
Diplomarbeit

Herr
Alves Oertelt

**Auslegung eines
Photovoltaiksystems für die
autarke Nutzung elektrischer
Energie in
Campingfahrzeugen**

2024

Fakultät: Ingenieurwissenschaften

DIPLOMARBEIT

Auslegung eines Photovoltaiksystems für die autarke Nutzung elektrischer Energie in Campingfahrzeugen

Autor:

Herr Alves Oertelt

Studiengang:

Industrial Engineering

Seminargruppe:

IE21w1-D

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Michael Kuhl

Zweitprüfer:

M.Sc. Kevin Blümel

Einreichung:

Mittweida, 14.08.2024

DIPLOMA THESIS

**Design of a photovoltaic
system for the self-sufficient
use of electrical energy in
camping vehicles**

author:

Mr. Alves Oertelt

Course of studies:

Industrial Engineering

seminar group:

IE21w1-D

first examiner:

Prof. Dr.-Ing. Michael Kuhl

second examiner:

M.Sc. Kevin Blümel

submission:

Mittweida, 14.08.2024

Bibliografische Beschreibung:

Oertelt, Alves:

Auslegung eines Photovoltaiksystems für die autarke Nutzung elektrischer Energie in Campingfahrzeugen. –2024. – 61 Seiten, 30 Abbildungen.

Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Diplomarbeit, 2024

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Auslegung eines Photovoltaiksystems für die autarke Nutzung elektrischer Energie in Campingfahrzeugen. Die Schwerpunkte liegen bei der Analyse von Hardwarekomponenten und der Erstellung eines Schemas zur Dimensionierung eines Photovoltaiksystems.

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 <i>Problemstellung</i>	1
1.2 <i>Zielsetzung</i>	2
1.3 <i>Abgrenzung Inhalt</i>	2
1.4 <i>Stand der Forschung</i>	3
1.5 <i>Gang der Untersuchung</i>	3
2 Grundlagen	5
2.1 <i>Solares Strahlungsangebot</i>	5
2.2 <i>Photovoltaik</i>	8
2.2.1 <i>Leiter, Nichtleiter, Halbleiter</i>	9
2.2.2 <i>Innerer Photoeffekt</i>	10
2.2.3 <i>p-n-Übergang</i>	11
2.2.4 <i>Solarzelle</i>	12
2.2.5 <i>Wirkungsgrad Solarzelle</i>	17
2.2.6 <i>Solarzellentechnologien</i>	18
2.2.7 <i>Ausrichtung einer Solarzelle</i>	19
2.3 <i>Photovoltaik-Module</i>	19
2.3.1 <i>Verschaltung von Solarzellen</i>	20
2.3.2 <i>Hinterlüftung</i>	22
2.3.3 <i>Aufbau und Ausführung eines PV-Moduls</i>	22
2.4 <i>Solarladeregler</i>	24
2.4.1 <i>PWM-Solarladeregler</i>	25
2.4.2 <i>Maximum Powerpoint Tracking</i>	26
2.4.3 <i>Vergleich Solarladeregler</i>	27
2.5 <i>Speicherung der elektrischen Energie</i>	27

2.5.1	Blei-Säure-, Blei-Gel- und AGM-Akkumulator	28
2.5.2	Lithium-Eisenphosphat Akkumulator	31
2.5.3	Vergleich der Akkumulatoren	34
2.6	<i>Wechselrichter</i>	34
3	Dimensionierung eines Photovoltaiksystems	37
3.1	<i>Ermittlung des Bedarfs elektrischer Energie</i>	37
3.1.1	Optimierung des Energiebedarfs.....	38
3.1.2	Verbrauchsbewusste Nutzung eines Wechselrichters	39
3.2	<i>Auslegung Akkumulator</i>	40
3.3	<i>Auslegung Solargenerators</i>	41
3.3.1	Ermittlung des Strahlungsangebots.....	41
3.3.2	Dimensionierung PV-Modul.....	44
3.3.3	Auswahl der Ausführung	47
3.3.4	Auswahl interne Verschaltung des PV-Moduls	47
3.3.5	Auswahl des PV-Moduls	48
3.3.6	Verschaltung der PV-Module	49
3.3.7	Ausrichtung des Solargenerators	49
3.4	<i>Auslegung Solarladeregler</i>	50
3.5	<i>Dimensioniertes Photovoltaiksystem</i>	51
3.6	<i>Typische Nutzerprofile</i>	51
4	Verschattungsversuch	53
5	Verfahrensfließbild.....	56
6	Fazit	60
7	Handlungsempfehlung	61
Literatur	62
Anlagen	64
Selbstständigkeitserklärung	67

Abbildungsverzeichnis

Abb.: 1 Elektromagnetisches Spektrum (vgl. Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, F. 2020, S.114).....	5
Abb.: 2 Zur Erklärung der Air-Mass-Zahl (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.34)....	6
Abb.: 3 Spektrale Verteilung der Globalstrahlung bei AM 1,5 und AM (vgl. Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, F. 2017, S.124).....	7
Abb.: 4 Für Si-Solarzellen energetisch nutzbarer Bereich des solaren Spektrums (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.361)	7
Abb.: 5 Mittlere monatliche Tagessummen von Diffus-und Direktstrahlung (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.23)	8
Abb.: 6 Leitungsband, Valenzband und Bandlücke (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.342)	10
Abb.: 7 Schematischer Aufbau einer Solarzelle (nicht maßstabsgerecht) (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.35)	13
Abb.: 8 Ersatzschaltbild einer Solarzelle (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1335).....	14
Abb.: 9 Strom-Spannungskennlinie einer Solarzelle (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.356)	14
Abb.: 10 Strom- Spannungskennlinie Solarzelle für unterschiedliche Temperaturen (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.38).....	16
Abb.: 11 Abhängigkeit von Strom und Spannung einer Solarzelle bei unterschiedlicher Einstrahlung (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.38(links)) (vgl. Vinaricky, E; Schröder, K-H, Weiser, J 2016, S.821(rechts)).....	17
Abb.: 12 Verluste an einer Solarzelle (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1339).....	18
Abb.: 13 Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen mit Strom-Spannungskennlinien (vgl. Watter, H, 2022, S.23).....	21

Abb.: 14 Solarzellen Strings mit Bypassdiode zum Schutz gegen „Hot Spot“ Bildung (vgl. Zahoransky,R 2022, S 432)	21
Abb.: 15 Typischer Aufbau eines starren kristallinen PV-Moduls (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.66)	22
Abb.: 16 IU-Ladekennlinie für AGM und Blei-Gel Akkumulatoren (Quelle: ective.de)	24
Abb.: 17 IU-Ladekennlinie für LiFePO ₄ - Akkumulatoren (Quelle: ective.de)	25
Abb.: 18 Schematische Darstellung der nutzbaren Leistung des PV-Moduls mit PWM-Laderegler(Darstellung erweitert aus vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.356).....	26
Abb.: 19 Schematischer Aufbau eines Bleisäure-Akkumulators (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.418).....	29
Abb.: 20 Schematische Entladecharakteristik eines Blei-Säure-Akkumulators bei konstantem Strom (vgl. Sterner, M; Stadler, I; 2017, S.253)	30
Abb.: 21 Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle (vgl. Sterner, M; Stadler, I; 2017, S.284).....	32
Abb.: 22 Lade- und Entladekurven von LiFePO ₄ / Graphit (LFP/C) und anderen Li-Ionen Akkumulatoren (vgl. Sterner, M; Stadler, I; 2017, S.284).....	33
Abb.: 23 Schema Rechteckwechselrichter und PWM-Wechselrichter (vgl. Watter, H, 2022, S.25).....	35
Abb.: 24 Vergleich reiner Sinus (links) und modifizierter Sinus (rechts) (eigene Darstellung)	36
Abb.: 25 Monatssummern Globalstrahlung für das Jahr 2023 in Deutschland (Quelle: dwd.de).....	42
Abb.: 26 Durchschnittliche Globalstrahlung für Madrid für Sep 22 – Dez 23 und mit Langzeitdaten (Quelle: aemet.es)	42
Abb.: 27 Durchschnittliche Globalstrahlung für Madrid für Dezember 2023 (Quelle: aemet.es).....	43
Abb.: 28 Daten des Versuchsaufbaus	53

Abb.: 29 Verschattung verschiedener Bereiche eines PV-Moduls	54
Abb.: 30 Verfahrensfließbild zur Auslegung eines Photovoltaiksystems im Campingfahrzeug.....	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Wirkungsgrade monokristalline und polykristalline Solarzelle (Quelle: solartronics.de)	18
Tabelle 2 Vergleich PWM- und MPPT-Solarladeregler.....	27
Tabelle 3 Vergleich der Akkumulatortechnologien (Quelle: victronenergy.de; ective.de) .	34
Tabelle 4 Energiebedarf eines Campingfahrzeugs als Mobile Office für zwei Personen..	38
Tabelle 5 Vergleich Energiebedarf Leuchtmittel in Halogen- und LED-Technik.....	38
Tabelle 6 Vergleich des Ladens zweier Smartphones an Wechsel- und Gleichspannung	39
Tabelle 7 Auswahl geeigneter Akkumulatoren (Quelle: ective.de).....	40
Tabelle 8 Eigenschaften an den Solargenerator	48
Tabelle 9 Daten des ausgewählten Solargenerators (Quelle: ective.de)	49
Tabelle 10 Anforderungen an MPPT-Laderegler.....	50
Tabelle 11 Daten des ausgewählten MPPT-Ladereglers (Quelle: victronenergy.de).....	50
Tabelle 12 Vergleich des dimensionierten PV-Systems mit den Systemanforderungen ..	51
Tabelle 13 Beispieldimensionierung für typische Einsatzzwecke von Campingfahrzeugen	52
Tabelle 14 Ergebnisse Verschattung von 25% der PV-Modulfläche.....	55

Abkürzungsverzeichnis

AGM	Absorbent Glass Mat
AM	Air Mass
LiFePO₄	Lithium-Eisen-Phosphat
MPPT	maximum power point tracking
PV	Photovoltaik
PWM	Pulsweitenmodulation
WR	Wechselrichter

1 Einleitung

Zu den Grundanforderungen eines Menschen an seine Unterkunft zählt unter anderem auch die Versorgung mit elektrischer Energie. Jene Anforderung gilt auch für mobile Wohnstätten wie Campingfahrzeuge. Diese Campingfahrzeuge beziehen ihre elektrische Energie von Akkumulatoren, welche wiederum meist durch den Verbrennungsmotor des Campingfahrzeuges oder durch Anschluss an das Stromnetz aufgeladen werden. Die moderne Technik bietet die Möglichkeit diese Akkumulatoren alternativ durch eine weltweit verfügbare Energiequelle, die Strahlungsenergie der Sonne, aufzuladen. Dies geschieht mithilfe der Photovoltaik, welche es ermöglicht die Energie der sichtbaren elektromagnetischen Strahlung der Sonne in elektrische Energie umzuwandeln.

Durch Systeme, welche dem Nutzerverhalten angepasst sind, ist es möglich die elektrischen Verbraucher im Wohnaufbau eines Campingfahrzeugs vollständig elektrisch autark vom festen Stromnetz zu betreiben. Die Ermittlung von Nutzerprofilen und die optimierte Auslegung eines Systems zur netzautarken Versorgung mit elektrischer Energie ist Untersuchungsgegenstand dieser Diplomarbeit.

1.1 Problemstellung

Immer mehr Nutzer von Campingfahrzeugen beschäftigen sich mit dem Thema netzautarker Versorgung mit elektrischer Energie, um eine größere Flexibilität beim Reisen zu erreichen. Es gibt eine Vielzahl von Anbietern, welche die notwendige Technik für solch ein Vorhaben anbieten. Allerdings ist es für den Nutzer oft nicht leicht abzuschätzen, welche der zahlreichen Kombinationen aus technischen Komponenten für den jeweiligen Einsatzzweck am besten geeignet ist. Da die Anforderungen von einzelnen Nutzern individuell sind, ist es meist nicht zielführend eine technische Pauschallösung zu erwerben. Es ist nicht davon auszugehen, dass Personen, welche ihr Campingfahrzeug mit Technik zur netzautarken Versorgung mit elektrischer Energie ausrüsten, die Komponenten und deren Leistungsfähigkeit korrekt einschätzen können. Somit ergibt sich eine Ungewissheit darüber, welche technischen Komponenten und deren Dimensionierung und Art für welchen Anwendungsfall geeignet sind. Ein Photovoltaiksystem stellt einen beliebten Anwendungsfall für die Netzautarkie bei Campingfahrzeugen dar.

Daher ergibt sich die Fragestellung: Wie sind eine Photovoltaikanlage und ihre notwendigen technischen Komponenten in Art und Dimensionierung auszulegen, um für ein individuelles Nutzerprofil eine netzautarke Versorgung mit elektrischer Energie zu gewährleisten?

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Vermittlung des Wissens darüber, mit welchen Komponenten welcher Art eine Photovoltaikanlage für ein Campingfahrzeug zu dimensionieren ist, um dieses elektrisch autark auszurüsten.

Dies ist mit dem Ziel der Erarbeitung eines Verfahrensfließschemas für die optimale Auswahl der Komponenten zu erarbeiten.

1.3 Abgrenzung Inhalt

Ein Photovoltaiksystem mit auf den Einsatzzweck angepassten Komponenten kann zu finanziellen Kosten im Einkauf für den Nutzer führen. In dieser Diplomarbeit werden weder die Einkaufskosten der Komponenten noch deren Kostenentwicklung betrachtet.

Da die elektrischen Verbraucher und die technische Ausstattung zur Stromversorgung in Campingfahrzeugen individuell sind, wird die Implementierung eines hier erarbeiteten Photovoltaiksystems in ein Netzwerk aus Verbrauchern und einem bereits vorhandenen System zur Stromversorgung nicht beleuchtet. Die Auswahl der zu betrachtenden technischen Komponenten limitiert sich auf typische Bauteile im Bereich Campingfahrzeuge.

Es werden unterschiedliche Anwenderprofile festgelegt und je ein Photovoltaiksystem dem Nutzerprofil angepasst.

1.4 Stand der Forschung

In der Fachliteratur ist die Bedeutung der Photovoltaiktechnik im Hinblick auf die Nutzung für die elektrische Autarkie vom festen elektrischen Energienetz hinreichend belegt.

Als heute einzige nahezu unerschöpflich nutzbare Energiequelle der Menschheit erreicht täglich ein Vielfaches des menschlichen Energiebedarfs in Form von solarer Strahlungsenergie die Erde. Der überwiegende Teil dieser Energie wird ohne Zwischenschritte in die niederwertige Energieform Wärme umgewandelt. Durch Photovoltaik lässt sich die solare Strahlungsenergie der Sonne direkt in die hochwertige Energieform elektrische Energie umwandeln. (vgl. Wagemann, H.; Eschrisch, H, 2007, S.1)

Sterner und Stadler vertreten bezüglich der vollständigen Netzautarkie die These, dass eine vollständige Unabhängigkeit vom Stromnetz mit Solarenergie nur mit Hilfe eines Speichers oder einer PV-Anlage, welche so groß ist, dass diese auch im Winter noch genügend Energie liefert, zu erreichen ist. (vgl. Sterner, M; Stadler, I, 2017, S.713)

Die Tatsache, dass reine Photovoltaiksysteme mit einem Batteriespeicher nur so viel Energie zur Verfügung stellen wie eine PV-Anlage infolge solarer Einstrahlung abzüglich Speicherverluste liefert, zeigt dessen Abhängigkeit von Jahreszeiten und Wetterlagen am Standort des Photovoltaiksystems. Ein Photovoltaiksystem, welches beispielsweise für die Versorgung von Kleinverbrauchern eingesetzt wird, besteht im Wesentlichen aus dem eigentlichen Photovoltaikgenerator, einem Energiespeicher und einem Laderegler. In den meisten Fällen werden mit solchen Systemen direkt oder indirekt über den Energiespeicher Gleichstromverbraucher versorgt. Ein typischer Anwendungszweck hierfür ist der Campingbereich. (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.425)

1.5 Gang der Untersuchung

Diese Diplomarbeit besteht aus 7 Kapiteln.

Nach der allgemeinen Einleitung zum Thema werden in Kapitel 2 die grundlegenden Komponenten eines Photovoltaiksystems und deren Funktion für eine autarke Versorgung mit elektrischer Energie erläutert. Diese Wissensgrundlage soll das Fundament für diese Arbeit bilden.

In Kapitel 3 setzt sich diese Arbeit mit der individuellen Dimensionierung eines Photovoltaiksystems auseinander. Die Bestimmung des Bedarfs elektrischer Energie und das solare Strahlungsangebot sind dabei zu ermitteln. Es sind für verschiedene Fallbeispiele in Form von Nutzerprofilen jeweils geeignete Komponentenkombinationen zur netzautarken Versorgung mit elektrischer Energie zu erarbeiten.

Entsprechend einem wie in Kapitel 3 erarbeiteten Nutzerprofil wird in Kapitel 4 ein Versuchsaufbau durchgeführt, in dem das Photovoltaiksystem einer Situation ausgesetzt wird, welche dem normalen Betrieb eines Photovoltaiksystems entspricht. Des Weiteren werden die Versuchsergebnisse ausgewertet.

Zudem wird in Kapitel 5 ein Fazit aus der Untersuchung gezogen und die Forschungsfrage beantwortet. Es wird ein Verfahrensbild für die optimale Auswahl der Komponenten erarbeitet.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse aus dieser Diplomarbeit in einem Fazit zusammengefasst und ausgewertet.

Das Kapitel 7 beschäftigt sich mit einer Handlungsempfehlung für die weitere Forschung.

2 Grundlagen

Für eine vom Stromnetz unabhängige Versorgung mit elektrischer Energie bietet sich für den Einsatz an Campingfahrzeugen ein Photovoltaiksystem an. Dieses System nutzt die Strahlungsenergie der Sonne, um diese Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Ein solches System besteht aus unterschiedlichen Komponenten, welche jeweils verschiedene Zwecke in jenem System erfüllen. In dieser Diplomarbeit wird die Komponentenzusammensetzung und Dimensionierung eines PV-Systems für den Einsatz in einem Campingfahrzeug erarbeitet. Zum weiteren Verständnis werden im Folgenden die Komponenten eines PV-Systems und deren Funktionsweise beleuchtet.

2.1 Solares Strahlungsangebot

Aus physikalischer Sicht ist die Solarstrahlung wie Gamma-, Röntgen- und Mikrowellenstrahlung elektromagnetische Strahlung. Das gesamte Strahlungsspektrum elektromagnetischer Wellen wird über die Wellenlänge der Strahlung aufgeteilt (Abb. 1)

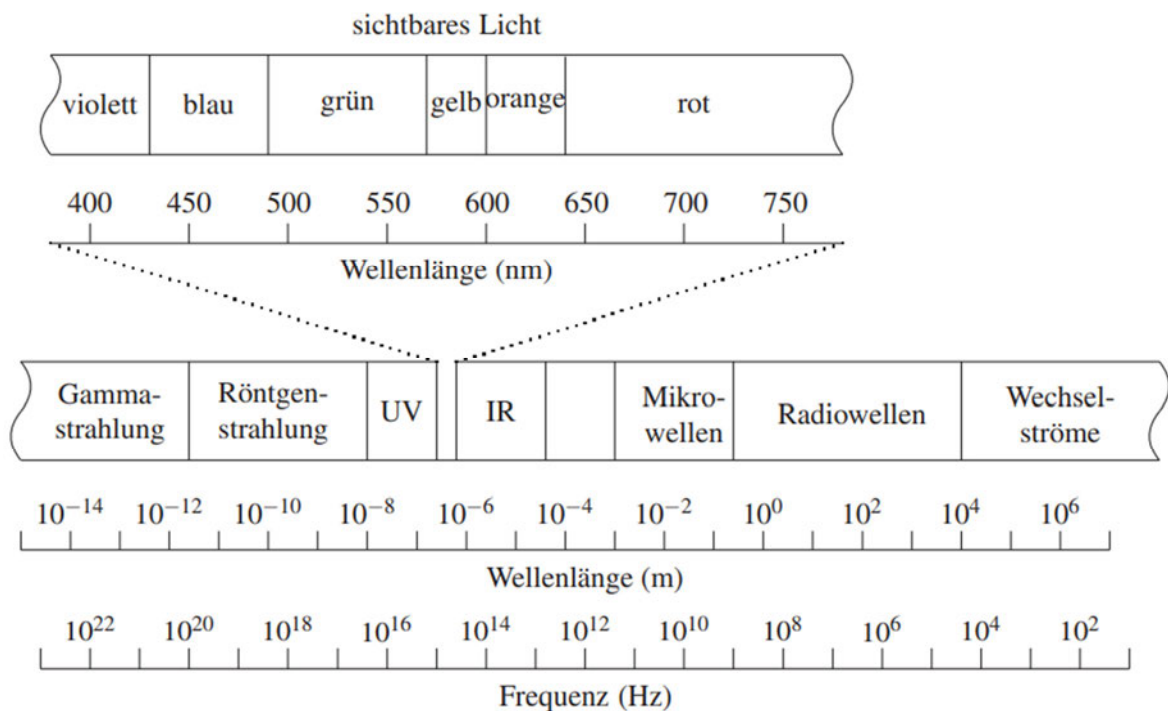


Abb.: 1 Elektromagnetisches Spektrum (vgl. Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, F. 2020, S.114)

Beim Durchdringen der Sonnenstrahlung durch die Erdatmosphäre wird diese Strahlung abgeschwächt. Dies geschieht durch Wechselwirkung mit verschiedenen Molekülen in der Erdatmosphäre. Dadurch wird sowohl der ultraviolette als auch der infrarote Anteil der

Strahlung stark absorbiert. Das nach senkrechtem Durchlaufen der atmosphärischen Schichten auf der Erde auftreffende Strahlungsspektrum wird AM 1-Strahlungsspektrum genannt (AM steht für Air Mass). Dabei ist AM das Verhältnis des jeweiligen Wegs der Einstrahlung bezogen auf die minimale Weglänge der Strahlung bei senkrechtem Einfall. Diese AM1-Verhältnisse liegen nur bei senkrechtem Strahlungseinfall, also nur in Äquatornähe vor. In Europa fällt das Sonnenlicht nie senkrecht ein. Die Abweichung des Einstrahlwinkels zur senkrechten Einstrahlung führt zu einer größeren Weglänge, die von der Strahlung bewältigt werden muss und in einer größeren Dämpfung der Lichteinstrahlung resultiert (Abb.2). Das mittlere Strahlungsspektrum in Europa entspricht AM 1,5-Verhältnissen (Abb.3) und weist eine Strahlungsflussdichte von 1 kW/m^2 auf. Diese AM 1,5-Verhältnisse sind durch jahreszeitliche Schwankungen des Einstrahlwinkels nur als Mittelwert anzusehen. In Deutschland liegt der Höchstwert bei AM 1,5 (Sommersonnenwende) und der Minimalwert bei AM 4 (Wintersonnenwende). AM 0 beschreibt die spektrale Strahlungsintensität außerhalb der Erdatmosphäre und ist daher vorwiegend für die extraterrestrische Nutzung der Photovoltaik von Interesse. (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1322)

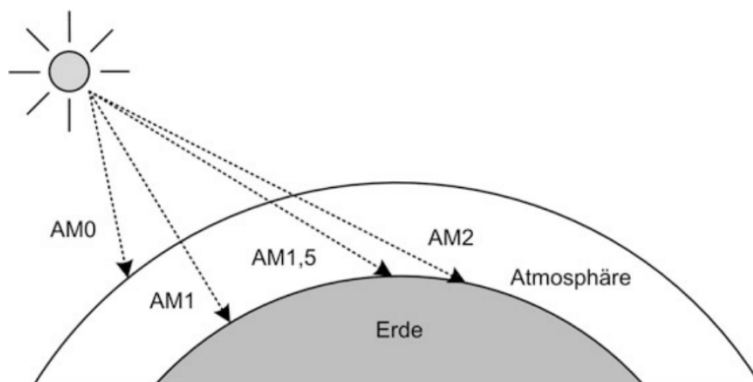


Abb.: 2 Zur Erklärung der Air-Mass-Zahl (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.34)

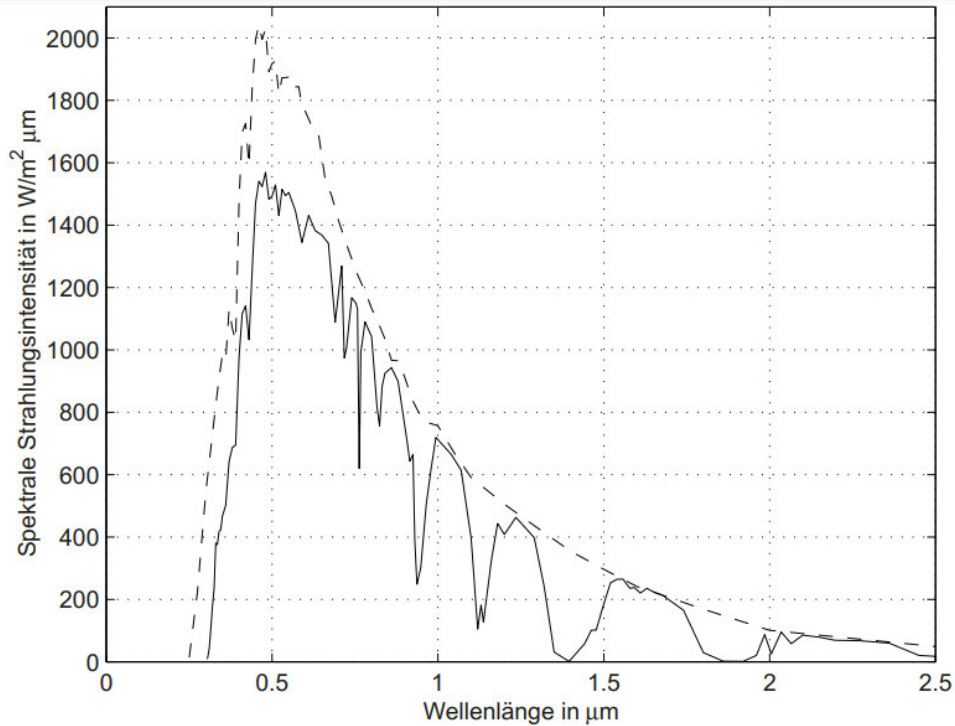


Abb.: 3 Spektrale Verteilung der Globalstrahlung bei AM 1,5 und AM (vgl. Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, F. 2017, S.124)

In einem PV-System kann durch den technisch bedingten Funktionsbereich nicht das vollständige Spektrum solarer Einstrahlung für die Umwandlung in elektrische Energie genutzt werden. Das von einer Siliziumbasierten Solarzelle nutzbare Spektrum liegt vorrangig im Bereich des sichtbaren Lichts und dem nahen Infrarotbereich (Abb. 4).

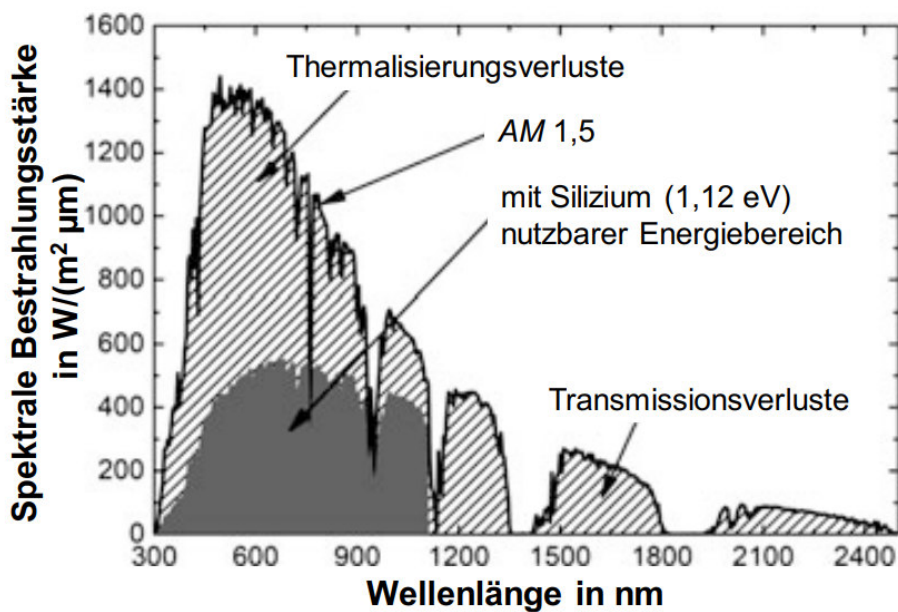


Abb.: 4 Für Si-Solarzellen energetisch nutzbarer Bereich des solaren Spektrums (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.361)

Die solare Strahlung, die auf eine Solarzelle trifft, wird als Globalstrahlung bezeichnet. Sie setzt sich aus gerichteter und ungerichteter Solarstrahlung zusammen. Der gerichtete Anteil wird als Direktstrahlung und der ungerichtete Anteil als Diffusstrahlung bezeichnet. Dabei beschreibt die Direktstrahlung die direkt von der Sonne auftreffende langwelligere Strahlung. Unter Diffusstrahlung wird die Strahlung verstanden, welche durch Streuprozesse in der Erdatmosphäre entsteht (kurzwelligere Strahlung). Bei klarem Himmel besteht der größere Teil der Globalstrahlung aus Direktstrahlung und bei bewölktem Himmel nimmt der Anteil an Diffusstrahlung zu und übertrifft den Anteil direkter Einstrahlung (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1322) (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.31). In Abb.5 wird am Beispiel für Kassel in Deutschland die mittlere tägliche Einstrahlung von Diffus- und Direktstrahlung auf eine horizontale Fläche gezeigt. Die gezeigte Abbildung ist dabei weitgehend typisch für Deutschland. Sie zeigt deutlich, dass die mittlere Einstrahlung in den Sommermonaten ungefähr eine Größenordnung über jener in den Wintermonaten liegt. Es wird erkennbar, dass im Winter größtenteils Diffusstrahlung vorliegt. (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1322) (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.31 und S24).

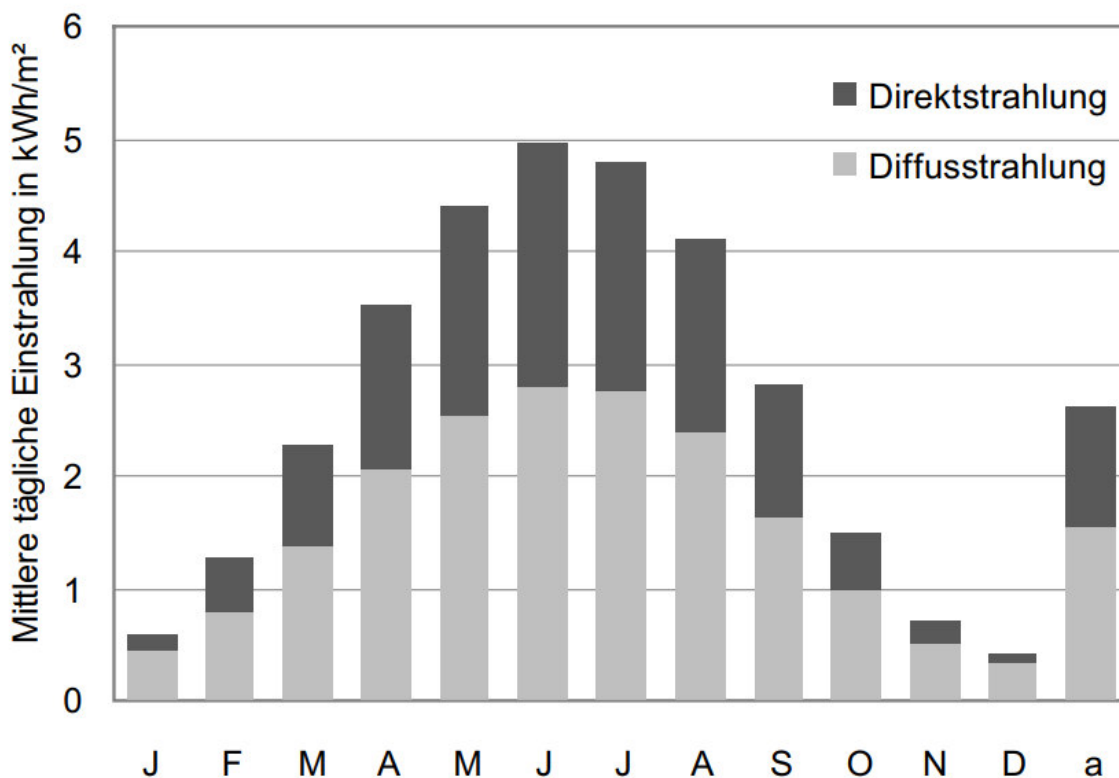


Abb.: 5 Mittlere monatliche Tagessummen von Diffus- und Direktstrahlung (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.23)

2.2 Photovoltaik

Die Technik der Photovoltaik beschreibt das Umwandeln der Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie. Das heißt, dass allein durch den Einfall von Licht auf ein

bestimmtes Material ein Fluss elektrischen Stroms zustande kommt. In diesen Materialien (Festkörper) wird der innere Photoeffekt, auch „photovoltaischer Effekt“ genutzt, um solare Strahlungsenergie in elektrische Energie umzuwandeln. (vgl. Wagner.2019, S. 4)

Materialien, welche diese Fähigkeit besitzen, zählen zur Gruppe der Halbleiter. In der praktischen Anwendung wird diese Umwandlung durch eine Vielzahl von Solarzellen, gefertigt aus Halbleitermaterial, welche zu Photovoltaikmodulen zusammengefasst werden, umgesetzt.

2.2.1 Leiter, Nichtleiter, Halbleiter

Als Basismaterial für die kristalline anorganische Photovoltaik werden Halbleitermaterialien verwendet woraus Solarzellen gefertigt werden. Halbleiter unterscheiden sich von Nicht-Leitern (Isolatoren) und Leitern in der Leitfähigkeit durch Bandstruktur und der Bänderbesetzung mit Elektronen (Abb.6)

Bei einem Leiter ist entweder das energiereichste Band (Leitungsband) nicht voll mit Elektronen besetzt oder das energiereichste Valenzband und das darüber liegende Leitungsband überlappen sich (keine Energielücke). In beiden Fällen entsteht ein teilbesetztes Leitungsband, wodurch bewegliche Ladungsträger (Elektronen) freigesetzt werden. Leiter zeigen temperaturunabhängig eine hohe Anzahl frei beweglicher Elektronen, aber durch Erhöhung der Temperatur erhöht sich auch die Schwingung der Atomrümpfe, wodurch die Elektronen in ihrer Bewegung eingeschränkt werden. Das bedeutet, dass der spezifische elektrische Widerstand von Leitern bei steigender Materialtemperatur ebenfalls steigt.

Nichtleiter besitzen ein vollständig gefülltes Valenzband und ein unbesetztes Leitungsband. Zwischen beiden Bändern befindet sich ein großer Bandabstand. Dadurch stehen keine frei beweglichen Elektronen für den Ladungstransport zur Verfügung. Werden Nichtleiter stark erhitzt, können wenige Elektronen die große Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband überwinden und sorgen dafür, dass auch Nichtleiter unter bestimmten Bedingungen eine geringe Leitfähigkeit besitzen.

Halbleiter sind im wesentlichen Nichtleiter, allerdings besitzen sie einen deutlich geringeren Bandabstand als Nichtleiter. In Bezug auf die elektrische Leitfähigkeit zeigen Halbleiter bei niedrigen Materialtemperaturen das gleiche Verhalten wie Nichtleiter: der elektrische Widerstand steigt bei sinkender Temperatur. Im Vergleich zum Nichtleiter reicht bei Halbleitermaterialien ein deutlich geringerer Eintrag thermischer Energie in das Material aus, um Elektronen aus ihren Bindungen im Valenzband zu lösen und ins Leitungsband zu heben. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Halbleiter eine wesentlich geringere Bandlücke zwischen Valenzband und Leitungsband aufweisen. Das bedeutet, dass die untere Energieschwelle für das Einsetzen der Absorption durch Band-Band-Übergänge deutlich niedriger liegt als bei Nichtleitern.

Im Unterschied zu Leitern nimmt die Leitfähigkeit von Halbleitern mit steigender

Temperatur deutlich zu (bei Leitern sinkt die Leitfähigkeit bei steigender Materialtemperatur). (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.341-343) (vgl. Wagemann, H;. Eschrich, H, 2007, S.19)

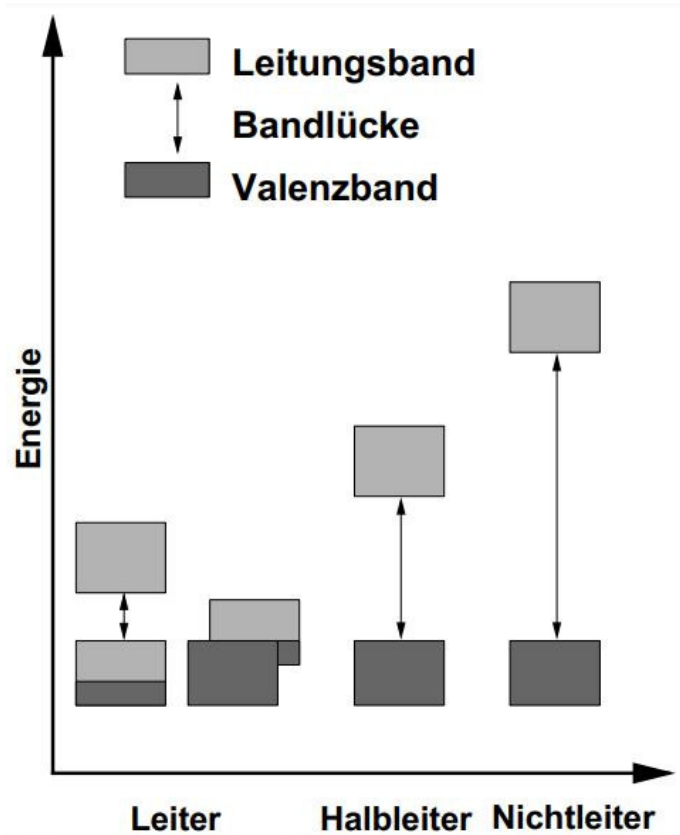


Abb.: 6 Leitungsband, Valenzband und Bandlücke (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.342)

Ein Festkörper besteht aus schwingungsfähigen Gitterteilchen, deren Schwingungsenergie gequantelt ist. Diesen Energiequanten lässt sich ähnlich wie bei elektromagnetischen Wellen ein Teilchencharakter zuschreiben und diese Teilchen werden als Phononen bezeichnet. Werden die Schwingungszustände der Gitteratome durch Einbringen thermischer Energie angeregt, kann dies als Phononenerzeugung bezeichnet werden. Damit lassen sich die Generationsvorgänge frei beweglicher Ladungsträger in einem Halbleiter als Stoßvorgänge beschreiben. Die Entstehung von frei beweglichen Ladungsträgern durch den Eintrag thermischer Energie lässt sich somit auf Phonon-Elektron-Stöße zurückführen. (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.31)

2.2.2 Innerer Photoeffekt

Im Allgemeinen wird mit dem Photoeffekt die Übertragung der Energie von Photonen auf Elektronen in Materie bezeichnet. Die Energie der Photonen wird dabei in potenzielle und kinetische Energie von Elektronen umgewandelt. Der Photoeffekt wird in den äußeren und inneren Photoeffekt unterschieden. Beim äußeren Photoeffekt, welcher für die

Photovoltaik von geringerer Bedeutung ist, verlassen Elektronen das Material auf welches die Photonen treffen.

Der innere Photoeffekt, auch photovoltaischer Effekt genannt, ist für die Photovoltaik von entscheidender Bedeutung, denn bei diesem Effekt werden durch Absorption elektromagnetischer Strahlung Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband gehoben statt diese vom Festkörper abzulösen. Es kommt zur Bildung von Elektron-Loch-Paaren und damit zur Erhöhung der Leitfähigkeit des Materials. Dafür muss die so zugeführte Energie größer sein als die der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Photonen mit geringerer Energie als der Bandabstand sind nicht in der Lage Elektron-Loch-Paare zu erzeugen. (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.349). Überschreitet der Energieeintrag jenen welchen das Elektron für den Sprung ins Leitungsband benötigt, wird die überschüssige Energie in Wärme umgewandelt. (vgl. Wagemann, H; Eschrich, H, 2007, S.21)

Verunreinigungen im Zusammenhang mit Dotierung und Fehler im Kristallgitter können zu erlaubten Energieniveaus in der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband führen. Dies führt zur Störstellen- und Oberflächen-Rekombination. Das heißt, dass zuerst ein freier Ladungsträger von einem unbesetzten Energieniveau einer Störstelle eingefangen und danach mit einem anderen freien Ladungsträger rekombiniert. Bei der Rekombination rekombiniert ein Elektron aus dem Leitungsband mit einem Loch aus dem Valenzband. Rekombinationsprozesse begrenzen die Lebensdauer generierter Ladungsträger und begrenzen die mittlere Weglänge, Diffusionslänge genannt, welche ein Ladungsträger im Halbleitermaterial zurücklegen kann, bevor dieser rekombiniert. (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.34)

2.2.3 p-n-Übergang

Zur Herstellung einer Solarzelle ist der p-n-Übergang die am häufigsten genutzte Struktur, um eine Materialinterne Sperrschicht oder Potenzialbarriere herzustellen.

Dieser Übergang bedarf zweier unterschiedlich dotierter Halbleiterschichten. Silizium ist das für Solarzellen am häufigsten verwendete Material und besitzt in reiner Form vier Außenelektronen (Valenzelektronen). Durch verschiedene Fertigungsverfahren lässt sich Silizium mit anderen Elementen verunreinigen, um dessen Leitfähigkeit zu beeinflussen. Dies wird durch Dotieren, der Zugabe von Akzeptoren, wie Bor mit drei Außenelektronen (p-Dotierung) bzw. Donatoren, wie Phosphor mit fünf Außenelektronen (n-Dotierung) ermöglicht. Wird ein dreiwertiges Fremdatom wie Bor in das Siliziumgitter eingebracht, entsteht ein Elektronenmangel im eingebrachten Material. Es entstehen positive Löcher (auch Defektelektronen genannt) im Halbleitergrundmaterial, wodurch dieses positiv leitend wird. Die Einbringung von fünfwertigen Fremdatomen wie Phosphor sorgt in Silizium (vier Außenelektronen) für einen Elektronenüberschuss, d.h. der dotierte Halbleiter wird negativ leitend.

Wird ein p- und n-dotiertes Halbleitermaterial in engen Kontakt gebracht, findet durch den starken Konzentrationsunterschied an den Grenzflächen eine Diffusion von

Ladungsträgern statt und es kommt zu einer Verarmung an Ladungsträgern. In der Umgebung der Dotierungsgrenze zwischen n- und p-Gebiet kommt es zu Diffusionsströmen von Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet und von Löchern aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet. Die fest in das Kristallgitter eingebauten Dotierungsatome bilden eine Raumladungszone aus, welche im n-Gebiet positiv und im p-Gebiet negativ geladen ist. Aus der Raumladungszone resultiert ein elektrisches Feld, welches dem Diffusionsstrom entgegengesetzt ist und einer weiteren Abwanderung von Ladungsträgern entgegenwirkt. Im Gleichgewichtszustand sind Feldstrom und Diffusionsstrom gleich und heben sich gegenseitig auf. (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.35) (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.350)

2.2.4 Solarzelle

Eine Solarzelle ist ein Bauteil, bestehend aus Halbleitermaterial, welches durch Nutzung des photovoltaischen Effekts solare Strahlungsenergie in elektrische Energie umwandelt. Die Funktion einer Solarzelle wird im Folgenden am Beispiel einer Solarzelle aus dem Halbleitermaterial Silizium erläutert, da diese Art von Solarzelle im Campingbereich am häufigsten zum Einsatz kommt. Die Solarzelle basiert auf einem p-n-Übergang mit Kontaktierungen je am p- und am n-Gebiet (Abb. 7).

Wird eine Solarzelle beleuchtet, werden Photonen vom Halbleitermaterial absorbiert, wodurch zusätzliche frei bewegliche Ladungsträger generiert werden. Das elektrische Feld trennt die im Abstand einer Diffusionslänge oder innerhalb der Raumladungszone erzeugten Elektron-Loch-Paare. Dabei werden Elektronen Richtung des n-Gebiets und die Löcher in Richtung des p-Gebiets beschleunigt. Sowohl Diffusionslänge als auch Rekombinationsvorgänge wirken dem entgegen, sodass nur ein Teil der Ladungsträger an die Materialoberfläche des Halbleiters gelangen, um dort eine Spannung aufbauen zu können. Werden nun beide Oberflächen elektrisch leitend miteinander verbunden, fließen die Elektronen von der n-Schicht über die leitende Verbindung in die p-Schicht und ein elektrischer Stromfluss entsteht. (Abb.: 7) (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.36)

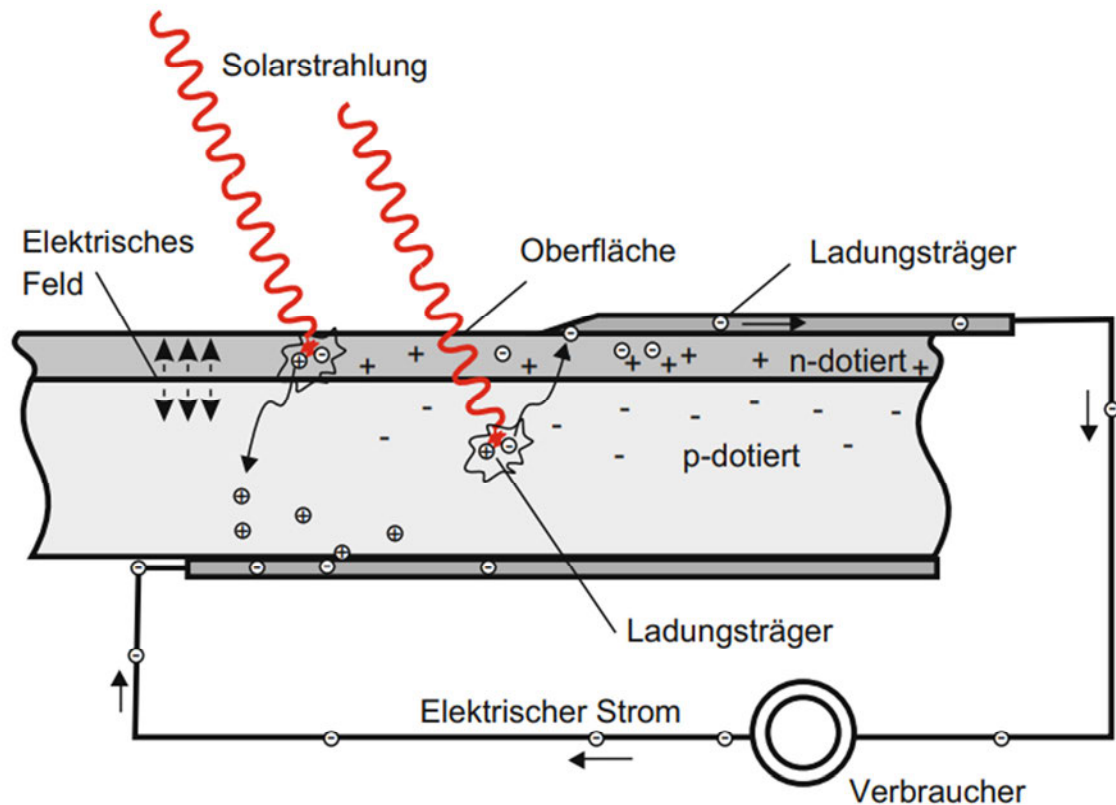


Abb.: 7 Schematischer Aufbau einer Solarzelle (nicht maßstabsgerecht) (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.35)

Das elektrische Ersatzschaltbild einer Solarzelle (Abb. 8) fasst die elektrischen Eigenschaften einer Solarzelle zusammen. Dabei werden die Diffusionsprozesse, denen optisch generierte Ladungsträger ausgesetzt sind, durch eine Diode abgebildet. Des Weiteren müssen Verluste berücksichtigt werden, welche bei realen Solarzellen auftreten. Diese sind in einem konzentrierten Parallel- und Reihenwiderstand zusammengefasst. Der Reihenwiderstand umfasst dabei den Widerstand des Halbleitermaterials selbst, die Widerstände der Kontaktierung auf der Vorder- und Rückseite der Solarzelle, sowie die Übergangswiderstände zwischen Halbleitermaterial und Kontaktierungen. Der Parallelwiderstand verkörpert die Leckströme, die am p-n-Übergang oder an den Kanten der Solarzelle durch Kristalldefekte fließen. Solarzellen können als Stromquellen bezeichnet werden und der Photostrom I_{ph} beschreibt die durch optische Anregung generierten Ladungsträger und verhält sich in guter Näherung proportional zur Einstrahlung. Der Photostrom wird durch den Diffusionsstrom I_d um die Ladungsträger vermindert, die aufgrund von Diffusion die Oberfläche der Solarzelle nicht erreichen konnten. (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.37)

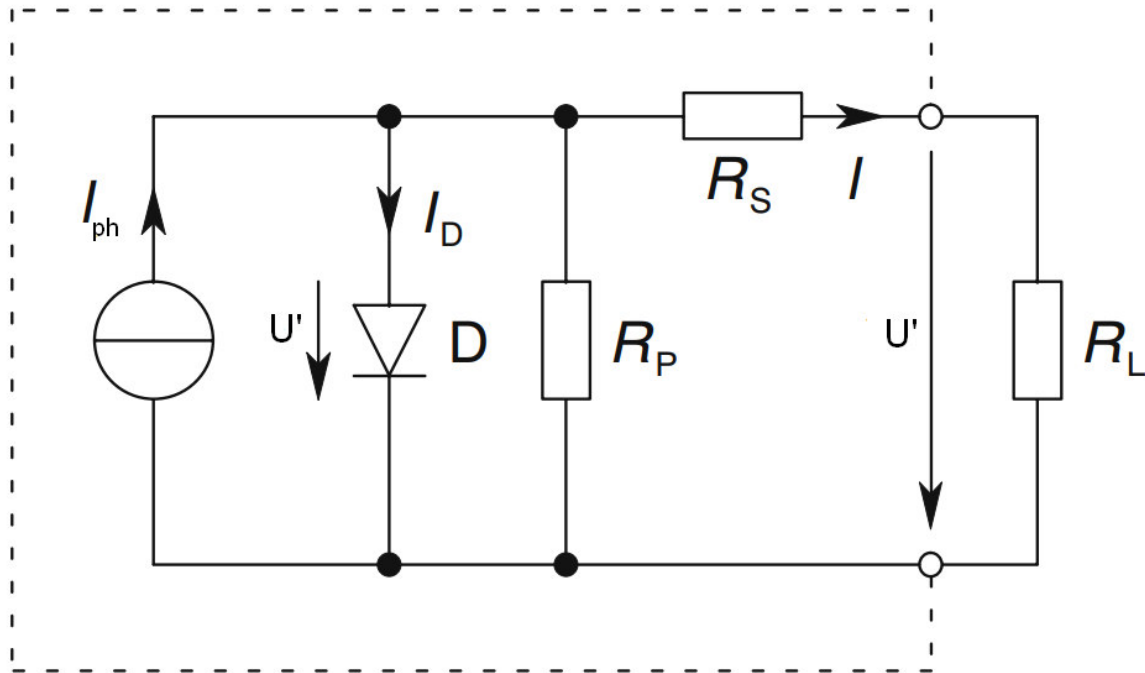


Abb.: 8 Ersatzschaltbild einer Solarzelle (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1335)

Das prinzipielle elektrische Verhalten einer Solarzelle wird durch eine Strom-Spannungskennlinie beschrieben. Abb.9 zeigt die Kennlinie einer monokristallinen Solarzelle für eine Einstrahlung von 1000W/m^2 bei 298K Zelltemperatur auf einer Fläche von $100\text{mm} \times 100\text{mm}$. Des Weiteren wird die Lage des Maximum Power Points und die Leistung-Spannungskennlinie dargestellt.

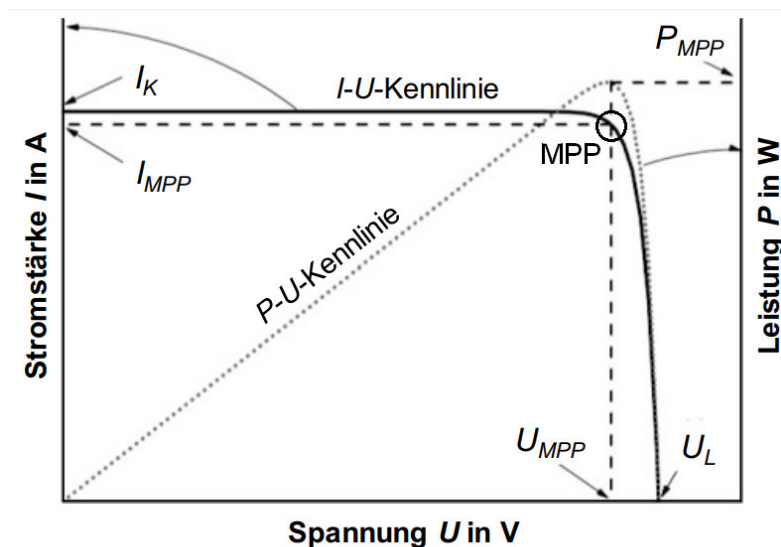


Abb.: 9 Strom-Spannungskennlinie einer Solarzelle (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.356)

In der Strom-Spannungskennlinie ist zu erkennen, dass Strom I umso größer ist, je niedriger die Spannung U der Solarzelle ist. Dieser maximale Strom ist der Kurzschlussstrom I_K , also der Strom, der sich ohne elektrischen Verbraucher bei geschlossenem Stromkreis einstellt. Wird die beleuchtete Solarzelle mit einem Verbraucher R_L belastet, wird die Bewegung der Elektronen aus dem n-Gebiet über R_L in Richtung des p-Gebiets gedämpft- der Stromfluss I nimmt ab. Da die Solarzelle beleuchtet ist, findet nach wie vor eine Generation von frei beweglichen Elektronen statt, welche sich am Rand des n-Gebiets durch den verminderten Stromfluss sammeln. Dadurch entsteht eine elektrische Spannung zwischen n-Gebiet und p-Gebiet. Über das elektrische Verhalten einer Solarzelle lässt sich demnach Folgendes sagen: Bei Erhöhung der Last (Widerstand des Verbrauchers R_L) zwischen den Kontakten der Solarzelle und konstanter Einstrahlung, sinkt der Stromfluss I , wodurch sich die Spannung U zwischen den Kontakten der Solarzelle erhöht. Zunächst sinkt der Stromfluss nur geringfügig ab bis er kurz vor Erreichen der Leerlaufspannung beginnt stark abzusinken. Wird R_L so groß, dass der durch Einstrahlung erzeugte Strom den Verbraucher nicht mehr durchfließen kann, stellt sich die Leerlaufspannung U_L ein.

Die Kennlinie einer Solarzelle weist eine Temperaturabhängigkeit auf. Bei Erhöhung der Temperatur findet eine Zunahme des Kurzschlussstroms I_K statt. Dies resultiert aus einer Abnahme der Energielücke, was auch langwelligeren Photonen die Möglichkeit bietet Elektron-Loch-Paare zu erzeugen und somit zum elektrischen Strom der Solarzelle beizutragen. Um zum Photostrom I_{ph} beizutragen, muss die Mehrzahl der durch Einstrahlung generierten Elektronen erst zur Sperrschicht diffundieren. Durch die stärkere Wärmebewegung bei höheren Temperaturen läuft die Ladungsträgerdiffusion bevorzugt ab und I_K nimmt zu. Der Temperaturkoeffizient des Kurzschlussstroms beträgt dabei typischerweise $5 \cdot 10^{-4} K^{-1}$.

Im Gegensatz zum Kurzschlussstrom I_K nimmt die Leerlaufspannung U_L bei steigender Temperatur ab. Dies ist in der Temperaturabhängigkeit des Sättigungsstroms I_S und der Temperaturspannung U_T begründet. I_{ph} fließt schon bei kleinen Spannungen U' durch die Diode ab. Die typische Änderung $-1,5 mV/K$ bei einer für Solarzellen typischen Leerlaufspannung von 0,6 V ergibt für U_L einen Temperaturkoeffizienten von $-2,5 \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

Die Temperaturkoeffizienten von Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung verhalten sich entgegengesetzt zueinander, aber da der Temperaturkoeffizient der Leerlaufspannung um eine Größenordnung größer ist und entsprechend mehr auf das Gesamttemperaturverhalten einwirkt, nimmt der Wirkungsgrad η der Solarzelle mit steigender Temperatur ab. (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1335) Typische Werte sind dabei 0,3 %/K bis 0,5 %/K.

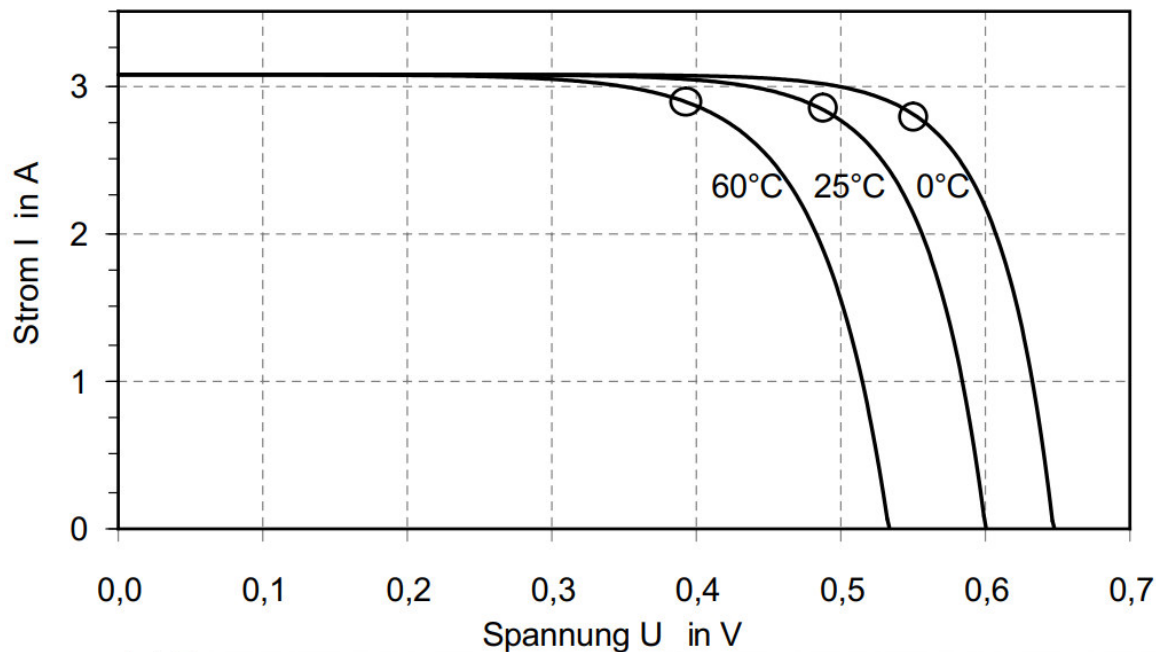


Abb.: 10 Strom- Spannungskennlinie Solarzelle für unterschiedliche Temperaturen (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.38)

Die Leistung, die bei einem bestimmten Arbeitspunkt an den Verbraucher abgegeben wird, entspricht durch

$$P = U \cdot I \quad (2.1)$$

der linken markierten rechteckigen Fläche in Abb.9. Zusätzlich ist auch die Leistungs-Spannungs-Kennlinie angegeben, welche die von der Solarzelle generierte Leistung P in Abhängigkeit der Spannung U beschreibt. Die von der Solarzelle abgegebene Leistung ist offensichtlich abhängig vom gewählten Arbeitspunkt. Der Punkt, an dem die Solarzelle die höchste elektrische Leistung abgibt, ist der MPP (maximum power point), der bei einer Spannung U_{MPP} und einem generierten Strom I_{MPP} erreicht wird. (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1334) (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, Wiese, A; 2020, S.356)

Der Strom und die Spannung sind Temperaturabhängig. Nach Gl. (2.1), ist demnach auch die Leistung der Solarzelle abhängig von ihrer Temperatur. In Abb. 10 sind das Temperaturverhalten und auch die jeweilige Lage des MPP dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass es zu jedem Einstrahlungs- und Temperaturwert genau einen Arbeitspunkt gibt, an dem die Solarzelle die maximale elektrische Leistung bereitstellt. Es ist demnach energetisch am effizientesten die Solarzelle stets im MPP zu betreiben. (vgl. Wesselak, V; Voswinckel S. 2012, S.38)

Solarzellen sind in der Praxis verschiedenen Stärken solarer Intensitäten ausgesetzt. Die in Abb. 11 aufgetragene Kennlinie für eine monokristalline Solarzelle zeigt, dass der Kurzschlussstrom, welcher sich ohne Verbraucher einstellt, nahezu proportional zur Einstrahlung ist. Es wird auch deutlich, dass sich die Änderung der Einstrahlung in deutlich geringerem Ausmaß auf die Leerlaufspannung auswirkt als auf den

Kurzschlussstrom. Diese Abhängigkeit von Strom und Spannung von der Einstrahlung wirkt sich demnach auch auf die Leistung und damit auf den MPP aus.

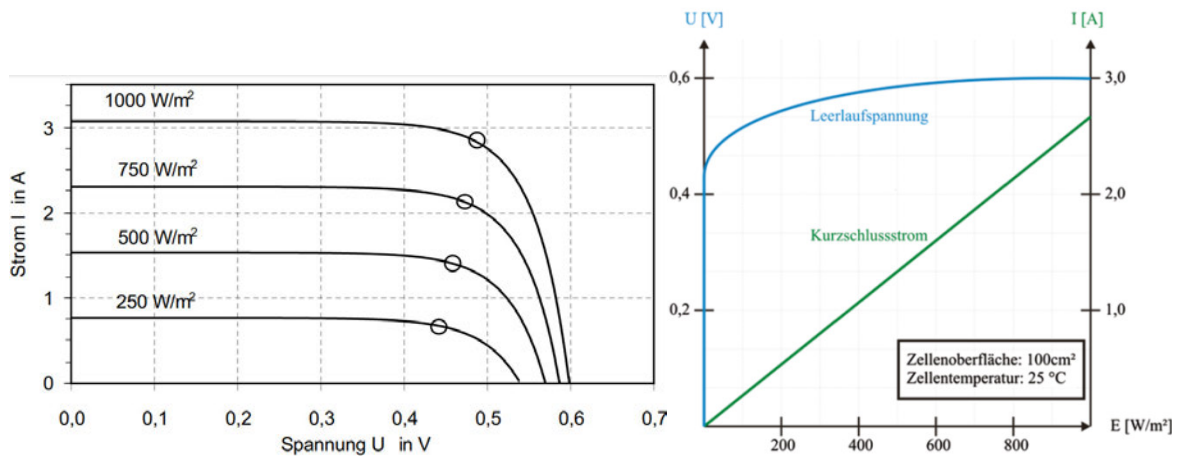


Abb.: 11 Abhängigkeit von Strom und Spannung einer Solarzelle bei unterschiedlicher Einstrahlung (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.38(links)) (vgl. Vinaricky, E; Schröder, K-H, Weiser, J 2016, S.821(rechts))

2.2.5 Wirkungsgrad Solarzelle

Eine Solarzelle kann nur einen gewissen Anteil solarer Strahlung in elektrische Leistung umsetzen. Der Anteil der auftreffenden Strahlungsenergie, der zur Leistungserzeugung beiträgt, wird Wirkungsgrad genannt und wird in Prozent angegeben.

Bei der Energieumwandlung wird ein Teil der Strahlungsenergie in Wärme umgesetzt und kann somit keinen Beitrag zur Bereitstellung elektrischer Leistung leisten. Von der einfallenden Strahlungsleistung kann eine Siliziumbasierte Solarzelle theoretisch bis zu 44 % nutzen (Abb.12). Bekannt aus Abschnitt 2.2.2 können Photonen mit geringerer Energie als dem Bandabstand keine Elektron-Loch-Paare erzeugen. Photonen, deren Energie größer als der Bandabstand ist, erzeugen zwar genau ein Elektron-Loch-Paar, aber die überschüssige Energie wird in Wärme umgewandelt (Aufheizung der Module auf 60°C – 70°C) und geht für die elektrische Energieumwandlung verloren. Je wärmer eine Solarzelle wird, desto geringer wird ihr Wirkungsgrad (-0,4 %/K und -0,5 %/K).

Hinzukommen Verluste durch Reflexion an der Oberfläche, Rekombinationsverluste und Verluste am Serienwiderstand. Diese Verluste senken den Wirkungsgrad auf typische 15 % - 23%. (technologieabhängig) (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1339) (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.39). Der Wirkungsgrad einer Solarzelle wird in der Regel für genormte Standardtestbedingungen Messbedingungen (STC) angegeben. Gründe dafür sind unter anderem die Abhängigkeit dessen der spektralen Lichtzusammensetzung, Zelltemperatur und Strahlungsintensität. Diese Standardtestbedingungen (Standard Test Conditions (STC)) sind wie folgt definiert:

- Einstrahlung 1000 W/M^2
- Solarzellentemperatur: 25 °C
- Spektralverhältnisse: AM 1,5

(vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.356)

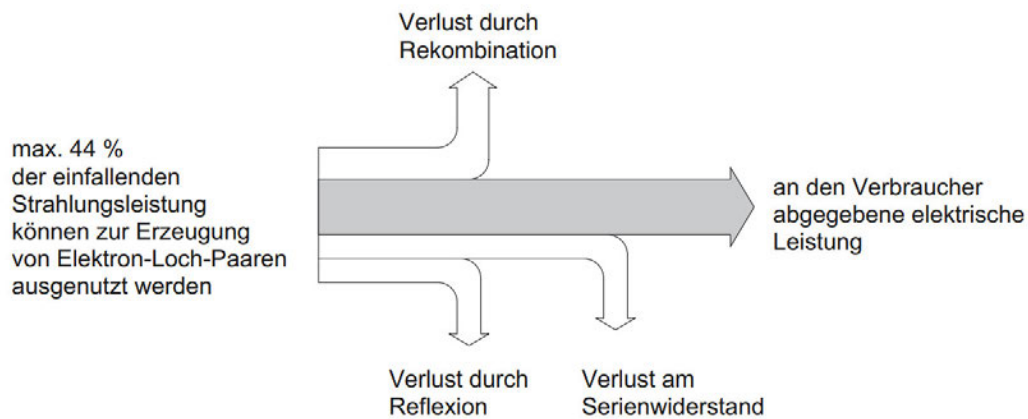


Abb.: 12 Verluste an einer Solarzelle (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1339)

2.2.6 Solarzellentechnologien

In der Praxis kommen für die Nutzung an Campingfahrzeugen monokristalline, auch einkristalline Solarzellen genannt, oder polykristalline Solarzellen zum Einsatz. Diese Solarzellen unterscheiden sich durch ihr optisches Erscheinungsbild, dem Fertigungsverfahren und die elektrischen Eigenschaften im Betrieb. Das Erscheinungsbild einer monokristallinen Solarzelle zeigt eine schwarze homogene Oberfläche, wobei auf einer polykristallinen Solarzelle deutlich die Korngrenzen der Siliziumkristalle zu erkennen sind.

Polykristalline Solarzellen weisen bedingt durch die höhere Verunreinigung des Siliziums vor allem an den Korngrenzen einen geringeren Wirkungsgrad als monokristalline Solarzellen auf. (vgl. Zahoransky, R 2022, S 428)

Eigenschaft	Monokristalline Solarzelle	Polykristalline Solarzelle
Typischer Wirkungsgrad Serienfertigung	18 % - 23 %	15 % - 18 %
Maximaler Zellwirkungsgrad Serienfertigung	24%	20%
Platzbedarf	ab 0,0043 m ² /W	ab 0,0056 m ² /W
Degradation pro Jahr	0,3 % - 0,5 %	0,2 % - 0,3 %
Temperaturbereich	-40 °C bis +80°C	-40 °C bis +80°C

Tabelle 1 Wirkungsgrade monokristalline und polykristalline Solarzelle (Quelle: solartronics.de)

Monokristalline Solarzellen haben im Vergleich zu polykristallinen Solarzellen einen höheren Wirkungsgrad, weisen aber eine geringere Lebensdauer auf. Die Herstellung monokristalliner Solarzellen bedarf eines vergleichsweise hohen Energieeinsatzes und verursacht dadurch auch höhere Herstellungskosten. Durch den geringeren Wirkungsgrad polykristalliner Solarzellen muss bei gleicher Leistung eine größere Einstrahlfläche bereitgestellt werden als bei monokristallinen Solarzellen (Tab. 1).

2.2.7 Ausrichtung einer Solarzelle

Für eine möglichst gute Ausnutzung des solaren Strahlungsangebots muss eine Solarzelle optimal ausgerichtet sein. Dabei ergeben sich für ein vorwiegend aus direkter Einstrahlung bestehendem Strahlungsangebot andere Anforderungen als bei überwiegend diffuser Einstrahlung. Bei direkter Einstrahlung werden die größten Energieerträge erzielt, wenn der Einfallswinkel zwischen solarer Strahlung und der Senkrechten zur Zellebene so gering wie möglich ist. Die Solarzelle muss dafür im Optimalfall der Sonneneinstrahlung nachgeführt werden. Durch eine Nachführung können im Vergleich zu einer fest horizontal ausgerichteten Solarzelle beträchtliche Ertragsgewinne im Bereich von +30 % erzeugt werden. Der diffuse Strahlungsanteil fällt annähernd gleichmäßig aus dem gesamten Himmelshalbraum ein und kann daher durch die horizontale Ausrichtung der Solarzelle am besten ausgenutzt werden. (vgl. Wesselak, V.; Voswinckel, S 2012, S24 und S.69)

Bei der ortveränderlichen Nutzung von Solarzellen wie beim Einsatz von Campingfahrzeugen ist der ständige Standortwechsel des PV-Systems ein starker Einflussfaktor auf den Ertrag elektrischer Energie.

Ein Campingfahrzeug eignet sich nur bedingt für den Gebrauch von nachgeführten Systemen, da das Fahrzeug oft seinen Standort wechselt und somit im Vergleich zu einem nicht mobilen Einsatzort mit deutlich erhöhter Frequenz nachgeführt werden muss. Es bietet sich daher an das System so auszulegen, dass der Energiebedarf auch ohne Nachführung gedeckt werden kann, sofern ein Betrieb ohne regelmäßig manuelle Eingriffe in das PV-System gewünscht ist. Andernfalls sind einachsige Nachführsysteme oder nicht fest installierte Solargeneratoren üblich.

2.3 Photovoltaik-Module

Werden Solarzellen schaltungstechnisch betrachtet, stellen sie eine Stromquelle dar. Für den Campingbereich typische kristalline Solarzellen weisen ohne Belastung durch elektrische Verbraucher eine sogenannte Leerlaufspannung im Bereich von 0,6 V bis 0,7 V auf. Der Kurzschlussstrom, der bei maximaler Einstrahlung auftritt, ist stark von der Größe der Solarzelle abhängig und liegt bei einer typischen Solarzelle von 6 Zoll Kantenlänge bei 7A bis 9A. Dabei verfügen monokristalline Solarzellen über größere Stromwerte als polykristalline Solarzellen. Wird ein elektrischer Verbraucher an die Solarzelle angeschlossen, sinkt die Spannung der Solarzelle und es stellt sich ein Stromfluss ein, welcher sich direkt proportional zur Bestrahlungsstärke verhält. Die von einer einzelnen Solarzelle bereitgestellte Leistung ist für den Betrieb größerer elektrischer Verbraucher allerdings zu gering, weshalb mehrere Solarzellen elektrisch miteinander verschaltet werden, um zu einem Solarmodul zusammengefasst zu werden. (vgl. Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, F. 2012, S.87) Werden mehrere Solarzellen in Reihe geschaltet, wird die Leerlaufspannung des so entstandenen Moduls von der Anzahl der so verschalteten Solarzellen bestimmt. Anders verhält es sich bei

Parallelschaltung mehrerer Solarzellen. Hier legt die Anzahl der parallel geschalteten Solarzellen den Kurzschlussstrom fest. Die Strom-Spannungskennlinie eines PV-Moduls wird durch die Anzahl und Verschaltung der Solarzellen bestimmt. Durch die Anzahl an Solarzellen in einem Modul wird auch die maximale Modulleistung bestimmt. (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.386) Die gleiche Anzahl Solarzellen liefert bei gleicher Bestrahlung aller Solarzellen in einer reinen Reihenschaltung die gleiche Gesamtleistung wie bei einer reinen Parallelschaltung.

Die Unterschiede beider Varianten ergeben sich in der Nutzung des Solarmoduls unter realen Bedingungen. Die meisten PV-Module beinhalten in Reihe geschaltete Solarzellen; um die Ausgangsspannung des Moduls zu erhöhen und den Ausgangsstrom gering zu halten.

2.3.1 Verschaltung von Solarzellen

Wird in einer Reihenschaltung mehrerer Solarzellen eine Solarzelle durch z.B. Verschmutzung abgeschattet, liefert diese nicht mehr den gleichen Photostrom wie die anderen Solarzellen und beeinträchtigt die Leistungserzeugung der Reihenschaltung. Die verschattete Solarzelle bestimmt in guter Näherung den Strom der Reihenschaltung und damit die Leistungsabgabe der Reihenschaltung. Die partielle Abschattung führt daher zu deutlich höheren Leistungsverlusten als es dem Verhältnis von abgeschatteter Fläche zur Gesamtfläche der Reihenschaltung entspricht. Die abgeschattete Solarzelle wirkt wie eine in Sperrrichtung betriebene Diode und belastet die Schaltung. Eine in Sperrrichtung betriebene Solarzelle neigt dazu sich stark aufzuheizen (hot-spot Effekt) und Schaden zu nehmen. Eine schadhafte Solarzelle bestimmt in gleicher Weise die Leistung der Reihenschaltung und somit auch deren Wirkungsgrad. Um einer Beschädigung durch Überhitzung entgegenzuwirken, werden den Solarzellen Bypassdioden parallel geschaltet (Abb. 14). Typischerweise wird nicht jede Solarzelle durch eine eigene Bypassdiode geschützt, sondern es wird einem String aus mehreren Solarzellen eine Bypassdiode parallel geschaltet. Wenn die an der Solarzelle abfallende Sperrspannung die Schleusenspannung der Bypassdiode überschreitet, gerät diese in Flusspolung und begrenzt die an der abgeschatteten Solarzelle abfallende Sperrspannung. Diese Schutzmaßnahmen erhöhen die Energieverluste innerhalb eines Solarmoduls, sind aber gerade für den Campingbereich, bei dem PV-Module durch Laubblätter oder Baumschatten des Öfteren in Teilverschattung betrieben werden, interessant. (vgl. Reisch, M, S 2012, S.1354) (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.388) (vgl. Watter, H, 2022, S.23)

Werden mehrere Solarzellen parallel zueinander geschaltet, fällt bei gleicher Beleuchtung über jeder Zelle die gleiche Spannung ab und der Gesamtstrom ergibt sich aus der Summe der Einzelströme der Solarzellen. Bei Abschattung einer Solarzelle trägt diese nicht mehr zur Leistungserzeugung der Parallelschaltung bei. Dabei ist der Leistungsverlust der Schaltung proportional zur abgeschatteten Fläche. Die bei einer Parallelschaltung auftretenden hohen Ströme und damit einhergehende Leistungsverluste sind bei dieser Art der Verschaltung problematisch. (vgl. Watter, H, 2022, S.24) Die

meisten PV-Module beinhalten in Reihe geschaltete Solarzellen, um die Ausgangsspannung des Moduls zu erhöhen und den Ausgangsstrom gering zu halten. Abhängig von der Anzahl der Solarzellen weisen handelsübliche PV-Module Ausgangsspannung von 12 V bis 120 V auf

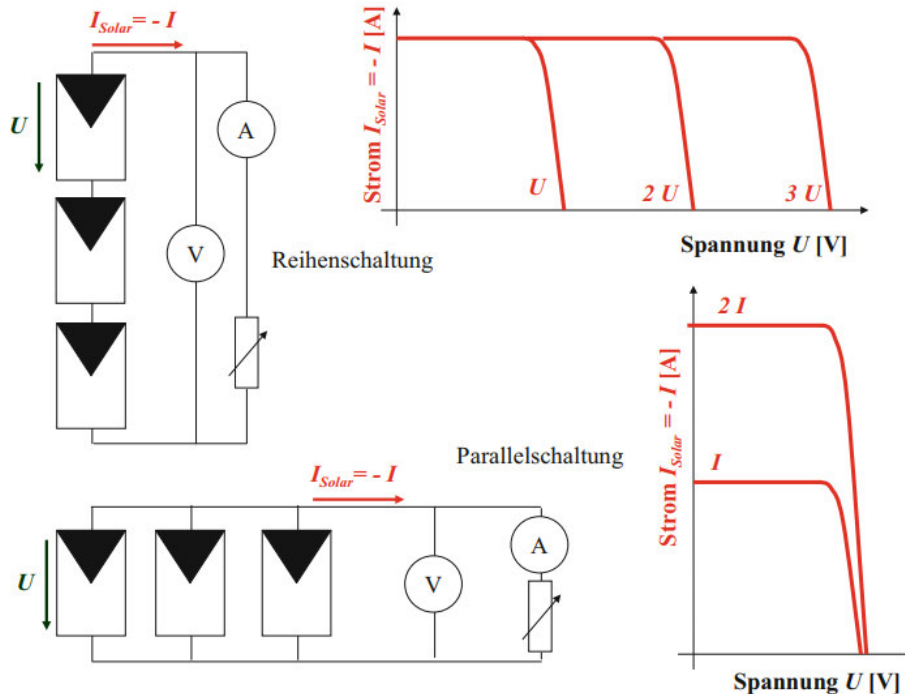


Abb.: 13 Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen mit Strom-Spannungskennlinien (vgl. Watter, H, 2022, S.23)

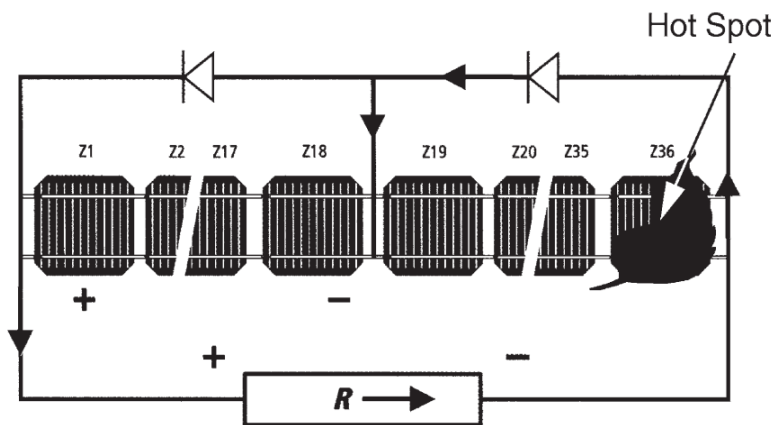


Abb.: 14 Solarzellen Strings mit Bypassdiode zum Schutz gegen „Hot Spot“ Bildung (vgl. Zahoransky,R 2022, S 432)

Werden mehrere Solarmodule zusammengeschaltet, gilt gleiches Verhalten wie bei der Verschaltung mehrerer Solarzellen zu einem Modul. Bei einer Reihenschaltung mehrerer Solarmodule summieren sich deren Klemmenspannungen und ergeben die Gesamtspannung der Reihenschaltung. Der Gesamtstrom entspricht im Wesentlichen

dem des Solarmoduls mit dem geringsten Stromfluss. Analog dazu gilt in einer Parallelschaltung von PV-Modulen, dass sich der Strom der Module aufsummiert und über jedem Modul die gleiche Spannung anliegt. Demnach ist auch das Verhalten bei Verschattung einzelner Module übertragbar und kann durch Nutzung von Bypassdioden in gleicher Weise beeinflusst werden.

2.3.2 Hinterlüftung

Neben der Umwandlung solarer Strahlungsenergie in elektrische Energie wird in PV-Modulen auch thermische Energie freigesetzt. Bei starker Einstrahlung und hoher Umgebungstemperatur, wie es im Sommer der Fall ist, kann die Modultemperatur auf 70°C ansteigen. Eine Erhöhung der Temperatur geht mit einer Senkung des Wirkungsgrades eines PV-Moduls einher. Typische Werte sind zwischen -0,4 %/K und -0,5 %/K. Um die Modultemperatur ohne aktive Kühlsysteme so gering wie möglich zu halten, ist bei der Installation eines PV-Moduls auf eine ausreichende Hinterlüftung dessen zu achten. Dies verhindert Stauwärme auf der Modulrückseite und kommt dem Wirkungsgrad zugute. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Zellenwirkungsgrades zeigen hinterlüftete PV-Module einen bis zu 5% höheren Wirkungsgrad als nicht hinterlüftete Module. (vgl. Konrad, F, S 2008, S.17) (vgl. Watter, H, 2022, S.22)

2.3.3 Aufbau und Ausführung eines PV-Moduls

Um das PV-Modul vor Witterungseinflüssen zu schützen, sowie zur mechanischen Stabilisierung und elektrischen Isolation wird die Zusammenschaltung der Solarzellen verkapselt (Abb 15).

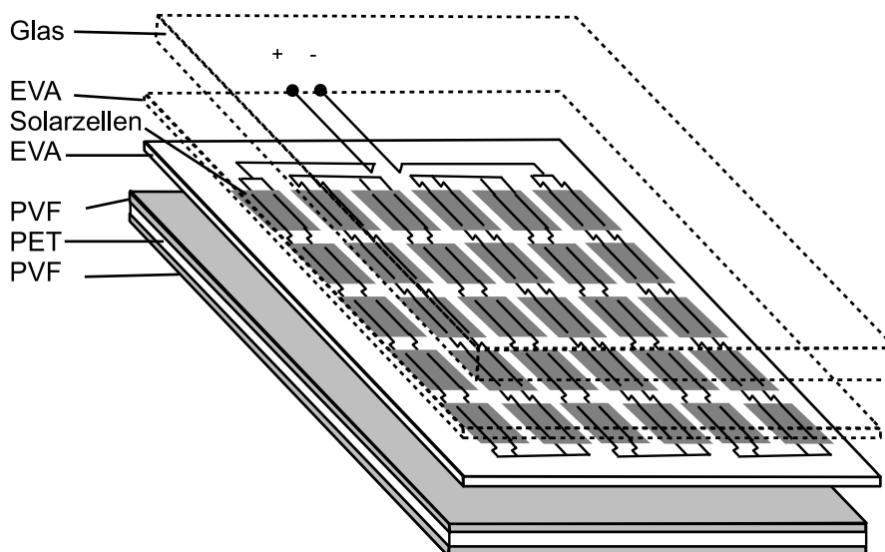


Abb.: 15 Typischer Aufbau eines starren kristallinen PV-Moduls (vgl. Wesselak, V; Voswinckel, S 2012, S.66)

PV-Module werden in verschiedenen Leistungsklassen angeboten. Für den Campingbereich üblich sind Module mit $50W_p$ bis $200W_p$ üblich. Der Ausdruck W_p bezeichnet dabei die maximale Gesamtleistung im MPP des PV Moduls. Es gibt verschiedene Arten von PV-Modulen, die für den Campingbereich interessant sind. Starre PV-Module lassen sich nicht zerstörungsfrei verformen und sind daher von einem Metallrahmen umgeben, welcher neben dem Schutz vor Verformung auch zur Befestigung des Moduls an dessen Einsatzort dient. Solche PV-Module lassen sich nicht an die Form der Montagefläche anpassen, was den Einsatz auf ebene Flächen beschränkt. Starre PV-Module bieten den Vorteil, dass sie bedingt durch die Rahmenkonstruktion meist problemlos hinterlüftet installiert werden können, um die Zelltemperatur zu senken. Bei Bedarf kann das Modul mithilfe einer passenden Konstruktion auf zum Sonnenstand passende Neigungswinkel angepasst werden.

Flexible PV- Module sind so aufgebaut, dass sie große Biegeradien und kleinere Torsion ohne Schaden zu nehmen aushalten. Sie werden ohne stützenden Rahmen auf dem ebenen oder nicht-ebenen Montageplatz angebracht. Damit bieten diese Module die Möglichkeit auch sonst ungenutzte Flächen am Campingfahrzeug für die Erzeugung elektrischer Energie zu nutzen. Diese Art von PV-Modulen wird meist mit einem Klebstoff direkt auf die Montagefläche geklebt. Vorteil dabei ist eine recht unkomplizierte Montage und ein unauffälliges Erscheinungsbild bei Installation auf dem Dach des Campingfahrzeugs. Eine Folge der direkten Befestigung mit Klebstoff ist allerdings die schlechte Hinterlüftung und die damit einhergehende hohe Zelltemperatur und verringerter Wirkungsgrad des Moduls. Vorteile zeigen flexible PV-Module aber bei Gewicht, da sie bei vergleichbarer Leistung nur ca. 30 % der Masse eines starren PV-Moduls mit Rahmen aufweisen.

Solartaschen bestehen aus mehreren PV-Modulen mit geringer Baugröße, welche über flexible Leitungen miteinander verbunden sind. Dadurch lassen sich diese Module für die Nutzungszeit entfalten und anschließend wieder zusammenfalten und verstauen. Diese Module sind nicht für die feste Montage konzipiert, sondern für flexible Einsatzorte. Sie dienen als Alternative, wenn keine oder zu geringe Fläche am Campingfahrzeug für die dauerhafte Montage von ausreichend PV-Modulen verfügbar ist. Vorteile von Solartaschen sind die Beschädigungsfreie Installation am Campingfahrzeug, sowie dass sie sich unkompliziert nach dem Sonnenstand ausrichten lassen, was sich im Vergleich zu flach aufliegenden Modulen positiv auf die Ausbeute solarer Strahlungsenergie auswirkt. Zudem lassen sie sich auch meist problemlos hinterlüftet aufstellen. Ihr Gewicht liegt bei vergleichbarer Leistung nur leicht unter dem von starren PV-Modulen. Nachteilig ist hier hingegen, dass sich die Module nur während des Stillstands des Campingfahrzeugs nutzen lassen. Des Weiteren sind diese Module meist unzureichend gegen Diebstahl geschützt, wodurch der Nutzer sie in der Regel nur unter Aufsicht betreibt.

2.4 Solarladeregler

Zu einem Netzautarken PV-System gehört neben der Umwandlung solarer Strahlungsenergie in elektrische Energie (PV-Modul) auch deren Speicherung (Akkumulator). Um diese Energie möglichst effektiv und effizient im Akkumulator zu speichern, bedarf es eines steuernden Bindeglieds zwischen Solargenerator und Energiepuffer.

Ein Photovoltaikmodul stellt in Betrieb Gleichspannung und Gleichstrom an dessen Anschlussklemmen zur Verfügung. Um damit einen Akkumulator in einem autarken System für elektrische Verbraucher aufzuladen, ist es notwendig Strom und Spannung entsprechend des Akkumulatorbedarfs aufzubereiten und bereitzustellen. Dafür ist der Einsatz eines Solarladereglers notwendig. Dieser dient als steuerndes Bauteil zwischen PV-Modul und Akkumulator und hat die Hauptaufgabe den Energiespeicher vor Überladung und Tiefentladung zu schützen. Um den Energiespeicher so effizient und effektiv, aber auch so schonend wie möglich zu laden, muss der Solarladeregler auch die vom Typ des Energiespeichers abhängige U/I-Ladekennlinie bereitstellen können (Abb. 16 und 17). An den Eingangsklemmen des Solarladereglers ist das PV-Modul und an den Ausgangsklemmen ist der Akkumulator angeschlossen.

Für den Einsatz in Campingfahrzeugen konzentriert sich der Markt auf zwei Arten von Solarladereglern: PWM-Laderegler und MPPT Laderegler.

Zyklusladung Ladecharakteristik (IU)

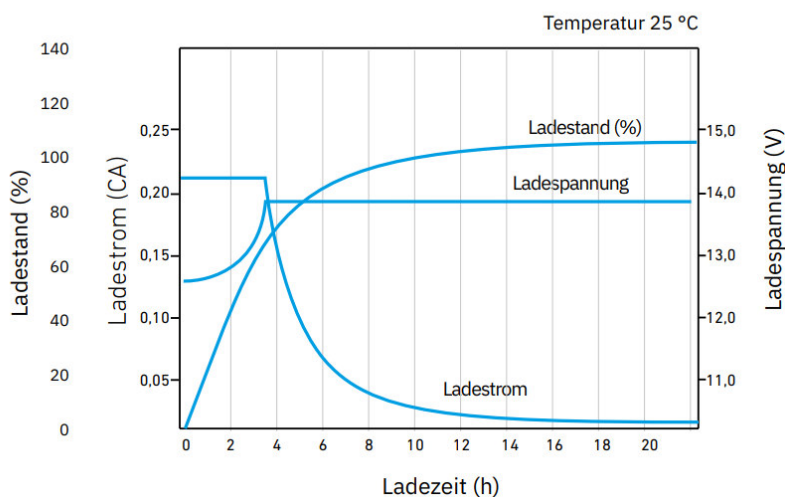


Abb.: 16 IU-Ladekennlinie für AGM und Blei-Gel Akkumulatoren (Quelle: active.de)

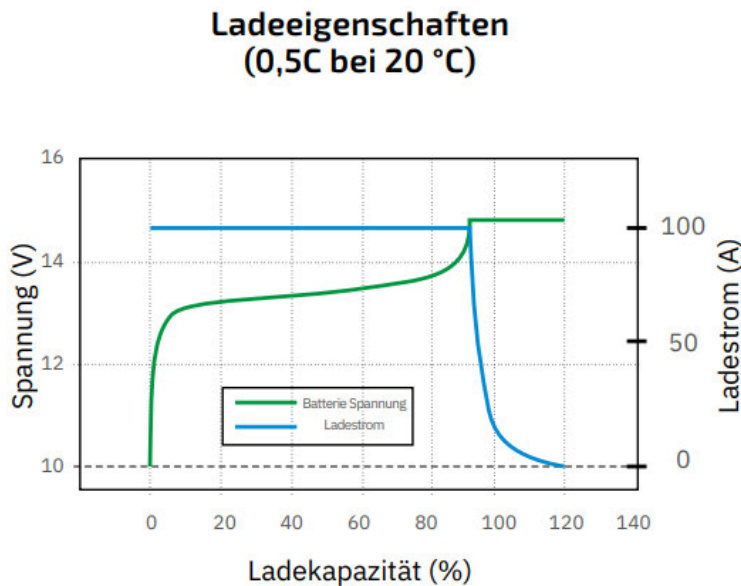


Abb.: 17 IU-Ladekennlinie für LiFePO₄- Akkumulatoren (Quelle: ective.de)

2.4.1 PWM-Solarladeregler

Der PWM-Solarladeregler nutzt die namensgebende Pulsweitenmodulation, um die Spannung des PV-Moduls an den Eingangsklemmen des Laders aufzubereiten. Der Effektivwert der Eingangsspannung (Gleichspannung) wird über Aufteilung in Pulse passender Breiten auf die für das Laden des Akkumulators benötigte Spannung angepasst. Der Strom, den das PV-Modul liefert, bleibt dabei unverändert. Die Ausgangsspannung des PV-Moduls muss über der Spannung, die für das Aufladen Akkumulators notwendig ist, liegen, um Ladungsträger in diesen zu transportieren. Dies sorgt abhängig von dem angeschlossenen Akkumulator für eine nutzbare Spannung von ca. 10,8 V bis 14,6 V. Da bei der genutzten Pulsweitenmodulation die Spannung angepasst wird, der Strom aber nicht, hat dies großen Einfluss auf die Leistung des PV-Systems. PV-Module lassen sich wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben auf hohe Spannung in Kombination mit niedrigem Strom oder umgekehrt anpassen. Je höher die Eingangsspannung am Regler, desto geringer ist der nutzbare Anteil der anliegenden Spannung, da der Laderegler die Spannung reduziert und an den Akkumulator weitergibt. Als Faktor aus Strom und Spannung wird die Leistung, welche an den Akkumulator weitergegeben wird, stark beeinflusst (Abb. 18). Dieser Einfluss wirkt sich bei PV-Modulen mit niedriger (aber höher als Akkumulatorspannung) Spannung und hohem Strom an den Ausgangsklemmen weniger stark aus, da die Verluste durch Anpassung der Spannung geringer sind.

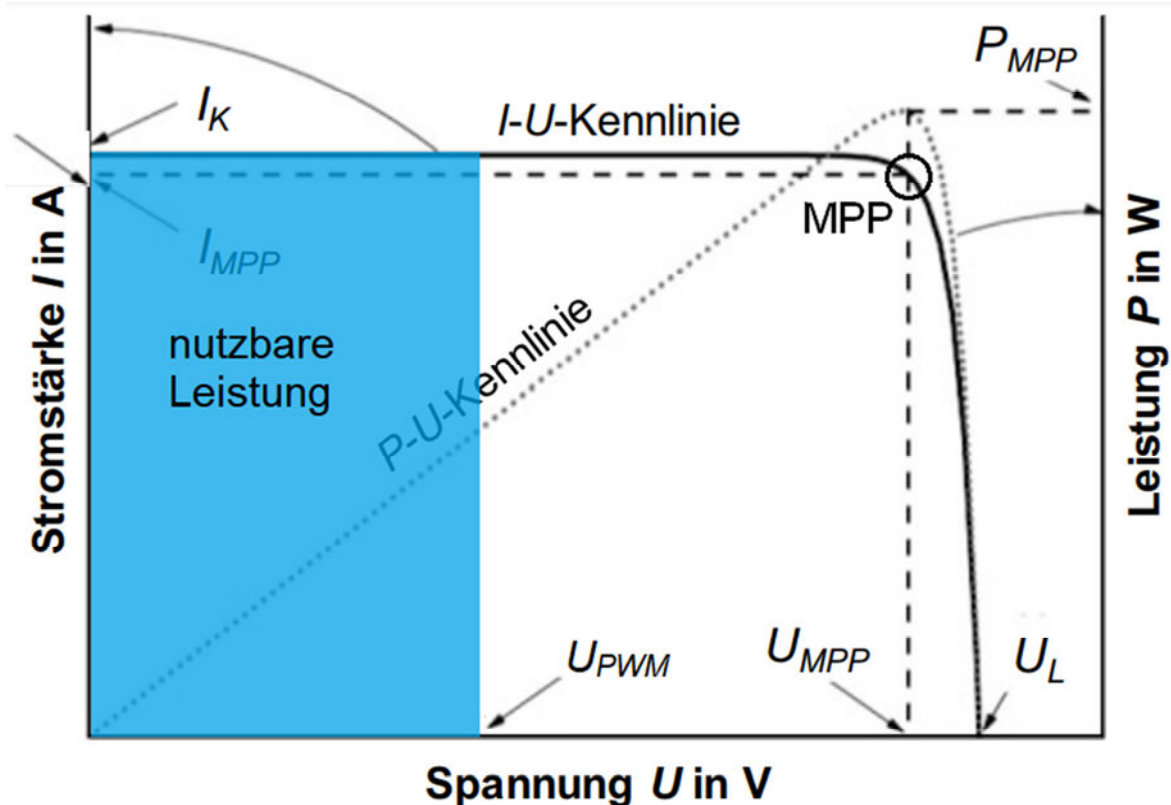


Abb.: 18 Schematische Darstellung der nutzbaren Leistung des PV-Moduls mit PWM-Laderegler (Darstellung erweitert aus vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.356)

2.4.2 Maximum Powerpoint Tracking

Die Bezeichnung MPPT-Solarladeregler stammt auch hier von der Funktion dieser Komponente: dem maximum powerpoint tracking.

Der MPPT-Solarladeregler passt wie der PWM-Solarladeregler die Spannung an den Ausgangsklemmen des Reglers so an, dass diese für das Aufladen des Akkumulators eingesetzt werden kann. Im Gegensatz zum PWM-Solarladeregler wird aber auch der Strom aus dem PV-Modul im Regler angepasst zum Akkumulator geleitet, wodurch deutlich geringere Leistungsverluste am Laderegler entstehen. Dafür fährt der MPPT-Laderegler die Kennlinie des angeschlossenen Solargenerators in regelmäßigen Zeitabständen ab und ermittelt den aktuellen MPP. Es wird somit die maximale Leistung, die der Generator in diesem Moment liefern kann, genutzt, um diese in den angeschlossenen Akkumulator zu transferieren. Die Eingangsleistung des MPPT-Solarladereglers entspricht (bei verlustlosen Bauelementen) dessen Ausgangsleistung. Dieser Laderegler eignet sich besonders bei hoher Spannungsdifferenz zwischen PV-Modul und Akkumulator sowie für geringe solare Einstrahlung, da diese einen hohen Einfluss auf den Strom des PV-Modus hat.

Der MPP kann durch MPP-Tracker entweder direkt oder indirekt bestimmt werden. Bei der indirekten Bestimmung wird zum Beispiel über Bestimmung der Modultemperatur oder Messung der Leerlaufspannung anhand eines Modells der MPP bestimmt. Diese Methoden sind technisch einfacher umzusetzen, bieten allerdings den Nachteil, dass sich der MPP hier nur annähernd bestimmen lässt. Direkte MPP-Tracker nutzen zur Informationsgewinnung das Messen tatsächlicher Größen von Strömen, Spannung und Leistungen. Der MPP-Tracker ist in der Lage eine der Größen definiert zu ändern und den Einfluss auf die anderen Größen zu messen. Dadurch entsteht ein aktuelles Modell des PV-Moduls, wodurch der optimale Arbeitspunkt, also der MPP, bestimmt werden kann. Da der Arbeitspunkt sich ständig verändert, wird dieser durch den MPP-Tracker ständig neu ermittelt.

(vgl. Zach, F, S 2023, S.2256)

2.4.3 Vergleich Solarladeregler

Der PWM-Laderegler deckt im Vergleich zu MPPT-Laderegler eine geringere Bandbreite an Einsatzgebieten ab. Die Stärken des MPPT-Ladereglers sind vor Allem bei hoher PV-Modulspannung oder geringer Einstrahlung ersichtlich. Wenn stabile Einstrahlungsbedingungen herrschen und die Spannung des PV-Moduls eine geringe Differenz zur Ladespannung des Akkumulators aufweist, arbeitet der MPPT-Laderegler ähnlich effizient wie der PWM-Laderegler. Im Wesentlichen lässt sich feststellen, dass der PWM-Laderegler unter bestimmten Bedingungen an die Leistungsfähigkeit eines MPPT-Ladereglers heranreicht. Über ein breites Einsatzspektrum hat der MPPT Laderegler technisch stets Vorteile (Tab. 2)

Eigenschaft	PWM-Solarladeregler	MPPT-Solarladeregler
PV-Spannung	PV-Spannung bis ca. 18 V	für kleine und große PV Spannungen
Kosten	kostengünstiger Regler	ca. Faktor 2-3 höher als PWM
Leistungsabgabe an Akkumulator	hohe Verluste (>50 % PWM möglich)durch ungenutze	PV-Leistung kann an Akkumulator übertragen werden
Einsatzgebiet	hohe durchschnittliche Einstrahlung	mittlere bis niedrige Einstrahlung

Tabelle 2 Vergleich PWM- und MPPT-Solarladeregler

2.5 Speicherung der elektrischen Energie

In Photovoltaikanlagen, welche für die Nutzung in autarken Systemen eingesetzt werden, sind Energiespeicher zwingend notwendig. Sie dienen dazu auch in Phasen geringer oder keiner nutzbaren Sonneneinstrahlung (Nacht, bewölkter Himmel) zu überbrücken. Für den Campingbereich kommen dafür nur Akkumulatoren infrage. Der Markt bietet eine Vielzahl an Speichertypen mit verschiedenen Eigenschaften wie Kapazitätsbereich, entnehmbare Maximalleistung, Zyklfestigkeit, typische Lade-/Entladezeit, Lebensdauer sowie

Platzbedarf und Gewicht an. Für eine Nutzung im Campingfahrzeug haben sich drei Arten von Akkumulatoren durchgesetzt, welche im Folgenden vorgestellt werden: Bleisäureakkumulator, Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator und AGM-Akkumulatoren.

2.5.1 Blei-Säure-, Blei-Gel- und AGM-Akkumulator

Dieser Akkumulatortyp war bis vor einigen Jahren vor allem als Starterbatterie für Kraftfahrzeuge im Einsatz. Für diesen Einsatz sind Bleisäure Akkumulatoren so ausgelegt, dass sie kurzzeitig hohe Ströme von bis zu 300 A (Anlassen eines Verbrennungsmotors) zur Verfügung stellen können ohne sich nennenswert zu entladen. Für diesen Zweck verfügen Bleisäure Akkumulatoren über einen niedrigen Innenwiderstand, eine hohe Säuredichte und eine große Elektrodenfläche. Ein so ausgelegter Bleisäure Akkumulator erreicht allerdings nur etwa 150 Zyklen (vollständiges Laden und Entladen). (vgl. Zach, F, S 2023, S.2256) Besonders dank hoher Verfügbarkeit und niedriger Kosten ist dieser Akkumulatortyp für den Einsatz als Energiespeicher interessant. Für den Einsatz als Energiespeicher in PV-Systemen ist die kurzzeitige Abnahme hoher Ströme nicht notwendig. Dadurch können diese Akkumulatoren durch Erhöhung des Innenwiderstands eine erhöhte Zyklenfestigkeit aufweisen.

Die Umwandlung der chemischen Energie in elektrische Energie wird hier über Redoxreaktionen vollzogen. Vereinfacht besteht der Bleisäure-Akkumulator aus mehreren in Reihe geschalteten Elektrodenpaaren. Die negative Elektrode (Anode) besteht aus porösem Blei und die positive Elektrode aus porösem Bleidioxid. Beide Elektroden sind in einen Elektrolyten (verdünnter Schwefelsäure) eingetaucht und weisen ein Potential von ca. 2 V zueinander auf. Zwischen beiden Elektroden befindet sich ein Separator, welcher für Ionen durchlässig aber für Elektronen ein Isolator ist. Wird zwischen den Elektroden ein Verbraucher geschaltet, bildet sich an der Oberfläche der Anode Bleisulfat und es findet eine Oxidation statt, bei der Elektronen von der Anode abgegeben werden. An der Kathode findet eine Reduktion statt, welche es dieser Elektrode erlaubt die Elektronen aufzunehmen, die von der Anode über elektrische Last fließen. Beim Aufladen werden von einer Spannungsquelle Elektronen zur mit Bleisulfat bedeckten Elektrode geführt, wodurch sich das Bleisulfat auflöst (Reduktion). Oxidationsvorgänge sorgen an der positiv geladenen Elektrode dazu, dass sie Elektronen in Richtung Spannungsquelle abgeben kann.

Für den Gebrauch in einem Kraftfahrzeug müssen sechs Elektrodenpaare in Reihe zueinander geschaltet werden. Die einzelnen Spannungen addieren sich und ergeben die typische Spannung von ~12 V.

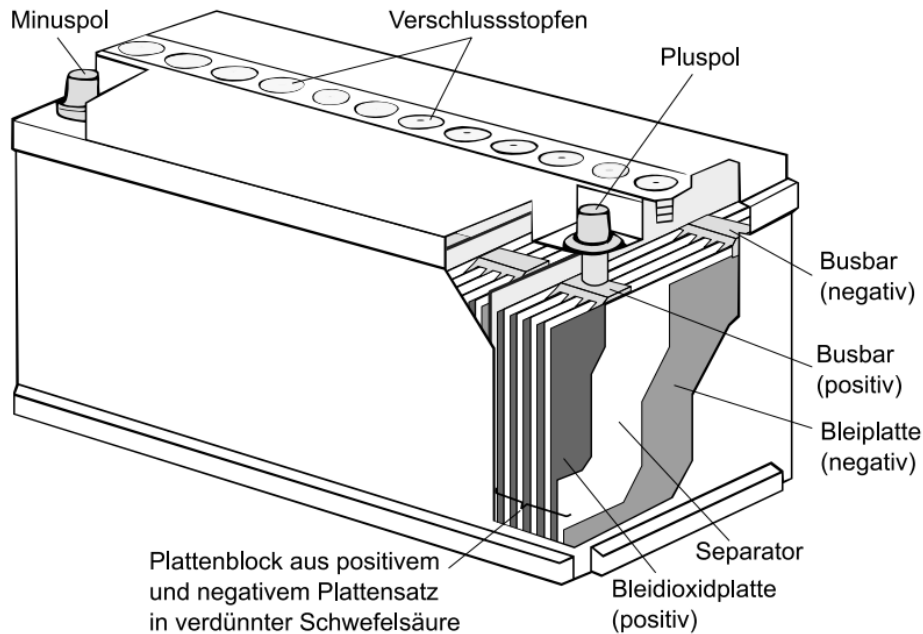


Abb.: 19 Schematischer Aufbau eines Bleisäure-Akkumulators (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.418)

Es gibt verschiedene Mechanismen, die die Alterung von Bleisäure-Akkumulatoren vorantreiben. Durch hohe Spannungen, d.h. hohen Ladezuständen, kommt es an der positiven Elektrode zu verstärkter irreversibler Korrosion. Tiefe Ladezustände bewirken aufgrund von Schwerkraft und unterschiedlicher Dichten eine Säureschichtung, wodurch einige Abschnitte der Elektroden tieferen Ladezuständen ausgesetzt sind als andere. Durch die hohe Empfindlichkeit auf tiefe Ladezustände kommt es zu einer stark beschleunigten Alterung ohne dass dies an der Klemmenspannung ersichtlich ist. Sehr tiefe Ladezustände ($< 1,8$ V/Zelle) begünstigen auch die Bildung großer Sulfatkristalle, welche sich schwer auflösen lassen. Dies hat eine Erhöhung des Innenwiderstands und dadurch einen Kapazitätsverlust zur Folge. Die großen Sulfatkristalle lassen sich durch spezielle Ladeverfahren mit dafür ausgelegten Ladegeräten meist wieder auflösen. Um diesen Akkumulator Typ vor Tiefentladung oder Überschreitung der Ladeschlussspannung zu schützen, reicht es in der Regel aus die Gesamtspannung des Zellverbands zu überwachen.

Bleisäure Akkumulatoren können für unterschiedliche Einsatzzwecke ausgelegt werden: für die kurzzeitige hohe Leistungsabgabe (Starterbatterie in Kraftfahrzeugen), Energiespeicher für hohe Lebensdauern im Bereitschaftsparallelbetrieb (unterbrechungsfreie Stromversorgung mit seltener Entladung) oder als Energiespeicher für starke zyklische Belastungen (z.B. Gabelstapler). Mit passenden Elektrodengeometrien und Elektrodenbauformen lassen sich Bleisäure-Akkumulatoren dem Anwenderprofil anpassen. Für den Einsatz als Pufferspeicher im PV-System eines Campingfahrzeuges, sollte demnach ein für diesen Anwendungsfall ausgelegter Bleisäure- Akkumulator gewählt werden. (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.414-420)

Die Kapazität eines Blei-Säure-Akkumulators kann durch Überwachung der Spannung näherungsweise bestimmt werden (Abb. 20). Bei ca. 12,72 V ist von 100% und bei ca. 11,88 V ist von 40% Ladezustand auszugehen. Dabei ist zu beachten, dass dieser Akkumulatortyp nicht unter ca. 50 % Ladekapazität sinken sollte, um ihn vor Beschädigungen zu schützen. Um über die Klemmenspannung auf den Ladezustand zu schließen, muss die Spannungsmessung ohne Belastung des Akkumulators und nach ca. 20min Ruhezeit durchgeführt werden, da direkt nach Laden bzw. Entladen die Spannung erhöht bzw. vermindert ist.

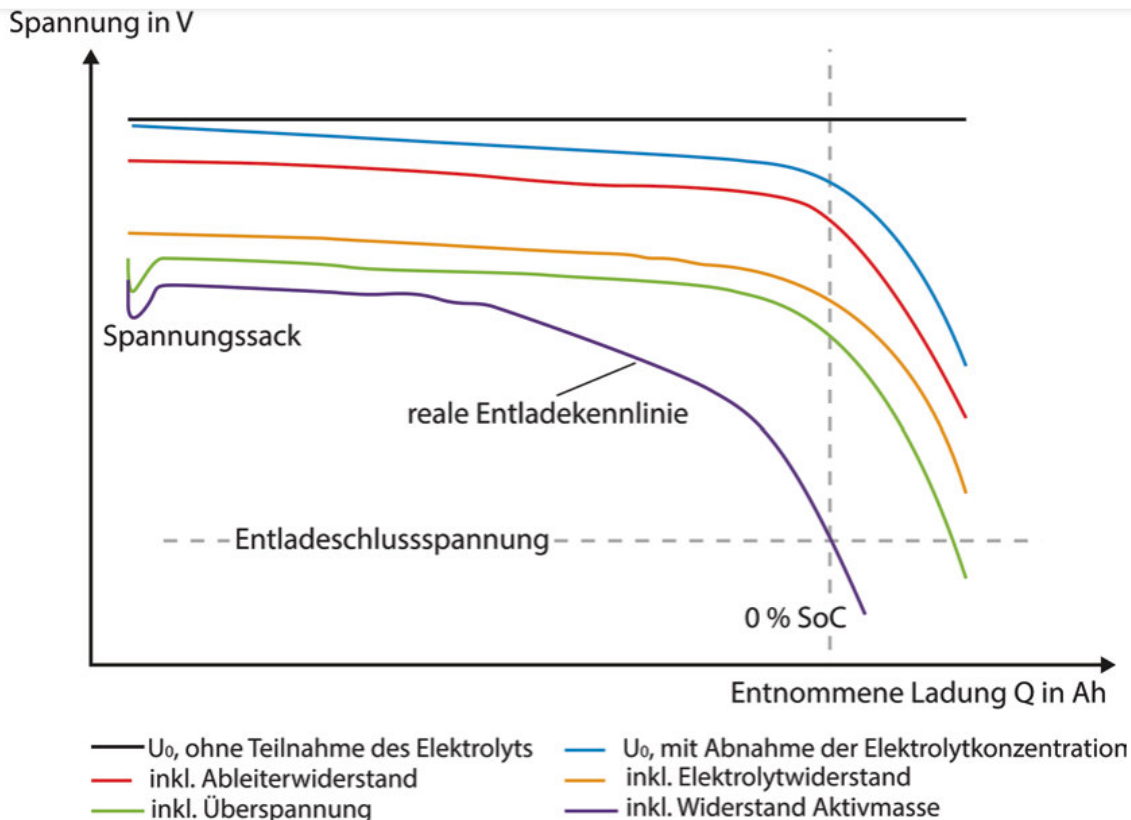


Abb.: 20 Schematische Entladecharakteristik eines Blei-Säure-Akkumulators bei konstantem Strom (vgl. Sterner, M; Stadler, I; 2017, S.253)

Bei Betrieb des Akkumulators findet nach und nach eine Wasserstoff- und Sauerstoffentgasung statt, was zum Wasserverlust aus dem Elektrolyten (verdünnter Schwefelsäure) führt. Die Gasung (Knallgasbildung) und die Gefahr des Auslaufens sollte bei der Installation dieses Akkumulatortyps beachtet werden. Die Zellen müssen regelmäßig mit destilliertem Wasser aufgefüllt werden, was Wartungsaufwand bedeutet. Aus diesem Grund können verschlossene Systeme eingesetzt werden, bei denen Wasserstoff und Sauerstoff nicht mehr aus dem Akkumulator austreten können. In diesen Blei-Gel-Akkumulatoren wird der Elektrolyt durch Zugabe von Kieselsäure in einen gelartigen Zustand versetzt. Der Aufbau des Blei-Gel-Akkumulators gleicht dem des Blei-Säure-Akkumulators, jedoch mit dem Vorteil der wartungsarmen Handhabung, Unempfindlichkeit gegen Vibrationen und Lage, sowie einem Schutz gegen Auslaufen.

Technisch gesehen entspricht der Blei-Vlies bzw. AGM-Akkumulator (Absorbent Glass Mat) einem Blei-Gel-Akkumulator. Der namensgebende Unterschied besteht darin, dass die Schwefelsäure nicht durch Kieselsäure, sondern durch Glasfaservlies, welches sich zwischen den Bleielektroden befindet, gebunden ist. Dieser Akkumulatortyp ist in der Lage höhere Ströme abzuliefern als ein Blei-Gel-Akkumulator, ist allerdings weniger Zyklenfest. Werden vom Akkumulator hohe Ströme entnommen, wie beim Einsatz durch einen Wechselrichter, zeigt der AGM-Akkumulator seine Vorteile gegenüber dem Blei-Gel-Akkumulator, da sie bei hohem Stromfluss eine höhere effektive Kapazität aufweisen. (vgl. Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A; 2020, S.414-420) (vgl. Babel, G; 2023, S.25-26)

2.5.2 Lithium-Eisenphosphat Akkumulator

Der Markt für Lithium-Ionen-Akkumulatoren im Campingbereich konzentriert sich vor allem auf die Untergruppe der Lithium-Eisenphosphat –Akkumulatoren, weshalb diese im Folgenden näher beleuchtet werden.

Die Speicherung der Energie in Lithium-Ionen- Akkumulatoren beruht auf einer reversiblen Ein- und Auslagerung von Aktivmaterialien durch elektrochemische Redoxreaktionen (Interkalation). Der Aufbau besteht hier im Wesentlichen aus zwei Elektroden, welche sich in einem Elektrolyten befinden. Dabei dient der Elektrolyt der Separierung des Transports der Lithium-Ionen und der Elektronen. Das heißt, dass Elektroden im Vergleich zu Lithium-Ionen den Elektrolyten nicht passieren können (Abb. 21). Beim Einsatz von metallischen Lithium als negative Elektrode, wie es bei Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren (LiFePO_4) der Fall ist, ergibt sich die Spannung der Zelle aus der Differenz des elektrochemischen Potentials zwischen der positiven und der negativen Elektrode (Graphit mit eingelagertem Lithium). Die Zellspannung ist also abhängig vom Standardpotential der positiven Elektrode gegenüber der negativen Elektrode. (vgl. Sterner, M; Stadler, I; 2017, S.281)

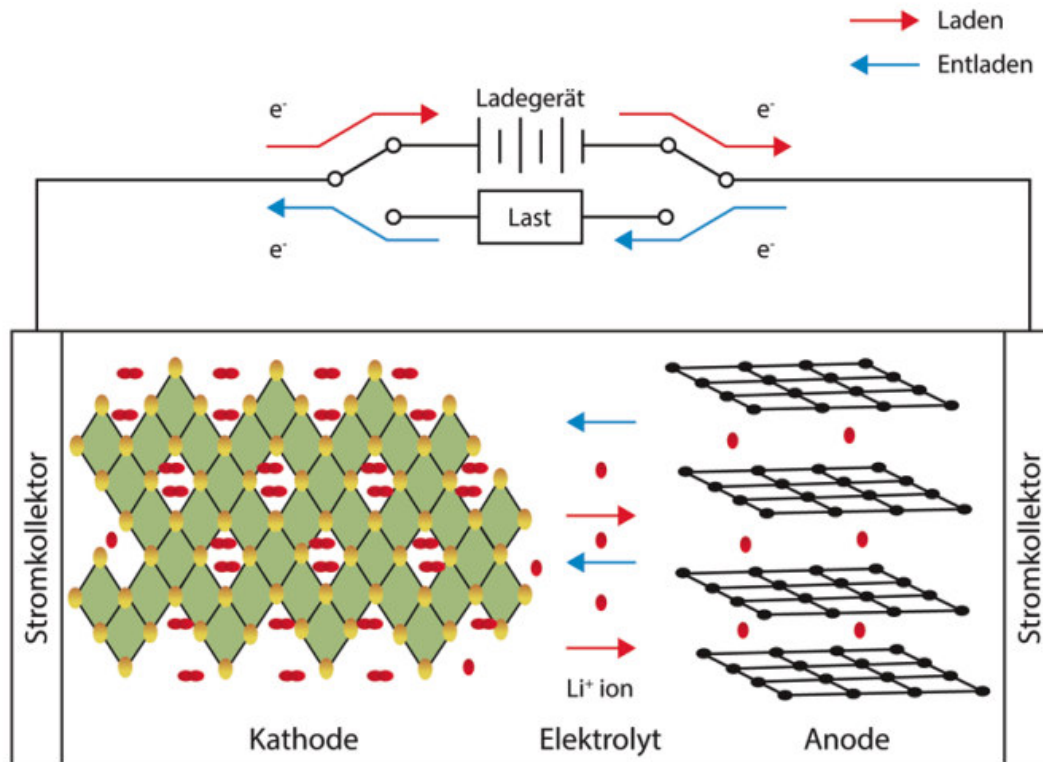


Abb.: 21 Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle (vgl. Sterner, M; Stadler, I; 2017, S.284)

Wird an dem Akkumulator eine Spannung angelegt (Laden mit einem Ladegerät), werden die Elektronen von der negativen Elektrode (Graphit) über das Ladegerät zur positiven Elektrode (LiFePO_4) geleitet. Dadurch entsteht ein Ungleichgewicht zwischen beiden Elektroden. Um dies auszugleichen, wandern die Lithium-Ionen über den Elektrolyt zur Metallelektrode. Dadurch entsteht ein Potential zwischen beiden Elektroden und der Akkumulator gilt als geladen. Beim Entladen läuft dieser Vorgang umgekehrt ab, nur dass die Elektronen dabei über einen elektrischen Verbraucher fließen und diesen mit elektrischem Strom versorgen. Bei Ladung und Entladung zeigt sich, dass die Lithium-Ionen dabei weder Oxidations- noch Reduktionsprozesse durchlaufen, sondern reversibel ein- bzw. ausgelagert werden. Dieser Vorgang ist sehr oft wiederholbar, sodass die Zyklenfestigkeit ca. eine Größenordnung über der von AGM-, Bei-Gel- und Blei-Säure-Akkumulatoren liegt. Die Zellspannung eines LiFePO_4 -Akkumulators beträgt 3,2 V – 3,3 V, das heißt um eine wie in Campingfahrzeugen übliche Spannung von 12 V bereitzustellen, müssen vier Zellen in Reihe geschaltet werden. Für die Erhöhung der Kapazität muss bei diesem Akkumulatortyp die Anzahl der Lithium-Ionen, die in das Material eingelagert werden können, erhöht werden.

Die Zyklenfestigkeit ist wie auch bei Blei-Akkumulatoren davon abhängig, wie tief dieser entladen wird. Der für lange Lebensdauer ideale Ladezustand liegt zwischen 30 % und 70 %. Allerdings sind selbst bei Zyklenzahl vermindernder Handhabung über 2500 Zyklen möglich. Dies übertrifft in Campingfahrzeugen meist die Nutzungszeit des PV-Systems,

wodurch die Nennkapazität im Vergleich zu Blei-Akkumulatoren (ca. 50%) zu 90 % bis 100% genutzt werden kann. Die tatsächliche Kapazität des Akkumulators liegt bei einigen Herstellern höher als die beworbene Nennkapazität. Darin begründet sich die nutzbare Kapazität von 100% der Nennkapazität. Im Vergleich zum Blei-Akkumulator ergibt sich dadurch eine einfachere Handhabung für den Nutzer. Der LiFePO_4 -Akkumulaor kann im Temperaturbereich von $-20\text{ }^\circ\text{C}$ bis $60\text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden (Herstellerangaben für Ladung und Entladung beachten). Um die Lade und Entladetemperatur zu überwachen und den Zelldrift von Einzelzellen auszugleichen, muss bei LiFePO_4 -Akkumulaoren ein sogenanntes Batteriemanagementsystem implementiert werden. Durch dieses kann meist auch der Ladezustand abgefragt werden. Um die klimatische Einsatzbandbreite zu erhöhen, werden für LiFePO_4 -Akkumulaoren Heizsysteme angeboten, welche die Temperatur des Akkumulators im Winter erhöhen, um ihn auch bei niedriger Umgebungstemperatur zu betreiben. Im Vergleich zu Blei-Akkumulatoren wirkt sich die Kapazitätsänderung nur gering auf die Klemmenspannung des LiFePO_4 -Akkumulaors aus. Erst bei hoher Lade- bzw. tiefer Entladespannung ist eine deutliche Spannungsänderung feststellbar (Abb. 22).

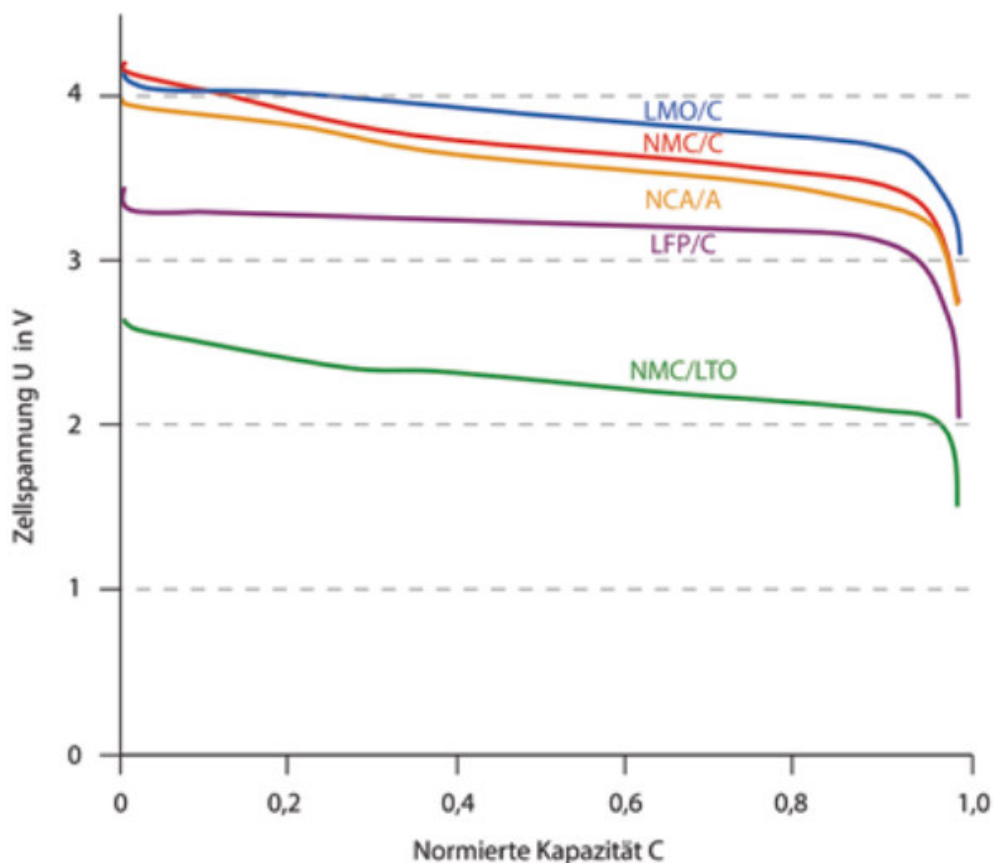


Abb.: 22 Lade- und Entladekurven von LiFePO_4 / Graphit (LFP/C) und anderen Li-Ionen Akkumulatoren (vgl. Sterner, M; Stadler, I; 2017, S.284)

2.5.3 Vergleich der Akkumulatoren

Im Folgenden werden die zuvor beleuchteten Akkumulatortypen in einer Tabelle (Tab. 3) miteinander verglichen. Dies soll einen Überblick über die verschiedenen Akkumulatorsysteme bieten. Durch die Gefahr von Knallgasbildung und des nicht vorhandenen Schutzes gegen Auslaufen sind Blei-Säure-Akkumulatoren nicht für den Gebrauch im Campingfahrzeug geeignet, weshalb sie vom Vergleich ausgeschlossen werden. Allgemein lässt sich sagen, dass der Vorgang des Ladens und Entladens jeden Akkumulatortyp altern lässt. Diese Zyklenzahl wird im Betrieb auch durch die nutzbare Kapazität stark beeinflusst, wodurch die nutzbare Kapazität bei der Dimensionierung des Akkumulators bedeutend ist.

Technologie	Blei-Gel	AGM	Lithium (LiFePO4)
Nennkapazität	38 bis 290 Ah	38 bis 290 Ah	12 bis 300 Ah
Nutzbare Kapazität	ca. 65%	ca. 55 %	ca. 90 % - 100 %
Ladeschlussspannung bei 25 °C	14,2 V -14, 4 V	14,4 V -14, 7 V	14,4 V - 14,6 V
Entladeschlussspannung bei 25 °C	10,5 v	10,8 V	11 V
Zyklusfestigkeit bei 80% Entalddtiefe	500 Zyklen	400 Zyklen	2500 Zyklen
Zyklusfestigkeit bei 50% Entalddtiefe	750 Zyklen	600 Zyklen	5000 Zyklen
Temperaturbereich	-20 bis 50 °C	-20 bis 40 °C	-30 bis 45 °C beheizt
Energiedichte	25-30 Wh/kg	25-30 Wh/kg	120-160 Wh/kg
Ladewirkungsgrad	ca. 75 %	ca. 90 %	ca. 95 %
max. konst Entladestrom (100 Ah Akku)	19 A - 22 A (nach C3)	19A -22 A (nach C3)	100 A -200 A
Nutzung mit Wechselrichter empfohlen	nein	ja	ja

Tabelle 3 Vergleich der Akkumulatortechnologien (Quelle: victronenergy.de; ective.de)

2.6 Wechselrichter

Die Mehrzahl der elektrischen Verbraucher in ortsfesten Haushalten wird mit Wechselspannung versorgt. Ein Solargenerator liefert seine elektrische Energie mit Gleichstrom an seine Verbraucher und Akkumulatoren können nur Gleichstrom aufnehmen und abgeben. Um die vom PV-System bereitgestellte Energie auch mit Wechselstromverbrauchern zu nutzen, ist eine Aufbereitungsanlage notwendig, welche den Gleichstrom aus dem Akkumulator in Wechselstrom wandelt. Diese Anforderung wird von einem Wechselrichter (DC/AC) abgedeckt. Es besteht ein berechtigtes Interesse am Einsatz von DC/AC Wechselrichtern in Campingfahrzeugen, weshalb diese Komponente im Folgenden näher beschrieben wird.

Der Wechselrichter gehört nicht zwangsläufig zu einem PV-System zur autarken Versorgung mit elektrischer Energie, sondern kann als Verbraucher des Systems angesehen werden. Da er durch die Fähigkeit der Wandlung elektrischer Energie die Bandbreite an nutzbaren elektrischen Geräten erhöht, nimmt er hier aus Sicht des Nutzers des Campingfahrzeugs eine Rolle als Teil des elektrischen Versorgungssystems

ein. Da der Wechselrichter hier ein Netzautarkes elektrisches Netz betreiben soll, ist ein selbst geführter Wechselrichter, welcher sich keiner Netzfrequenz anpassen muss, ausreichend.

Die am Markt verfügbaren Wechselrichter lassen sich in drei Arten unterscheiden: Geräte mit reiner Sinusspannung, mit modifizierter Sinusspannung und mit Rechteckspannung. Beim Rechteckwechselrichter werden Thyristoren miteinander verschaltet und so getaktet, dass am Ausgang des Wechselrichters eine rechteckige Wechselspannung entsteht (Abb. 23). Die so erzeugte Frequenz gleicht der Netzfrequenz von 50 Hz, wobei die Rechteckspannung mit ihren steilen Spannungsanstiegen Störungen an nicht-ohmschen Verbrauchern führen können. Sollen am Wechselrichter typische Verbraucher wie Laptops, Ladegeräte für Kameras und Smartphones oder eine Kaffeemaschine betrieben werden, kann es an den Geräten bzw. deren Netzteil zu hoher Temperaturentwicklung oder Funktionsverweigerung kommen. Rechteckwechselrichter gehören dank ihrer unkomplizierten Ausführung zu den kostengünstigsten Wechselrichtern, bieten aber auch die geringste Bandbreite an Verbrauchern, die sie betreiben können.

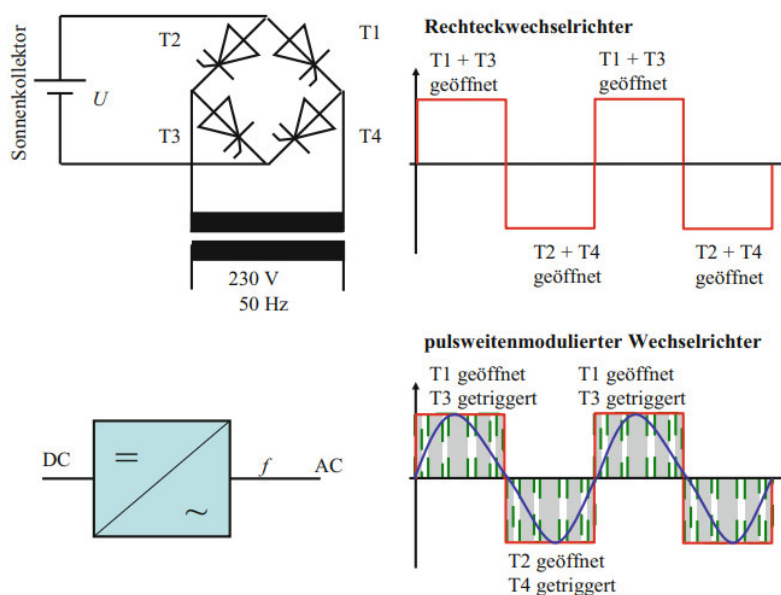


Abb.: 23 Schema Rechteckwechselrichter und PWM-Wechselrichter (vgl. Watter, H, 2022, S.25)

Wird die Impulsweite der Thyristoren (T3 und T4 in Abb. 23) angepasst, kann eine sinusförmige Ausgangsspannung am Wechselrichter erreicht werden. Dieser Vorgang, bekannt als Pulsweitenmodulation (PWM), kann durch den Einsatz von Transistoren statt Thyristoren deutlich in der Effizienz gesteigert werden. Die Frequenz am Ausgang eines PWM-Wechselrichters besteht aus kurzen Pulsen hoher Frequenz, welche von Transistoren periodisch umgepolt werden. Es entsteht eine zerhackte sinusförmige Ausgangsspannung, welche auch modifizierte Sinusspannung genannt wird. An Wechselrichtern mit modifiziertem Sinus lassen sich neben ohmschen Verbrauchern auch

Verbraucher mit einfacher Elektronik betreiben. Beispiele dafür sind Mikrowellen und Ladegeräte für Smartphones, Kameras, sowie Laptopladegeräte. Es gilt aber zu beachten, dass die genannten Geräte für den Gebrauch mit reinem Sinus ausgelegt und entsprechend geprüft sind. Demnach können, abhängig von der verbauten Elektronik, Schäden oder beschleunigte Alterung der Bauteile auftreten. Des Weiteren können bei Betrieb von induktiven Lasten erhöhte Betriebsgeräusche am Wechselrichter entstehen. Die Effizienz ist hier aber geringer als bei Betrieb an reiner Sinus-Wechselspannung. Sollen Verbraucher mit empfindlicher Elektronik, medizinische Geräte, moderne Fernseher oder Wechselstrommotoren an einem Wechselrichter betrieben werden, eignen sich Wechselrichter mit reinem Sinus als Ausgangsfrequenz. Diese Wechselrichter nutzen verschiedene Filter, um die Kanten eines modifizierten Sinussignals so zu glätten, dass ein Sinussignal am Ausgang entsteht, welches dem entspricht, was vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellt wird. Somit können auch Geräte mit empfindlicher Elektronik am Wechselrichter betrieben werden. Die Bandbreite der nutzbaren Geräte ist dadurch gleich derer einer Nutzung am 230 V Wechselspannungsnetz einer Immobilie. (vgl. Watter, H, 2022, S.25-27)

Wechselrichter sind oft auch in Kombination mit einem MPPT Solarladeregler in einem Gerät erhältlich. In diesem Fall muss dieses Gerät sowohl die Anforderungen des Solargenerators, des Akkumulators als auch die der an den Wechselrichter anzuschließenden Geräte erfüllen.

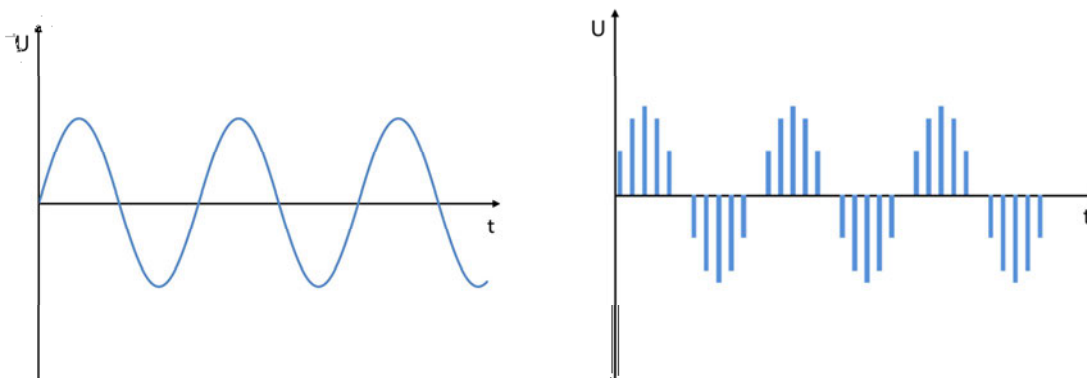


Abb.: 24 Vergleich reiner Sinus (links) und modifizierter Sinus (rechts) (eigene Darstellung)

3 Dimensionierung eines Photovoltaiksystems

Die in Abschnitt 2 vorgestellten Komponenten sind dem jeweiligen Anspruch an die Nutzung des Systems anzupassen. Dieser Anspruch ist hier die Netzautarke Versorgung eines Campingfahrzeugs mit elektrischer Energie. Mit einer optimalen Auslegung des PV-Systems auf den Anwendungsbereich lassen sich die Komponenten effektiv, effizient und langlebig betreiben. (vgl. Wesselak, V; Voswinkel, S 2012, S.95) Die Dimensionierung des PV-Systems erfolgt in folgenden Schritten. Zunächst wird der tägliche Bedarf elektrischer Energie ermittelt. Anschließend wird mit der geforderten Autarkiezeit und dem Energiebedarf die Kapazität des Akkumulators festgelegt. Des Weiteren ist die geeignete Akkumulortechnologie zu ermitteln. Danach wird das Strahlungsangebot des Einsatzortes untersucht und der Solargenerator wird entsprechend des Energieverbrauchs und des Strahlungsangebots ausgelegt. Die nachfolgende Dimensionierung basiert auf der ganzjährigen Nutzung eines Campingfahrzeugs für zwei Personen. Dabei sollen ein achtstündiger Arbeitstag mit zwei Laptops und eine Autarkiezeit von drei Tagen möglich sein. Das Campingfahrzeug soll in den Sommermonaten in Mitteleuropa (April-September) und in den Wintermonaten (Oktober – März) in Südeuropa genutzt werden. Falls PV-Module auf dem Campingfahrzeug fest installiert werden müssen, stehen auf dem ebenen Dach des Campingfahrzeugs eine Fläche mit 1600 mm * 700 mm und weitere Fläche mit 1800 mm* 750 mm zur Verfügung. Es gibt keine Anforderungen an die Gesamthöhe des Fahrzeugs. Das komplette PV-System darf dabei 100 kg Masse aufweisen. Es wird keine Wechselspannung benötigt.

3.1 Ermittlung des Bedarfs elektrischer Energie

Soll der Bedarf elektrischer Energie festgestellt werden, bietet es sich an die Leistungsaufnahme der einzelnen Verbraucher und deren Betriebsdauer zu ermitteln. Dabei sollte beachtet werden, dass sich der Energiebedarf bei einem autarken System nach dem Einsatzzeitpunkt des Systems richten sollte. Bei einer ganzjährigen autarken Nutzung des PV-Systems sollten demnach die Monate bzw. Jahreszeit mit dem höchsten Energiebedarf die Bedarfsrechnung bestimmen (Tab.4) Die dafür notwendigen Werte lassen sich von den Netzteilen der Verbraucher oder deren Datenblättern ablesen. Die Betriebsdauer ist dabei stets ein Schätzwert, welcher bei einer Bedarfsrechnung erfahrungsbasiert ist. Die Verbräuche von Smartphone, Kamera und Laptop wurden dabei experimentell mithilfe eines Messshunts ermittelt.

Verbraucher	Nennleistung in W	Anzahl	Betriebszeit in h		Täglicher Verbrauch in Wh	
			Sommer	Winter	Sommer	Winter
Beleuchtung	10	5	1	4	50	200
Wasserpumpe	20	1	0,3	0,3	6	6
Smartphone	10	2	2	2	40	40
Laptop	14	2	5	5	140	140
Kamera	8	1	1	1	8	8
Kühlschrank	40	1	5	0	200	0
Lüftungsventilator Toilette	2	1	24	24	48	48
Lüftungsventilator Wohnraum	15	1	0,5	0,5	7,5	7,5
Solarladeregler (Eigenverbrauch)	1,2	1	24	24	28,8	28,8
Heizung (Zyklisch)	50	1	0	4	0	200
Gesamt	170,2				528,3	678,3

Tabelle 4 Energiebedarf eines Campingfahrzeugs als Mobile Office für zwei Personen

Bei ganzjähriger Nutzung eines Campingfahrzeugs wird in den Wintermonaten zumeist mehr Energie verbraucht als in den Sommermonaten. Dies ist am Kalkulationsbeispiel in Tab. 4 erkennbar. Bevor der errechnete Wert als Basis für die Auslegung des Akkumulators dient, kann sich die Überlegung der Verbrauchsoptimierung durchaus auf den Gesamtverbrauch auswirken.

3.1.1 Optimierung des Energiebedarfs

In Campingfahrzeugen sind oft Leuchtmittel in Halogentechnik verbaut, welche bei Betrieb eine hohe Temperaturentwicklung zeigen und somit auf einen geringen Wirkungsgrad hinweisen. Werden statt Halogen Leuchtmitteln (10 W) LED-Leuchtmittel (1,5 W) eingesetzt, können bei gleicher Leuchtstärke erhebliche relative Energieeinsparungen erreicht werden. Im Beispiel aus Tab. 4 kann der Energiebedarf für die Beleuchtung somit um 85% reduziert werden. Damit sinkt der Energiebedarf von 50 Wh im Sommer und 200 Wh im Winter auf 7,5 Wh im Sommer und 30 Wh im Winter (Tab. 5). Weitere Ersparnisse lassen sich durch zusätzliche Lüfter, welche die Abwärme von der Kühlschrankrückseite abführen, erwirken. Auch eine Wärmedämmung des Campingfahrzeugs kann zu Minderung des Verbrauchs elektrischer Energie führen, da dieses bei kühlen Außentemperaturen weniger schnell auskühlen kann. Kennwerte zu Einsparungen des Verbrauchs sind für beide vorrangegangenen Optionen nicht verfügbar und müssen experimentell bestimmt werden, was nicht Teil dieser Diplomarbeit ist. Allerdings lässt sich der Einfluss einer Verbrauchsoptimierten Nutzung der Verbraucher des Campingfahrzeugs erkennen und es wird klar, dass es sich im Hinblick auf die Reduktion des Energiebedarfs auszahlt sparsamere Technologien zu ergründen.

Verbraucher	Nennleistung in W	Anzahl	Betriebszeit in h		täglicher Verbrauch in Wh	
			Sommer	Winter	Sommer	Winter
Beleuchtung Halogen	10	5	1	4	50	200
Beleuchtung LED	1,5	5	1	4	7,5	30

Tabelle 5 Vergleich Energiebedarf Leuchtmittel in Halogen- und LED-Technik

3.1.2 Verbrauchsbewusste Nutzung eines Wechselrichters

Der in Abschnitt 3 vorgestellte Wechselrichter ist ebenfalls als Verbraucher anzusehen, da er selbst und vor allem die angeschlossenen Geräte zum Energieverbrauch beitragen. Der typische Wirkungsgrad eines Wechselrichters liegt bei $\eta_{WR} = 91\%$ und die Null-Last-Leistung kann bis zu 10 W betragen. Das heißt auch wenn keine Last am Wechselrichter angeschlossen ist, verbraucht dieser Energie. Am folgenden Beispiel sollen wie in Tab. 4 zwei Smartphones an einem Wechselrichter aufgeladen werden. Dafür wird ein typischer Wirkungsgrad des Ladegeräts von $\eta_{LG} = 85\%$ angenommen.

Verbraucher	Nennleistung in W	Anzahl	Betriebszeit in h	täglicher Verbrauch in
Wechselrichter eigenverbrauch	10	1	1	10
Smartphone mit 230 V Netzteil	20	2	1	40
Einfluss $\eta_{LG} = 85\%$	20	2	1	6
Einfluss $\eta_{WR} = 91\%$	20	2	1	4,14
Gesamt mit Wechselrichter				60,14
Gesamt ohne Wechselrichter				40

Tabelle 6 Vergleich des Ladens zweier Smartphones an Wechsel- und Gleichspannung

Es wird deutlich, dass durch das Aufladen beider Smartphones an Gleichspannung weniger Energie benötigt wird als über den Betrieb eines Wechselrichters und 203 V Ladegeräts. Dies ist vor allem in den Umwandlungsverlusten begründet. Während beim Einsatz von Gleichspannung die Akkumulatorspannung von ca. 12 V auf 5 V (DC/DC) gewandelt werden muss, ist bei der Nutzung am Wechselrichter die Umwandlung von 12 V auf 230 V (DC/AC) und anschließend von 230 V auf 5V (AC/DC) notwendig. Hinzu kommt der Eigenverbrauch des Wechselrichters. Daraus folgt, dass ein Wechselrichter nur dann sinnvoll ist, wenn der zu betreibende Verbraucher nicht ohne weiteres an Gleichspannung betrieben werden kann. Geräte mit Steckernetzteilen (AC/DC) sind auf Gleichspannung ausgelegt und können meist mit geeigneten Netzteilen bzw. Ladegeräten (DC/DC) an 12 V Systemen betrieben werden. Die Verluste sind dabei geringer als bei der Spannungsumwandlung (AC/DC bzw. DC/AC), hängen aber vom Netzteil bzw. Ladegerät ab.

Durch den bewussten Einsatz von Gleich- und Wechselfspannung im Campingfahrzeug lässt sich auch hier der Verbrauch elektrischer Energie senken.

3.2 Auslegung Akkumulator

Ein Akkumulator für ein PV-System eines Campingfahrzeugs wird sowohl der gewünschten Versorgungssicherheit, dem Einsatzprofil, sowie den baulichen Gegebenheiten des Einbauorts angepasst. Zunächst wird der ermittelte tägliche Energiebedarf mit der gewünschten Autonomiezeit multipliziert, woraus sich der tatsächliche Energiebedarf ergibt. Dafür wird der in Tab. 4 ermittelte Energiebedarf genutzt.

$$\text{tatsächlicher Energiebedarf} = 678,3 \frac{\text{Wh}}{\text{d}} \cdot 3\text{d} = 2034,9 \text{ Wh}$$

Die nutzbare Kapazität des Akkumulators muss demnach mindestens 2034,9 Wh betragen.

Im nächsten Schritt sollte festgelegt werden, ob am PV-System hohe Stromverbraucher betrieben werden sollen, wie beispielsweise beim Betrieb von Haushaltsgeräten (Kaffemaschine, Föhn, TV, etc.) an einem Wechselrichter. Blei-Gel-Akkumulatoren eignen sich nicht für den Betrieb mit einem Wechselrichter als Verbraucher, AGM und LiFePO₄-Akkumulatoren sind hingegen dafür geeignet. Anschließend muss der Installationsort im Campingfahrzeug berücksichtigt werden. Es ist zu ermitteln, wie die geometrischen Dimensionen des Akkumulators ausgeprägt sein dürfen. Des Weiteren ist das maximale Gewicht, welches der Akkumulator haben darf, zu ermitteln. Das Gewicht des Akkumulators sollte nicht vernachlässigt werden, da bei Campingfahrzeugen oft nur eine maximale Zuladung von 400 kg – 600 kg zur Masse im fahrbereiten Zustand zulässig ist. Es wird im Folgenden eine maximale geometrische Ausdehnung und ein maximales Akkumulatorgewicht erfahrungswertbasiert angenommen. Zudem wird bei einem Anbieter für Akkumulatoren nach passenden Energiespeichern gesucht (Tab. 7).

Eigenschaft	Sollwert	Blei-Gel	AGM	LiFePO ₄
Nennkapazität	x	3480 Wh	4080 Wh (2*2040 Wh)	2560 Wh
nutzbare Kapazität	2034,9 Wh	2262 Wh	2244 Wh	2560 Wh
Wechselrichter	nein	nein	ja	ja
Haltbarkeit in Zyklen	>1000	>2000	>1500	>15000
Gewicht	70 kg	73,1 kg	95,6 kg (2*47,8 kg)	27,70 kg
Abmessungen (L*B*H)	(700*320*300) mm	(520*269*222) mm	(484*340*241)mm (2*(484*170*241)) mm	(520*267*228) mm
Anforderungen erfüllt	x	nein	nein	ja

Tabelle 7 Auswahl geeigneter Akkumulatoren (Quelle: active.de)

In der Tabelle ist zu erkennen, dass der LiFePO₄-Akkumulator für den vorgegebenen Einsatzzweck am besten geeignet ist. Dies ist auch abhängig von den angebotenen Akkumulatoren. Es sollte eine erhöhte Bandbreite von Anbietern betrachtet werden, um einen geeigneten Akkumulator für den jeweiligen Einsatzzweck zu finden. Die Nennkapazität passt nur in seltenen Fällen genau auf den ermittelten Sollwert. Bei der kapazitätsbasierten Auswahl gilt es die Sollkapazität mindestens zu erreichen. In Tab. 7

erfüllt der betrachtete Blei-Gel-Akkumulator nur aufgrund des geringfügig zu hohen Gewichts nicht die geforderten Anforderungen. Wenn sich wie in Tab. 7 kein einzelner Akkumulator mit hinreichender nutzbarer Kapazität im Portfolio des Anbieters befindet, können auch mehrere Akkumulatoren in Parallelschaltung zusammenschaltet werden. Dadurch kann die Zielkapazität erreicht werden, allerdings wird auch ein etwas größerer Einbauraum benötigt. Dadurch und durch das zu hohe Gewicht erfüllt das ausgewählte Akkumulatorenpaar nicht die geforderten Anforderungen. Durch die Anforderung an die Versorgungssicherheit entladen sich die untersuchten Akkumulatoren an einem Tag um 16 % - 25 %. Dadurch ist die Anzahl möglicher Zyklen so hoch, dass alle drei Akkumulatoren die Anforderungen deutlich übertreffen. Bewusst sind hier die Temperaturen am Einsatzort nicht beachtet worden. Dies ist darin begründet, dass es bei ganzjähriger Nutzung eines Campingfahrzeugs nicht sehr wahrscheinlich ist, dass Akkumulator in die Nähe dessen Temperaturgrenzen (-20 °C - +60 °C) betrieben wird. Muss der Akkumulator nahe seiner Temperaturgrenzen betrieben werden, bietet sich die Nutzung eines Akkumulator-Heizsystems bzw. eines Lüfters (wenn Umgebung kühler) zum Kühlen zu installieren.

Der LiFePO₄-Akkumulator ist den Blei-Akkumulatoren aus technischer Sicht für den Einsatz in Campingfahrzeugen meist überlegen. Deshalb bietet es sich nur aus wirtschaftlichen Gründen, welche hier nicht weiter beleuchtet werden, an einen Blei-Gel- oder AGM-Akkumulator statt eines LiFePO₄-Akkumulators zu installieren.

3.3 Auslegung Solargenerators

Um den Solargenerator zu dimensionieren, muss sowohl der Energiebedarf (Abschnitt 3.1) als auch das Energieangebot ermittelt werden. Da der Solargenerator solare Strahlungsenergie in elektrische Energie umwandelt, stellt deren Einstrahlung das Energieangebot dar. Wenn das Strahlungsangebot bekannt ist, kann der Solargenerator nach Energieangebot und Energiebedarf dimensioniert werden.

3.3.1 Ermittlung des Strahlungsangebots

Die Auslegung eines Solargenerators sollte sich innerhalb des Nutzungszeitraums nach dem Strahlungsangebot der Monate oder Jahreszeiten richten, an denen die geringste Einstrahlung zu erwarten ist. Neben der Jahreszeitlichen Abhängigkeit ist das solare Strahlungsangebot auch Ortsabhängig. Für die Ermittlung des lokalen Strahlungsangebots können Messgeräte (z.B. Pyranometer) verwendet werden. Da bei einem Campingfahrzeug eine große Bandbreite an Einsatzorten vorkommen kann, sollte hier das durchschnittliche Strahlungsangebot von Regionen, Ländern oder Bereiche von Kontinenten bzw. Klimazonen herangezogen werden. Dies lässt sich in Datenbanken anhand von historischen Daten ermitteln. Es wird nachfolgend eine ganzjährige autarke Nutzung nach dem Energiebedarf aus Tab. 4 angenommen. Als Einsatzort wird im

Sommer Deutschland und im Winter Spanien (Festland) gewählt. Dafür können von Behörden bereitgestellte Datensätze genutzt werden.

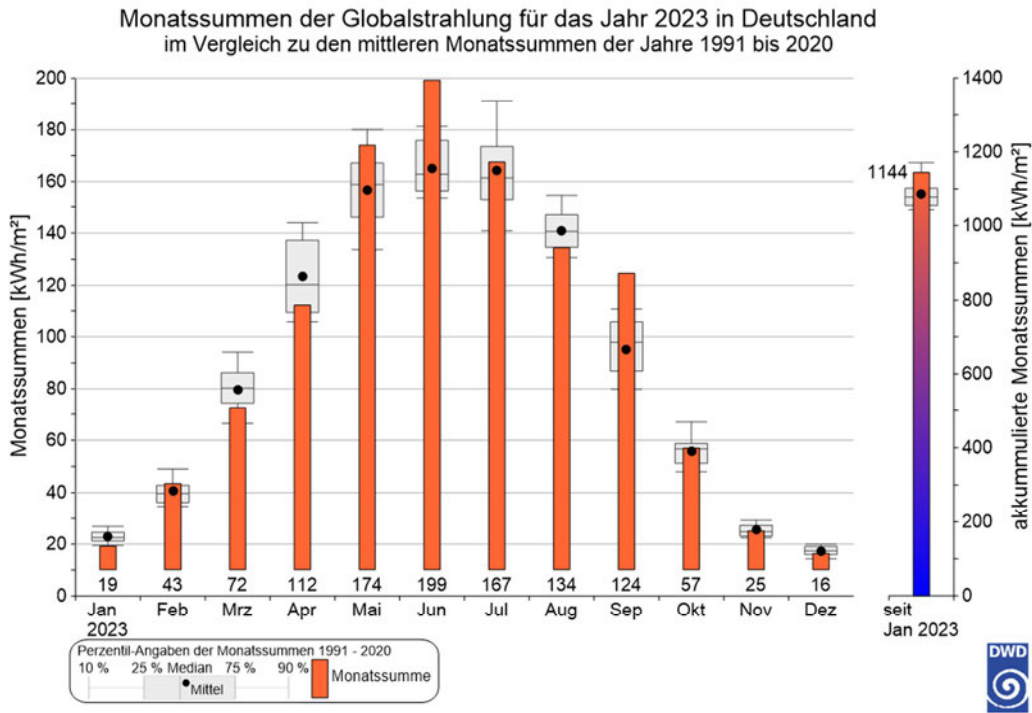


Abb.: 25 Monatssummen Globalstrahlung für das Jahr 2023 in Deutschland (Quelle: dwd.de)

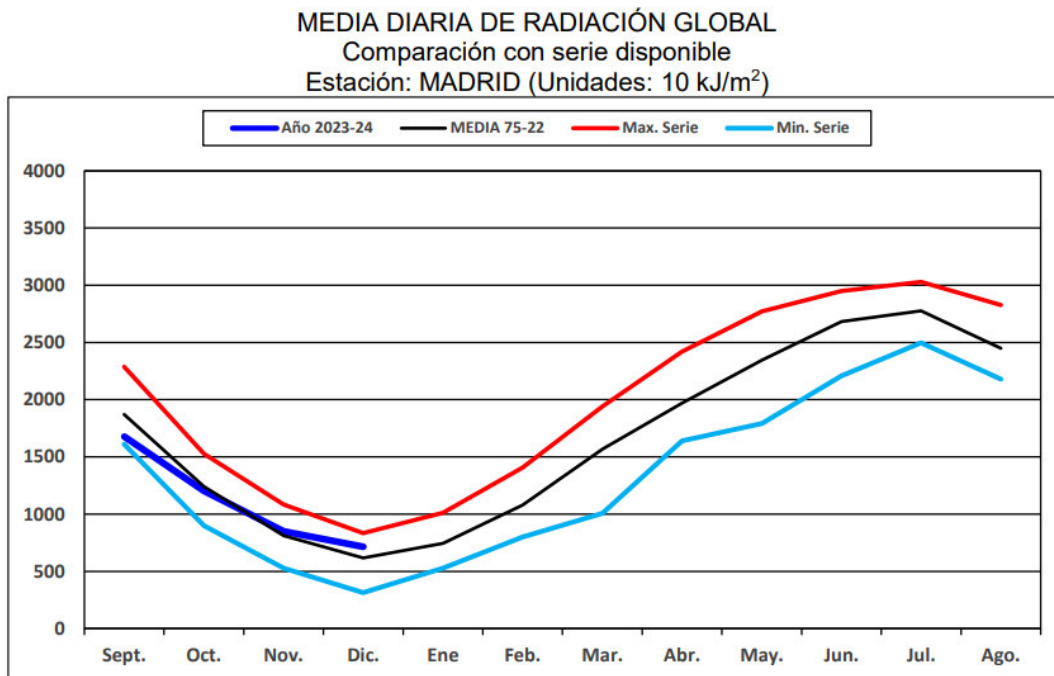


Abb.: 26 Durchschnittliche Globalstrahlung für Madrid für Sep 22 – Dez 23 und mit Langzeitdaten (Quelle: aemet.es)

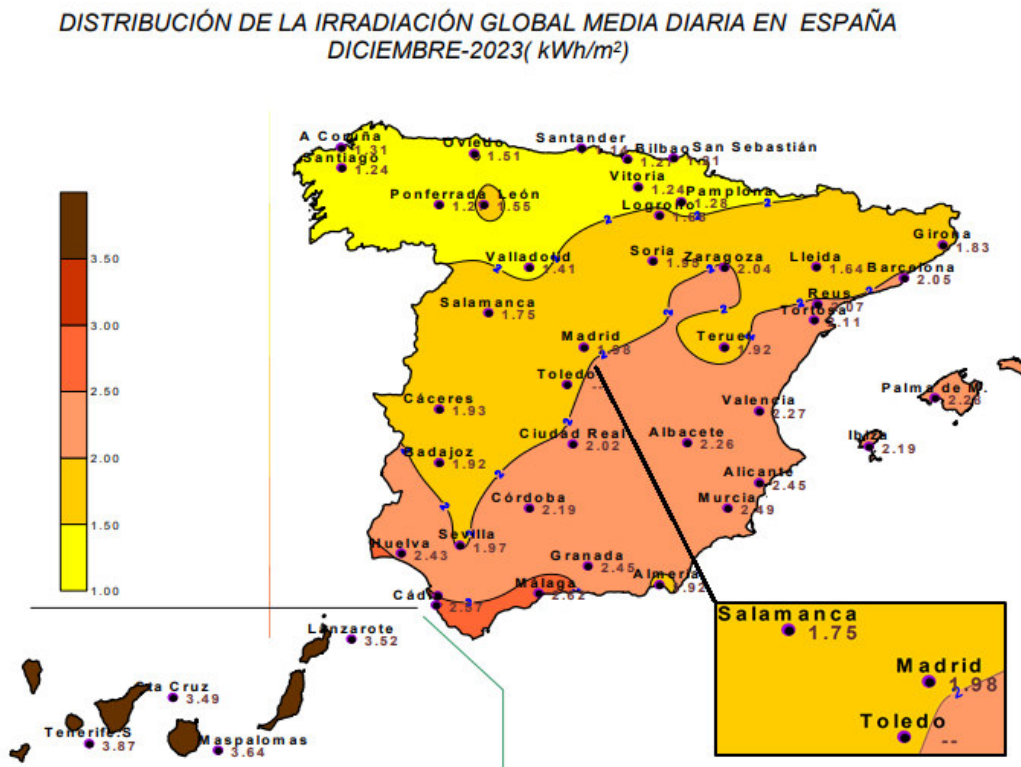


Abb.: 27 Durchschnittliche Globalstrahlung für Madrid für Dezember 2023 (Quelle: aemet.es)

Aus Abb. 25 und 26 lässt sich der Monat Dezember als Strahlungsärmster Monat für Deutschland und Spanien (Madrid stellvertretend) erkennen, weshalb dieser am Ort Madrid als Referenz (Abb. 27) für die Bestimmung des Strahlungsangebots genutzt wird.

$$E_{Dez} = E_{\emptyset Dez} \cdot \frac{1}{t_{TL}}$$

$$E_{Dez} = 1,98 \frac{kWh}{m^2} \cdot \frac{1}{8,5 h}$$

$$E_{Dez} = 0,233 \frac{kWh}{m^2}$$

Das so ermittelte Strahlungsangebot bildet die durchschnittliche Einstrahlung des Monats Dezember in Madrid ab und dient im Folgenden als Basis für die weitere Auslegung des PV-Systems.

3.3.2 Dimensionierung PV-Modul

Mit ermitteltem Energiebedarf und vorliegendem Strahlungsangebot kann nachfolgend sowohl Leistungsfähigkeit, Technologie; Verschaltung und Anordnung festgelegt werden. Die Anforderungen für den Solargenerator sind wie folgt.

- Energieumwandlung pro Tag: $W = 678,3 \text{ Wh}$
- Ø Strahlungsangebot: $E_{\text{Dez}} = 233 \text{ W/m}^2$
- Ø Dauer Tageslicht: $t_{\text{tl}} = 8,5 \text{ h}$

Die höchstmögliche Leistungsfähigkeit eines PV-Moduls wird in Watt Peak (W_p), welche bei STC ($E_{\text{STC}} = 1\text{kW/m}^2$) ermittelt wird, angegeben. Daraus lässt sich über den Wirkungsgrad (η_{mon} bzw. η_{pol}) der PV-Modultechnologie die maximale Einstrahlung ermitteln, welche das Modul in elektrische Energie umwandeln kann. Der Faktor aus dem Strahlungsangebot (E_{Dez}) und dem Wirkungsgrad (η_{mon} bzw. η_{pol}) gibt Auskunft darüber, welche maximale Einstrahlung das PV-Modul unter vorherrschenden Strahlungsbedingungen in elektrische Energie umwandeln kann. Anschließend wird mit dem Energiebedarf der durchschnittlichen Dauer an Tageslicht die Leistung (P_{soll}) ermittelt, die vom Solargenerator umgesetzt werden muss, um den Energiebedarf zu decken. Diese Leistung wird der maximal nutzbaren Einstrahlung gegenübergestellt und ergibt die Mindestfläche des gesuchten Solargenerators. Wird die benötigte Fläche (A) mit der für die Technologie höchstmöglichen Einstrahlung multipliziert, ergibt dies die mindestens zu installierende Leistung (W_p) für den Anwendungszweck. Mit diesem Wert kann nachfolgend die Modulkonfiguration festgelegt werden.

Ermittlung der Leistungsfähigkeit für mono- und polykristalline Modultechnik:

$$\eta_{\text{mon}} = 0,18$$

$$\eta_{\text{pol}} = 0,15$$

$$E_{\text{STC}} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$E_{\text{STC}} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$E_{\text{mon}} = E_{\text{STC}} \cdot \eta_{\text{mon}}$$

$$E_{\text{pol}} = E_{\text{STC}} \cdot \eta_{\text{pol}}$$

$$E_{\text{mon}} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,18$$

$$E_{\text{pol}} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,15$$

$$E_{\text{mon}} = 180 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$E_{\text{pol}} = 150 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Ermittlung der maximal nutzbaren Einstrahlung:

$$\eta_{mon} = 0,18$$

$$E_{Dez} = 233 \frac{W}{m^2}$$

$$E_{mon} = E_{Dez} \cdot \eta_{mon}$$

$$E_{mon} = 233 \frac{W}{m^2} \cdot 0,18$$

$$E_{mon} = 41,94 \frac{W}{m^2}$$

$$\eta_{pol} = 0,15$$

$$E_{Dez} = 233 \frac{W}{m^2}$$

$$E_{pol} = E_{Dez} \cdot \eta_{pol}$$

$$E_{pol} = 233 \frac{W}{m^2} \cdot 0,15$$

$$E_{pol} = 34,95 \frac{W}{m^2}$$

Ermittlung der Minderleistung die vom Solargenerator bereitgestellt werden muss:

$$W_{soll} = 678,3 Wh$$

$$t_{TL} = 8,5h$$

$$P_{soll} = \frac{W_{soll}}{t_{TL}}$$

$$P_{soll} = \frac{678,3 Wh}{8,5 h}$$

$$P_{soll} = 79,8 W$$

Ermittlung des Flächenbedarfs für mono- und polykristalline Modultechnik

$$W_{soll} = 678,3 \text{ Wh}$$

$$t_{TL} = 8,5 \text{ h}$$

$$A_{mon} = \frac{P_{soll}}{E_{mon}}$$

$$A_{mon} = \frac{79,8 \text{ W}}{41,94 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$A_{mon} = 1,9 \text{ m}^2$$

$$W_{soll} = 678,3 \text{ Wh}$$

$$t_{TL} = 8,5 \text{ h}$$

$$A_{pol} = \frac{P_{soll}}{E_{pol}}$$

$$A_{pol} = \frac{79,8 \text{ W}}{34,95 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$A_{pol} = 2,3 \text{ m}^2$$

$$P_{mon} = P_{pol} = P$$

$$P = A_{mon} \cdot E_{mon}$$

$$P = 1,9 \text{ m}^2 \cdot 180 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$P = 342 \text{ W}_p$$

Der Solargenerator muss demnach mindestens eine Leistung von 342 W_p aufweisen. Es ist deutlich, dass ein Solargenerator aus polykristallinem Silizium im Vergleich zur monokristallinen Option bei gleicher Leistung einen höheren Platzbedarf hat. Die zur Verfügung stehenden Flächen messen 1,12 m² (1600 mm * 700 mm) und 1,35 (1800 mm * 750 mm). Die Gesamtfläche ist mit 2,47 m² für beide Technologien ausreichend. Da PV-Module in der Regel die verfügbare Fläche nicht komplett ausnutzen können, zeigt sich hier der Vorteil des höheren Wirkungsgrades bei monokristallinen PV-Modulen. Die Bandbreite an für den Einsatzzweck nutzbaren PV-Modulen steigt durch den geringeren Platzbedarf deutlich. Im schlechtesten Fall hat ein monokristallines PV-Modul den gleichen Wirkungsgrad wie ein alternatives polykristallines PV-Modul. Üblich ist, dass sich durch den Einsatz monokristalliner PV-Module vergleichsweise einfach eine höhere Versorgungssicherheit erreichen lässt. Aus diesen Gründen wird sich hier für einen Solargenerator mit Solarzellen aus monokristallinem Silizium entschieden. Polykristalline PV-Module werden aufgrund der wenigen technischen Vorteile genutzt, wenn die Einbaufäche kein limitierender Faktor für die Auslegung des Systems ist. Der Markt bietet hier für den Fall der festen Installation PV-Module mit bis zu 200 W_p, wovon je ein PV-Modul in eine der geplanten Flächen passt.

3.3.3 Auswahl der Ausführung

Nach der Auslegung von Leistung und Technologie des Solargenerators wird im nächsten Schritt entschieden, ob der Solargenerator als Solartasche, flexibles PV-Modul oder starres PV-Modul in das Campingfahrzeug implementiert wird. Für den ganzjährigen autarken Betrieb eignet sich der Einsatz von Solartaschen nur bedingt. Durch die Möglichkeit des Nachführens in Richtung Sonne bieten Solartaschen den Vorteil der effektiveren Nutzung der Direktstrahlung. Auch wenn diese in den Wintermonaten nur einen geringen Teil der Solarstrahlung bestimmt, können nützliche Energieerträge erzielt werden. Allerdings erfordert dies ein mehrfaches Ausrichten pro Tag. Dazu muss die Solartasche täglich auf- und abgebaut werden, was für den Ganzjahresbetrieb unhandlich ist. Zudem wird die Solartasche nur genutzt, wenn sich das Campingfahrzeug im Stillstand befindet. Aus diesen Gründen wird sich hier gegen den Einsatz eines Solartaschensystems entschieden.

Sowohl flexible als auch starre PV-Module müssen fest am Campingfahrzeug installiert werden. Die Fläche, die hier zur Verfügung steht (ebenes Dach), ist für beide Ausführungen geeignet. Beide Ausführungen haben einen ähnlichen Platzbedarf und das Gewicht von je zwei PV-Modulen (flexibel ca. 8,5 kg; starr ca. 23 kg) ist durch Auswahl einer vergleichsweise leichten Akkumulortechnologie (LiFePO₄-Akkumulator mit 27,7 kg) deutlich unter dem geforderten Höchstgewicht des Systems. Da auch die maximale Bauhöhe der PV-Module nicht in den Anforderungen spezifiziert ist, bleibt der Aspekt der Hinterlüftung. Diese ist bei starren PV-Modulen deutlich besser als bei festgeklebten flexiblen Modulen. Dadurch erwärmen sich flexible Module bei Betrieb mehr als starre PV-Module, was einen negativen Einfluss auf den Modulwirkungsgrad hat. Unter diesen Umständen wird sich für ein starres Modul entschieden, da das flexible PV-Modul hier keinen Vorteil bringt.

3.3.4 Auswahl interne Verschaltung des PV-Moduls

Bevor der monokristalline Solargenerator ausgewählt wird, ist die interne Verschaltung anhand der Anforderungen festzulegen. Wie in 2.3.1 beschrieben können die PV-Module intern unterschiedlich verschaltet werden. Eine Parallelschaltung der Solarzellen bringt einen hohen Strom und eine niedrige Spannung mit sich. Bei einer Reihenschaltung von Solarzellen verhält es sich umgekehrt. Die Vor- und Nachteile bei Verschattung, sowie der Nutzen von Bypassdioden wurden ebenfalls bereits beleuchtet. PV-Module mit parallelgeschalteten Solarzellen bieten durch ihre Eigenschaften bei Verschattung eine erhöhte Versorgungssicherheit bei hoher Einstrahlung. Allerdings hat die niedrige Modulspannung (typisch 18 V - 25 V) den Nachteil einer geringeren Energieausbeute bei Dämmerung oder diffuser Strahlung. Dies ist darin begründet, dass die Spannung der Solarzelle bei niedriger Einstrahlung stark von dieser abhängt (Abschnitt 2.2.5). Zum Aufladen des Akkumulators muss mindestens dessen Klemmenspannung durch das PV-Modul erreicht werden, was einem PV-Modul mit parallelverschalteten Solarzellen erst bei

höherer Einstrahlung gelingt als es bei einer Reihenschaltung von Solarzellen der Fall ist. Daraus ergibt sich, dass PV-Module mit parallel geschalteten Solarzellen vorwiegend bei hoher Einstrahlung einzusetzen sind oder wenn oft Teilverschattungen zu erwarten sind (bsp Offroadeinsatz: Staub, Schlamm, Blätter). PV-Module mit Solarzellen in Reihenschaltung und hoher Spannung (typisch ca. 36 V – 45 V) eignen sich, wenn im Strahlungsangebot ein erhöhter Anteil diffuser Strahlung vorherrscht und zur Energieumwandlung genutzt werden soll. Ein Beispiel dafür ist der Betrieb des PV-Systems in den Wintermonaten. Da dies bei einem ganzjährigen Betrieb der PV-Anlage wie hier gefordert der Fall ist, wird ein PV-Modul mit in Reihe geschalteten Solarzellen eingesetzt. Wenn auf dem Datenblatt des PV-Moduls keine Angaben zur internen Verschaltung zu finden sind, können die Anzahl der Solarzellen und die Modul-Leerlaufspannung, sowie die aus Abschnitt 2.2.4 bekannte Solarzellen-Leerlaufspannung von ca. 0,6 V einen Hinweis auf die Verschaltung geben.

3.3.5 Auswahl des PV-Moduls

Die Anforderungen für die Auswahl des Solargenerators sind erarbeitet. Zusammengefasst muss der Solargenerator folgende Anforderungen erfüllen:

Eigenschaft	Anforderung
Nennleistung	342 W _p (Gesamtleistung)
Technologie	monokristallin
max. Abmaße (L*B*H*)	(1600*700*x)mm (1800*750*x)mm
Ausführung	starr mit Rahmen
interne Verschaltung	Reihenschaltung
min. Wirkungsgrad	18%

Tabelle 8 Eigenschaften an den Solargenerator

Der in Tab. 9 beschriebene Solargenerator besteht aus zwei PV-Modulen gleichen Typs. Die Höchstleistung liegt bei 380 W_p, Die vermeintliche Überdimensionierung ist bewusst gewählt, da bei der Auslegung des Solargenerators noch nicht die Verluste durch den Laderegler und das Laden des Akkumulators berücksichtigt wurden (meist $\eta_{LDR}=0,98$; $\eta_{LiFePO4}=0,95$). Um Verluste, welche nicht oder noch nicht bekannt sind (neue bzw. unbekannte Komponenten und Verbraucher), aufzufangen, sollten bei der Auswahl des Solargenerators 10 % bis 20 % mehr Nennleistung konfiguriert werden als berechnet. Dies ist eine erfahrungswertbasierte Empfehlung. Je breiter der Einsatzbereich gefächert ist bzw. je ungenauer die Anforderungen an den Solargenerator sind, desto höher sollte der Aufschlag zur ermittelten Nennleistung sein (ausreichender Platz am Installationsort vorausgesetzt).

Eigenschaft	Daten aus Datenblatt
Nennleistung	2*190 W _p
Technologie	monokristallin
max. Abmaße (L*B*H*)	2 *(1482*676*35)mm
Ausführung	starr mit Rahmen
interne Verschaltung	Reihenschaltung
Wirkungsgrad	18,97%
Kurzschlussstrom I _K	5,64 A
Nennstrom I _{MPP}	5,10 A
Leerlaufspannung U _L	44,35 V
Nennspannung U _{MPP}	37,28 V
Anzahl der Zellen	72
Anzahl Bypassdioden	1
Gewicht	2*11,10 kg

Tabelle 9 Daten des ausgewählten Solargenerators (Quelle: active.de)

3.3.6 Verschaltung der PV-Module

Die beiden ausgewählten PV-Module müssen entweder parallel oder in Reihe miteinander verschaltet werden. Die Vor- und Nachteile sind hier analog zur internen Verschaltung von Solarzellen in ein PV-Modul (Abschnitt 3.3.4). Die Spannung eines Einzelmoduls liegt bei etwa dem dreifachen der Akkumulatorspannung, was auf ein gutes Diffuslichtverhalten hindeutet. Eine Reihenschaltung beider PV-Module würde das Diffuslichtverhalten noch weiter verbessern. Für den geplanten Einsatz des PV-Systems ist noch besseres Diffuslichtverhalten nicht notwendig. Wenn sich der Einsatzort in Gebiete geringerer Einstrahlung verlagert (z.B. Skandinavien in Wintermonaten) ist es zu empfehlen, die PV-Modulspannung zu erhöhen. Da ein verbessertes Diffuslichtverhalten nicht notwendig ist, bietet es sich hier an beide PV-Module parallel miteinander zu verschalten. Dies erhöht die Versorgungssicherheit bei Verschattung eines PV-Moduls bzw. Zellstrings.

3.3.7 Ausrichtung des Solargenerators

Die Nachführung der PV-Module zur Sonne kann bei einer Solartasche am einfachsten umgesetzt werden. Bei einem starren PV-Modul bedarf es der Installation einer geeigneten Mechanik. Üblicherweise ist diese einachsrig mit Anpassung des Neigungswinkels zur horizontalen Ebene. Dies erhöht die Ausbeute elektrischer Energie. Das System ist für die ganzjährige Nutzung mit erhöhter Autonomiezeit auch in den Wintermonaten ausgelegt, weshalb eine zusätzliche Mechanik zur Ausrichtung der PV-Module als nicht notwendig angesehen wird.

3.4 Auslegung Solarladeregler

Der Markt bietet hier die Auswahl an Solarladeregler in PWM-Technik und mit MPP-Tracker. Bekannt aus Abschnitt 2.4 passt der PWM-Solarladeregler die Spannung des PV-Moduls durch Pulsweitenmodulation an die an den Klemmen des Akkumulators benötigte Spannung an. Durch den dimensionierten Solargenerator liegt am Solarladeregler eine Nennspannung von $U_{MPP} = 37,28 \text{ V}$ an. Das heißt konkret, dass der PWM-Solarladeregler bei einer Modulation auf $14,4 \text{ V}$ die Differenz zwischen beiden Spannungen nicht weiter aufbereitet, was starke Leistungsverluste zur Folge hat. Dadurch gilt: je höher die Modulspannung, desto größer die Leistungsverluste durch einen PWM-Solarladeregler. Der MPPT-Solarladeregler nutzt die überschüssige Spannung und modelliert damit den Stromfluss so, dass die Leistung des PV-Moduls mit nur kleinen Abweichungen ($\eta_{LDR} = 0,98$) an die Klemmen des Akkumulators weitergegeben wird. Aus diesem Grund wird hier ein MPPT-Solarladeregler mit folgenden Anforderungen gewählt (Tab. 10).

Eigenschaft	Anforderung
PV-Nennleistung	342 W _p (Gesamtleistung)
Technologie	MPPT
Kurzschlussstrom I _k	11,28 A
Leerlaufspannung U _L	44,35 V
Masse	max. 5 kg
Ladekennlinie	LiFePO ₄

Tabelle 10 Anforderungen an MPPT-Laderegler

Der ausgewählte Solarladeregler ist in Tab. 11 beschrieben. Dieser eignet sich sowohl für die Reihenschaltung beider PV-Module als auch für die Parallelschaltung dieser. Des Weiteren können neben LiFePO₄ auch Blei-Gel und AGM- Akkumulatoren betrieben werden. Dies erhöht die Flexibilität der Komponentenauswahl bei Defekt, Erweiterung, etc..

Eigenschaft	Daten aus Datenblatt
max. PV-Nennleistung	440 W
Technologie	MPPT
max. Kurzschlussstrom I _k	35 A
max. Leerlaufspannung U _L	100 V
Masse	1,3 kg
Ladekennlinie	LiFePO ₄ und weitere

Tabelle 11 Daten des ausgewählten MPPT-Ladereglers (Quelle: victronenergy.de)

3.5 Dimensioniertes Photovoltaiksystem

Das dimensionierte PV-System ist nun den festgelegten Anforderungen entgegensustellen (Tab. 12). Der Vergleich zeigt, dass das dimensionierte PV-System die geforderten Bedingungen erfüllt.

Eigenschaft	
Anforderungen	Sollwert
Einsatzzeitraum	ganzjährig
Einsatzort	Mittel- und Südeuropa
täglicher Energiebedarf	678,3 Wh
Autonomiezeit	3 d
tatsächlicher Energiebedarf	2034,9 Wh
Wechselrichter	nein
Installationsort	flaches Dach mit 2 Flächen Fläche 1: (1600*700*x)mm Fläche 2: (1800*750*x)mm
Gesamtmasse PV-System	max. 100 kg
Ausgelegtes PV-System	Istwert
täglicher Ertrag (Winter)	753,67 Wh
nutzbare Kapazität Akkumulator	2560 Wh
Autonomiezeit	3,72 d
Flächenbedarf auf Dach	2 *(1482*676*35)mm
Gesamtmasse PV-System	51,16 kg

Tabelle 12 Vergleich des dimensionierten PV-Systems mit den Systemanforderungen

Die Systemanforderungen können von dem dimensionierten PV-System erfüllt werden. Es wird deutlich, dass ein PV-System, welches sich nach dem Zeitraum der niedrigsten Einstrahlung richtet, für deutlich höhere Einstrahlungen überdimensioniert ist. Dies kann durch Optimierung des Energiebedarfs, Anpassung der Autarkiezeit oder regelmäßiges Nachführen verhindert werden, da die Dimensionierung des PV-Systems geringer wird.

3.6 Typische Nutzerprofile

Die Dimensionierung eines PV-Systems hängt von der Nutzung dieses Systems ab. In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 13) wurden nach dem gleichen Schema wie zuvor weitere Nutzerprofile erstellt, welche eine Abschätzung darüber erlauben, welche Größenordnung das PV-System für den jeweiligen Einsatzzweck haben kann. Dabei wurden aufgrund der hohen Individualität das Höchstgesamtgewicht, sowie Maße des PV-Systems nicht berücksichtigt.

Eigenschaft	Wochenende; Urlaub (Freizeit, kleines Fahrzeug)	Overlander (Offroad, mobiles Arbeiten)
Anforderungen		
Einsatzzeitraum	Sommer	Herbst/Winter
Einsatzort	Mittel und Südeuropa	Äquatornähe
täglicher Energiebedarf	300 Wh	800 Wh
Wechselrichter	nein	ja
Autonomiezeit	0,75 d	2 d
Festinstallation PV-Modul	nicht möglich	möglich
Empfohlene Dimensionierung		
nutzbare Kapazität Akkumulator	525 Wh	1600 Wh
Akkumulatortechnologie	LiFePO ₄	LiFePO ₄
Nennleistung PV-Modul	50 W _p (Gesamtleistung)	180 W _p
Technologie	monokristallin	monokristallin
int. Verschaltung PV-Modul	reihe	parallel
ext. Verschaltung PV-Module	entfällt	parallel
Ausführung PV-Modul	Solartasche	starres PV-Modul
Solarladereglertechnologie	MPPT	MPPT; PWM bei defekt möglich

Tabelle 13 Beispieldimensionierung für typische Einsatzzwecke von Campingfahrzeugen

4 Verschattungsversuch

In diesem Kapitel sollen die Eigenschaften eines PV-Moduls auf Verschattung untersucht werden. Dafür wird ein PV-Modul gleichen Typs des wie in Abschnitt 3.3 ausgelegten Solargenerators untersucht. Dafür werden unterschiedliche Bereiche vollständig verschattet und sowohl Strom als auch Leistung an den Anschlussklemmen gemessen. Damit an einem bestrahlten PV-Modul ein Stromfluss zustande kommen kann, muss das PV-Modul elektrisch belastet werden. Diese Last wird durch einen MPPT-Solarladeregler mit angeschlossenem LiFePO₄-Akkumulator dargestellt.

Eigenschaft	Daten
PV-Modul	Ective MSP 190s Black
Nennleistung	190 W _p
Technologie	monokristallin
max. Abmaße (L*B*H*)	1482*676*35 mm
Ausführung	starr mit Rahmen
interne Verschaltung	Reihenschaltung
Wirkungsgrad	18,97%
Kurzschlussstrom I _k	5,64 A
Nennstrom I _{MPP}	5,10 A
Leerlaufspannung U _L	44,35 V
Nennspannung U _{MPP}	37,28 V
Anzahl der Zellen	72
Anzahl Bypassdioden	1
Last	LiFePO ₄ + MPPT-Solarladeregler
Einstrahlungsbedingungen	klarer Himmel
Messgerät U/I	Victron SmartSolar MPPT 75/15
Messabweichung (rel./abs)	unbekannt

Abb.: 28 Daten des Versuchsaufbaus

Erwartung:

Das PV-Modul verfügt über 72 in Reihe verschaltete Solarzellen. Dadurch sollte sich der Strom an den Anschlussklemmen des PV-Moduls auf den Wert einstellen, den die Solarzelle mit dem niedrigsten Strom liefert. Da die Einstrahlung den Strom einer Solarzelle maßgeblich bestimmt, ist bei vollständiger Verschattung einer Solarzelle zu erwarten, dass der Strom an den Ausgangsklemmen des PV-Moduls Null ist. Laut dem der Website des Modulherstellers ist in diesem PV-Modul eine Bypassdiode verbaut, im Datenblatt finden sich darüber keine Informationen. Auf welche Weise diese mit den Solarzellen verschaltet ist, lässt sich mittels Datenblatt nicht feststellen. Den Effekt auf die

Verschattung gilt es nachfolgend herauszuarbeiten. Des Weiteren ist der Einfluss der verschatteten Fläche einer einzelnen Solarzelle auf den Strom des gesamten PV-Moduls zu bestimmen.

Durchführung:

Zunächst wird das PV-Modul in vier gleich große Flächen aufgeteilt, welche nacheinander verschattet werden. Anschließend wird es solarer Einstrahlung ausgesetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass während der Messung möglichst geringe Schwankungen der Einstrahlung stattfinden (klarer Himmel oder durchweg bewölkter Himmel). Das PV-Modul wird anschließend mit einem Solarladeregler und einem nicht voll aufgeladenen LiFePO₄-Akkumulator belastet, sodass ein Strom fließen kann. Es können nun nacheinander alle vier Flächen verschattet werden. Zum Messen von Strom und Spannung wird die im Solarladeregler integrierte Messtechnik verwendet: SmartSolar MPPT 75/15

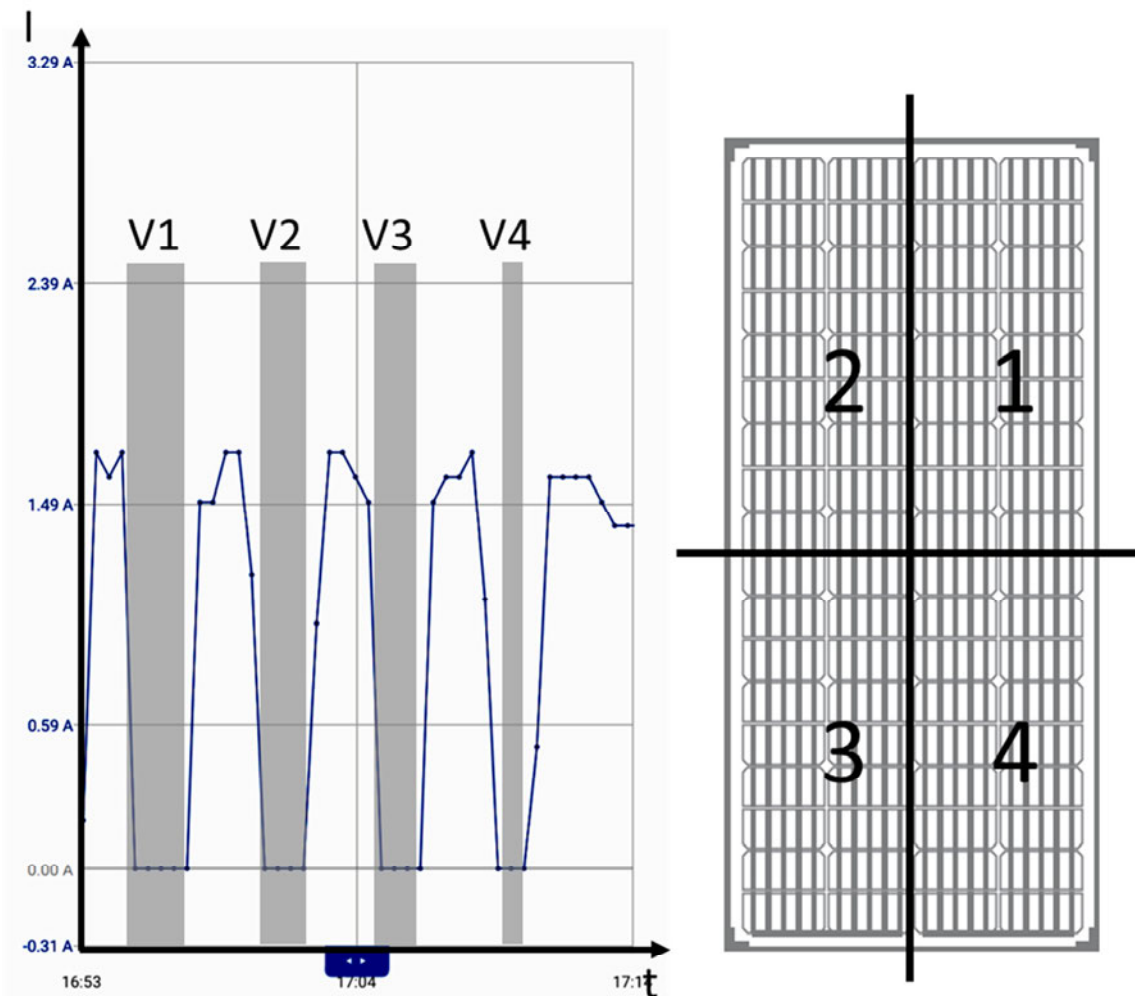


Abb.: 29 Verschattung verschiedener Bereiche eines PV-Moduls

Eigenschaft	keine Verschattung	Bereich 1 verschattet	Bereich 2 verschattet	Bereich 3 verschattet	Bereich 4 verschattet
Strom	1,6 A	0 A	0 A	0 A	0 A

Tabelle 14 Ergebnisse Verschattung von 25% der PV-Modulfläche

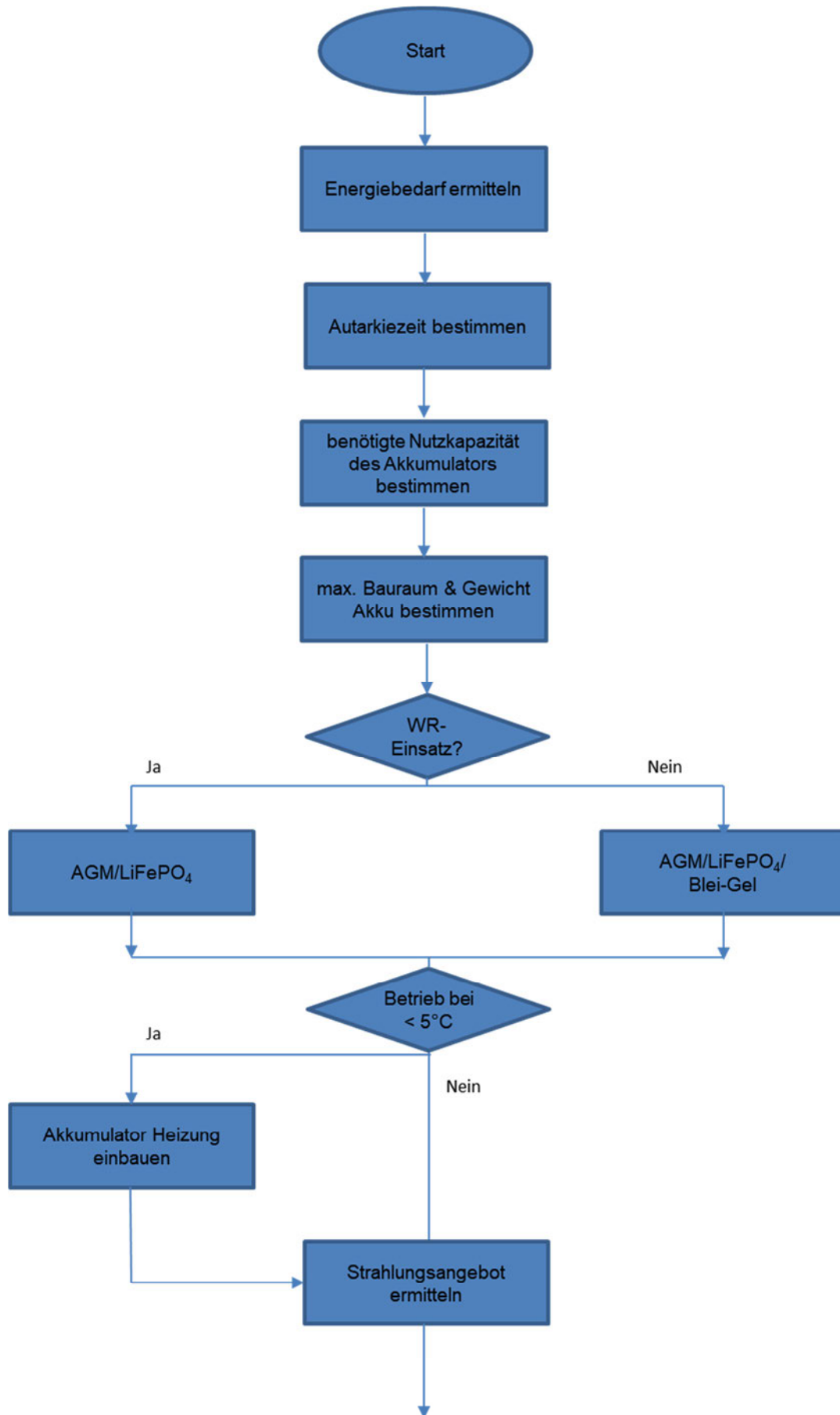
Es lässt sich erkennen, dass die Solarzellen innerhalb des PV-Panels in Reihe miteinander verschaltet sind, da der Strom bei Verschattung stets Null ist. Die vom Hersteller angegebene verbaute Bypassdiode konnte durch Messungen nicht bestätigt werden, da jeder abgedeckte Bereich das gleiche Ergebnis erzielte. Es ist zudem ungewöhnlich weniger als zwei Bypassdioden pro PV-Modul zu installieren. Es Bedarf mindestens zwei solcher Dioden, um das PV-Modul in zwei gleichwertige Strings aufzuteilen und somit die Solarzellen dieses Strings zu schützen. Aus diesem Grund darf vermutet werden, dass die verbaute Diode dem gesamten PV-Modul parallel geschaltet ist, um dieses bei Verschattung zu schützen, wenn es sich in einer Reihenschaltung mit weiteren PV-Modulen befindet.

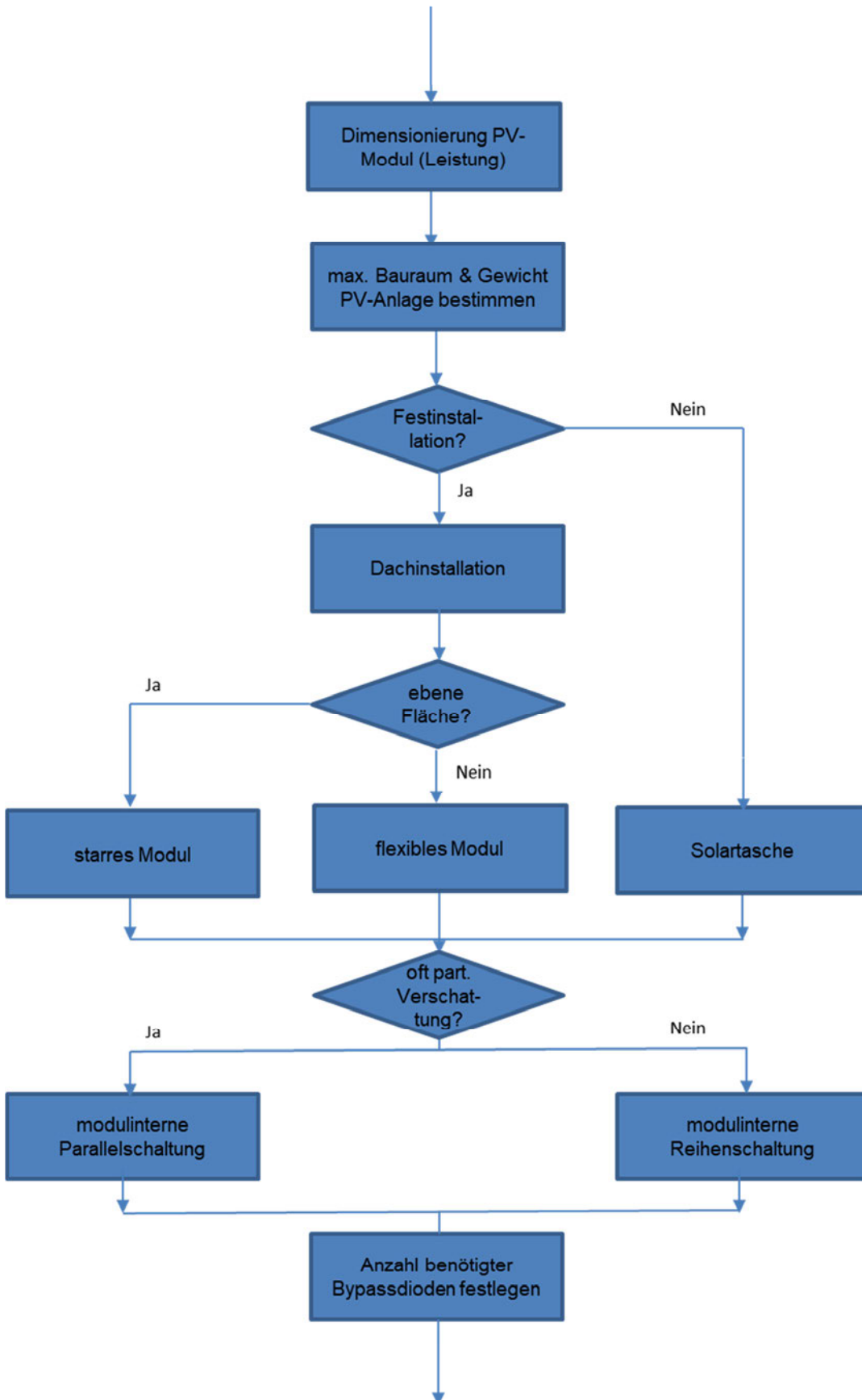
Auswertung:

Es zeigt sich, dass die Verschattung von Teilen des PV-Moduls eine starke Auswirkung auf die Gesamtleistung des Moduls hat. Die Fläche der Verschattung trägt dabei so stark zur Leistung des PV-Moduls bei, dass bereits eine Verschattung des PV-Moduls von >1 Solarzelle zu einem Leistungseinbruch des Gesamtmoduls um ebenfalls 100 % sorgen kann. Es konnte zudem nach wenigen Minuten ein Temperaturanstieg des abgeschatteten Bereichs des PV-Moduls festgestellt werden. Die Temperatur der Solarzelle oder des abgeschatteten Bereichs wurde dabei nicht über ein Messgerät ermittelt. Der Einsatz einer Infrarotkamera würde hier notwendige Nachweise liefern. Dieser Temperaturanstieg ist nicht zuletzt des Fehlens einer Bypassdiode geschuldet, die zum einen die Leistung des Gesamtmoduls nicht so stark einbrechen lässt und zum anderen Beschädigungen der abgedeckten Solarzellen durch Hot-Spots verhindert. Das Fazit aus diesem Versuch ist die Empfehlung der Auswahl von PV-Modulen mit zwei bis sechs Bypassdioden. Mehr Dioden erhöhen die Verlustleistung des PV-Moduls und erhöhen die Modulkosten deutlich und bereits mit zwei Bypassdioden kann ein deutlicher Zuwachs an Versorgungssicherheit gewonnen werden. Das getestete PV-Modul eignet sich nach Erfahrung dennoch für die Nutzung im PV-System eines Campingfahrzeugs. Dafür bedarf es einer regelmäßigen Reinigung des PV-Moduls.

5 Verfahrensfließbild

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln gewonnenen Informationen über die Zusammensetzung und Dimensionierung einer Photovoltaik Anlage für die Netzautarke Versorgung eines Campingfahrzeuges mit elektrischer Energie entsteht in diesem Kapitel ein Verfahrensfließbild für die Auslegung eines PV-Systems. Dieses Verfahrensfließbild soll als Navigator und Entscheidungshilfe für die Auslegung eines PV-Systems am Campingfahrzeug dienen.





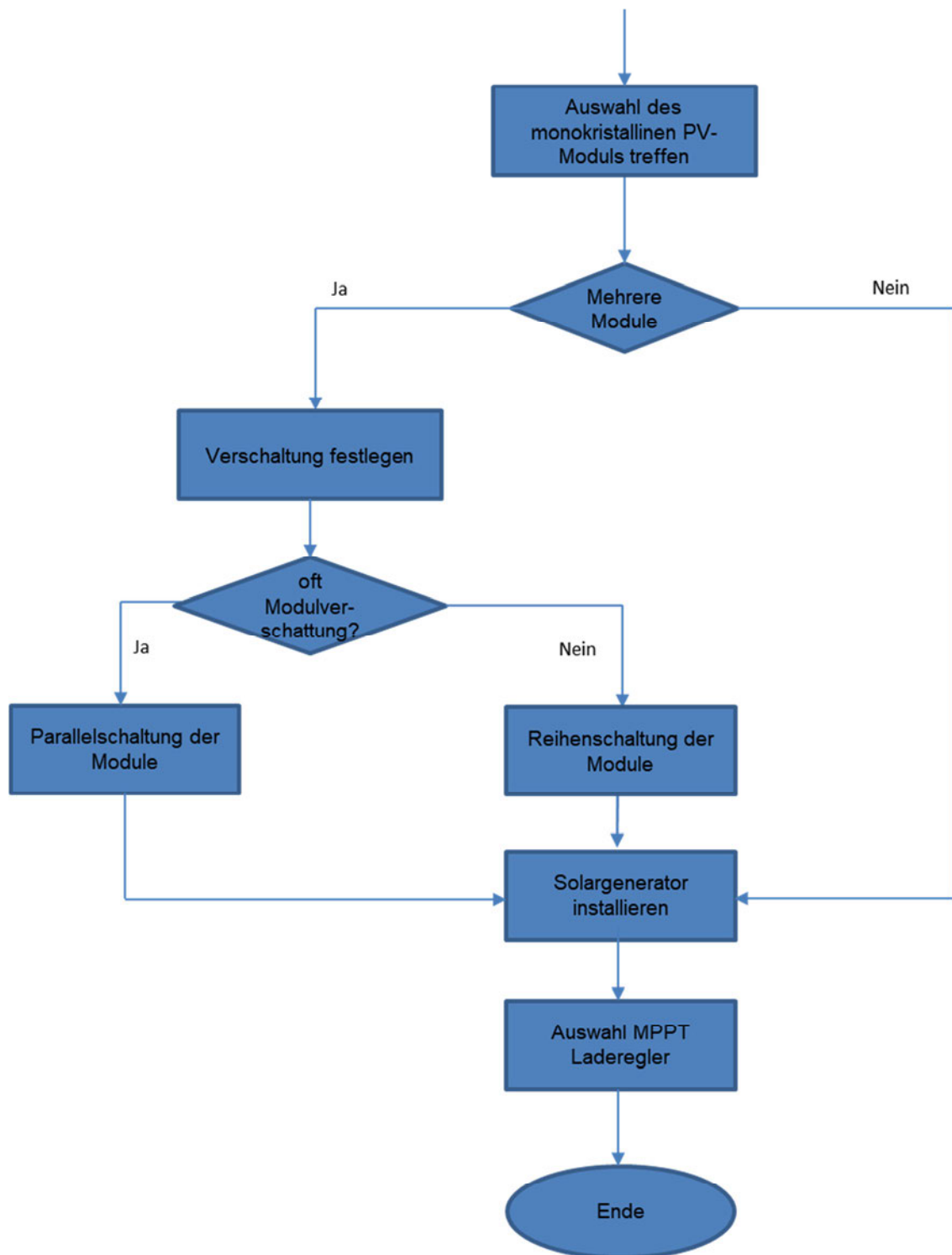


Abb.: 30 Verfahrensfließbild zur Auslegung eines Photovoltaiksystems im Campingfahrzeug

6 Fazit

Es konnte erfolgreich eine datengestützte Dimensionierung eines Photovoltaiksystems für die Netzautarkie Nutzung eines Campingfahrzeugs durchgeführt werden. Daraus konnte ein Verfahrensfliesschema erstellt werden, welches eine Orientierung darüber gibt, welche Schritte für die Dimensionierung eines PV-Systems in welcher Reihenfolge durchzuführen sind. Im Ergebnis der Dimensionierung des Photovoltaiksystems zeigt sich, dass bei einer Auslegung des PV-Systems auf den Zeitraum der geringsten Einstrahlung innerhalb des Nutzungszeitraums schnell eine Überdimensionierung des Systems stattfinden kann. Je näher sich am Wert der geringsten Einstrahlung (Extremwerte) orientiert wird, desto überdimensionierter wird das PV-System für höhere Einstrahlungen. Die Versorgungssicherheit steigt dabei geringfügig. Der Nutzen einer hohen Versorgungssicherheit ist dabei dem Aufwand, den eine höhere Leistungsfähigkeit des PV-Systems mit sich bringt, entgegenzusetzen. Auch ein theoretisch optimal ausgelegtes PV-System kann keine vollständige Autarkie garantieren, da sich in einem Campingfahrzeug sowohl Energiebedarf, als auch Strahlungsangebot während der gesamten Betriebszeit des PV-System von den Werten, welchen die Dimensionierung zugrundliegt, abweichen. Die Autarkiezeit hat einen hohen Einfluss auf die Versorgungssicherheit aber auch auf Dimensionierung des Gesamtsystems. Hier sollten vor der Festlegung der gewünschten Autarkiezeit Überlegungen über die Folgen eines Ausfalls der elektrischen Energie angestellt werden. Ein Ausfall der elektrischen Energie ist bei Freizeitnutzung oft weniger folgenschwer als beim Einsatz des Campingfahrzeugs als mobiles Büro. Es zeigt sich des Weiteren, dass der möglichst effiziente Einsatz der elektrischen Energie den Energiebedarf deutlich senken kann. Wird dies während der Dimensionierung des PV-Systems getan, kann sich dies stark auf die Dimensionierung des Systems auswirken. Während der Dimensionierung fiel auf, dass die Technik der polykristallinen Solarzelle für den Einsatz im Campingfahrzeug keine Vorteile gegenüber monokristalliner Solarzellen bringt. Die geringere Degradation der Solarzelle wiegt den Nachteil des geringeren Wirkungsgrades nicht auf. Es hat sich zudem gezeigt, dass der LiFePO₄-Akkumulator dem Blei-Gel- und AGM-Akkumulatoren für den hiesigen Einsatz technisch überlegen ist. Vor Allem sorgen sein geringes Gewicht und Platzbedarf, sowie die hohe Zyklenfestigkeit dafür, dass dieser Akkumulator technisch für die meisten Nutzerprofile im Campingbereich favorisiert wird. Auch bei der Auslegung des Solarladereglers ist sehr deutlich, dass der PWM-Solarladeregler dem MPPT-Solarladeregler durch seine teilweise hohen Leistungsverluste klar nachsteht. Daraus folgt, dass der polykristalline Solargenerator, der AGM- und Blei-Gel-Akkumulator, und der PWM-Solarladeregler nicht für den Einsatz im Campingfahrzeug zu empfehlen sind.

7 Handlungsempfehlung

Wenn das Photovoltaiksystem eine so hohe Autarkie bieten soll, dass beispielsweise die nutzbare Installationsfläche oder das Fahrzeuggewicht (vor allem durch Akkumulatoren) überschritten wird, oder die Installation eines passenden PV-Systems andere aufwändig zu überwindende Herausforderungen mit sich bringt, sollte eine zusätzliche Methode der Energieumwandlung in Betracht gezogen werden. Der verbaute Akkumulator kann durch entsprechende Technik unkompliziert über den Verbrennungsmotor des Campingfahrzeugs geladen werden. Ein solches Ladegerät lässt sich gut in ein PV-System implementieren und kann den Akkumulator, wenn gewünscht, mit hohen Strömen (typisch 18 A bis 60 A) aufladen. Wird ein solches System genutzt, können leicht Phasen geringer Einstrahlung kompensiert werden, wenn das PV-System nicht genügend elektrische Energie umwandeln kann. Dies ist für Nutzer zu empfehlen, die eine erhöhte Versorgungssicherheit benötigen, ohne dass das PV-System erweitert werden soll. Bei der Nutzung hoher Ladeströme ist deren Effekt auf die Alterung des Akkumulators zu beachten.

Es ist zudem zu empfehlen wie die Leitungen eines PV-Systems zu dimensionieren sind um sowohl Funktion als auch Sicherheit des PV-Systems zu gewährleisten. Der Einfluss von Leitungslängen und –deren Durchmesser in einem Gleichspannungssystem, sowie deren Absicherung sind dabei zu analysieren.

Um einen möglichst hohen Anteil solarer Strahlungsenergie zu nutzen, empfiehlt es sich die Technik der Mehrfachsolarzellen und deren Nutzen für den Einsatz im Campingbereich zu erforschen. Hier bietet sich die Möglichkeit eine höhere Bandbreite an Photonen für den inneren Photoeffekt und somit für die Umwandlung der Strahlungsenergie in elektrische Energie zu nutzen.

In Abschnitt 4 wurde durch einen Versuch an einem PV-Modul die Bedeutung von Bypassdioden erkannt. Gerade wenn nur wenige PV-Module zur PV-Anlage gehören, ist der Verschattungsbedingte Ausfall eines kompletten PV-Moduls für den Energieertrag umso schwerwiegender. Für den Campingbereich werden daher PV-Module mit mehreren Bypassdioden empfohlen.

Da sich diese Diplomarbeit nicht mit der Wirtschaftlichkeit einer Photovoltaikanlage oder deren Komponenten befasst, wird die weitere Forschung für den Einsatz eines solchen Systems in Bezug auf Wirtschaftlichkeit empfohlen.

Literatur

Wagemann, H.; Eschrich, H. (2007) Photovoltaik Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, 1. Aufl. Wiesbaden: Teubner

Wagner, A (2019) Photovoltaik Engineering Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung, 5. Aufl. Berlin: Springer

Sterner, M.; Stadler, I. (2017) Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, 2. Aufl. Berlin: Springer

Kaltschmitt, M.; Streicher, W.; Wiese, A. (2020) Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 6. Aufl. Berlin: Springer

Wesselak, V.; Voswinckel, S. (2012) Photovoltaik, Wie Sonne zu Strom wird, 6. Aufl. Berlin: Springer

Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, F. (2017) Regenerative Energietechnik, 3. Aufl. Berlin: Springer

Schabbach, T.; Wesselak, V. (2020) Energie – Den Erneuerbaren gehört die Zukunft, 2. Aufl. Berlin: Springer

Reisch, M. (2007) Elektronische Bauelemente – Funktion, Grundschaltungen, Modellierung mit SPICE, 2. Aufl. Berlin: Springer

Zahoransky, R. (2022) Energietechnik – Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf, 9. Aufl. Wiesbaden: Springer

Watter, H. (2022) Regenerative Energiesysteme – Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme, 6. Aufl. Berlin: Springer

Konrad, F. (2008) Planung von Photovoltaik-Anlagen, 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner

Vinaricky, E.; Schröder, K.-H.; Weiser, J. (2016) Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen – Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren, 3. Aufl. Berlin: Springer

Zach, F. (2023) Leistungselektronik – Ein Handbuch Band1/Band2, 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg

Babel, G. (2023) Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik – Lehr und Arbeitsbuch, 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg

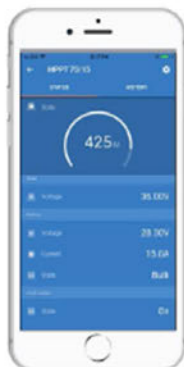
Anlagen

Anlage 1: Datenblatt VictronSmartSolar MPPT 75/15 (Quelle: victronenergy.de).....	65
Anlage 2: Datenblatt Ective MSP 190s Black (Quelle: ective.de).....	66

Anlage 1:



Solar Lade-Regler
MPPT 75/15



Ultraschnelles Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Insbesondere bei bedecktem Himmel, wenn die Lichtintensität sich ständig verändert, verbessert ein extrem schneller MPPT-Regler den Energieertrag im Vergleich zu PWM-Lade-Reglern um bis zu 30% und im Vergleich zu langsameren MPPT-Reglern um bis zu 10%.

Lastausgang

Eine zu tiefe Entladung der Batterie lässt sich verhindern, indem sämtliche Lasten an den Lastausgang geschlossen werden. Der Lastausgang trennt die Lasten ab, wenn die Batterie bis zu einem vorgegebenen Spannungswert entladen wurde. Alternativ lässt sich auch ein Algorithmus für intelligentes Batteriemangement wählen, siehe Battery Life.

Der Lastausgang ist kurzschlussicher.

Einige Lasten (insbesondere Wechselrichter) lassen sich am besten direkt mit der Batterie verbinden. Die Wechselrichter-Femsteuerung lässt sich am besten mit dem Lastausgang verbinden. Unter Umständen wird ein besonderes Schrittrelaislabel benötigt, bitte beachten Sie das Handbuch.

Battery Life: Intelligentes Batterieverwaltung

Ist der Solar-Lade-Regler richtig in der Lage, die Batterie innerhalb eines Tages bis zu ihrer vollen Kapazität aufzuladen, wechselt der Status der Batterie ständig zwischen "teilweise geladen" und "Ende der Entladung" hin und her. Dieser Betriebsmodus (kein regelmäßiges volles Aufladen) beschädigt eine Blei-Säure-Batterie binnen weniger Wochen oder Monaten.

Der Battery Life Algorithmus überwacht den Ladezustand der Batterie und sofern erforderlich hebt er Tag für Tag den Schwellwert zum Abtrennen der Last an (d. h. die Last wird früher abgetrennt), bis die gewonnene Energie ausreicht, um die Batterie bis auf nahezu 100% aufzuladen. Ab diesem Punkt wird der Schwellwert für das Abschalten der Last moduliert, so dass die Aufladung zu nahezu 100% etwa einmal wöchentlich erreicht wird.

Programmierbarer Batterie-Ladalgorithmus

Weitere Informationen hierzu finden Sie unter dem Abschnitt Software auf unserer Website.

Tag/Nacht-Zeitsteuerung und Lichtdämmungsoption

Weitere Informationen hierzu finden Sie unter dem Abschnitt Software auf unserer Website.

Optionen für die Programmierung, Daten in Echtzeit und Anzeigen des Verlaufs

- ColorControl GX oder andere GX-Geräte: Bitte beachten Sie die Venus dokumente auf unserer Website.
- Bei einem Smartphone oder einem anderen Bluetooth-fähigen Gerät: Hierfür ist ein VEDirect Bluetooth-Smart Dongle erforderlich.

BlueSolar Lade-Regler	MPPT 75/10	MPPT 75/15	MPPT 100/15	MPPT 100/20
Batteriespannung (automatische Wahl)	12/24 V		12/24/48V	
Nennlaststrom	10 A	15 A	15 A	20 A
Nominale PV-Leistung, 12 V (1a, b)	145W	220W	220W	290W
Nominale PV-Leistung, 24V (1a, b)	290W	440W	440W	580W
Nominale PV-Leistung, 48V (1a, b)	n.a.	n.a.	n.a.	1160W
Max. Kurzschlussstrom der Solaranlage (2)	13A	15 A	15 A	20 A
Automatische Lastabschaltung	Ja			
Maximale PV-Leerspannung	75V		100V	
Spitzenwirkungsgrad	98%			
Eigenverbrauch – Laden ein	12V: 25 mA / 24V: 15 mA		26 / 20 / 19 mA	
Eigenverbrauch – Laden aus			10 / 8 / 7 mA	
„Konstant“-Ladespannung (absorbieren)	14,4V / 28,8 V (regulierbar)		14,4V / 28,8V / 57,6V (4S)	
„Erhaltung“-Ladespannung (float)	13,8V / 27,6V (regulierbar)		13,8V / 27,6V / 57,6V (4S)	
Ladalgorithmus	mehrfach adaptiv			
Temperaturkompensation	-16 mV/°C bzw. -32 mV/°C			
Unterbruch von Freier/Laststrom	15 A			
Abschalten der Last bei geringer Spannung	11,1V / 22,2 V / 44,4 V oder 11,8 V / 23,6 V / 47,2V oder Battery Life Algorithmus			
Erneutes Verbinden der Last nach niedriger Spannung	13,1 V / 26,2V / 52,4 V oder 14 V / 28 V / 56 V oder Battery Life Algorithmus			
Schutz	Ausgangskurzschluss / Übertemperatur			
Betriebstemperatur	-30°C bis +60°C (voller Nennausgang bis zu 40°C)			
Feuchte	95% nicht kondensierend			
Datenkommunikationsport	VEDirect (Siehe Informationsbrochure zu Datenkommunikation auf unserer Website)			
GEHÄUSE				
Farbe	Blau (RAL 5012)			
Stromanschlüsse	6 mm ² / AWG10			
Schutzklasse	IP43 (Elektronische Bauteile), IP22 (Anschlussbereich)			
Gewicht	0,5 kg	0,6 kg	0,6 kg	0,65 kg
Maße (HxBxT)	100 x 113 x 40 mm		100 x 113 x 50 mm	100 x 131 x 60 mm
NORMEN				
Sicherheit	EN/IEC 62109-1, UL 1741, CSA C22.2			

1a) Wenn mehr PV-Ströme angeschlossen ist, benutzt der Regler die Einspeiseleistung.
 1b) Die PV-Spannung muss mindestens die Höhe von Vbat + 5 V erreichen, damit der Regler den Betrieb aufnimmt.
 Danach liegt der Mindestwert der PV-Spannung bei Vbat + 1 V.
 2) Eine PV-Anlage mit einem höheren Kurzschlussstrom kann den Controller beschädigen.

Anlage 2:

ACTIVE

MSP 190 S

Solarmodul
190W|37,28V|M on okristall in

**BLACK
EDITION**

Elektrische Eigenschaften

Nennleistung (Wp)	190 W
Nennspannung (Umpp)	37,28 V
Nennstrom (Impp)	5,1 A
Leerlaufspannung (UoC)	44,35 V
Kurzschlussstrom (Isc)	5,64 A
Wirkungsgrad	18,97 %

Technische Daten

Arbeitstemperatur	- 40 °C bis + 85 °C
Solarzellen	Monokristallin
Anzahl der Zellen	72
Maße	676 × 1482 × 35 mm
Gewicht	11,1 kg
Anschlussdose	Schutzklasse IP65
Glas (Vorderseite)	Gehärtetes Sicherheitsglas
Rahmen	Stabiler Aluminiumrahmen in Hohlkammerbauweise
Kabellänge	790 mm
Steckerverbindungen	MC4

Maße

Garantie*

**5 YEARS
WARRANTY**
ACTIVE

**15 YEARS
WARRANTY**
ACTIVE

*80 % der Nennleistung: 5 Jahre, 70 % der Nennleistung: 15 Jahre

Der passende Laderegler

Laden Sie Ihre Batterien effizienter, schneller und schonender – mit einem MPPT-Solarladeregler von ACTIVE. Welcher Laderegler für Ihr Projekt optimal ist, je nach Anzahl der verwendeten Solarmodule, erfahren Sie hier. ACTIVE.DE

1 Modul

SC 20

2 Module

SC 40

3 Module

SC 40

bei 24-V-Batterien

4 Module

SC 40

bei 24-V-Batterien

ACTIVE ist eine Marke der batterium GmbH | Robert-Bosch-Straße 1, 71691 Freiberg am Neckar
T: +49 7141 1410870 | F: +49 7141 / 560 90 49 | info@active.de

ACTIVE.DE

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Dresden, den 14.08.2024



Alves Oertelt