden gemittelt Werte von etwa 330 W/m<sup>2</sup> erreicht werden.

**Dies bedeutet, dass ein horizontal ausgerichtetes Solarpanel ohne die Berücksichtigung sonstiger Verluste über eine Zeitspanne von 24 Stunden im Mittel etwa 23 % bis maximal 33 % des aufgedruckten Leistungswertes liefern kann. Dies entspricht 0,23 W/Wp bis maximal 0,33 W/Wp.**

#### **Beispiel:**

Ein 100 Wp starkes Solarpanel kann an einem durchschnittlichen Sommertag nicht mehr als maximal 552 Wh an Energie generieren:

$$0,23 \frac{W}{Wp} * 100 Wp * 24 h = 552 Wh$$

An einem sehr guten Sommertag wären es maximal 792 Wh:

$$0,33 \frac{W}{Wp} * 100 Wp * 24 h = 792 Wh$$

Diese Werte verstehen sich hierbei als absolut obere Grenze, also das Maximum, welches aufgrund der verfügbaren Sonnenstrahlung überhaupt möglich ist. Verluste durch eine Aufheizung der Panele sind hier noch nicht berücksichtigt, weshalb wir diese im folgenden Kapitel genauer betrachten werden. Auch Ladeverluste und zeitweise Abschattung sind hierbei unberücksichtigt.

### **3.1.2 Wirkungsgradverlust durch Erwärmung:**

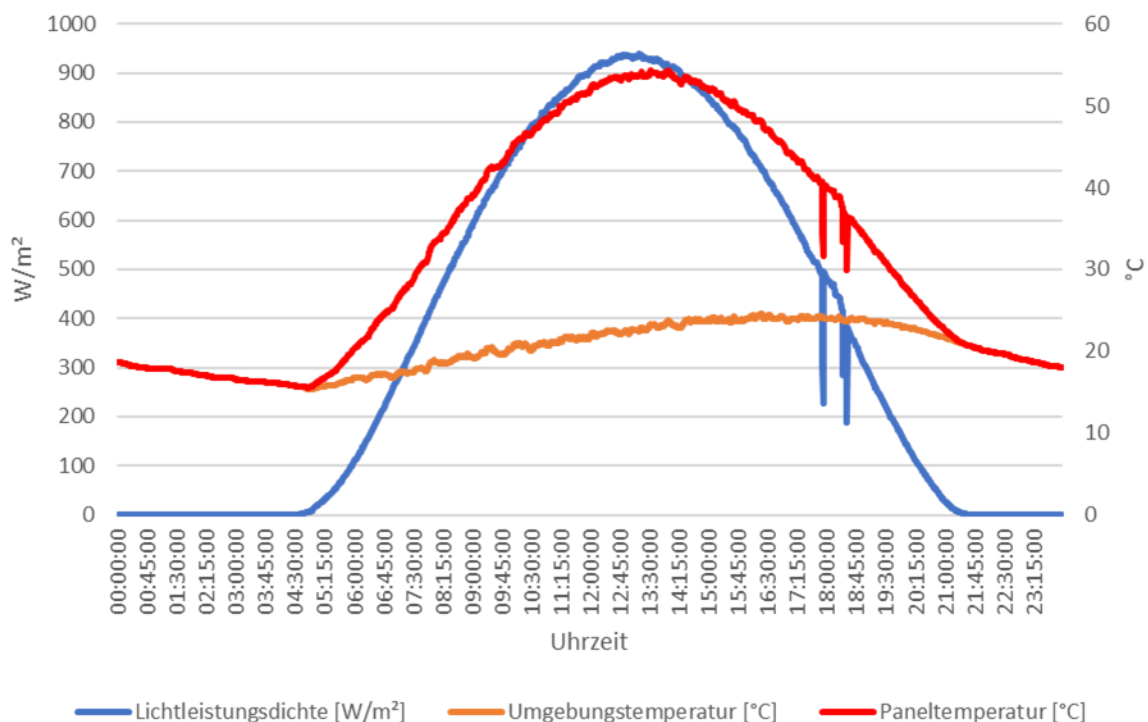
Um den Wirkungsgradverlust durch Erwärmung berücksichtigen zu können, müssen wir zunächst abschätzen, wie warm unser Solarpanel in der Sonne wird. Die meisten Berichte und Artikel über dieses Thema geben eine maximale Erwärmung von bis zu 30 °C über

Umgebungstemperatur an [2, 3, 4]. Die Erwärmung der Solarpanele kommt dabei ausschließlich durch die einstrahlende Sonnenenergie zustande, welche wie in Abb. 10 dargestellt innerhalb Deutschlands maximal ca.  $900 \text{ W/m}^2$  beträgt.

Für die Berechnung der Paneltemperatur nehme ich vereinfacht an, dass sich diese gleichmäßig mit der eintreffenden Lichtleistung verändert und bei  $900 \text{ W/m}^2$  ca.  $30 \text{ °C}$  über Umgebungstemperatur liegt. Eine Lichtleistung von  $450 \text{ W/m}^2$  würde folglich eine Temperatur von  $15 \text{ °C}$  über Umgebungstemperatur bedeuten, während  $0 \text{ W/m}^2$  zu keiner Erwärmung der Paneele führen.

Mit dieser Grundlage können wir anhand der in Kap. 3.1.1 vorgestellten Lichtleistungswerte die Temperaturerhöhung eines Solarpanels schätzen. Glücklicherweise liefert die Wetterstation der TUB neben der Lichtleistung ebenfalls Messwerte der Umgebungstemperatur, sodass wir diese zur geschätzten Temperaturerhöhung addieren und somit die Gesamttemperatur eines Solarpanels für jeden Zeitpunkt bestimmen können.

Dieses Vorgehen möchte ich beispielhaft anhand der Messwerte des 23 Juni 2020 erläutern, welche in Abb. 12 dargestellt sind.



**Abb. 12: Lichtleistung, Umgebungstemperatur und geschätzte Paneltemperatur am 23.06.2020**

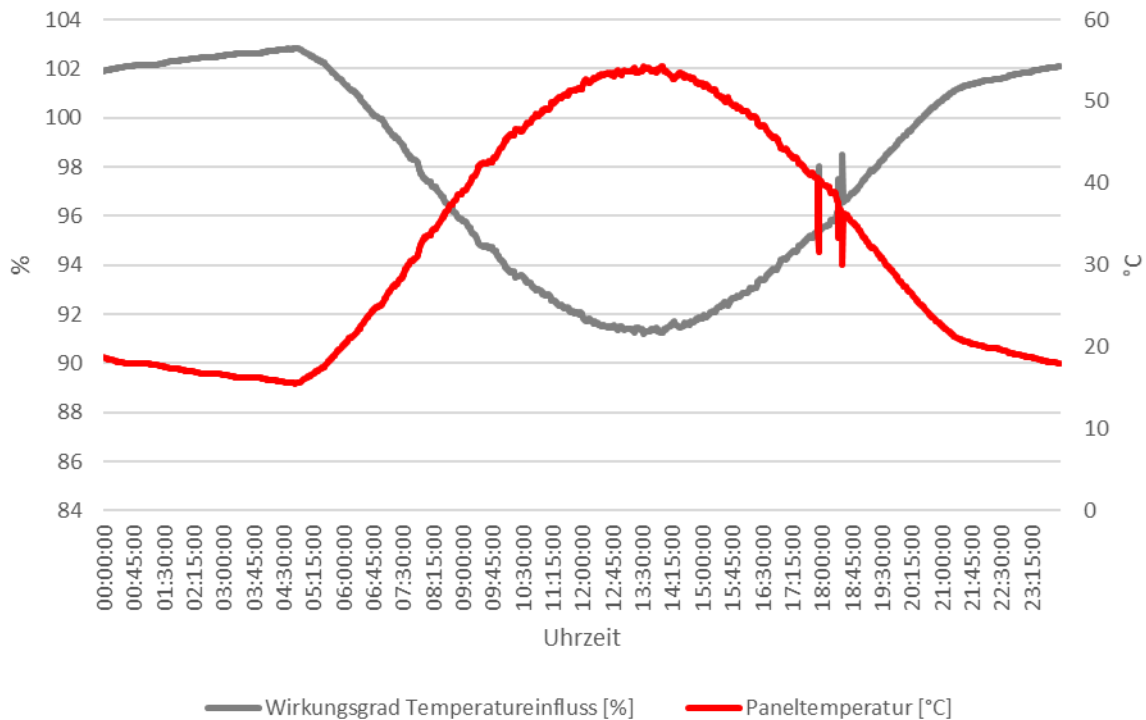
Die blaue Kurve zeigt den uns bereits bekannten Verlauf der Lichtleistung, welche in Kap. 3.1.1 genauer vorgestellt wurde. Die orangene Kurve wiederum zeigt den gemessenen Temperaturverlauf der Umgebung. Diese ist nachts bis auf etwa  $15 \text{ °C}$  abgekühlt und er-

wärmt sich ab dem Sonnenaufgang um 5:00 Uhr langsam wieder. Die maximale Umgebungstemperatur von 25 °C wurde schließlich um etwa 18:00 Uhr erreicht. Ab diesem Zeitpunkt kühlt sich die Umgebung langsam wieder bis auf 20 °C ab.

Während die Panele (rote Kurve) nachts noch dieselbe Temperatur wie die Umgebung haben, steigt die berechnete Temperatur mit zunehmender Sonneneinstrahlung immer weiter an, sodass sie in den Mittagsstunden merklich wärmer als die Umgebung sind. Die Paneltemperatur erreicht ihr Maximum von etwa 55 °C kurz nach dem Sonnenhöchststand. Auch ist zu erkennen, dass sich die Panele aufgrund der Bewölkung zwischen 17 Uhr und 19 Uhr kurzzeitig abkühlen können, bis sie sich zum Sonnenuntergang kurz nach 21 Uhr wieder an die Umgebungstemperatur angleichen.

Anhand dieser Temperaturkurve lässt sich im Folgenden der Temperaturwirkungsgrad der Panele über den Tag hinweg berechnen. Solarpanele verlieren im Schnitt mit jedem zusätzlichen Grad an Temperatur zwischen 0,25 % bis 0,4 % ihrer Leistung [3, 4, 5], wobei ich im Folgenden von einem mittleren Leistungsverlust von 0,3 %/°C ausgehen werde. Ist das verwendete Solarpanel bekannt, so kann der exakte Wert auch direkt dem Datenblatt entnommen werden. Der Leistungsverlust bezieht sich hierbei immer auf den aufgedruckten Leistungswert, welcher wiederum bei 25 °C ermittelt wird. Dies bedeutet, dass ein Panel „Wirkungsgrade“ von über 100% erreicht, wenn es kühler als 25 °C ist. Ein 20 °C kühles Panel liefert beispielsweise 101,5 % seiner angegebenen Leistung, während es bei einer Temperatur von 50 °C unter sonst gleichen Bedingungen nur noch 92,5 % leistet.

Abb. 13 zeigt sowohl die berechnete Temperatur (rot) als auch den temperaturbedingten Wirkungsgrad (grau) eines horizontal ausgerichteten Panels für den 23. Juni 2020.



**Abb. 13: Paneltemperatur und Panelwirkungsgrad für den 23.06.2020**

Es ist deutlich zu erkennen, wie der Wirkungsgrad proportional zur Temperatur sinkt. Während aufgrund der niedrigen Temperaturen von unter 25 °C nachts über sogar ein „Wirkungsgrad“ von mehr als 100 % erreicht wird, sinkt dieser mit ansteigender Sonnenleistung zum Mittag hin bis auf unter 92 % ab. Von diesem Zeitpunkt an kühlen die Paneele langsam wieder ab und der Wirkungsgrad steigt entsprechend an.

Es könnte nun ein durchschnittlicher Wirkungsgrad ermittelt werden. Dieser hat jedoch nur wenig Aussagekraft, da es immer entscheidend ist, zu welcher Zeit ein jeweiliger Wirkungsgrad erreicht wird. Ein Wirkungsgrad von über 100 % klingt im ersten Moment sehr gut, bringt jedoch keine Vorteile, wenn er ausschließlich nachts oder bei sehr geringer Sonneneinstrahlung erreicht wird. Gleichzeitig treten die höchsten Temperaturen und somit die niedrigsten Wirkungsgrade zu Zeiten der besten Sonneneinstrahlung auf und führen somit zu besonders hohen Ertragsminderungen.

Aus diesem Grund habe ich den temperaturbedingten Wirkungsgrad minutengenau mit den jeweiligen Lichtleistungen verrechnet. Wird zu einem Zeitpunkt beispielsweise eine Lichtleistung von 900 W/m<sup>2</sup> bei einem temperaturbedingten Wirkungsgrad von 92 % erreicht, so leistet das Panel lediglich 0,828 W/Wp:

$$\frac{W}{W_p} = \frac{\text{Strahlungsleistung real}}{\text{Strahlungsleistung STC}} * \text{temperaturbedingter Wirkungsgrad}$$

$$\frac{900 \text{ W/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} * 0,92 = 0,828$$

**Beispiel:** Ein mit 100 Wp beschriftetes Solarpanel liefert an einem guten, wolkenlosen Sommernachmittag (Lichtleistung 900 W/m<sup>2</sup>, Paneltemperatur 52 °C) temperaturbedingt nur 92 % der zu erwartenden Leistung. Dies entspricht zu diesem Zeitpunkt also einer tatsächlichen Leistung von 82,8 W, welche an die angeschlossene Elektronik geleitet wird.

Die durchschnittliche Tagesleistung für die betrachteten Monate Mai bis August des Jahres 2020 sind in Abb. 14 zusammengefasst. Die Werte berücksichtigen die am Boden eintreffende Strahlungsleistung in Kombination mit den temperaturbedingten Wirkungsgraden. Im Mittel leistete ein Panel 0,2154 W/Wp, während es an den besten Tagen Werte von 0,3114 W/Wp erzielt werden konnten.

Monat:	Durchschnittliche Pannelleistung [W/Wp]:	Durchschnittliche Pannelleistung [W/Wp]:
	gemittelt von 0:00 bis 23:59 Uhr	gemittelt von 0:00 bis 23:59 Uhr
Mai 2020:	0,2208	0,3112
Juni 2020:	0,2303	0,3461
Juli 2020:	0,2178	0,3006
August 2020:	0,1928	0,2877
<b>Durchschnitt:</b>	<b>0,2154</b>	<b>0,3114</b>

**Abb. 14: Von 0:00 Uhr bis 23:59 Uhr gemittelte Gesamtwirkungsgerade für ausgewählte Monate im Jahr 2020**

Da diese Werte stets über 24 Stunden gemittelt sind, geben sie keine Auskunft über die tatsächliche Leistung zu einem bestimmten Zeitpunkt. Sie eignen sich jedoch, um den Energieertrag eines durchschnittlichen Tages abzuschätzen.

Ein 100 Wp Solarpanel kann an einem durchschnittlichen Sommertag also etwa 517 Wh an Energie generieren:

$$0,2154 \frac{W}{Wp} * 100 Wp * 24 h = 516,96 Wh$$

An einem sehr guten Sommertag wären es schon etwa 747 Wh:

$$0,3114 \frac{W}{Wp} * 100 Wp * 24 h = 747,4 Wh$$

Diese Werte gehen davon aus, dass sich das Solarpanel zu keinem Zeitpunkt im Schatten befindet und stets horizontal ausgerichtet ist. Auch sind noch keine Verluste durch die nachgeschaltete Elektronik berücksichtigt, welche im folgenden Kapitel genauer betrachtet werden.

Für alle weiteren Betrachtungen werde ich auf Grundlage der erläuterten Berechnungen von **durchschnittlichen 0,22 W/Wp für normale Tage sowie von 0,31 W/Wp für sehr gute Tage** ausgehen.

### 3.1.3 Verluste durch Ladeelektronik und Spannungswandler

Während wir in den Kapiteln 3.1.1 und 3.1.2 die Verluste vor und im Solarpanel genauer betrachtet haben, schauen wir nun auf die Lade- und Umwandelverluste nach dem Solarpanel an. Je nachdem, welche und wie viele Bauteile wir benötigen, um die Energie aus dem Panel in unseren Akku zu leiten, variieren auch die Lade- und Umwandelverluste. Dies bedeutet insbesondere, dass es Unterschiede je nach gewähltem Einbauszenario (vgl. Kapitel 2 „Wie integriere ich eine Solaranlage in meinen Fahrradwohnen?“) gibt.

Bevor wir die Gesamtverluste innerhalb der einzelnen Einbauszenarien vergleichen können, müssen wir zunächst die Verluste jedes einzelnen Bauteils bestimmen.

#### **MPPT Laderegler: 5 % Verluste**

Ein MPPT-Laderegler betreibt ein Solarpanel stets im optimalen Betriebspunkt. Gleichzeitig wandelt die integrierte Ladeelektronik die Solarspannung auf ein Niveau, mit welchem der Akku geladen werden kann. Der klassische MPPT-Laderegler benötigt hierbei stets eine höhere Solar- als Akkuspannung, da er die Spannung ausschließlich reduzieren, nicht aber erhöhen kann. Innerhalb des Datenblatts zu den als qualitativ hochwertig geltenden „Victron SmartSolar“ Ladereglern findet sich die Angabe einer maximalen Effizienz von bis zu 98%. Dieser Wert ist allerdings als Bestfall zu verstehen und nicht repräsentativ für einen Gebrauch über längere Zeiträume. Effizienzkurven existieren für Laderegler dieser Serie leider nicht, ein Supportmitarbeiter bescheinigt ihnen auf eine Nachfrage im Herstellerforum allerdings eine realistische Effizienz zwischen 90 % – 94 % [7]. Der Youtuber Will Prowse vergleicht in einem seiner Videos zudem Laderegler verschiedenster Hersteller, welche alle sehr ähnliche Leistungen zeigen. Er misst unter anderem die ein- und ausgehende Leistung, aus welchen sich die jeweiligen Verluste berechnen lassen. In seinem konkreten Setup ergeben sich schwankende Verlustleistungen zwischen 2 % - 5 % [8]. Der Youtuber Mark Osborne ermittelt für seine Laderegler ebenfalls Verlustleistungen zwischen 3 % - 5 % [9]. Ausgehend von diesen Werten setze ich für die folgenden Berechnungen eine Verlustleistung von 5 % an.

#### **MPPT Boost Laderegler: 8 % Verluste**

Liefern die Solarpaneele weniger Spannung als zum Laden des Akkus benötigt wird, so benötigt es einen „Boost Laderegler“. Diese Laderegler wandeln die Spannung zum Aufladen des Akkus hoch, anstatt sie zu verringern. Klassischerweise sind die Verluste beim Hochwandeln der Spannung jedoch etwas größer als sie für eine Spannungsreduzierung ausfallen. Der Youtuber Adam Welch führt in einem seiner Videos ausführliche Effizienzmessungen mit einem weit verbreiteten MPPT Boost Laderegler aus China durch [10]. Die gemessenen Verlustleistungen liegen bei etwa 8 %, welche ich im Folgenden allgemein für diese Laderegler annehmen werde.

#### **Zweitakku:** 1 % Verluste

Wird ein eigener Akku als Zwischenspeicher genutzt um anschließend den eigentlichen Hauptakku aufzuladen, so finden auch innerhalb dieses Akkus Energieverluste statt. Hierbei spielen chemische Verluste eine untergeordnete Rolle dar, doch kommt es insbesondere beim Entladevorgang eines Akkus zu einer Erwärmung der Zellen. Die Stärke dieser Erwärmung hängt insbesondere von der Entladegeschwindigkeit im Verhältnis zur Akkugröße sowie der Belastbarkeit der Zellen ab und ist nur schwer allgemein abzuschätzen. Um diese Verluste zu berücksichtigen und ohne sie unrealistisch hoch zu gewichten, nehme ich sie mit 1 % an.

#### **Wechselrichter:** 12,5 % Verluste

Laut der Wissensdatenbank des Elektronikhändlers Reichelt haben durchschnittliche 12 V zu 230 V Wechselrichter einen Wirkungsgrad von nur 85 % - 90 %. Das Datenblatt der beliebten TS-400 Serie des Herstellers Meanwell bescheinigt den unterschiedlich großen Modellen der Serie ebenfalls Effizienzen zwischen 84,5 % bis 88,5 %. [12, 13]. Als Mittelwert dieser Angaben gehe ich von einer Verlustleistung von durchschnittlich 12,5 % aus.

#### **230V Akkuladegerät:** 8 % Verluste

Da normale E-Bike-Ladegeräte in der Regel an Haushaltssteckdosen betrieben werden spielt der Wirkungsgrad dieser Geräte für den Verbraucher meist eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund finden sich eher wenig verlässliche Angaben zu den entstehenden Verlusten während des Ladevorgangs. In einem Artikel von e-Bike-News wird „modernen Ladegeräten“ ein Wirkungsgrad von bis zu 95 % zugesprochen [14]. In einem Forenbeitrag des Pedelec-Forums messen Mitglieder Wirkungsgrade von etwa 93 % [15]. Zum Vergleich habe auch ich die aufgenommene und abgegebene Leistung meines eigenen 4A 58,8V Ladegeräts vermessen. Für eine Ladeleistung von 217,7 W hat es 235,3 W aus der Steckdose gezogen. Dies entspricht einer Verlustleistung von etwa 8 %, welche ich im Folgenden auch für weitere Berechnungen verwenden werde.



Anhand der aufgeführten Einzelverluste lassen sich nun die Gesamtverluste für die in Kapitel 2 beschriebenen Einbauszenarien errechnen. Abb. 15 zeigt die Verluste für das Einbauszenario 1, welches von der Mitführung eines Zweitakkus ausgeht, mit welchem über einen 230 V Wechselrichter ein proprietäres Ladegerät für den Pedelecakku betrieben wird.

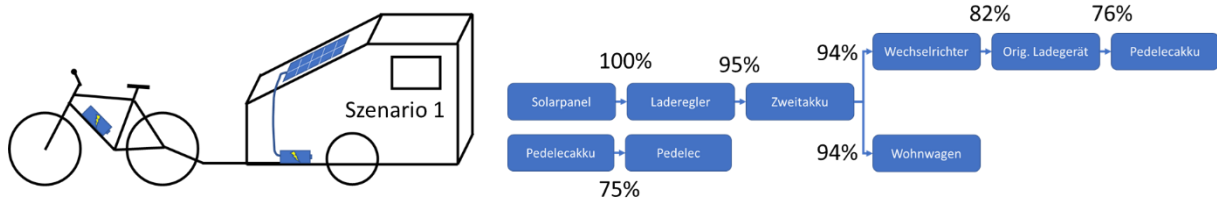


Abb. 15: Energieverluste zwischen Solarpanel und Pedelecakku für Einbauszenario 1

Der Laderegler zum Aufladen des verwendeten Zweitakkus arbeitet mit der angenommenen Verlustleistung von 5 %, sodass 95 % der Energie aus dem Solarpanel in den Zweitakku gespeist werden können. Aufgrund der internen Verluste des Akkus von etwa 1 % stehen anschließend nur noch knapp über 94 % der Solarenergie für die Wohnwagenelektronik sowie für den Wechselrichter zur Verfügung. Die hohe Verlustleistung des Wechselrichters sowie des Akkuladegeräts führen dazu, dass schließlich nur noch 76 % der Solarenergie in den Pedelecakku gespeist werden können. Insgesamt stehen dem Motor des Pedelecs 75 % der erzeugten Solarenergie zur Verfügung.

Verglichen hierzu sind die Wirkungsgrade des Szenario 2 und 3 in Abb. 16 dargestellt.

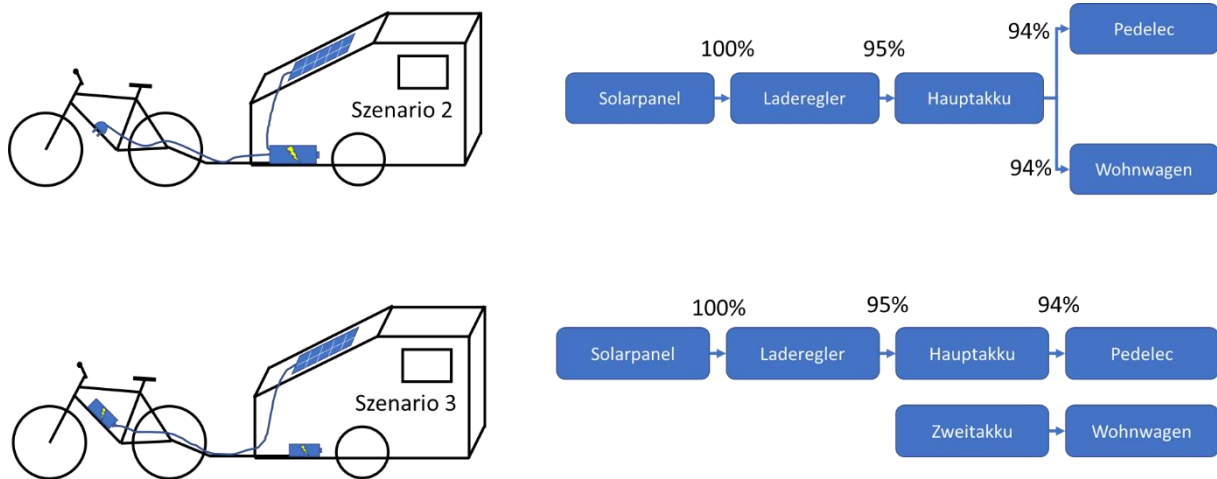


Abb. 16: Abb. 79: Energieverluste zwischen Solarpanel und Pedelecakku für Einbauszenario 2 und 3

Durch den Wegfall der des Wechselrichters und des zusätzlichen Ladegerätes können 95 % der Solarenergie in den Pedelecakku gespeist werden. Aufgrund der internen Akkuverluste stehen der Wohnwagenelektronik in Szenario 2 jedoch nur etwa 94 % zur Verfügung, während Szenario 3 hierfür einen separaten Akku und somit keinen Solarstrom zum Betrieb des Wohnwagens verwendet.

**Beispiel:** Ein 100 Wp Solarpanel kann an einem durchschnittlichen Sommertag etwa 517 Wh an Energie generieren. An einem sehr guten Sommertag wären es schon etwa 747 Wh (vgl. Kapitel 3.1.2). Wird der eBike-Akku wie in Szenario 1 von einem Wechselrichter aus einer Zwischenbatterie geladen, so kommen davon an einem durchschnittlichen Tag nur etwa 388 Wh bzw. 560 Wh an einem sehr guten Tag im Akku an:

$$517,7 \text{ Wh} * 0,75 = 388,28 \text{ Wh} \quad | \quad 747,4 \text{ Wh} * 0,75 = 560,55 \text{ Wh}$$

Kann der eBike-Akku direkt über den Laderegler aufgeladen werden, so sind die Verluste geringer und wir können den Akku an einem normalen Sommertag stattdessen um 487 Wh bzw. um 702 Wh am einem sehr guten Tag aufladen:

$$517,7 \text{ Wh} * 0,94 = 486,64 \text{ Wh} \quad | \quad 747,4 \text{ Wh} * 0,94 = 702,56 \text{ Wh}$$

### 3.1.4 Tagesertrag einer Solaranlage am Fahrradwohnwagen

Anhand der in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.3 hergeleiteten Kenngrößen können wir nun den Tagesertrag unserer Solaranlage schätzen.

Für einen durchschnittlichen Sommertag erwarten wir, dass unser Solarpanel eine über 24 Stunden gemittelte Leistung von etwa 0,2154 W/Wp erbringt. Dies entspricht einem Tagesertrag von 5,18 Wh/Wp, welche an die angeschlossene Elektronik geleitet werden.

Aufgrund von Verlusten in unserer Elektronik kommen davon jedoch nur ca. 75 % (Szenario 1) oder aber bis zu 94 % (Szenario 2 und 3) in unserem Akku an, was ca. 3,94 Wh/Wp bzw. 4,92 Wh/Wp entspricht. Für einen richtig guten Sommertag kann der Akku um bis zu 5,68 Wh/Wp bzw. 7,10Wh/Wp geladen werden. Eine Übersicht der Werte für durchschnittliche sowie besonders gute Tage des Jahres 2020 sind in Abb. 17 für ein 100 Wp Solarpanel zusammengefasst.

100 Wp Panel	Normaler Tag			Bester Tag		
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Mai 2020	403 Wh	503 Wh	503 Wh	568 Wh	709 Wh	709 Wh
Juni 2020	420 Wh	525 Wh	525 Wh	631 Wh	789 Wh	789 Wh
Juli 2020	397 Wh	496 Wh	496 Wh	548 Wh	685 Wh	685 Wh
August 2020	352 Wh	440 Wh	440 Wh	525 Wh	656 Wh	656 Wh
Durchschnitt	393 Wh	491 Wh	491 Wh	568 Wh	710 Wh	710 Wh

**Abb. 17: Maximale Tagesladung des Akkus bei Verwendung eines 100 Wp Solarpanels**

Diese Werte gehen davon aus, dass das Solarpanel horizontal ausgerichtet ist und sich zu keiner Zeit im Schatten befindet. Insbesondere während der Fahrt wird sich eine Abschattung jedoch nicht verhindern lassen, weshalb auf Ausfahrten in der Praxis mit weniger Solar-

---

energie zu rechnen ist. Der genaue Unterschied hängt dabei stark von der gewählten Strecke und Fahrtzeit ab.

## 4 Gewicht und Kosten für Akkus und Solarsysteme

Um einen fairen Vergleich zwischen der Mitnahme eines zusätzlichen Akkus oder aber eines Solarpanels mit Ladeelektronik treffen zu können, müssen wir zunächst die jeweiligen Kosten und Gewichte der beiden Möglichkeiten ermitteln.

### 4.1.1 Gewicht und Kosten eines Akkus

Standardmäßig werden für Pedelecs sog. Lithium-Ionen-Akkus verwendet. Diese stellen die heutzutage leichteste und am Markt verfügbare Akkutechnologie dar. Die zugehörigen Akkus bieten also die größte Energiemenge pro Kilogramm. Die Energiedichte liegt je nach Ausführung des Akkus allgemein bei etwa 90 – 250 Wh/kg [16]. Gängige Pedelecakkus für „Fertigpedelecs“ wie beispielsweise die PowerPack-Serie von Bosch weisen Energiedichten von bis zu etwa 180 Wh/kg auf [17]. Drittanbieter und Eigenbauten schaffen durch Ausführungen als „Softpack“ (Rucksackakku Akku ohne festes Gehäuse mit lediglich einer Schrumpfschlauchummantelung) Energiedichten von bis zu 240Wh/kg [18] während Gehäuseausführungen bei etwa 190 – 220 Wh/kg liegen [18, 19].

Auch die Kosten unterscheiden sich je nach Ausführung des Akkus. So schlagen die weit verbreiteten Systemakkus des Herstellers Bosch mit ca. 1,00 – 1,50 €/Wh zu buche, während Akkus von Drittherstellern nur etwa 0,55 – 0,95 €/Wh kosten [17, 18, 19]. Eine Übersicht beispielhafter Akkus ist in Abb. 18 gegeben.

Name:	Kapazität [Wh]	Gewicht [kg]:	Kosten [€]:	Leistungsdichte [Wh/kg]	Kosten [€/Wh]:
Bosch Powerpack 300	300	2,5	440	120,00	1,47
Bosch Powerpack 400	400	2,5	450	160,00	1,13
Bosch Powerpack 500	500	2,6	550	192,31	1,10
Bosch powerTube 400	400	2,9	485	137,93	1,21
Bosch powerTube 500	500	2,9	545	172,41	1,09
Bosch powerTube 625	625	3,5	630	178,57	1,01
Enerprof HaiLong PLUS Rahmenakku Li-Ion 48V 17,25Ah 35E	830	3,65	455	227,40	0,55
Enerprof Hailong PRO Rahmenakku Li-Ion 48V 13,8Ah 35E	660	2,95	395	223,73	0,60
Enerprof Softpack-Akku 48V 10Ah BMS 20A XLR-3 mit 50E	480	2	225	240,00	0,47
Enerprof Softpack-Akku 24V 10,35Ah BMS 20A XLR-3 mit 35E	250	1,2	195	208,33	0,78
Fasterbikes 900Wh Rucksackakku 52V 14S 5P Ebike	900	4,3	770	209,30	0,86
Fasterbikes 730Wh Flaschenhalter Akku 52V 14S 4P Super Shark	730	3,8	700	192,11	0,96

**Abb. 18: Gewicht, Kapazität und Kosten einiger beispielhafter Akkus**

Für den endgültigen Vergleich nehme ich daher eine Energiedichte von 180 Wh/kg bei Kosten von 1,10 €/Wh für Systemakkus an, welche ich für das Einbauszenario 1 betrachten werde. Für die Szenarien 2 und 3 gehe ich von Akkus von Drittherstellern mit einer durchschnittlichen Energiedichte von 210 Wh/kg und Kosten von etwa 0,80 €/Wh aus.

### 4.1.2 Gewicht und Kosten einer Solaranlage

Zur Ermittlung des ungefähren Gewichts und Kosten einer Solaranlage habe ich zunächst einige gängige Panele miteinander verglichen (siehe Abb. 19). Zwischen den Herstellern gibt es hohe Kostenschwankungen, während jedoch durchweg zu erkennen ist, dass größere Panele ein besseres Preis- Leistungsverhältnis als auch Leistungs- Gewichtsverhältnis bieten. Betrachtet habe ich aus Gewichtsgründen ausschließlich flexible, monokristalline Panele, welche momentan die leichtesten am Markt verfügbaren Panele darstellen.

Module:	Leistung [Wp]:	Gewicht [kg]:	Kosten [€]:	Leistungsdichte [Wp/kg]:	Relative Kosten [€/Wp]:
GreenAkku Neptun	30	1,1	67	27,27	2,23
Offgridtec ETFE SPR-F-35 V2	35	0,85	79,9	41,18	2,28
Sunbeam Tough 37 W flush	37	0,7	179,95	52,86	4,86
OffgridTec PCB-ETFE	50	2,5	94,9	20,00	1,90
MC Camping Basic Panel Flex MC-100	100	2,4	219	41,67	2,19
Sunbeam Tough 111W flush	111	2	449,95	55,50	4,05
Greenakku SunPower	120	4,5	225	26,67	1,88
Greenakku Venus	120	2,7	195	44,44	1,63
Greenakku ETFE Marine	120	4,21	209	28,50	1,74
Offgridtec ETFE-AL	120	4	179,9	30,00	1,50
EnjoySolar Eco Line ES120M36	120	4,3	168,95	27,91	1,41
GreenAkku Neptun	130	3,8	203	34,21	1,56
Offgridtec ETFE SPR-F-120 V2	135	2,8	224,9	48,21	1,67
MC Camping Basic Panel Flex MC-150	150	3,2	329	46,88	2,19
Offgridtec ETFE-AL	160	6,6	229,9	24,24	1,44
Greenakku Venus	160	3,3	245	48,48	1,53
OffgridTec PCB-ETFE	180	3,6	284,9	50,00	1,58
GreenAkku Neptun	195	4,5	289	43,33	1,48
<b>Durchschnitt bis 50Wp:</b>				<b>35,33</b>	<b>2,82</b>
<b>Durchschnitt ab 100 Wp:</b>				<b>39,29</b>	<b>1,85</b>

**Abb. 19: Gewicht, Leistung und Kosten einiger beispielhafter Solarpaneele**

Paneele bis zu einer Leistung von etwa 50 Wp erreichen eine Leistungsdichte von etwa 20 bis 50 Wp/kg. Die relativen Kosten liegen zwischen 1,90 bis 4,86 €/Wp. Panele mit einer Leistung zwischen 100 bis 200 Wp weisen Leistungsdichten von etwa 24 bis 56 Wp/kg bei relativen Kosten von 1,4 bis 4 €/Wp auf. Die jeweiligen Durchschnittswerte sind der Tabelle in Abb. 19 zu entnehmen.

Für die Kosten eines MPPT-Ladereglers sowie eines MPPT-Boost-Ladereglers setze ich jeweils 75 € an. Dies entspricht in etwa dem Mittelwert aus günstigen Chinamodellen wie sie für etwa 30 – 40 € von diversen Resellern angeboten werden sowie echten Markenmodellen von beispielsweise Victron oder GenaSun, welche jeweils etwa 150 € bis 200 € kosten [20, 21].

## 5 Akku Vs. Solar - Beispiele

In diesem Kapitel möchte ich einige konkrete Beispiele durchrechnen und anhand des jeweiligen Beispiels bewerten, ob bzw. ab wann sich der Einbau einer entsprechenden Solaranlage wirklich lohnt. Abschließend wird eine allgemeine Aufstellung mit Hilfe der in Kapitel 4 ermittelten Durchschnittswerte betrachtet.

### 5.1 100 Wp Solarpanel mit Powerbank und Fertigpedelec

#### 5.1.1 Das Solarsetup

Das erste Beispiel bildet das wohl klassischste Setup: Wir verwenden ein fertig gekauftes Pedelec mit zugehörigem Akku und 230 V Ladegerät. Um möglichst wenig selbst verdrahten zu müssen entscheiden wir uns für den Einbau einer Solarpowerbank, welche wir über ein 100 Wp Solarmodul aufladen. Eine Solarpowerbank vereint dabei den Solarladeregler, Zweitakku und Wechselrichter in einem Gehäuse mit einigen Extras wie z.B. USB-Anschlüssen und häufig auch Taschenlampen. Die vom Powerbankhersteller angebotenen Solarpaneele sind meist etwas teurer, weshalb wir hier ein kompatibles Solarmodul eines anderen Herstellers wählen. Dieses Setup entspricht dem „Szenario 1“ aus Kapitel 2.1.1.

Die betrachtete Powerbank ist eine AC50S der Firma Poweroak welche eine der ersten Vorschläge auf Amazon darstellt. Die Kapazität des verbauten Akkus beträgt 500 Wh bei einem Gesamtgewicht von 6,18 kg. Die Kosten liegen bei 540 € [22]. Das gewählte Solarpanel ist ein flexibles 100 Wp Panel der Firma Topsolar, welches 140 € kostet und ca. 1,8 kg wiegt [23]. Auch dieses Modul stellt einen der ersten Vorschläge beim Versandriesen dar. Beide Komponenten sind in Abb. 20 dargestellt.

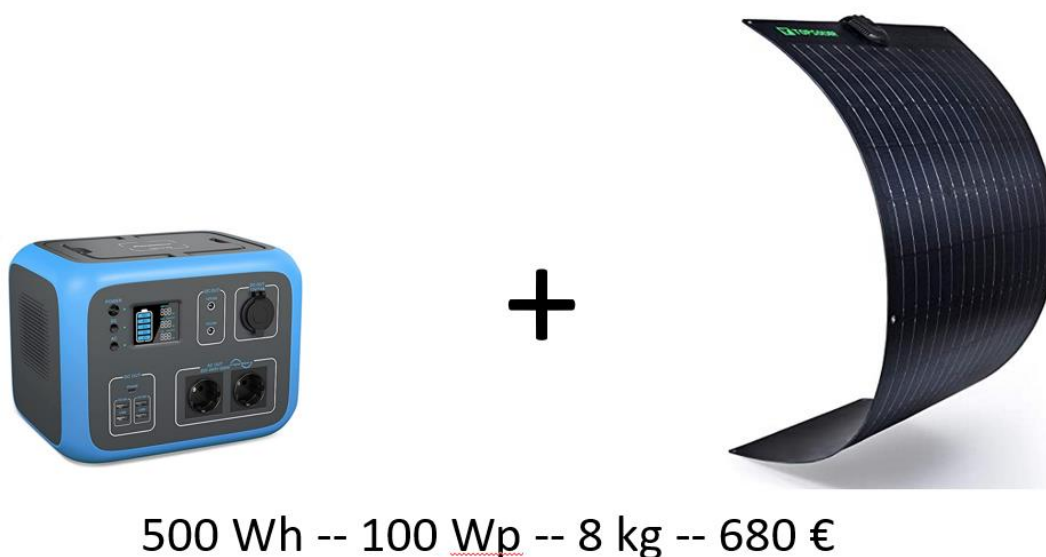


Abb. 20: Poweroak Powerbank und Topsolar Solarpanel [22, 23]

Zum Aufladen des Pedelecakkus muss zudem das herstellereigene 230 V Ladegerät mitgenommen werden. Ausgehend vom Bosch „Standard Charger“ entspricht dies einem zusätzlichen Gewicht von ca. 0,8 kg. Da dieses Ladegerät ohnehin vorhanden sein sollte sind dessen Kosten jedoch nicht zusätzlich zu berücksichtigen.

Zu guter Letzt benötigt es einen zweiten Pedelecakku, welcher im Anhänger geladen werden kann, während der erste Akku im Fahrrad eingesetzt ist. Gewicht und Kosten dieses Akkus werden jedoch nicht berücksichtigt, da selbiges Gewicht und Kosten ebenfalls im Akkusetup anfallen und sie sich somit ausgleichen.

Das zusätzliche Gesamtgewicht des reinen Solarsetups beträgt somit ca. 8,8 kg während es 680 € kostet.

### 5.1.2 Energieertrag des Solarsetups

Nach den in Kapitel 3 vorgestellten Berechnungen ist für einen durchschnittlichen Sommertag mit einer über 24 Stunden gemittelten Solarleistung von 0,2154 W/Wp auszugehen. Weiterhin können aufgrund der Wandelverluste nur ca. 76 % dieser Leistung in den Pedelecakku geladen werden.

Für das in diesem Setup verwendete Solarpanel bedeutet dies einen durchschnittlichen Tagesertrag von 394 Wh:

$$100 \text{ Wp} * 21,57 \% * 76 \% * 24 \text{ h} = 394 \frac{\text{Wh}}{\text{Tag}}$$

Da bei Fahrtbeginn alle Akkus gefüllt sind und der im Pedelec eingesetzte Akku nicht während der Fahrt geladen werden kann, muss dieser zunächst etwas entleert werden. Vorher kann keine Solarleistung zum Aufladen dieses Akkus verwendet werden.

Durch die Powerbank werden zudem bereits 500 Wh zu Fahrtbeginn zusätzlich mitgenommen, von welchen aufgrund der Ladeverluste von Wechselrichter und Ladegerät (vgl. Kapitel 3.1.3) jedoch nur 403 Wh im Pedelecakku landen können:

$$500 \text{ Wh} * 87,5 \% * 0,92 \% = 403 \text{ Wh}$$

### 5.1.3 Energie der Akkualternative

Anstatt der Solarpowerbank, des Solarpanels und des Ladegerätes hätten alternativ auch weitere Akkus mitgenommen werden können. Da ein Fertigpedelec verwendet wird kommen hierfür ausschließlich kompatible Akkus desselben Herstellers in Betracht. Für dieses Beispiel wird von einem Pedelec mit Antrieb der Firma Bosch ausgegangen, was die Auswahl auf entsprechende Akkus beschränkt.

Ist der Kostenrahmen der entscheidende Faktor, so hätte für den Betrag von 680 € alternativ auch ein Bosch Powertube 625 mitgenommen werden können, welcher mit 630 € etwas

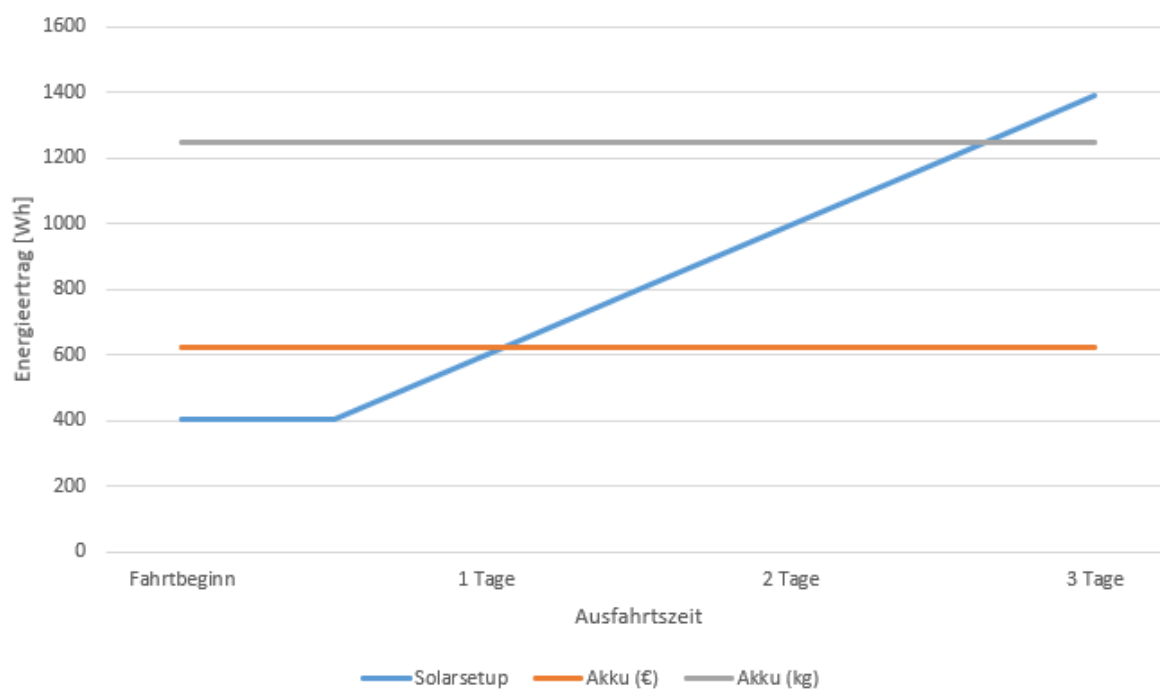
günstiger und mit 3,5 kg sogar deutlich leichter als die Solaralternative ausfällt. Dieser Akku bietet 625 Wh.

Ist das mitgeführte Gewicht der limitierende Faktor, so hätten anstatt des 8,8 kg schweren Solarsetups auch gleich zwei weitere Powertube 625 mit einem Gesamtgewicht von 7 kg mitgenommen werden können. Der Preis läge in diesem Fall bereits bei 1260 €, die Gesamtkapazität entspricht 1250 Wh.

Da die Akkus in beiden Fällen direkt mit dem Pedelec verbunden werden müssen keine Wandelverluste wie bei der Powerbank des Solarsetups berücksichtigt werden. Die Energie kann somit zu 100 % genutzt werden.

#### 5.1.4 Fazit

Trägt man den Energieertrag des vorgestellten Solarsetups gegen die Kapazität der jeweiligen Akkualternativen auf, ergibt sich der in Abb. 21 dargestellte Verlauf.



**Abb. 21: Energieertrag der Solaranlage gegenüber den jeweiligen Akkukapazitäten**

Zu Fahrtbeginn stehen mit dem Solarsetup 403 Wh zusätzlich zur Verfügung. Während der ersten Tageshälfte können jedoch keine Solarerträge erwirtschaftet werden, da der im Pedelec eingesetzte Akku zunächst etwas entladen werden muss. Zur Mittagspause wird dieser dann über das Ladegerät mit der Solarpowerbank verbunden und der zweite Akku ins Pedelec eingesetzt. Zum Ende des ersten Tages konnten somit ca. 200 Wh über das Solarpanel in den Pedelecakku geladen werden, was mit den nutzbaren 403 Wh der Powerbank in etwa derselben zusätzlichen Energiemenge entspricht, wie mit einem Akku gleicher Kosten ebenfalls hätte mitgenommen werden können.



Während der weiteren Ausfahrtszeit wird der entladene Pedelecakku regelmäßig mit dem am Ladegerät befindlichen Zweitakku ausgetauscht, sodass die Leistung des Solarpanels möglichst ununterbrochen in einen der Akkus geladen werden kann. Nach einer Ausfahrtszeit von 2,5 Tagen können somit knappe 850 Wh zusätzlich generiert werden, was mit den nutzbaren 403 Wh der Powerbank in etwa derselben zusätzlichen Energiemenge entspricht, wie mit den Akkus gleichen Gewichts ebenfalls hätte mitgenommen werden können.

Es lässt sich in diesem Setup also sagen, dass sich die Mitnahme der Solaranlage frühestens bei Ausfahrten ab mindestens einem Tag Länge gegenüber der Mitnahme eines gleich teuren Akkus rentieren kann. Stellt das Gewicht den entscheidenderen Faktor dar, so muss die Ausfahrtszeit bereits mindestens 2,5 Tage betragen.

In diesem Beispiel wurde kein Schattenwurf berücksichtigt. Die tatsächlich benötigten Ausfahrtszeiten werden also höher liegen und die Berechnungen geben die durchschnittlichen Minimalzeiten an, ab welchen sich eine Solaranlage rentieren kann. Das bedeutet, dass eine Solaranlage bei kürzeren Ausfahrtszeiten gegenüber einem Akku keinen Mehrwert bedeutet. Wie viel länger die Ausfahrten jedoch sein müssen hängt stark von der gewählten Fahrtstrecke und der zugehörigen Aufenthaltszeit im Schatten ab.

## II Quellen und Links

- [1] <https://wetter.htw-berlin.de/History>
- [2] <https://www.womoblog.ch/Blog/Reisebericht/Temperaturmessung-Solarmodule/1260/>
- [3] <https://www.welt.de/wirtschaft/energie/article143523151/Die-Rekordhitze-bremst-die-Solarstrom-Produktion.html>
- [4] <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/solarmodule-fotovoltaikanlagen-leiden-unter-hitzewelle-a-1154692.html>
- [5] <https://www.solaranlage.eu/photovoltaik/technik-komponenten/solarmodule/leistungsabfall-hitze>
- [6] gelöscht
- [7] <https://community.victronenergy.com/questions/2392/mppt-7510-efficiency-curve.html>
- [8] [https://www.youtube.com/watch?v=kF\\_cVEYxj3E](https://www.youtube.com/watch?v=kF_cVEYxj3E)
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=GpPLk2sOG0U>
- [10] <https://www.youtube.com/watch?v=omAhsQqwWSo>
- [11] <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator#Wirkungsgrad>
- [12] <https://www.reichelt.de/reicheltpedia/index.php/Wechselrichter>
- [13] <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001292377DS01/datenblatt-1292377-mean-well-wechselrichter-ts-400-248b-400-w-48-vdc.pdf>
- [14] <https://ebike-news.de/wie-hoch-sind-die-betriebskosten-beim-e-bike/172376/>
- [15] <https://www.pedelecforum.de/forum/index.php?threads/wirkungsgrad-bosch-ladeger%C3%A4t-2013.33464/>
- [16] <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator>
- [17] <https://www.bosch-ebike.com/de/produkte/akkus>
- [18] <https://fasterbikes.eu/de/akkus/akkus/>
- [19] <https://enerprof.de/fahrradakkus/>

- [20] <https://greenakku.de/Ladegeraete/Solarladeregler/MPPT-Solarladeregler/SmartSolar-MPPT-100-20-48V-Solarladeregler-12-48V-20A::1744.html>
- [21] [https://genasun.eu/products/genasun-gv-boost-8-lithium-56-8-volt-mppt?\\_pos=2&\\_sid=05d08a0e4&\\_ss=r](https://genasun.eu/products/genasun-gv-boost-8-lithium-56-8-volt-mppt?_pos=2&_sid=05d08a0e4&_ss=r)
- [22] [https://www.amazon.de/POWEROAK-mobiler-energiespeicher-generator-Emergency/dp/B08KZLSK91/ref=sr\\_1\\_3?\\_mk\\_de\\_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=1SGWO57G01CDP&keywords=powerstation&qid=1640788897&srefix=powerstatio%2Caps%2C92&sr=8-3&th=1](https://www.amazon.de/POWEROAK-mobiler-energiespeicher-generator-Emergency/dp/B08KZLSK91/ref=sr_1_3?_mk_de_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=1SGWO57G01CDP&keywords=powerstation&qid=1640788897&srefix=powerstatio%2Caps%2C92&sr=8-3&th=1)
- [23] [https://www.amazon.de/Solarmodul-Monokristallin-Photovoltaik-Solarladeger%C3%A4t-Solaranlage/dp/B08MKSG4B9/ref=sr\\_1\\_2\\_sspa?\\_mk\\_de\\_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=solar%2Bflexibel&qid=1626539869&s=industrial&sr=1-2-spons&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUEwUzBMS1ICNDg4R0NGJmVuY3J5cHRIZElkPUEwMzcyMzA5M0YzODJYQUQ2WFIZVSZlbnNyeXB0ZWRBZEIkPUEwODM0NTI0MUZWWVNSU1YyVFE0TiZ3aWRnZXROYW1IPXNwX2F0ZiZhY3Rpb249Y2xpY2tSZWRpcmVjdCZkb05vdExvZ0NsaWNrPXRydWU&th=1](https://www.amazon.de/Solarmodul-Monokristallin-Photovoltaik-Solarladeger%C3%A4t-Solaranlage/dp/B08MKSG4B9/ref=sr_1_2_sspa?_mk_de_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&dchild=1&keywords=solar%2Bflexibel&qid=1626539869&s=industrial&sr=1-2-spons&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUEwUzBMS1ICNDg4R0NGJmVuY3J5cHRIZElkPUEwMzcyMzA5M0YzODJYQUQ2WFIZVSZlbnNyeXB0ZWRBZEIkPUEwODM0NTI0MUZWWVNSU1YyVFE0TiZ3aWRnZXROYW1IPXNwX2F0ZiZhY3Rpb249Y2xpY2tSZWRpcmVjdCZkb05vdExvZ0NsaWNrPXRydWU&th=1)
- [24] <https://www.bayern-innovativ.de/seite/pv-energie-wolkenreflexionen>

## III Anhang

A1            Auf Anfrage            Berechnungsunterlagen (Excel-Tabellen)