

Autarke Stromversorgung & Solaranlagen im Wohnwagen

Physikalische Grundlagen, präzise Dimensionierung für 1 bis 4 Personen, 4-Jahreszeiten-Ertragsanalyse und rechtlicher Rahmen in Deutschland

Schwerpunkte des Berichts

- Detaillierte mathematische Formeln & Verbrauchsprofile
- Systemgewichts- & Zuladungsoptimierung
- MPPT-Laderegler & LiFePO4-Sicherheitsanforderungen
- Gesetzliche Auflagen (VDE, StVZO, Campingplatzordnung)

Zielgruppen-Spektrum

- Solo-Reisende bis Familien (4 Personen)
- Ganzjahres- und Saison-Camper
- DIY-Ausbauer & Nachrüster auf deutschen Stellplätzen

INHALTSVERZEICHNIS

Abschnitt 1: Systemphilosophie & Das Wohnwagen-Trilemma (Gewicht, Platz, Ertrag)

Abschnitt 2: Elektrotechnische Grundlagen & Physikalische Berechnungsformeln

Abschnitt 3: Detaillierte Verbrauchermatrix & Bilanzierung für 1 bis 4 Personen

Abschnitt 4: 4-Jahreszeiten-Simulation & Solare Einstrahlungsanalyse in Deutschland

Abschnitt 5: Das Nadelöhr Zuladung: Systemgewicht & Ladebooster-Sonderlösungen

Abschnitt 6: Rechtlicher Rahmen, VDE-Normen, StVZO & Campingplatzverordnungen

Abschnitt 7: Amortisationsrechnung & Wirtschaftlichkeitsvergleich

Abschnitt 8: Schaltplan-Schema & Leitfaden zur Kabelquerschnitts-Dimensionierung

Abschnitt 9: Fazit & Zusammenfassende Empfehlungen

1. Systemphilosophie & Das Wohnwagen-Trilemma

Die Realisierung echter Energieautarkie in einem Wohnwagen unterscheidet sich in wesentlichen Punkten von autarken Systemen in Wohnmobilen oder Kastenwagen. Während ein Wohnmobil über eine leistungsfähige Lichtmaschine mit hoher Ladeleistung verfügt und meist höhere Zuladungsreserven aufweist, unterliegt der Wohnwagen dem sogenannten **Wohnwagen-Trilemma**:

- **Zuladungsbeschränkung:** Wohnwagen verfügen ab Werk häufig nur über 100 bis 200 kg freie Nutzlast für Gepäck, Mover, Gasflaschen und Wasser. Jedes Kilogramm Elektrotechnik verringert die Restzuladung direkt.
- **Eingeschränkte Nachladung im Zugbetrieb:** Der Stromtransport vom Zugfahrzeug über den 13-poligen ISO-Stecker (ISO 11446) unterliegt durch lange Kabelwege (bis zu 10 Meter) massiven Spannungsfällen. Ohne Spezialtechnik lädt die Batterie während der Fahrt kaum nach.
- **Ortsfester Schattenbetrieb:** Wohnwagen stehen auf Campingplätzen oft tagelang fest verankert auf einer Parzelle. Steht das Fahrzeug unter Bäumen, entfällt die Ausbeute einer reinen Dach-Photovoltaikanlage fast vollständig.

2. Elektrotechnische Grundlagen & Berechnungsformeln

Für die korrekte Auslegung eines Off-Grid-Solarsystems müssen alle Verbraucher und Erzeuger auf die mathematischen Grundgleichungen der Gleichstromtechnik zurückgeführt werden.

2.1 Grundlegende Umrechnungsformeln

Leistung (Watt): $P [W] = U [V] \times I [A]$

Energiearbeit (Wattstunden): $E [Wh] = P [W] \times t [h]$

Akkukapazität (Amperestunden bei 12,8V): $C [Ah] = E [Wh] / 12.8 [V]$

Nutzbare Kapazität: $C_{nutz} = C_{nom} \times DoD$

Für Blei/AGM-Akkus gilt eine maximale Entladetiefe (**DoD** = Depth of Discharge) von ca. 50 %, um Sulfatierung und Kapazitätsverlust zu vermeiden. Für LiFePO₄-Speicher beträgt das günstige **DoD** 90 % bis 95 %.

2.2 Temperaturberechnung für Solarmodule

Monokristalline PV-Module weisen einen negativen Temperaturkoeffizienten des Leistungspunkts (γ_{pmp}) von ca. **-0.38% / K** auf. Bei steigender Zelltemperatur oberhalb der Standard-Testbedingungen (**STC** = 25 °C) sinkt die tatsächliche Ausgangsleistung:

$$P_{real} = P_{STC} \times [1 + (T_{Zelle} - 25) \times (-0.0038)]$$

An heißen Sommertagen erreichen flach verklebte Solarmodule auf einem Wohnwagendach schnell Zelltemperaturen von $T_{Zelle} = 65$ °C. Dies führt zu einem direkten Ertragsverlust von ca. 15,2 % gegenüber der Nennleistung (W_p).

2.3 Wirkungsgrad von Solarreglern: MPPT vs. PWM

Ein MPPT-Laderegler (Maximum Power Point Tracking) ermittelt kontinuierlich das optimale Spannungs-Strom-Verhältnis ($U_{MPP} \times I_{MPP}$). Insbesondere bei kühlen Modultemperaturen oder Teillastbedingungen liegt der Wirkungsgrad eines MPPT-Reglers bei ca. 97–98 %, während ein klassischer PWM-Regler die Modulspannung starr auf die Batteriespannung herunterzieht und dadurch bis zu 30 % der erzeugten Energie vernichtet.

3. Detaillierte Verbrauchermatrix & Bilanzierung für 1 bis 4 Personen

Die folgende Verbrauchermatrix stellt die realen Tagesverbräuche bei typischer Nutzung im Sommer- und Übergangsbetrieb dar. Sämtliche Werte basieren auf 12,8V-Gleichstrombasis.

3.1 Aufschlüsselung des täglichen Energiebedarfs

Verbraucher-Typ	Leistung (W)	1 Pers. (h/Tag)	2 Pers. (h/Tag)	3–4 Pers. (h/Tag)	Tagesenergie (Wh) 4 Pers.
LED-Innenbeleuchtung	10 W	2,0 h	3,0 h	5,0 h	50 Wh
Kompressorkühlschrank (45-90L)	45 W (40% Duty)	8,0 h	9,6 h	12,0 h	540 Wh
Druckwasserpumpe	35 W	0,1 h	0,2 h	0,5 h	17,5 Wh
Smartphones / Tablets	15 W (pro Gerät)	1,5 h (1 Ger.)	3,0 h (2 Ger.)	6,0 h (4 Ger.)	90 Wh
Laptop (USB-C PD)	60 W	1,0 h	2,0 h	4,0 h	240 Wh
Standheizungsgebläse (Umluft)	20 W	1,0 h	2,0 h	4,0 h	80 Wh
TV / LTE-WLAN-Router	30 W	0,5 h	1,5 h	3,0 h	90 Wh
Inverter Standby-Verlust	15 W	0,0 h	2,0 h	12,0 h	180 Wh
GESAMTVERBRAUCH (Wh / Tag)	-	233 Wh	538 Wh	1.287 Wh	1.287 Wh
GESAMTVERBRAUCH (Ah bei 12,8V)	-	18,2 Ah	42,0 Ah	100,5 Ah	100,5 Ah

3.2 Wechselrichter-Verluste & Eigenverbrauch

Achtung: Der unterschätzte Ruhestrom von Wechselrichtern

Ein echter Sinus-Wechselrichter mit 2.000 Watt Dauerleistung hat eine Leerlauf-Laufleistung von ca. 1,0 bis 1,5 Ampere bei 12V (12–18 Watt). Wird der Wechselrichter 24 Stunden am Tag eingeschaltet gelassen, verbraucht er alleine durch das Bereitstehen **288 bis 432 Wh pro Tag** – das entspricht nahezu dem gesamten Tagesverbrauch einer 2-Personen-Gruppe!

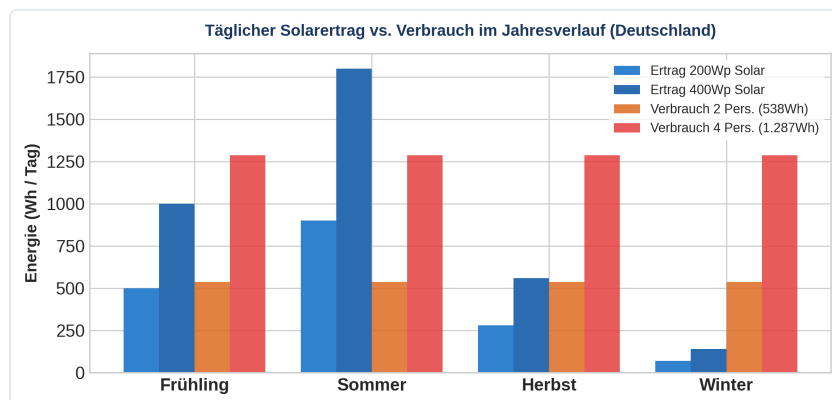


Abbildung 1: Vergleich des täglichen Solarertrags (200Wp vs. 400Wp) mit dem realen Energiebedarf für 2 und 4 Personen im Jahresverlauf in Deutschland.

4. 4-Jahreszeiten-Simulation & Solare Einstrahlungsanalyse

Die Einstrahlungsdaten für Mitteleuropa (Deutschland) schwanken zwischen Juni und Dezember um mehr als den Faktor 10. Für eine realistische Systemauslegung darf nicht mit Jahresdurchschnittswerten gerechnet werden.

4.1 Einstrahlungsdaten Deutschland (Durchschnittswerte kWh / m² / Tag)

- **Frühling (März – Mai):** 3,5 – 4,8 kWh/m²/Tag – Sehr gute Effizienz wegen kühler Modultemperaturen.
- **Sommer (Juni – August):** 5,2 – 5,8 kWh/m²/Tag – Höchster Ertrag, jedoch Temperaturbeschränkung bei flachen Modulen.
- **Herbst (September – November):** 1,5 – 2,8 kWh/m²/Tag – Flacher Sonnenstand, steiler Anstellwinkel der Panels erforderlich.
- **Winter (Dezember – Februar):** 0,3 – 0,8 kWh/m²/Tag – Extrem geringer Ertrag durch kurze Tage, Nebel und Bewölkung.

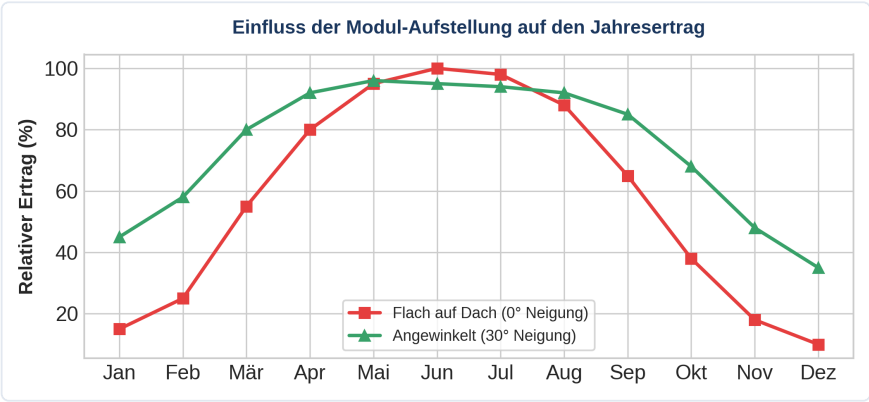


Abbildung 2: Relativer Solarertrag bei flacher Dachmontage (0°) im Vergleich zu einer optimal angewinkelten Aufstellung (30°) in den Herbst- und Wintermonaten.

4.2 Das Lithium-Kälteproblem im Winterbetrieb

Lithium-Eisenphosphat-Zellen (LiFePO4) besitzen hervorragende Eigenschaften, weisen jedoch bei Temperaturen unter 0 °C eine physikalische Schwachstelle auf: Bei Ladevorgängen unter dem Gefrierpunkt lagert sich metallisches Lithium an den Anoden ab (**Lithium Plating**). Dies führt zu irreversiblen Kapazitätsverlusten und Kurzschlussgefahr.

Schutzmaßnahmen für den Winterbetrieb

1. **BMS mit Low-Temperature Cut-Off:** Das Batteriemanagementsystem muss Ladevorgänge unter 0 °C automatisch unterbrechen.

2. **Smart-Heat Akkus:** Akkus mit integrierter Heizfolie nutzen den eingehenden Ladestrom (z. B. vom Solarregler), um die Zellen zunächst auf +5 °C zu erwärmen, bevor das Laden freigegeben wird.

3. **Innenraummontage:** Einbau des Akkus im beheizten Staukasten des Wohnwagens nahe der Umluftleitung.

5. Das Nadelöhr Zuladung: Systemgewicht & Ladebooster

5.1 Massenbilanz: Blei/AGM vs. LiFePO4 Leichtbau

Ein Hauptgrund für das Scheitern klassischer Autarkie-Installationen im Wohnwagen ist das Gesamtgewicht der Komponenten. Die Tabelle verdeutlicht die Einsparpotenziale durch moderne Komponenten.

Komponente	Konventionelle Technik (AGM)	Moderne Leichtbau-Technik (LiFePO4)	Gewichtseinsparung
Batteriespeicher (100Ah nutzbar)	2× 100Ah AGM (62,0 kg)	1× 100Ah LiFePO4 (11,5 kg)	- 50,5 kg
Solarmodule (200 Wp)	2× 100Wp Glas/Alu (18,0 kg)	2× 100Wp Flex-Module (3,8 kg)	- 14,2 kg
Halterung / Verklebung	Alu-Spoiler & Schrauben (4,5 kg)	MS-Polymer Direktkleber (1,2 kg)	- 3,3 kg
Verkabelung & Wechselrichter	1500W Trafowechselrichter (12,0 kg)	1500W HF-Wechselrichter (4,5 kg)	- 7,5 kg
GESAMTGEWICHT SYSTEM	96,5 kg	21,0 kg	- 75,5 kg (-78%)

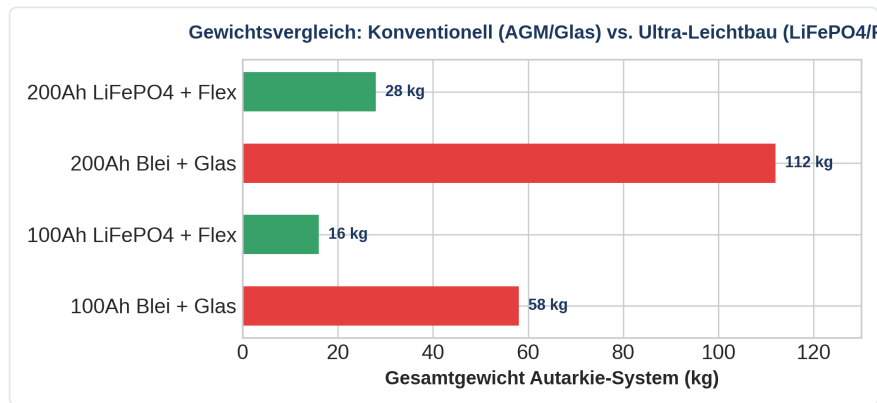


Abbildung 3: Massenvergleich zwischen konventionellen Blei/AGM-Systemen und modernen Ultra-Leichtbau-Installationen.

5.2 Die Herausforderung der Ladung über die Anhängersteckdose

Die Stromversorgung eines Wohnwagens über das Zugfahrzeug erfolgt über die Pins 9 (Dauerplus) und 10 (Ladeleitung) des 13-poligen Steckers. Durch den hohen Leitungswiderstand über 8 bis 12 Meter Kabellänge fällt die Spannung unter Last stark ab:

$$U_{\text{Wohnwagen}} = U_{\text{Lichtmaschine}} - (2 \times L \times I / (\gamma \times A))$$

Bei einem Strom von $I = 10 \text{ A}$ und einem Aderquerschnitt von $A = 2.5 \text{ mm}^2$ sinkt die Spannung am Wohnwagenakku von 14,2 V auf unter 12,4 V ab – eine effektive Batterieladung ist ohne **dc-dc Ladebooster mit Weitbereichseingang** (z. B. Schaudt WA 1208 oder Victron Orion-Tr Smart) physikalisch unmöglich.

6. Rechtlicher Rahmen, VDE-Normen & Campingplatz-Regeln

6.1 Elektro-Installation nach VDE 0100-721

Die Installation von 230V-Wechselspannungsanlagen in Caravan-Fahrzeugen unterliegt strengen Sicherheitsvorschriften gemäß DIN VDE 0100-721:

- **Fehlerstrom-Schutzschalter (RCD):** Jeder Wechselrichterkreis mit Steckdosen muss über einen eigenen RCD/FI-Schalter (Typ A, Auslösestrom $\leq 30 \text{ mA}$) abgesichert werden.
- **Netzvorrangschaltung (NVS):** Bei Einspeisung von Landstrom muss eine galvanische Trennung zwischen Inverter und Netz hergestellt werden. Ein Ausfehlen von Inverterspannung ins externe Campingplatznetz muss mechanisch/elektrisch unmöglich sein.
- **Potentialausgleich:** Der Gehäuse-Erdungspunkt des Wechselrichters muss mit dem metallischen Fahrgestell des Wohnwagens niederohmig verbunden sein (mindestens 4 mm^2 Kupferleiter).

6.2 Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)

Auf dem Dach verklebte oder verschraubte Solarmodule gelten als Festeinbau und Fahrzeugteil. Die Verklebung muss mit zugelassenen Konstruktionsklebstoffen (z. B. Dekalin Dekasyl MS-5 oder Sika-Flex 252) nach genauer Herstellervorgabe (Reinigung, Primer-Auftrag, Mindestklebeschichtdicke von 2 mm) erfolgen, um ein Abreißen bei Autobahngeschwindigkeiten (130 km/h+) zu verhindern.

6.3 Betreiberregeln & Platzordnungen in Deutschland

- **Hausrecht:** Campingplatzbetreiber können das Aufstellen externer Solarmodule auf der Wiese untersagen, wenn diese Fluchtwege behindern oder optische Beeinträchtigungen darstellen.
- **Einspeiseverbot:** Mobile PV-Anlagen dürfen unter keinen Umständen über CEE-Stecker in das Verteiler-Netz des Campingplatzes zurückspeisen. Es drohen fristlose Kündigung des Stellplatzes und Schadenersatzansprüche.

7. Amortisationsrechnung & Wirtschaftlichkeitsvergleich

Aufgrund stark steigender Energiepreise auf deutschen Campingplätzen (Abrechnung nach kWh statt Tagespauschale) stellt eine Solaranlage nicht nur einen Komfortgewinn, sondern eine rentable Investition dar.

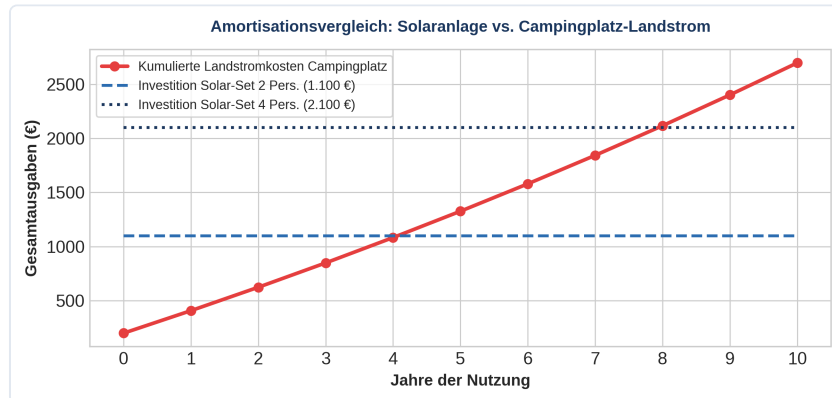


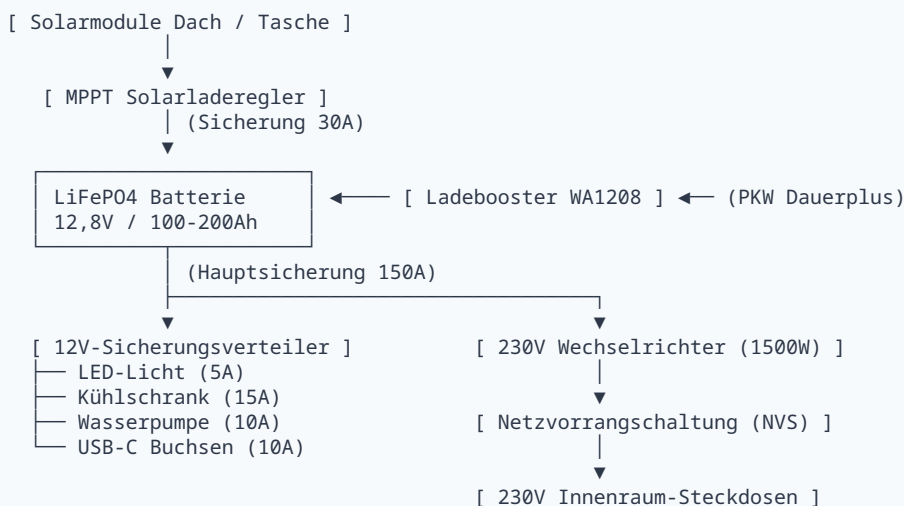
Abbildung 4: Kumulierte Stromkosten auf Campingplätzen (Annahme: 0,90 €/kWh, 40 Tage/Jahr) im Vergleich zu den einmaligen Anschaffungskosten einer Solaranlage.

Ergebnis der Berechnung: Bei einem Durchschnittspreis von 0,90 €/kWh und einer Nutzung von 40 Tagen pro Jahr amortisiert sich ein autarkes 2-Personen-Solarsystem bereits im **4. Betriebsjahr**. Nach 10 Jahren Betrieb beläuft sich die Netto-Ersparnis auf über **1.700 Euro**.

8. Schaltplan-Schema & Kabelquerschnitts-Dimensionierung

8.1 Prinzipschaltbild des Wohnwagen-Autarkiesystems

Systemarchitektur (DC-Inselnetz)



8.2 Leitfaden zur Kabelquerschnitts-Berechnung

Um Brände durch Überhitzung zu vermeiden und den Spannungsabfall unter 2 % zu halten, muss der Mindestkabelquerschnitt (**A**) berechnet werden:

$$A [\text{mm}^2] = (2 \times L \times I) / (\gamma \times \Delta U) \quad | \quad \gamma_{\text{Kupfer}} = 56, \Delta U \leq 0.25V$$

Verbindung / Strompfad	Max. Strom (I)	Max. Länge (L)	Empfohlener Querschnitt (A)	Mindestsicherung
Batterie — Wechselrichter (1500W)	150 A	1,5 m	35 mm ² / 50 mm ²	150 A ANL / Mega
MPPT Regler (30A) — Batterie	30 A	2,0 m	6 mm ² / 10 mm ²	40 A MIDI
Solarpanel — MPPT Regler	15 A	6,0 m	4 mm ² / 6 mm ²	20 A In-Line
12V Verteiler — Kühlschrank	15 A	4,0 m	4 mm ²	15 A ATO-Flachsicherung

9. Fazit & Abschließende Empfehlung

Eine nachhaltige und verlässliche Autarkie im Wohnwagen erfordert das sorgfältige Ausbalancieren von **Batteriekapazität, Ladeleistung und Fahrzeugzuladung**. Durch den konsequenten Einsatz von **LiFePO4-Speichern** in Kombination mit **MPPT-Laderegler** und einer **Hybrid-Solarlösung** (feste Dachpanels plus mobile Solartasche) lässt sich von Frühjahr bis Herbst eine 100-prozentige Unabhängigkeit vom Landstrom auf deutschen Campingplätzen erreichen. Im Winterbetrieb bleibt eine Ergänzung durch Landstrom oder aggregatgestützte Nachladung aufgrund der physikalischen Einstrahlungsgrenzen in Mitteleuropa unverzichtbar.