

Photovoltaik- anlagen

Technik, Eigenverbrauch und
Speicherung



LandSchaftEnergie

TEAM ENERGIEWENDE BAYERN



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Bayerisches Staatsministerium für
Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus



C.A.R.M.E.N.

Photovoltaik- anlagen

Technik, Eigenverbrauch und Speicherung

Einleitung

Mit über 1.500 Sonnenstunden pro Jahr verfügt Deutschland über ein hohes Potenzial für die Stromerzeugung durch Photovoltaik (PV). Die Technologie trug 2024 mit ca. 72 Terrawattstunden etwa 14 Prozent zur öffentlichen Stromerzeugung Deutschlands bei. Allein im sonnenreichsten Monat Juli konnten über 10 TWh an Solarstrom erzeugt werden (Fraunhofer ISE 2025). Dennoch bestehen trotz des stark beschleunigten Zubaus der letzten Jahre noch große Potentiale zum Ausbau dieser Erzeugungsform.

Maßgeblich für den hohen Zubau sind im Wesentlichen die stark gesunkenen Investitionskosten für PV-Anlagen sowie gestiegene Verbraucherstrompreise. Inzwischen ist der spezifische Anlagenpreis so weit gesunken, dass die Erzeugungskosten für Solarstrom kleiner Haus-

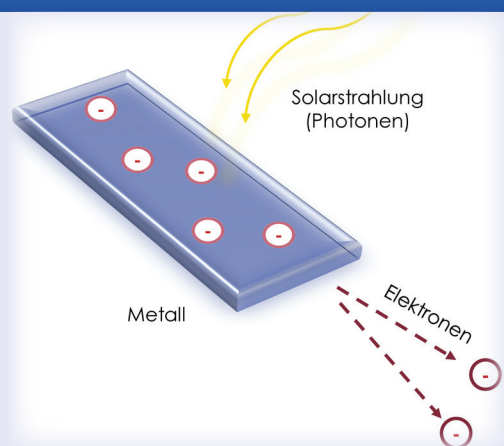
anlagen deutlich unterhalb des Bezugspreises für Haushaltsstrom liegen. Damit gewinnen, vor allem bei Neuinvestitionen in Photovoltaikanlagen, die Steigerung des Eigenverbrauchs und der Einsatz von Batteriespeichern an Bedeutung.

Technische Grundlagen und Entwicklung

Das Kernstück einer Photovoltaikanlage stellt die Solarzelle dar. Dort wird die Strahlungsenergie der Sonne durch Nutzung des sogenannten Photoeffektes in elektrische Energie umgewandelt. Mehrere Solarzellen werden zu einem

Der Photoeffekt

Der Photoeffekt beschreibt einen Prozess der Wechselwirkung von Photonen mit Materie. Bei diesem Prozess wird ein Photon von einem Elektron absorbiert und das Elektron so aus der bestehenden Bindung gelöst. Durch den Aufbau der Zelle wird das freie Elektron in Bewegung versetzt. Dadurch entsteht ein Stromfluss.



PV-Modul zusammengeschaltet. Durch technologische Fortschritte sind die Module widerstandsfähiger geworden und weisen einen langsameren Alterungsprozess als noch vor einigen Jahren auf. Heute werden auch bei privaten Anlagen vielfach unempfindliche Glas-Glas-Module verbaut. In der Regel wird ein Zeitraum von über 20 Jahren als übliche Nutzungsdauer für Gesamtanlage angenommen, die Module können aber meist weit darüber hinaus für die Stromproduktion genutzt werden. Bei den heute eingesetzten Modulen kann im Allgemeinen von einer Lebensdauer von mindestens 25 - 30 Jahren ausgegangen werden. Die Hersteller geben für marktübliche Module häufig eine lineare Leistungsgarantie von 80 % nach 20 Jahren.

Eine Photovoltaikanlage kann auf verschiedene Arten realisiert werden. Dabei stellen Freiflächenanlagen und Dachanlagen die am weitest verbreiteten Anwendungen dar:

- Freiflächenanlagen
 - Feste Aufständerung
 - Nachführung mit automatisierter Ausrichtung an den Tagesverlauf der Sonne
- Dachanlagen
 - Aufdachmontage (dachparallel)
 - Aufständerung bei Flachdächern

Daneben existiert noch eine Vielzahl an Varianten und Sonderformen:

- Montage an Gebäudefassaden oder Schallschutzwänden
- In-Dach-PV: die Nutzung von dachintegrierten PV-Modulen oder PV-Ziegeln
- Floating-PV: die schwimmende Installation auf stehenden Gewässern
- Agri-PV: die kombinierte Flächennutzung von Photovoltaik und Landwirtschaft

In aller Regel sind PV-Anlagen netzgekoppelt. Sie können entweder den gesamten erzeugten Strom in das öffentliche Stromnetz einspeisen („Volleinspeisung“) oder einen Teil des Stromes über die eigenen Leitungen nutzen und nur den

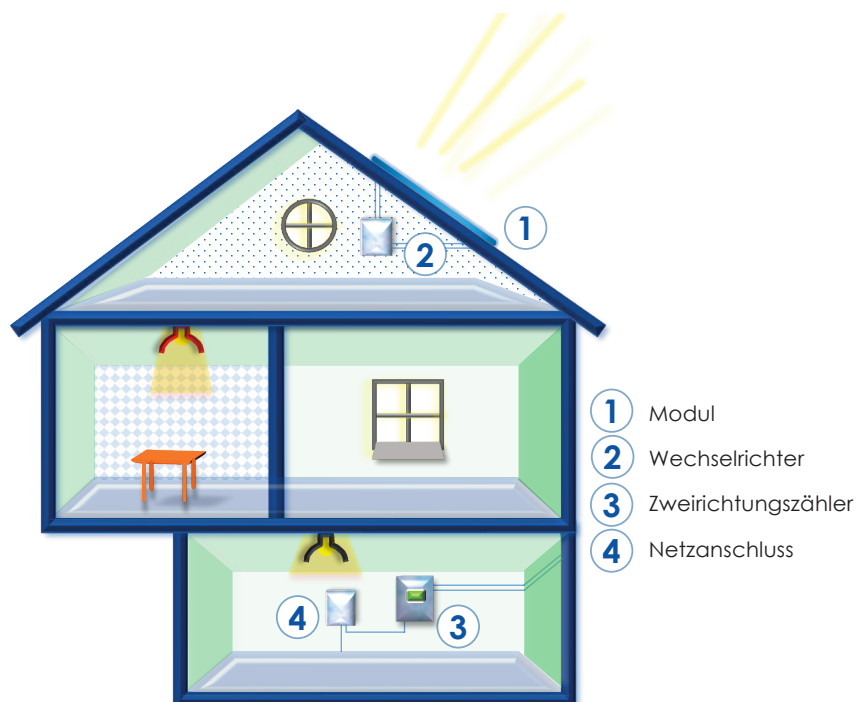


Abb. 1: Konventionelle, netzgekoppelte PV-Dachanlage

Überschuss ins Netz einspeisen („Teileinspeisung“). In Ausnahmen oder speziellen Einsatzbereichen, wie etwa in Berghütten, findet man auch sogenannte Inselanlagen. Diese sind nicht an das öffentliche Stromnetz angeschlossen und oft mit Energiespeichern oder weiteren Energieerzeugern kombiniert.

Eine **netzgekoppelte PV-Anlage** (Abbildung 1) besteht grundsätzlich aus dem Solargenerator (Zusammenschluss der PV-Module), mindestens einem Wechselrichter, dem Haus- und Netzanschluss sowie einem passenden Mess- und Zählersystem. Heute werden die meisten neuen privaten Dachanlagen mit einem Stromspeicher ausgestattet. Inzwischen üblich sind zudem Monitoring- und Energiemanagementsysteme. Mit diesen können die Be-

treibenden nicht nur den Ertrag und den Eigenverbrauch überwachen, sondern es können auch kompatible Verbraucher intelligent angesteuert werden. Das kann z. B. eine Wallbox sein, deren Ladeleistung in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Solarstrom geregelt wird.

Stromspeicher im Heimbereich

Die Stromerzeugung durch PV-Anlagen unterliegt, wie auch diejenige anderer Erneuerbarer-Energie-Anlagen, witterungsbedingten tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Strom aus einer Erzeugungsform alleine kann also nicht immer genau dann produziert werden, wenn er im Haushalt gebraucht wird. Umgekehrt kann es zu einem erhöhten Stromangebot

Smarte Messtechnik

Im Zuge des sogenannten „Smart-Meter-Rollouts“ sollen alle konventionellen Stromzähler bis spätestens zum Jahr 2032 entweder durch digitale („moderne Messeinrichtung“) oder durch intelligente Stromzähler („intelligentes Messsystem“ / „Smart Meter“) ersetzt werden. Moderne Messeinrichtungen speichern tagesgenaue Stromverbrauchsdaten der vergangenen zwei Jahre. Intelligente Messsysteme hingegen erfassen die momentane Strombilanz im 15-Minuten-Takt und leiten diese an den Messstellenbetreiber weiter. Mit diesen Daten wollen die Netzbetreiber langfristig Einfluss auf die Netzstabilität nehmen und für die Stromabnehmenden werden variable Stromtarife ermöglicht.

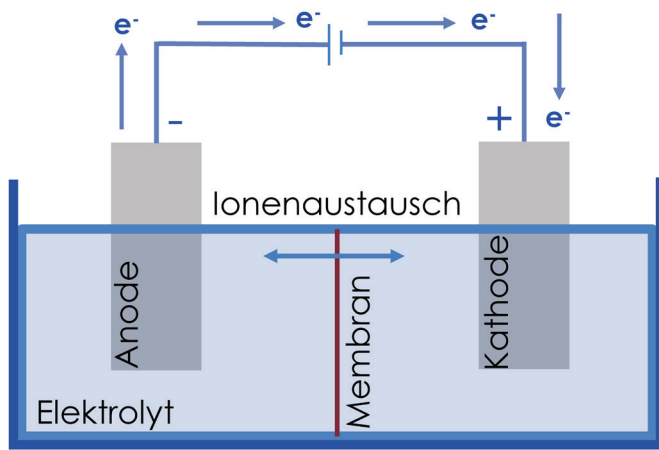


Abb. 2: Galvanische Zelle

bei gleichzeitig geringer Nachfrage kommen. Hier können Stromspeicher einen Ausgleich schaffen, indem sie Stromüberschüsse aufnehmen und diese bedarfsorientiert wieder abgeben.

Die kleinste Einheit eines Batteriespeichersystems bildet die sogenannte galvanische Zelle (vgl. Abbildung 2). Diese besteht aus zwei leitenden Elektroden (Kathode und Anode) und einem Elektrolyten, in dem sich Ionen frei bewegen können. Die Elektroden sind durch einen Separator (Membran) voneinander getrennt, der für Ionen durchlässig ist. In einer solchen Zelle finden elektrochemische Reaktionen statt, durch die Elektronen (e^-) freigesetzt werden, die wiederum einen Stromfluss erzeugen. Sind diese Reaktionen umkehrbar (reversibel), kann der Speicher sowohl be- als auch entladen werden.

Die **Nutz- oder Nettokapazität** eines Batteriespeichers wird in Kilowattstunden (kWh) angegeben. Sie beschreibt, welches Speichervermögen tatsächlich genutzt werden kann, wenn die zulässige Entladetiefe und die Beladungsgrenze (in Abbildung 3 orange dargestellt) eingehalten werden.

Die Nennkapazität (Gesamtkapazität) beschreibt den maximal möglichen Energieinhalt des Speichers.

Gängige Batterietechnologien für

Photovoltaikanlagen im Eigenheimbereich basieren derzeit größtenteils auf der Lithium-Ionen-Technologie. Aufgrund der hohen Sicherheit finden für Heimspeichieranwendungen heute großteils sogenannte Lithium-Eisenphosphat-Speicher Einsatz. Daneben sind Speicher auf Basis unterschiedlicher technologischer Ansätze mit Blei, Natrium oder der Redox-Flow-Technologie erhältlich.

Wirtschaftlichkeit und Nutzung des erzeugten Stroms

Für Strom aus Photovoltaikanlagen, der in das öffentliche Netz eingespeist wird, können Anlagenbetreibende eine Förderung über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) erhalten. Förderfähig sind Photovoltaikanlagen auf, an oder in baulichen Anlagen sowie Freiflächenanlagen in einer geeigneten Flächenkulisse. Die Art und Höhe der EEG-Vergütung ist unter anderem abhängig von der installierten Leistung der Photovoltaikanlage in Kilowatt Peak (kWp):

- Bis 100 kWp: feste Einspeisevergütung
- Über 100 kWp bis 1 MWp: nach dem Marktprämienmodell geförderte Direktvermarktung der eingespeisten Strommenge
- Über 1 MWp: Ermittlung des anzulegenden Wertes durch die Teilnahme an einem Ausschreibungsverfahren der Bundesnetzagentur

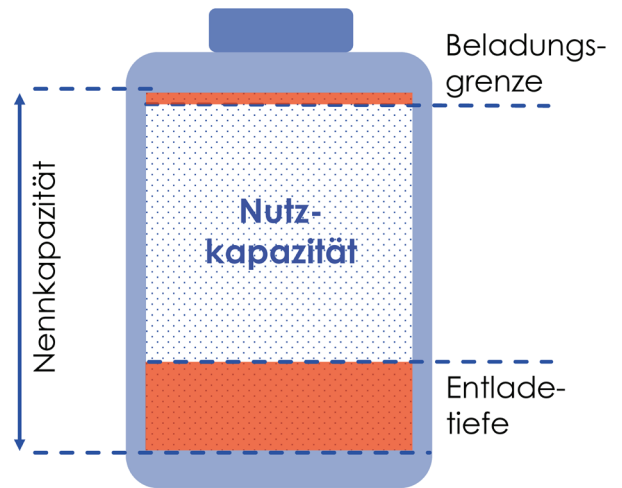


Abb. 3: Der Unterschied zwischen Nenn- und Nettokapazität eines Batteriespeichers

Für private Dachanlagen ist die feste Einspeisevergütung von Bedeutung. Hierbei erfolgen durch den Netzbetreiber pro eingespeiste Kilowattstunde Zahlungen in konstanter Höhe für 20 Kalenderjahre sowie das restliche Jahr der Inbetriebnahme. Wie hoch die feste Einspeisevergütung für eine konkrete Anlage ist, hängt neben der Leistung auch vom Inbetriebnahmezeitpunkt ab.

Wirtschaftlichkeit Photovoltaik

Während die EEG-Einspeisevergütung bis 2009 bei über 40 Cent pro Kilowattstunde (ct/kWh) lag, beträgt die Festvergütung bei Eigenverbrauch derzeit etwa 6 - 8 ct/kWh.

Trotzdem können PV-Anlagen auch weiterhin eine Investition mit guter Rendite sein, da die Installationskosten in den letzten 15 Jahren um etwa 75 Prozent gesunken sind. Abbildung 4 stellt die Kostenentwicklung für schlüsselfertige Photovoltaik-Dachanlagen bis 10 kWp im Verlauf der letzten Jahre dar.

Der Stromertrag einer PV-Anlage hängt maßgeblich von der geographischen Lage und den örtlichen Gegebenheiten ab. Die durchschnittlichen Erträge pro Jahr liegen in Deutschland bei ungefähr 1.000 kWh pro kWp installierter Leistung (kWh/kWp). In Norddeutschland sind sie dabei mit rund 900 kWh/kWp niedriger als im Süden, wo unter optimalen Bedingungen bis etwa

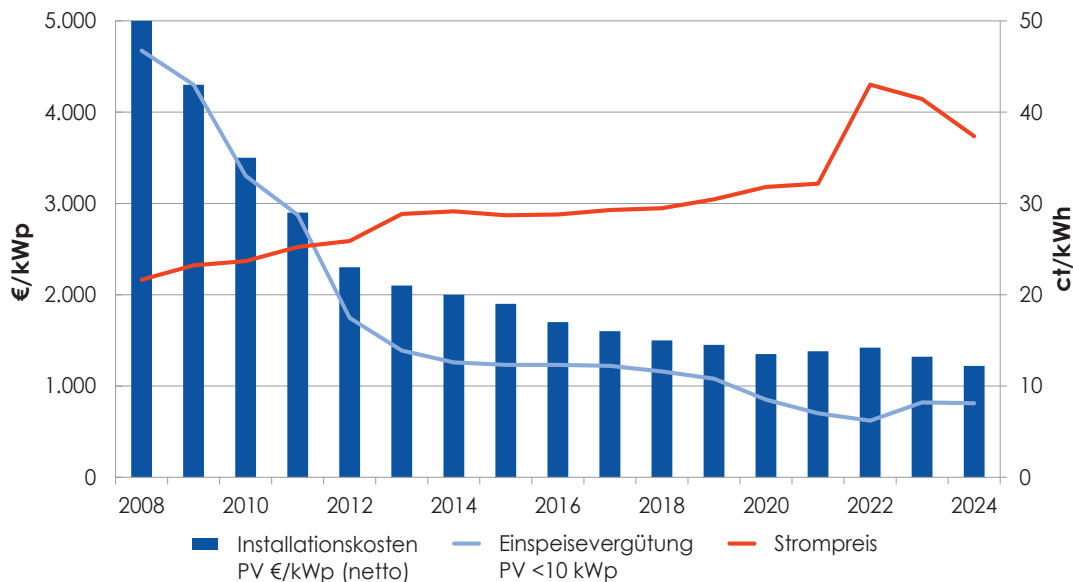


Abb. 4: Verbraucherstrompreise, Netto-Installationskosten und EEG-Einspeisevergütung für Aufdach-PV-Anlagen bis 10 kWp ohne Speichersystem von 2008 bis 2024 (Darstellung nach eigenen Daten sowie BDEW 2024, Musterhaus.net GmbH 2024, scon-marketing GmbH 2024, ub.de Fachwissen GmbH 2023 und BSW 2016 u.a.).

1.200 kWh/kWp erzielt werden können. Den höchsten Stromertrag über das Jahr erzeugen Module mit direkter Südausrichtung und ca. 30-35° Neigung – also wenn ein Großteil der Sonnenstrahlen möglichst senkrecht auf die Moduloberfläche trifft. Bei Satteldächern hängt in der Praxis die mögliche Ausrichtung der Module zwar von den vorhandenen Dachflächen ab, aber auch Dächer mit direkter Ost- oder West-Orientierung kommen für den wirtschaftlichen Betrieb einer PV-Aufdachanlage in Frage. Damit sinken zwar die Erträge insgesamt leicht, dafür steigt der Anteil in den Morgen-

und Abendstunden, in denen der Stromverbrauch in Haushalten meist vergleichsweise hoch ist. Bei entsprechend flacher Dachneigung kann heute im Einzelfall sogar eine zusätzliche Belegung mit Modulen in nördlicher Orientierung in Frage kommen.

Um die Kosten einer PV-Anlage einschätzen zu können, stellt der Anlagenkomplettpreis (inklusive Module, Anschlusskästen, Unterkonstruktion, Wechselrichter, Verkabelung, Anschluss, Transport, Gerüst, Montage, Inbetriebnahme und Einweisung) die ausschlaggebende Größe dar. Vergleichbar werden

unterschiedliche Solarmodule und Komplettanlagen anhand der spezifischen Kosten in Euro (netto) pro Kilowattpeak installierter PV-Leistung (€/kWp).

Beispiel

In Abbildung 5 wird eine stark vereinfachte statische Amortisationsrechnung dargestellt (Installation der fiktiven Anlage mit Batteriespeicher im März 2025). Nicht berücksichtigt sind dabei beispielsweise die Alterung der Module, die steuerliche Behandlung oder die Steigerung des Strompreises über die Jahre. Die Zahlen beruhen auf

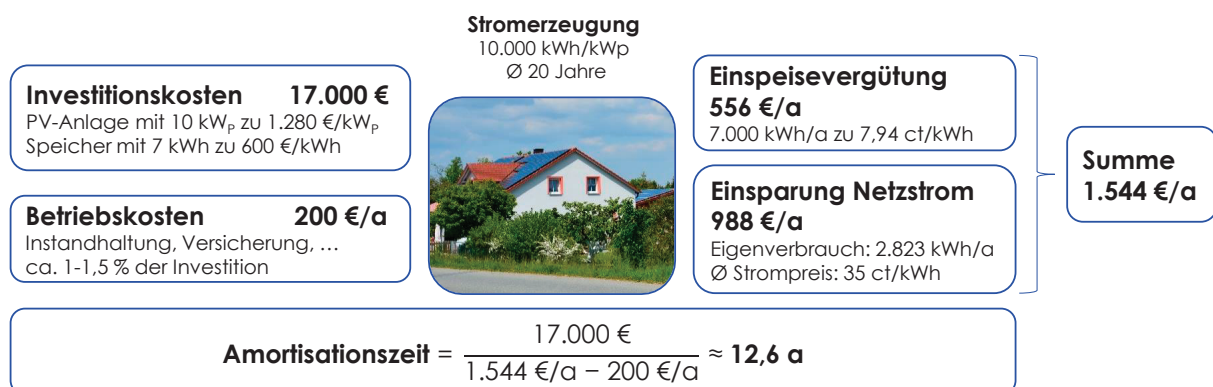


Abb. 5: Stark vereinfachte Wirtschaftlichkeitsberechnung einer PV-Dachanlage mit Stromspeicher für einen Haushalt mit 3.500 kWh Jahresstromverbrauch

- Wer für den Stromspeicher eine „**netzdienliche Betriebsweise**“ wählt, trägt zur Stabilität des Stromnetzes bei – ein immer wichtiger werdendes Thema der Energiewende. Bei der netzdienlichen Betriebsweise wird zu Zeiten der maximalen Einspeiseleistung der PV-Anlage, und somit auch zu Zeiten hoher Auslastung des Stromnetzes, Strom in den Speicher eingespeichert. Somit kann die sogenannte „PV-Spitze“ zu Mittagszeiten erheblich abgesenkt werden, was wiederum zur langfristigen Sicherung der Aufnahmefähigkeit des Netzes für PV-Strom beiträgt.
- Der Stromspeicher kann außerdem auf eine weitere Art und Weise zur Stabilität des Stromnetzes beitragen: Durch die unbeständige Einspeisung der erneuerbaren Energieträger Wind und Sonne nehmen Schwankungen im Stromnetz zu. Um das Netz und die 50 Hertz Netzfrequenz trotz dieser Bedingungen stabil zu halten, benötigen die Netzbetreiber kurzfristig verfügbare Kapazitäten, die sogenannte **Regelleistung**. Stromspeicher sind sehr reaktionsschnell und können innerhalb von Sekunden auf Netzschwankungen reagieren. Sie können sowohl Strom in das Netz abgeben als auch aufnehmen. Da kleine Stromspeicher einzeln jedoch nicht die erforderliche Mindestmenge erbringen, gibt es verschiedene Anbieter, die dezentrale Speicher zu einem virtuellen Kraftwerk vernetzen und steuern, um deren Leistung gebündelt zu vermarkten. Dadurch können Einnahmen mit dem Batteriespeicher erwirtschaftet werden.

Durchschnittswerten.

Die beispielhaft dargestellte Anlage wäre etwa nach 13 Jahren amortisiert und könnte etwa 1.550 Euro Einnahmen pro Jahr während der verbleibenden EEG-Förderdauer erwirtschaften. Unberücksichtigt bleiben bei dieser Betrachtung die Auswirkungen steigender Preise und Stromkosten sowie die Kreditkosten für eine mögliche Finanzierung der Anlage. Aus steuerlicher Sicht sind die Einnahmen und Ersparnisse aus privaten Photovoltaikanlagen auf Wohngebäuden nicht zu berücksichtigen, da diese im Regelfall sowohl von der Einkommenssteuer als auch von der Mehrwertsteuer befreit sind.

Stromspeicher

Die Kosten von Batteriespeichersystemen können vergleichbar gemacht werden, indem die Investitionskosten auf die Nutzkapazität bezogen werden. Der Preis variiert je nach eingesetzter Technologie und den individuellen Eigenschaften des Systems.

In den letzten Jahren sind die Kosten stark gesunken. Dennoch stellt die Investition in einen Batteriespeicher einen wesentlichen Kostenpunkt dar, der bei kleinen PV-Anlagen mehr als ein Viertel der Gesamtinvestition ausmachen kann. Um kleinere Speichersysteme im Sinne der Wissenschaftlichkeit eigenverbrauchsoptimiert auszulegen, empfiehlt sich als grober Richtwert folgende Faustformel: Pro 1.000 kWh Jahresstromverbrauch

sollte der Speicher eine Kapazität bis ca. 1,5 kWh aufweisen. Zudem sollte die Speicherkapazität in kWh nicht wesentlich höher sein als die installierte Leistung in kWp. Ein überdimensionierter Speicher weist über das Jahr nur wenige Vollzyklen auf, sodass die spezifischen Kosten pro gespeicherte kWh hoch sind.

Um die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes eines Batteriespeichers zu beurteilen, müssen einige Faktoren berücksichtigt werden, wie etwa die voraussichtliche Lebensdauer des Speichers, die Betriebskosten, der Systemwirkungsgrad, die Entladetiefe, die Anzahl der Vollzyklen pro Jahr sowie der Strombezugspreis.

Manche Aspekte eines Batteriespeichers lassen sich schwer in eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbeziehen. So kann beispielsweise im Falle eines Stromausfalles ein Batteriespeicher mit Notstromfunktion die elektrische Versorgung im Haus

aufrechterhalten. Bei PV-Anlagen, die wie oben beschrieben als Inselssysteme ausgeführt sind, verhelfen Batteriespeicher zu einer deutlichen Erweiterung der Zeit, in der Strom zur Verfügung steht.

Exkurs

Ein positiver Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsberechnung eines Stromspeichers im industriellen oder gewerblichen Einsatz ist gegeben, wenn neben dem Preis für die bezogenen Kilowattstunden (Arbeitspreis) ein sogenannter Leistungspreis extra ausgewiesen wird. Für dessen Berechnung in Euro je Kilowatt (€/kW) wird die Spitze des Leistungsbedarfs, auch Peak genannt, herangezogen. Je nach Preismodell wird dabei die höchste bezogene Leistung des Jahres oder die eines Monats verwendet. Ein Stromspeicher kann dann zum sogenannten „**Peak Shaving**“ genutzt werden, womit das Kapfen von Leistungsspitzen bezeichnet wird. Bei hohem Leistungsbedarf,

Anschaffung eines Batteriespeichersystems

Die Überlegung, ob ein Batteriespeichersystem angeschafft wird, sollte auf Grundlage von mehreren Kostenvoranschlägen getroffen werden. Ebenso gilt es die Finanzierung und mögliche Fördermittel vorab zu klären. Bei einer Inanspruchnahme von Fördermöglichkeiten muss in der Regel vor einer Auftragserteilung auf den Bewilligungsbescheid oder eine Zustimmung zum Maßnahmenbeginn gewartet werden.

Ausführliche Informationen zu den Kenngrößen von Speichersystemen finden Interessierte in der **C.A.R.M.E.N.-Marktübersicht Batteriespeicher** auf der C.A.R.M.E.N.-Homepage.

also zu „Peak-Zeiten“, wird die gespeicherte Sonnenenergie aus dem Batteriespeicher entnommen, statt den Strom aus dem Netz zu beziehen. Dabei ist die richtige Dimensionierung des Speichers von wesentlicher Bedeutung. Je genauer das Lastprofil des Stromverbrauchs bekannt und prognostizierbar ist, desto besser kann das System ausgelegt werden. Da der Leistungspreis durch Peak Shaving deutlich reduziert werden kann, ist im Idealfall eine Amortisation bereits in wenigen Jahren möglich.

Eigenverbrauchsoptimierung

Neben dem Be- und Entladen von Batteriespeichern gibt es im Heimbereich weitere Möglichkeiten, um eine **Erhöhung des Eigenverbrauchs** des erzeugten PV-Stroms zu erreichen:

Durch den Einsatz von **Energiemanagementsystemen (EMS)** können die Einschaltzeiten von elektrischen Geräten mit der Produktion von Solarstrom zusammengebracht werden. EMS erfassen die Stromerzeugung der PV-Anlage sowie den Stromverbrauch im Haushalt und erkennen so, wann Überschüsse aus der Anlage vorhanden sind. Über die Visualisierung wird diese Information an die Anlagenbetreibenden übermittelt und diese können gezielt Verbraucher zur Erhöhung des Eigenverbrauchs zuschalten (z. B. Waschmaschine, Spülmaschine, ...). Bestimmte kompatible Geräte können in ein EMS eingebunden werden, sodass diese automatisch eingeschaltet bzw. geregelt werden. Ein mögliches Beispiel hierfür ist eine Wallbox, deren Ladeleistung durch das EMS dynamisch den Stromüberschüssen aus der PV-Anlage angepasst wird.

Aus wirtschaftlichen Gründen kann es interessant sein, selbst produzierten Photovoltaikstrom für die Erzeugung von Wärme einzusetzen. Dieser Prozess wird als **Power-to-Heat (PtH)** bezeichnet und die damit einhergehende Verbindung von Strom- und Wärmeerzeugung als Sektorenkopplung.



Abb. 6: Reinigung einer PV-Anlage mit einer Bürstenwalze

- Eine einfache Möglichkeit besteht darin, einen Heizstab in den bestehenden Warmwasserpufferspeicher einzuschrauben (entsprechende Muffen sind häufig vorhanden). Ein regelbarer Heizstab ermöglicht es, die Leistungsaufnahme abhängig von der Stromlieferung durch die PV-Anlage zu variieren.
- Eine weitaus effizientere Variante der PtH-Anwendung im Eigenheim stellt die Kombination einer PV-Anlage mit einer Wärmepumpe dar. Dadurch kann hochwertige elektrische Energie genutzt werden, um ein Mehrfaches an Umweltwärme aus Luft, Erde oder Grundwasser bereitzustellen.
- Um die Kommunikation zwischen der PV-Anlage und der Wärmepumpenheizung zu ermöglichen, stellen viele Hersteller die Wärmepumpen mit einer Smart-Grid-Ready-Funktionalität („SG-ready“) aus.

Wenn neben einer PV-Anlage auch ein **Elektrofahrzeug** im Haushalt vorhanden ist, kann PV-Strom direkt in den Speicher des E-Mobils fließen, anstatt in das öffentliche Netz eingespeist zu werden.

Je nachdem, wann das Fahrzeug mit der PV-Anlage verbunden wer-

den kann und wie hoch die Fahrleistung ist, reichen die im E-Mobil gespeicherten Solarstrommengen für den Alltagsbetrieb komplett aus.

Gegebenenfalls kann das Laden des Fahrzeugs auch zum Wochenende hin verschoben werden. Für eine jährliche Fahrleistung von 10.000 km wird eine Energiemenge von 1.500 bis 2.000 kWh benötigt. In Zukunft wird es auch möglich sein, die Batterie von Elektroautos mittels sogenannter bidirektionaler Anbindung als Stromspeicher für die Stromversorgung des Hauses zu nutzen oder sogar zur Einspeisung in das Stromnetz (Vehicle to Home bzw. Vehicle to Grid).

Betrieb der Photovoltaikanlage

Während die Anlage und deren Installation einen erheblichen Investitionsaufwand darstellen, verursacht der laufende Betrieb einen relativ geringen Aufwand. Allerdings können Verschattungen, Verschmutzungen und Defekte der Anlage zu erheblichen Stromertragseinbußen führen. Nach Möglichkeit sollten deshalb regelmäßig Wartungen und nach Bedarf Reinigungs- und Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Zeitraum	Maßnahme
Täglich	Kontrolle der Betriebsanzeigen auf Fehlermeldungen
Monatlich	Erfassung der Zählerstände und Vergleich der Erträge zum Vormonat bzw. zum Vorjahreswert zur frühzeitigen Erkennung von aufgetretenen Fehlern
Monatlich/ mehrmals im Jahr/ nach starken Wetterereignissen	Sichtkontrolle aller Anlagenkomponenten auf offensichtliche Mängel wie lose Kabel, Schäden an der Kabelisolierung, Glasbruch oder Rahmenschäden am Modul
Spätestens alle 4 Jahre	Überprüfung der Gesamtanlage, z. B. über Isolationsprüfung, Strangprüfung, Kennlinienmessung und Thermografie

Tab. 1: Welche Wartungsarbeiten sind wann erforderlich?

Reinigung

Verschmutzungen auf Photovoltaikanlagen entstehen durch:

- Blätter, Baumnadeln oder Blütenpollen,
- Schmutzpartikel aus der Luft,
- Vogelkot, der außerdem die Moduloberfläche angreifen kann, sowie
- Moose oder Flechten.

Grundsätzlich tritt bei ausreichend geneigten Modulen durch die Witterung ein gewisser Selbstreinigungseffekt ein. Leichte Verschmutzungen werden durch Regen und Schnee von den Solarmodulen weggespült. Sollte die Selbstreinigung allerdings nicht wie gewünscht eintreten, müssen die Verschmutzungen durch eine manuelle Reinigung entfernt werden. Der Reinigungsaufwand

sollte dabei gegen die beobachtete Ertragsminderung abgewogen werden.

Eine sachgerechte Reinigung sollte mit entkalktem, temperiertem Wasser, einer weichen Bürste und am besten ohne den Einsatz von Reinigungsmitteln erfolgen. Generell empfiehlt es sich, für die Solarmodulreinigung einen Fachbetrieb zu Rate zu ziehen. So verhindert man potenzielle Modulbeschädigungen und mindert die Unfallgefahr bei der Reinigung.

Wartung und Instandhaltung

Um über die lange Lebensdauer der PV-Module den bestmöglichen Stromertrag zu erzielen, aber auch, um die Betriebssicherheit der gesamten Anlage zu gewährleisten und den Versicherungsschutz nicht zu riskie-

ren, sind darüber hinaus Wartungen und Instandhaltungen unerlässlich. Während kleinere Kontrollen auch von den Anlagenbetreibern selbst durchgeführt werden können, muss für die Prüfung der Gesamtanlage und Behebung elektrischer Mängel eine Fachkraft hinzugezogen werden. Die Fernüberwachung, Wartung und Instandhaltung können ebenfalls mit einem Fachbetrieb vertraglich für einen längeren Zeitraum vereinbart werden.

Ausgeförderte Anlagen: Weiterbetrieb, Rückbau und Recycling

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) räumt Strom aus regenerativen Energiequellen und somit auch aus PV-Anlagen einen Vorrang bei der Einspeisung in das öffentliche Stromnetz gegenüber konventionel-

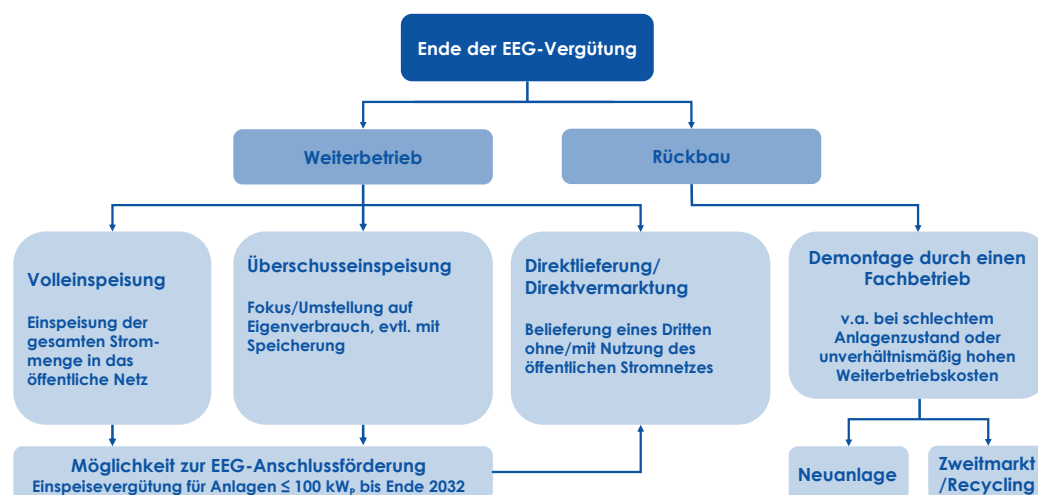


Abb. 7: Überblick über Möglichkeiten für ausgeförderte Anlagen

lem Strom ein. Außerdem erhalten PV-Anlagen über einen Zeitraum von 20 Jahren (zuzüglich des restlichen Inbetriebnahmejahres) für den eingespeisten Strom eine feste Vergütung. Nach diesem Zeitraum handelt es sich bei diesen, auch Ü20- oder Post-EEG- genannten ausgeförderten Anlagen, weiter um Anlagen im Sinne des EEGs mit einhergehenden Rechten und Pflichten. Es existiert jedoch eine Anschlussregelung für ausgeförderte Anlagen bis 100 kWp. Für den Weiterbetrieb einer ausgeförderten Anlage empfiehlt es sich, den Zustand der PV-Anlage dahingehend zu erfassen und zu bewerten, ob die Anlage aus technischer Sicht noch für mehrere Jahre sinnvoll weiter betrieben werden kann. Unverhältnismäßig teure Reparaturen lassen einen weiteren wirtschaftlichen Betrieb nicht zu. Betriebskosten wie etwa Versicherungskonditionen, Zählergebühr und mögliche Umrüstkosten sind ebenfalls in diese Überlegungen miteinzubeziehen.

Eine Möglichkeit für den Weiterbetrieb wäre, den gesamten erzeugten Strom weiterhin in das öffentliche Stromnetz einzuspeisen. Die Anlagenbetreibenden erhalten dafür die sogenannte „Anschlussvergütung“ für ausgeförderte Anlagen. Die Vergütungshöhe wird in Abhängigkeit von den Börsenstrompreisen jährlich neu bestimmt und lag im Jahr 2023 bei 7,2 ct/kWh. Diese Regelung ist vorerst bis Ende 2032 begrenzt. PV-Anlagen gehen nach Ablauf des 20-jährigen EEG-Förderzeitraums automatisch in diese Anschlussvariante über, sollten die Anlagenbetreibenden keine gegenteilige Meldung beim Netzbetreiber einreichen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die ausgeförderte Volleinspeiseanlage auf eine Überschusseinspeiseanlage mit Eigenverbrauch umzurüsten. Für den in das Netz eingespeisten Überschussstrom erhalten die Anlagenbetreibenden die Anschlussvergütung, analog zu einer ausgeförderten Volleinspeiseanlage. Zu beachten ist, dass bei der Umstellung auf Eigenverbrauch-Umrüstkosten zu erwarten sind. Ist

die elektrische Anlage des Hauses schon älter, muss gegebenenfalls ein Überspannungsschutz eingebaut oder der Sicherungskasten getauscht werden. Hier sollten die Umrüstkosten mit den zu erwartenden Einsparungen durch vermiedene Strombezugskosten wirtschaftlich abgeglichen werden. Abbildung 7 gibt einen Überblick, wie der Weiterbetrieb von ausgeförderten Anlagen umgesetzt werden kann.

Sollte von der Anschlussvergütung nicht Gebrauch gemacht werden können oder wollen, kann der Strom auch an ein Direktvermarktungsunternehmen verkauft werden, welches den Strom anschließend vermarktet. Hierbei sind dafür nötige Umrüst- und fällige Vermarktungskosten zu beachten.

Eine weitere Möglichkeit zur Stromnutzung ohne EEG-Vergütung ist die Direktlieferung an Dritte, bei der ein individueller Strompreis ausgehandelt wird und der Strom nur über eigene Leitungen geleitet wird. In diesem Fall müssen außer den relevanten Steuern keine Netzentgelte oder netznutzungsabhängige Umlagen für den gelieferten PV-Strom gezahlt werden. Ein Beispiel für ein solches Lieferverhältnis sind Mieterstromkonzepte, bei denen die Anlagenbetreibenden Mietparteien mit Strom versorgen. Man sollte beachten, dass die Belieferung von Letztverbrauchenden verschiedene energierechtliche Aufgaben und Pflichten mit sich bringt.

Sollte ein Weiterbetrieb der PV-Anlage wirtschaftlich uninteressant oder aus technischen Gründen nicht möglich sein, ist die Demontage durch einen Fachbetrieb eine Option. Die Anlage sollte dann entweder dem Recycling oder dem Zweitmarkt zugeführt werden. Die nun freigewordene Fläche kann (nach vorheriger Überprüfung des Dachzustands) für eine neue PV-Anlage genutzt werden. Aufgrund der technischen Weiterentwicklung ist es möglich, bei gleicher Dachfläche eine Anlage mit signifikant höherer Leistung zu deutlich geringeren Kosten zu realisieren. Mit einer Neuanlage kann erneut eine 20-jährige EEG-Einspeisevergütung in Anspruch genommen werden.

Gut zu wissen!

Früher wurden häufig Cadmium-Tellurid-Module (CdTe-Module) eingesetzt, deren Bestandteile als umweltschädlich gelten. Der Rückgewinnungserfolg beträgt für das Glas etwa 90 Prozent und für Cadmium und Tellurid etwa 95 Prozent. Beim toxischen Cadmium sind eine hohe Rückgewinnung und ein möglichst geschlossener Rohstoffkreislauf wesentlich, um negative Einflüsse auf die Umwelt zu verhindern. Mittlerweile wurde diese Modultechnologie allerdings praktisch vollständig durch Silizium-Module abgelöst.

Für Photovoltaik-Anlagen existieren mittlerweile diverse **Zweitmarkt-Plattformen**, über die noch funktionsfähige Anlagen, bzw. PV-Module unkompliziert verkauft werden können. Der Zweitmarkt bietet PV-Anlagenbetreibenden die Möglichkeit, z. B. bei Defekten oder Diebstahl ältere Modultypen oder nicht mehr lieferbare Module zu ersetzen.

Recycling von PV-Modulen

Ist die Anlage nicht für einen Weiterbetrieb oder den Zweitmarkt geeignet, muss sie fachgerecht entsorgt werden. Die Pflicht zu einer sachgerechten Entsorgung von Modulen liegt laut der europäischen Richtlinie zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten, kurz WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment), bei den Herstellern und Importeuren. Vorgeschrieben ist allerdings nicht die Abholung bei den Endkunden, wodurch diese für die Demontage der Anlage und die Anlieferung der Module an Sammelstellen, z. B. an Wertstoffhöfen, zuständig sind. Die Entsorgung erfolgt nach den Vorgaben des Elektrozugesetzes (Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten). Zu recycelnde PV-Module können in haushaltsüblichen Mengen kostenfrei an geeigneten Sammelstellen abgegeben werden. Eine solche Sammelstelle kann über den Handel oder den öffentlich-rechtlichen

Recycling von Batteriespeichern

- Blei: Für Blei-Batterien existieren bereits aus der Automobilindustrie stammende ausgereifte Aufbereitungs- und Recyclingmöglichkeiten.
- Lithium: Beim Recycling von Lithium-Batteriespeichern kommen verschiedene physikalische und chemische Verfahren zum Einsatz. Dadurch können eingesetzte Wertmetalle wie Lithium, Mangan, Nickel, Cobalt oder Kupfer fast vollständig zurückgewonnen werden. Industrielle Prozesse zur Wiederverwendung der Elektrolyte befinden sich aktuell in der Grundlagenforschung.
- Redox-Flow: Die Elektrolyte von Redox-Flow-Batterien können vollständig regeneriert werden, ohne Metallsalz-Verluste in Kauf nehmen zu müssen. Diese Recyclingprozesse befinden sich aber aktuell noch weitgehend in der Entwicklung.

Entsorgungsträger (örE) in Erfahrung gebracht werden. Alle PV-Modulhersteller müssen ihre Produkte mittlerweile vor Inverkehrbringen bei der Stiftung „ear“ (Stiftung Elektro-Altgeräte Register) registrieren und eine insolvenz sichere Garantie für die Entsorgung leisten.

Durch **Recycling von PV-Modulen** können wertvolle Materialien zurückgewonnen werden, was zur Schonung der teils knappen Ressourcen beiträgt.

Die Masse eines PV-Moduls wird maßgeblich durch das verwendete Glas bestimmt. Je nach Modultyp ergibt sich ein Glas-Anteil von 65 bis 95 Prozent, ein Aluminium-Anteil von 10 bis 12 Prozent, der Silizium-Anteil beträgt typischerweise 3 bis 4 Prozent und etwa 1 bis 11 Prozent sind Kunststoffe. Zu etwa einem Prozent findet man noch weitere Materialien wie Gold, Blei, Silber und Kupfer.

Der Recyclingprozess besteht im Wesentlichen aus drei Schritten:

- Schreddern und Brechen,
- Leichtstofftrennung sowie
- Metallsortierung.

Kunststoffteile, Kabelisolierung und Folien werden thermisch verwertet.

Damit ein Recycling nicht nur technisch möglich, sondern auch wirtschaftlich sinnvoll durchzuführen ist, werden ausreichend hohe Rücklaufmengen benötigt. Dies gilt nicht nur für das Recycling von PV-Modulen, sondern auch für das von Batteriespeichern.

Ausblick

Strom aus Photovoltaik wird aus Klimaschutzgründen in der Zukunft einen wesentlichen Teil zu unserer Energieversorgung beitragen, auch wenn es gelänge, den Energieverbrauch deutlich zu reduzieren.

Der Großteil des Zubaus von PV-Anlagen sollte auf Dächern und bereits versiegelten Flächen erfolgen, um Eingriffe in Natur und Landschaftsbild minimal zu halten. Dennoch stellen PV-Freiflächenanlagen durch Skaleneffekte und den einfachen Bau die Realisierungsform mit den geringsten spezifischen Kosten dar. Schon leicht umsetzbare Maßnahmen genügen, damit Freiflächenanlagen einen positiven Einfluss auf die Biodiversität von Landschaften haben.

Der Beitrag von PV-Anlagen für unser Energiesystem kann noch gesteigert werden, wenn es gelingt, wirtschaftlich sinnvoll und ökologisch tragfähig Energiespeicher zur Speicherung des Stroms in großer Zahl zu installieren. Mit einer PV-Anlage auf dem eigenen Dach kann aber auch jeder Haushalt nicht nur effektiv zur Energiewende beitragen, sondern nebenbei noch die Stromrechnung reduzieren.

Quellen

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Häufig gestellte Fragen rund um Smart Meter. Abrufbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/FAQ/Smart-Meter/faq-smart-meter.html> (letzter Abruf 09.11.2020).
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2024): BDEW-Strompreisanalyse Juli 2024. Abrufbar unter: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/> (letzter Abruf: 20.09.2024).
- Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-Solar) (2016): Photovoltaik-Preismonitor Deutschland. Abrufbar unter: <https://www.solarwirtschaft.de/presse/marktdaten/> (letzter Abruf: 09.11.2020).
- Deutscher Wetterdienst (o. J.): Globalstrahlungskarten, Monats- und Jahressummen. Abrufbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_su.html (letzter Abruf: 09.11.2020).
- Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Fraunhofer ISE (2024): Öffentliche Stromerzeugung 2024: Deutscher Strommix so sauber wie nie. Abrufbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2025/oeffentliche-stromerzeugung-2024-deutscher-strommix-so-sauber-wie-nie.html> (letzter Abruf: 31.03.2025).
- Musterhaus.net GmbH (2024): Preisentwicklung Photovoltaik: Preise & Daten im Überblick 2024. Abrufbar unter <https://gruenes.haus/photovoltaik-preisentwicklung> (letzter Abruf: 20.09.2024).
- scon-marketing GmbH (2024): Das sind die Kosten einer Photovoltaikanlage in 2024. Abrufbar unter: <https://www.solaranlagen-portal.de/photovoltaik/preis-solar-kosten.html#!> (letzter Abruf: 20.09.2024).
- ub.de Fachwissen GmbH (2023): Preisentwicklung für Photovoltaikanlagen. Abrufbar unter: <https://www.photovoltaik.org/wirtschaftlichkeit/preisentwicklung> (letzter Abruf: 20.09.2024).

Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.



C.A.R.M.E.N. e.V., das Centrale Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk, wurde am 6. Juli 1992 in Rimpf bei Würzburg durch den Freistaat Bayern gegründet. Anfang 2001 wurde der eingetragene Verein Teil des Kompetenzzentrums für Nachwachsende Rohstoffe (KoNaRo) mit Sitz in Straubing. Seit 2012 unterstützt C.A.R.M.E.N. e.V. zudem aktiv die Umsetzung der Ziele der Energiewende.

Der von über 100 Mitgliedern getragene Verein beschäftigt aktuell 50 Mitarbeitende. Diese befassen sich mit den Themen biogene Festbrennstoffe, Biogas und übrige Erneuerbare Energien sowie Mobilität, Stoffliche Nutzung, Bioökonomie, Energieeffizienz, Akzeptanz und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Einbindung in das KoNaRo bietet günstige Voraussetzungen für die Arbeit des Netzwerks. C.A.R.M.E.N. e.V. ist zwar zunächst eine bayerische Einrichtung, doch die Aktivitäten reichen längst über Landes- und Bundesgrenzen hinaus.



Dienstleistungen

C.A.R.M.E.N. e.V. bietet unterschiedliche Dienstleistungen für land- und forstwirtschaftlich Beschäftigte, Kommunen und die öffentliche Hand, Forschung, Unternehmen sowie Privatpersonen an. Die Beschäftigten tragen mit ihrem Fachwissen und ihren Erfahrungen zur Umsetzung und zum Gelingen verschiedenster Vorhaben bei. Die Erstinformation ist eine kostenfreie Dienstleistung des Netzwerks. Auch für Veranstaltungen Dritter stehen die Mitarbeitenden als Referenten und Kontakt u. a. rund um die Themen Bioenergie, Solarenergie, Windenergie, Stromspeicherung, Energieeffizienz, Akzeptanzmanagement und stoffliche Nutzung zur Verfügung.

- Unabhängige Beratung und Projektbegleitung:
Einschätzungen zur Wirtschaftlichkeit, fachliche und methodische Unterstützung und Optimierung von Projekten, z. B. bei der Realisierung von Energiekonzepten in Kommunen
- Umfangreiche Publikationen und Informationsangebote:
Broschüren, Pressemitteilungen, Fachartikel, Tagungsbände sowie Internetpräsenz mit aktuellen Informationen, Branchenverzeichnissen, Terminkalender u.v.a.
- Informationsveranstaltungen und Fachtagungen
- Messeauftritte und -beteiligungen, Ausstellungen, Führungen, Exkursionen



C.A.R.M.E.N.

Herausgeber: C.A.R.M.E.N. e.V.,
Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk
Schulgasse 18 · 94315 Straubing
Tel.: 09421 960 300 · Fax -333
E-Mail: contact@carmen-ev.de
Internet: www.carmen-ev.de
V.i.S.d.P.: Edmund Langer
Text und Konzeption:
C.A.R.M.E.N. e.V.
Bildnachweis: C.A.R.M.E.N. e.V.
Stand: April 2025