

Handbuch zu Photovoltaik- Anlagen in der Steine- und Erden-Industrie



© Dominik Ketz, Bezirksregierung Köln

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Impressum

Autor:innen	Julian Lassen, Johanna Bauer, Patrick Boscher, Stefan Schmid, Bernd Lottermoser
Herausgeber	MRE – Institute of Mineral Resources Engineering RWTH Aachen University Wüllnerstr. 2 52062 Aachen www.mre.rwth-aachen.de
Kontakt	lassen@mre.rwth-aachen.de
Förderung	Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) An der Bornau 2 49090 Osnabrück www.dbu.de
Gestaltung	Baumanns Medienkonzepte Inh. Jens Baumanns www.baumanns-medienkonzepte.de
Stand	September 2025
Danksagung	Unser besonderer Dank gilt den mitwirkenden Unternehmen der Steine- und Erden-Industrie sowie dem Bundesverband Mineralische Rohstoffe e. V. (MIRO) für den offenen Dialog, wertvolle Praxiseinblicke und die konstruktive Zusammenarbeit. Ihre Erfahrungen und Anregungen haben maßgeblich zur praxisnahen Ausgestaltung dieses Handbuchs beigetragen. Ebenso danken wir Niklas Bender, Maja Fehr, Daniel Kreutz, Hannah Neubauer und Alexander Reiners, die mit ihren Abschlussarbeiten wertvolle Beiträge zu diesem Handbuch und Projekt geleistet haben.



Hinweis zur Rechtsverbindlichkeit

Das vorliegende Handbuch stellt eine unverbindliche Informations- und Orientierungshilfe zur Integration von Photovoltaikanlagen in Unternehmen der Steine- und Erden-Industrie dar. Es wurde mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt, erhebt jedoch weder Anspruch auf Vollständigkeit noch auf rechtliche Verbindlichkeit. Alle technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Inhalte dienen der allgemeinen Unterstützung und ersetzen keine individuelle Beratung durch fachkundige Stellen, insbesondere keine rechtliche oder planerische Einzelfallberatung. Die jeweiligen gesetzlichen, behördlichen und normativen Anforderungen sind eigenverantwortlich zu prüfen und zu beachten. Die Herausgeber übernehmen keine Gewähr für die Aktualität, Richtigkeit oder Vollständigkeit der bereitgestellten Informationen sowie keine Haftung für etwaige Schäden, die aus der Nutzung dieses Handbuchs resultieren.

Copyright © 2025. Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil oder Element dieses Dokuments darf ohne schriftliche Genehmigung des Institute of Mineral Resources Engineering der RWTH Aachen University in irgendeiner Form reproduziert, elektronisch gespeichert oder übertragen werden.

Vorwort

Sehr geehrte Unternehmerinnen und Unternehmer der Steine- und Erden-Industrie,

die Energiewende stellt unsere Wirtschaft vor große Herausforderungen – aber auch vor enorme Chancen. Insbesondere in energieintensiven Industrien wie der Steine- und Erden-Industrie kann die Eigenversorgung mit Strom aus Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) nicht nur zur Kostenreduktion beitragen, sondern auch ein klares Zeichen für unternehmerische Verantwortung und nachhaltiges Handeln setzen.

Im Rahmen der Energiewende strebt Deutschland an, bis 2045 klimaneutral zu werden. Ein wesentlicher Baustein zur Erreichung dieser Ziele ist der massive Ausbau von PV-Anlagen. Um die PV-Kapazitäten schnell auszubauen, ist die Erschließung bisher ungenutzter Flächenpotenziale von großer Bedeutung für eine umwelt- und sozialverträgliche Energiewende.

Die deutsche Steine- und Erden-Industrie umfasst bundesweit etwa 3.400 Betriebe und fördert jährlich rund 560 Millionen Tonnen Primärrohstoffe wie Sand, Kies und gebrochene Natursteine. Viele dieser Betriebe verfügen über Flächen wie Sohlen, Böschungen, Förderbänder, Anlagendächer, Halden und Seen, die sich potenziell für die Installation von Freiflächen-, Floating- und Sonder-PV-Anlagen eignen. Die Integration von PV-Anlagen kann für die Betreiber nicht nur wirtschaftlich attraktiv sein, sondern auch zur Einsparung von CO₂-Emissionen, zum Umwelt- und Artenschutz sowie zur Förderung der Biodiversität beitragen. PV-Anlagen bieten das Potenzial, die Eigenstromversorgung von Produktionsstandorten zu stärken, Energiekosten langfristig zu senken und die CO₂-Bilanz signifikant zu verbessern.

Das vorliegende Handbuch entstand im Rahmen des Forschungsprojekts PVSEnergie – Praxisnaher Leitfaden für die Integration von Photovoltaik-Anlagen in der deutschen Steine- und Erdenindustrie, das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wurde (Aktenzeichen 39201/01). Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit den Partnern SINN Power GmbH und Baresel GmbH & Co. KG Stein und Kieswerke durchgeführt.

Mit diesem Handbuch möchten wir Sie gezielt dabei unterstützen, das Potenzial der PV für Ihr Unternehmen zu erschließen. Das Handbuch richtet sich an Entscheider und Praktiker der Steine- und Erden-Industrie, die eine fundierte Grundlage für die Integration von PV-Anlagen auf Betriebsgebäuden, Freiflächen und Anlagen suchen.

Das Handbuch gliedert sich in sechs praxisorientierte Kapitel: Im Abschnitt Planung und Auslegung erhalten Sie Hinweise zur optimalen Dimensionierung und Standortwahl. Rechtliche Aspekte helfen Ihnen dabei, Genehmigungsprozesse und regulatorische Anforderungen besser zu verstehen. Unter Wirtschaftlichkeit zeigen wir Ihnen, welche Kosten durch PV-Anlagen entstehen und wie sich diese amortisieren. Das Kapitel Betrieb und Rückbau beleuchtet Themen wie Wartung, Monitoring sowie den Umgang mit dem Lebensende von Anlagen. Abschließend geht es im Bereich Umweltaspekte um die ökologischen Wirkungen sowie um Chancen für die Nachhaltigkeitsbilanz Ihres Unternehmens. Ein Systemüberblick liefert Ihnen die technischen Grundlagen und zeigt auf, welche PV-Konzepte für die besonderen Rahmenbedingungen der Steine- und Erden-Industrie besonders geeignet sind.

Ziel ist es, Ihnen eine klare, verständliche und umsetzungsorientierte Grundlage zu bieten – damit Sie die richtigen Entscheidungen für Ihr Unternehmen treffen können. Wir laden Sie ein, dieses Handbuch als Impuls und Arbeitsgrundlage zu nutzen – für eine wirtschaftlich starke sowie klimafreundliche Zukunft Ihrer Branche.

Mit freundlichem Glückauf!

Julian Lassen

MRE – Institute of Mineral Resources Engineering der RWTH Aachen University

Wüllnerstr. 2, 52062 Aachen, Deutschland

www.mre.rwth-aachen.de



Inhalt

1. Planung und Auslegung	6 – 11
Dimensionierung	6
Flächen und Flächenbedarf	8
Statik und Standsicherheit	10
Netzanschluss	10
Energiespeicher	11
2. Rechtliches	12 – 14
Bauleitplanung und Baurecht	12
Stromsteuerliche Pflichten	14
3. Wirtschaftlichkeit	15 – 17
Kosten	15
Vermarktung	16
Betreibermodelle	17
4. Betrieb und Rückbau	18 – 19
Wartung	18
Staub und Reinigung	19
Rückbau	19
5. Umweltaspekte	20 – 22
Ökobilanz	20
Ökologische Gestaltung	21
Vereinbarkeit mit Rekultivierung	22
6. Systemüberblick und Technik	23 – 25
Modultypen	23
Komponenten	23
7. Check-Liste zur Planung und Umsetzung von Photovoltaikanlagen	26 – 27
8. Anhang	28 – 30
Landesbauordnungen der einzelnen Bundesländer	28
Solarkataster der einzelnen Bundesländer	29
Weiterführende Informationsangebote	30



© SINNpower

1. Planung und Auslegung

Dimensionierung

Eine zentrale Rolle zu Beginn der Planung stellt die Dimensionierung der PV-Anlage dar. Die Dimensionierung einer PV-Anlage zielt in der Regel darauf ab, einen Anteil der Grundlast des Betriebes zu decken. Anhand der Grundlast kann die erforderliche Nennleistung der PV-Anlage bestimmt werden.

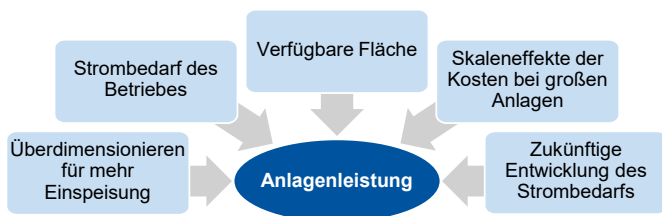


Abb. 1: Einflussfaktoren auf die Wahl der Anlagenleistung

Deckung der Grundlast

Die Grundlast kann als minimale elektrische Leistung, die während eines gängigen Produktionstages konstant benötigt wird, beschrieben werden. Sie entsteht durch den Betrieb von Anlagen, die über den Produktionszeitraum mit konstanter Leistung laufen, beispielsweise Förderbänder, Brecher, Sortier- und Klassierungsanlagen. Eine Analyse der Verbrauchsdaten ermöglicht es die Grundlast zu ermitteln.

Abbildung 2 zeigt einen beispielhaften Vergleich zwischen dem Leistungsbedarf eines Kalksteinbruchs und der Leistung unterschiedlich ausgerichteter PV-Anlagen. Um eine hohe Eigenversorgung zu erreichen, sollten Erzeugung und Verbrauch möglichst übereinstimmen. Im Gewinnungsbetrieb wird die Grundlast von morgens bis nachmittags abgefragt, während die höchste Sonnen-

einstrahlung mittags auftritt. Durch eine Ost-West-Ausrichtung der Module kann der Verlauf der Einspeisung an den Strombedarf und die Grundlast angepasst werden: morgens und nachmittags erfolgt eine höhere Einspeisung, während sie mittags geringer ausfällt als bei einer Süd-Ausrichtung.

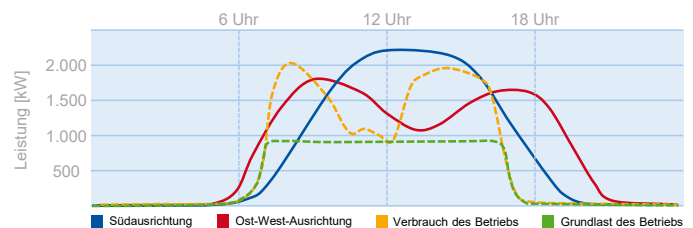


Abb. 2: Vergleich der beispielhaften Erzeugung einer 3.500 kW-PV-Anlage mit Süd- oder Ost-West-Ausrichtung

Das Ziel der Dimensionierung einer PV-Anlage ist, die Grundlast des Betriebs zu decken, während Lastspitzen weiter aus dem Stromnetz versorgt werden.

Nennleistung

Die Nennleistung (Spitzenleistung) ist die maximale Leistung, die eine PV-Anlage unter idealen Bedingungen erzeugen kann. Sie wird in Kilowatt-peak (kWp) oder Megawatt-peak (MWp) angegeben. Die erforderliche Nennleistung der PV-Anlage hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie dem Strombedarf, der verfügbaren Dach- oder Freifläche sowie dem verfügbaren Investitionsbudget.

Überdimensionierung

Alternativ besteht die Möglichkeit, die PV-Anlage auch bewusst größer als die Grundlast zu dimensionieren. Überschüssiger Strom kann beispielsweise über einen Stromliefervertrag oder im Rahmen einer gesetzlichen Einspeisevergütung zu einem festen Preis verkauft werden. Zudem können Energiespeicher eingesetzt werden, um Lastspitzen abzdämpfen.

„Eine überdimensionierte Anlage kann auch aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhaft sein, da bei der Beschaffung und Montage Skaleneffekte genutzt werden können.“

Patrick Boscher, SINN Power GmbH

Zukünftige Entwicklungen

Bei der Dimensionierung sollten auch zukünftige Entwicklungen im Betrieb berücksichtigt werden. Relevant ist besonders die Elektrifizierung von Maschinen oder die Errichtung von neuen elektrischen Anlagen mit hohem Verbrauch. Ist eine Erhöhung des Strombedarfs in der Zukunft abzusehen, sollte die PV-Anlage schon jetzt größer geplant werden.

Ertrag

Im Vergleich zur Nennleistung beschreibt der Ertrag die tatsächliche Strommenge, die eine PV-Anlage über einen bestimmten Zeitraum produziert. Der Ertrag wird in Kilowattstunden (kWh) gemessen und wird durch verschiedene Faktoren wie beispielsweise Einstrahlung, Ausrichtung, Verschattung, Verschmutzung oder Alterung beeinflusst.

Einstrahlung

Auf regionaler Ebene ist der Ertrag stark von der eingestrahnten Sonnenenergiemenge abhängig. Diese unterliegt räumlichen Schwankungen. In Deutschland sind jedoch überall Mindest-Globalstrahlungswerte von jährlich über 1.000 kWh/m² zu erwarten. Für eine präzise Bewertung der Einstrahlung im Zuge der Auslegung einer PV-Anlage eignen sich die Solarkataster der Bundesländer, die eine detailliertere Aufschlüsselung der Einstrahlungswerte bereitstellen. Die Solarkataster können auf den Websites der Bundesländer eingesehen werden.

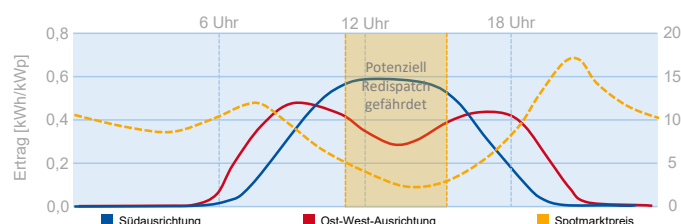


Abb. 3: Vergleich der Erzeugung bei Süd- oder Ost-West-Ausrichtung unter Berücksichtigung des Strom-Spotmarktpreises und der Redispatch-Gefahr

Ausrichtung

Die Ausrichtung und Neigung der Module sind besonders auf Anlagenebene entscheidend für den Ertrag. Die maximale Energiemenge kann mit einer Ausrichtung nach Süden und einem Modul-Neigungswinkel von 35 ° erreicht werden. Abweichungen in Ausrichtung oder Neigungswinkels resultieren in Ertragseinbußen. Ein Modul, das nach Osten oder Westen ausgerichtet ist, liefert etwa 5 % weniger Ertrag als ein nach Süden ausgerichtetes Modul mit der gleichen Neigung.

„Eine Ost-West-Ausrichtung kann wirtschaftlich vorteilhaft sein, da sie von höheren Strom-Spotmarktpreisen am Morgen und Abend profitiert und gleichzeitig durch eine flachere Erzeugungskurve die Redispatch-Gefahr zur Mittagszeit verringert.“

Patrick Boscher, SINN Power GmbH

Verschattung

Der Ertrag hängt wesentlich von der solaren Einstrahlung auf die Module ab. Verschattungen sollten daher vermieden werden. Neben den Ertragseinbußen stellen sie aber auch ein Sicherheitsrisiko dar: Wird nur ein Teil des Moduls verschattet, können einzelne Zellen im Modul als Verbraucher agieren, wodurch sich heiße Teilflächen (Hotspots) bilden. Moderne Module werden mittels Optimizern bei Verschattung überbrückt, wodurch Sicherheitsrisiken vermindert werden.

Verschmutzung

Verschmutzungen reduzieren ebenfalls die Einstrahlung auf die Solarzellen. Aufgrund höherer Staubentwicklungen in einem Trockenabbau, ist mit einer stärkeren Verunreinigung der Module zu rechnen. Dieses Thema wird im Abschnitt Staub und Reinigung näher betrachtet.

Alterung

Die Leistung von Solarmodulen nimmt im Laufe ihrer Lebensdauer ab. Dies geschieht z. B. durch Degradation der Metallkontakte oder Vergilben der Kunststoffeinkapselung. Hersteller kristalliner Solarzellen garantieren jedoch oft verbleibende Leistungen von 90 % nach 20 Jahren Betrieb; somit ist der Einfluss der Alterung gering und kalkulierbar.

Flächen und Flächenbedarf

PV-Anlagen sind in ihrer Positionierung flexibel und können auf unterschiedlichen Unterkonstruktionen bzw. Flächen errichtet werden. In Gewinnungsbetrieben können dafür viele verschiedene Flächen zur Verfügung stehen. In Frage kommen in erster Linie:

- **Gebäude** (z. B. Verwaltungsgebäude, Umhausung der Aufbereitungsanlage)
- **Bauliche Anlagen** (z. B. Förderbänder)
- **Freiflächen** (z. B. Halden)
- **Wasserflächen** (z. B. Baggerseen)

 Gebäude	• Auf Verwaltungsgebäuden oder Werkstätten • Schnelle Umsetzung wegen Genehmigungsfreiheit • Genügend verbleibende Dachlast benötigt
 Bauliche Anlagen	• Auf Förderbändern oder Aufbereitungsanlagen • Nicht genehmigungspflichtig • Sonderlösungen erforderlich
 Freiflächen	• Auf Halden oder ausgeschöpften, rekultivierten Arealen • Große Leistungen erzielbar • Aufwändigere Genehmigung
 Wasserflächen	• Auf Baggerseen • Effiziente Flächennutzung • Aufwändigere Genehmigung

Abb. 4: Für PV-Anlagen geeignete Flächen und wichtige Eigenschaften

Technologie	Installierbare Leistung in kWp/m²	Ertrag pro Jahr in kWh/kWp	Amortisationsdauer in Jahren
Dachanlagen	0,12	950 – 1.250	Volleinspeisung: 10 – 12 Eigenverbrauch: 4 – 8
Freiflächen	0,12	1.100 – 1.250	Volleinspeisung: 12 – 15 Eigenverbrauch: 4 – 8
Förderbandüberdachung	1,1	1.000 – 1.100	Volleinspeisung: 12 – 15 Eigenverbrauch: 4 – 8
PV-Zaun	1,5	1.000 – 1.100	Volleinspeisung: 12 – 15 Eigenverbrauch: 4 – 8

Tab. 1: Kennwerte für Leistung, Ertrag und Amortisationsdauer verschiedener PV-Systeme

Auf Gebäuden

PV-Anlagen auf oder an Gebäuden sind in Deutschland grundsätzlich nicht genehmigungspflichtig, weshalb sich die Umsetzung schneller und weniger aufwändig gestaltet als bei Freiflächen- oder schwimmenden PV-Anlagen. Die verfügbare Fläche ist dafür oftmals geringer als bei Freiflächenanlagen oder schwimmenden PV-Anlagen, wodurch unmittelbar auch die Nennleistung und der Energieertrag beeinflusst werden. Die Errichtung von PV-Anlagen auf Dächern ist jedoch bereits seit vielen Jahren Usus, weshalb viele Unternehmen zur Rate gezogen werden können und bereits Lösungen für viele unterschiedlich Dächer zur Verfügung stehen. Ein Hindernis könnte hier eine zu geringe verbleibende Dachlast sein. Daher sollte diese zu Beginn eines jeden Projektes geprüft werden. Ist die zulässige Dachlast nicht ausreichend hoch, können spezielle, besonders leichte PV-Module oder stabilisierende Unterkonstruktionen Abhilfe schaffen.

Auf baulichen Anlagen

Auch Nebenanlagen wie Förderbänder oder Aufbereitungsanlagen, die häufig in Gewinnungsbetrieben vorzufinden sind, können für die Montage von PV-Anlagen verwendet werden. PV-Anlagen an oder auf baulichen, ortsfesten Anlagen sind nicht genehmigungspflichtig, solange der Hauptzweck der Anlage unverändert bleibt. Diese Typen von PV-Anlagen erfordern jedoch eine einzelfallbezogene Planung durch ein Unternehmen für Sonderlösungen, da besondere Herausforderungen bestehen. In Deutschland gibt es bereits Projekte, bei denen Förderbänder an Land und auf dem Wasser mit PV-Modulen überdacht wurden.



<https://www.sinnpower.com/>

Auf Freiflächen

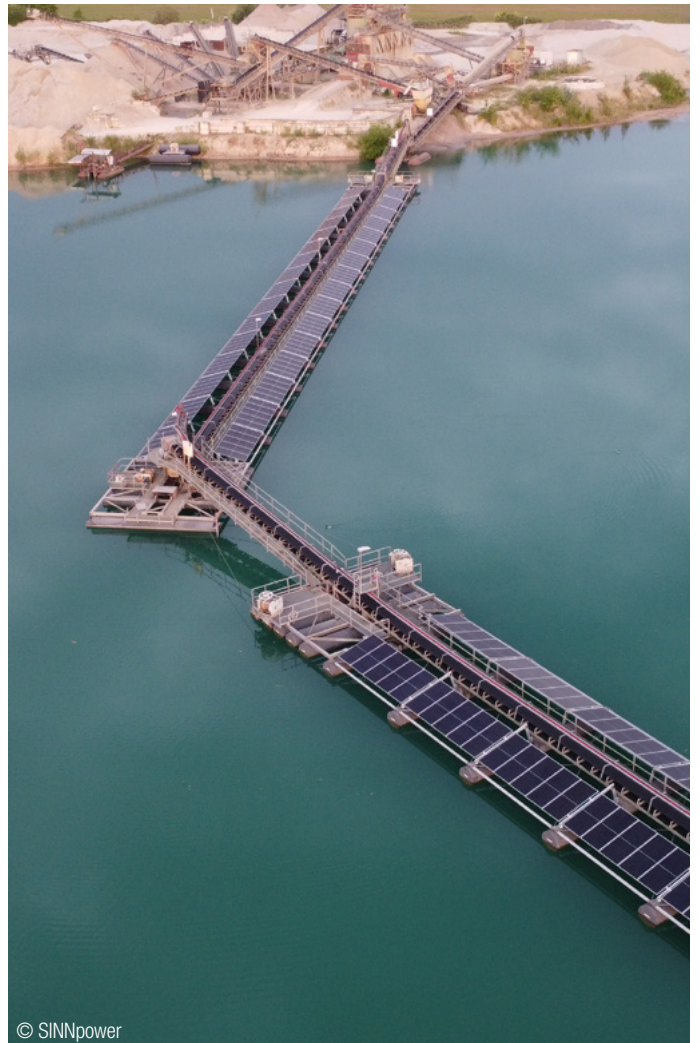
Außerdem ist die Errichtung von PV-Anlagen auf Freiflächen in Gewinnungsbetrieben möglich. Hier eignen sich möglichst große zusammenhängende Flächen, die in Zukunft nicht durch den Abbau verändert werden, z. B. Abraumhalden, die nicht weiter aufgeschüttet werden. Module können außerdem vertikal montiert und als sogenannter PV-Zaun verwendet werden. Wenn große Flächen zur Verfügung stehen, bieten Freiflächenanlagen hohes Potential, einen hohen Grad an Eigenversorgung zu ermöglichen. Außerdem zeichnen sich Freiflächenanlagen durch hohe planerische Flexibilität hinsichtlich Ausrichtung und Modulaufstellung aus. Die Planung und Genehmigung von Freiflächenanlagen ist jedoch aufwändiger und nimmt mehr Zeit in Anspruch. Neben bauplanungsrechtlichen Belangen müssen dabei z. B. auch boden- und artenschutzrechtliche Belange berücksichtigt werden.



Auf Wasserflächen

In Betrieben mit Nassgewinnung bietet sich die Integration von schwimmenden PV-Anlagen an. Diese Anlagen profitieren unter anderem von einer natürlichen Modulrückkühlung und der effizienten Flächennutzung. Die verfügbaren Wasserflächen müssen dafür jedoch ausreichend groß sein und müssen in jedem Fall künstliche Gewässer sein. Nach § 36 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) müssen schwimmende PV-Anlagen einen Abstand von 40 m zum Ufer einhalten und dürfen maximal 15 % der Wasseroberfläche bedecken. Diese Begrenzung bezieht sich ausschließlich auf die aus der Vogelperspektive überdeckte Fläche, weshalb mit vertikal montierten Modulen größere Leistungen realisierbar sind als mit klassischen, schräg aufgeständerten. Schwimmende PV-Anlagen müssen, wie Freiflächenanlagen bauplanungsrechtlich und zusätzlich nach dem WHG genehmigt werden.

Wasserflächen, die Teil einer technischen Anlage sind, unterliegen dem WHG nicht zwingend und können zu mehr als 15 % mit Modulen belegt werden.



Statik und Standsicherheit

Ein weiterer Aspekt bei der Dimensionierung von PV-Anlagen ist die Bewertung der Statik und Standsicherheit des Untergrundes. Durch das Eigengewicht von Modulen und Unterkonstruktion stellt eine PV-Anlage eine zusätzliche Belastung für Dächer, Böden und Anlagen dar.

Dachanlagen

Wird eine PV-Anlage auf einem Bestandsgebäude geplant, ist sicherzustellen, dass die Statik des Gebäudes die zusätzliche Last tragen kann. Dabei muss mit einem zusätzlichen Gewicht von 15 – 20 kg/m² gerechnet werden. Neben dem Eigengewicht der Anlage inklusive Unterkonstruktion sind auch zusätzliche Lasten durch Wind und Schnee zu berücksichtigen. Die verbleibende Dachlast von Bestandsgebäuden kann aus Bauplänen ermittelt oder von einem Statiker geprüft werden.

Freiflächenanlagen

Ähnlich wie bei einem Gebäude muss bei Errichtung einer Freiflächenanlage der Untergrund untersucht werden – insbesondere bei Halden und deren Böschungen. Der Zustand des Bodens sowie die Standsicherheit der Fläche beeinflussen maßgeblich die Ausführung der Unterkonstruktion. Für diese Prüfung müssen Auszugsversuche durchgeführt werden, um Bodenfestigkeit und Kohäsionskräfte bzw. Bodenstatik zu bestimmen. Bei unzureichender Festigkeit könnten Bodenarbeiten erforderlich sein, um den Boden an die Anforderungen anzupassen. Zudem spielt auch der pH-Wert des Bodens eine Rolle: Ein niedriger pH-Wert kann langfristig negative Auswirkungen auf die Haltbarkeit der Unterkonstruktion haben.

Netzanschluss

Eine PV-Anlage muss in der Regel an das öffentliche Stromnetz angeschlossen werden. Die Netzeinspeisung erfolgt bei PV-Anlagen mit einer Leistung von weniger als 135 kWp in das Niederspannungsnetz, während Anlagen mit mehr als 135 kWp über eine Transformationsstation an das Mittelspannungsnetz angeschlossen sind. Energieintensive Gewinnungsbetriebe verfügen normalerweise bereits über eine Transformatorstation für das Mittelspannungsnetz. Falls dies nicht der Fall ist, sollten Aufwand und Kosten für die Installation sorgfältig geprüft werden.

Im Rahmen der Inbetriebnahme muss die PV-Anlage im Marktstammdatenregister registriert werden. Die Bundesnetzagentur stellt dazu auf ihrer Website eine Anleitung bereit.



<https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR>



© Dominik Ketz, Bezirksregierung Köln

Netzanschlussbegehren

Vor der Errichtung einer PV-Anlage ist es erforderlich, den Anschluss an das Netz zu prüfen und genehmigen zu lassen. Dies erfolgt im Rahmen des Netzanschlussbegehrens, das beim zuständigen Netzbetreiber eingereicht wird. Es empfiehlt sich, das Begehren durch ein Fachunternehmen oder den Anlageninstallateur stellen zu lassen, um Verzögerungen aufgrund fehlerhafter oder unvollständiger Angaben zu vermeiden.

Um Verzögerungen durch den Netzbetreiber zu minimieren, gelten Fristen gemäß § 8 Abs. 6 EEG: Der Netzbetreiber muss spätestens acht Wochen nach dem Eingang eines vollständigen Netzanschlussbegehrens einen Zeitplan übermitteln, der die Schritte zum Netzanschluss sowie Informationen zum weiteren Vorgehen beinhaltet. Nach Eingang aller vollständigen Unterlagen prüft der Netzbetreiber die Netzverträglichkeit der PV-Anlage und erteilt eine Einspeisezusage, sofern keine Beanstandungen vorliegen.

Seit Januar 2025 besteht die Möglichkeit, über Portale der Netzbetreiber eine unverbindliche Netzanschlussanfrage zu stellen. Hierfür sind spezifische Angaben zur Anlage erforderlich, wie z. B. das Wechselrichtermodell oder das Zählerkonzept.

Zertifikate

Je nach Anlagengröße sind technische Nachweise über die gesetzes- und netzkonforme Elektroplanung einer PV-Anlage erforderlich. Für Anlagen mit einer installierten Leistung unter 500 kWp oder einer maximalen Einspeiseleistung von unter 270 kW ist kein Anlagenzertifikat notwendig. Hier genügen Einheiten- und Komponentenzertifikate der Hersteller als Nachweis. Für Anlagen, die diese Leistungsgrenzen übertreffen, muss ein vollständiges Anlagenzertifikat erstellt werden, das belegt, dass eine geplante Anlage theoretisch geeignet ist, Strom in das öffentliche Netz einzuspeisen.

Weitere Informationen finden Sie auf der Seite des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/05/20240517-beschleunigter-netzanschluss-von-stromerzeugungs-und-stromspeicheranlagen.html>

Energiespeicher

Energiespeicher werden bei PV-Anlagen eingesetzt, um die erzeugte Energie bedarfsgerecht zu speichern. Bei kleinen PV-Anlagen sind Batteriespeicher seit mehreren Jahren etabliert. Parallel dazu nimmt die Verfügbarkeit von Speichersystemen mit hoher Kapazität und Leistung kontinuierlich zu. Eine umfassende Übersicht über mehr als 350 Speichersysteme, einschließlich technischer Daten, bietet die Datenbank pv magazine.



<https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/grosse-batteriespeicher/#Datenbank>

Je nach Betriebsmodell stehen für die Nutzung des Stroms zwei wesentliche Prinzipien zur Auswahl:

- **Maximieren der Eigenversorgung:**

Momentan nicht benötigter Strom wird in den Speicher gespeist, um die Betriebsprozesse auch in Zeiten geringer oder fehlender Einstrahlung versorgen zu können. Auf diese Weise kann die Eigenversorgung erhöht werden.

- **Peak Shaving:**

Der Strom wird abhängig vom Netzzustand gespeichert, um den Verlauf der eingespeisten Leistung zu glätten und Leistungsspitzen zu vermeiden. Analog können Nachfragespitzen durch die Nutzung von zuvor gespeicherter Energie geglättet werden.



© AdobeStock_401706042

2. Rechtliches

Bauleitplanung und Baurecht

Die rechtlichen Rahmenbedingungen stellen derzeit die größten Herausforderungen für Unternehmen im Bereich des Baues und Betriebs von PV-Anlagen dar. Wichtige Aspekte wie die Bauleitplanung und das Baurecht sind entscheidend für die Erteilung von Genehmigungen. Abbildung 5 zeigt ein Entscheidungsdiagramm zur Zulässigkeit von PV-Anlagen je nach Standort und baurechtlichen Rahmenbedingungen.

Verfahrensfreiheit

Neben dem bundesweit gültigen Baugesetzbuch legen auch die landesweit gültigen Bauordnungen Bestimmungen zum Bau von PV-Anlagen fest. In den Landesbauordnungen wird unter anderem definiert, welche Vorhaben verfahrensfrei sind, folglich nicht genehmigt werden müssen. Gebäudebezogene Anlagen sind in allen Bundesländern verfahrensfrei, für Freiflächenanlagen gibt es nur wenige Ausnahmen. Ist ein Vorhaben nicht von der Genehmigungspflicht befreit, muss die betroffene Kommune eine bauplanungsrechtliche Genehmigung erteilen.

Gebäudebezogene Anlagen sind in allen Bundesländern verfahrensfrei – dazu zählen auch Förderband-PV-Anlagen!

Regelungsbereich

Für das Erlangen der bauplanungsrechtlichen Genehmigung ist maßgeblich, in welchem planungsrechtlichen Bereich sich der Gewinnungsstandort befindet. Grundsätzlich sind hierbei zwei Konstellationen zu unterscheiden:

- **Außenbereich gemäß § 35 BauGB:**

Der Gewinnungsbetrieb liegt außerhalb zusammenhängender Bebauung und außerhalb eines geltenden Bebauungsplans. Die Mehrheit der Gewinnungsbetriebe in Deutschland befindet sich in solchen Außenbereichen.

- **Innenbereich gemäß § 34 BauGB:**

Der Gewinnungsbetrieb liegt innerhalb eines im Zusammenhang bebauten Ortsteils bzw. im Geltungsbereich eines Bebauungsplans.

PV im Außenbereich

Im Außenbereich ist die Errichtung von PV-Anlagen grundsätzlich nicht zulässig, im Baugesetzbuch werden allerdings Ausnahmen aufgeführt. Demnach können PV-Anlagen im Außenbereich privilegiert sein, wenn sie einem ortsgebundenen gewerblichen Betrieb dienen (§ 35 Abs. 1 S. 3 BauGB). In diesem Fall entfällt die Pflicht zur Durchführung der Bauleitplanung. Diese Privilegierung kann für PV-Anlagen an Gewinnungsstandorten wirksam sein, sofern ein räumlich-funktionaler Zusammenhang zwischen der PV-Anlage und dem Betrieb besteht und dieser mit dem Strom aus der PV-Anlage versorgt werden soll. In der Verwaltungspraxis wird dafür häufig gefordert, dass mindestens 50 % der erzeugten Strommenge selbst verbraucht werden. Die Entscheidung über die Erfüllung dieser Kriterien obliegt jedoch der zuständigen Gemeinde.

Erhält eine PV-Anlage ihre Genehmigung auf Basis dieser Ausnahme, ist zu beachten, dass diese Genehmigung mit Beendigung des Abbaubetriebs erlischt, da die PV-Anlage dann nicht mehr dem ortsgebundenen Betrieb dienen kann. Die PV-Anlage muss folglich zurückgebaut werden.

Darüber hinaus sind PV-Anlagen im Außenbereich privilegiert, wenn sie in einem 200 m-Korridor neben Autobahnen oder Schienenwegen errichtet werden sollen (§ 35 Abs. 1 S. 8 Lit. B BauGB).

Das Baugesetzbuch legt zudem fest, dass die Aufstellung eines Bebauungsplans für die Zulässigkeit eines PV-Vorhabens nicht zwingend notwendig ist, sofern es von einem Planfeststellungsbeschluss erfasst wird. Wenn für den Gewinnungsbetrieb ein Planfeststellungsverfahren durchgeführt wurde, muss überprüft werden, ob die Errichtung von PV-Anlagen für den Betrieb erfasst ist; dies kann durch die Stromerzeugung speziell für betriebseigene Anlagen begründet sein.

Privilegierungen von PV-Anlagen im Außenbereich sind immer nur dann zulässig, wenn dem keine öffentlichen Belange entgegenstehen.

Kann keine Privilegierung begründet werden, ist eine Erstellung oder Anpassung des betreffenden Flächennutzungsplans und Bebauungsplans nötig. Dies geschieht im Zuge der Bauleitplanung durch die Gemeinde. Ein solches Verfahren kann durch Unternehmen angestoßen und durch Anregungen und Stellungnahmen im Zuge der Öffentlichkeitsbeteiligung gelenkt werden, die Gemeinde besitzt aber die Planungshoheit. Der gesamte Prozess kann mehr als zwölf Monate in Anspruch nehmen.

„Oft zeigt sich, dass durch technisch sinnvolle Argumentation und genaue rechtliche Prüfung auch größere oder komplexere Anlagen genehmigungsfrei realisiert werden können.“

Patrick Boscher, SINN Power GmbH

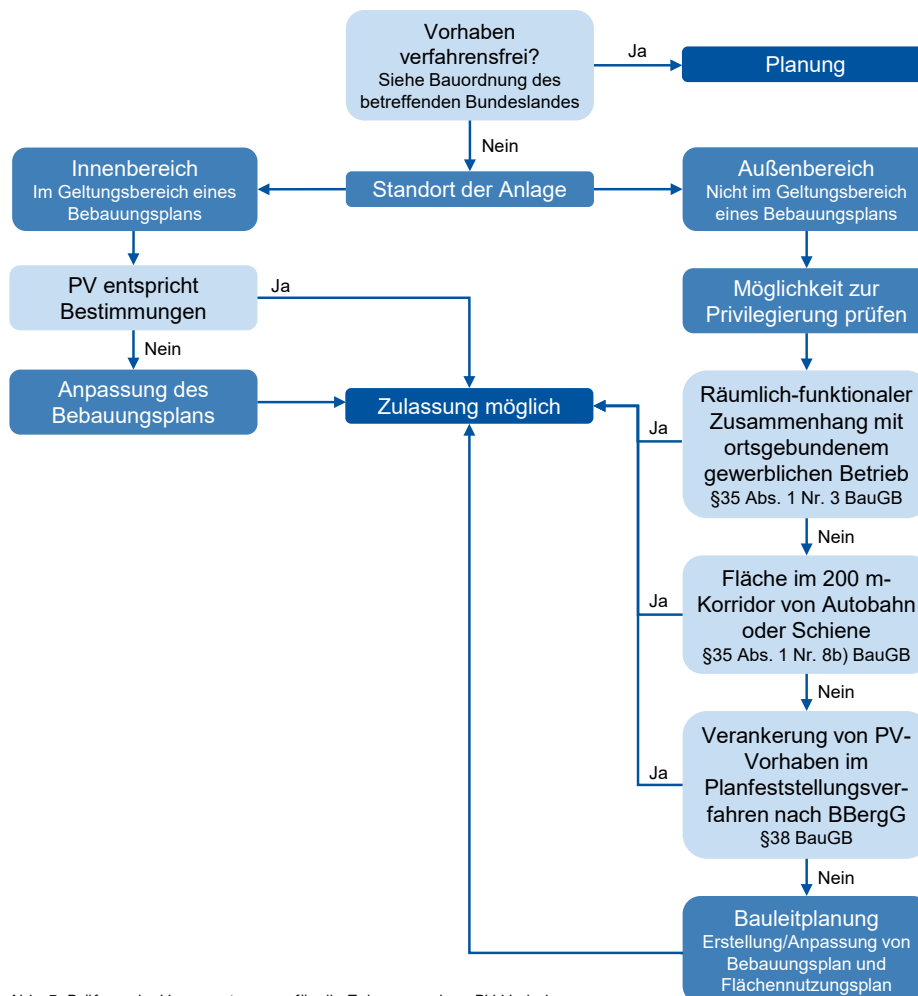


Abb. 5: Prüfung der Voraussetzungen für die Zulassung eines PV-Vorhabens

Für den gesamten Prozess der bauplanungsrechtlichen und baurechtlichen Genehmigung lassen sich nur schwer allgemeingültige Aussagen treffen, da die Entscheidung stark von örtlichen und betriebsspezifischen Gegebenheiten abhängt. Es empfiehlt sich daher, über Verfahrensdauer und -abläufe eng mit der der Gemeinde und einem PV-Planungsunternehmen in Kontakt zu stehen.

PV im Innenbereich

Findet die Gewinnung in einem Gebiet mit bestehendem Bebauungsplan statt, gilt es zu überprüfen, ob die Errichtung einer PV-Anlage auf dem Betriebsgelände unter den gegebenen Umständen zulässig ist. Ist dies nicht der Fall, kann eine Anpassung des Bebauungsplans durch die Gemeinde beantragt werden.

Baugenehmigung

Nach Abschluss des Bebauungsplanverfahrens muss das zuständige Bauamt eine Baugenehmigung erteilen. Hierbei wird geprüft, ob durch die Errichtung der PV-Anlage gegen geltendes Recht – z. B. das Boden- oder Artenschutzrecht – verstoßen

würde. Der Betreiber muss dazu einen Antrag bei der Bauaufsichtsbehörde stellen. Diese Genehmigung kann unter Umständen an bestimmte Bedingungen oder Auflagen geknüpft werden.

Stromsteuerliche Pflichten

PV-Anlagen unterliegen unter bestimmten Voraussetzungen den stromsteuerlichen Regelungen gemäß dem Stromsteuergesetz (StromStG). Die Pflichten des Betreibers hängen insbesondere von der Nutzung des erzeugten Stroms, der Weitergabe an Dritte sowie der Anlagengröße ab. Tabelle 2 bietet einen kompakten Überblick über die wichtigsten stromsteuerlichen Pflichten für Betreiber von PV-Anlagen.



<https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Strom/Verfahren-Erteilung-einer-Erlaubnis/Antragstellung/antragstellung>

Ausgangslage	Rechte und Pflichten	Rechtsgrundlage	Formulare
Versorgung Dritter mit selbst erzeugtem Strom	Beantragung einer Versorgererlaubnis	§ 4 Abs. 1 StromStG § 2 StromStV	1410, 1410a, 1410az
Versorgerstatus nur für geleisteten Strom, ansonsten Letztverbraucher	Anzeige der Stromversorgung beim zuständigen Hauptzollamt	§ 1a Abs. 6 und 7 StromStV § 2 Abs. 3 StromStV	1412
Nutzung des Stroms am Ort der Erzeugung ohne Einspeisung ins öffentliche Netz bei Nennleistung von mehr als 2 MW	Beantragung der Stromsteuerbefreiung in Form einer förmlichen Einzelerlaubnis	§ 9 Abs. 1 Nr. 1 StromStG	1421, 1421a, 1421az
Nutzung des Stroms im Radius von 4,5 km von der Erzeugung bei Nennleistung zwischen 1 und 2 MW	Beantragung der Stromsteuerbefreiung in Form einer förmlichen Einzelerlaubnis	§ 9 Abs. 1 Nr. 3a StromStG	1422, 1422a, 1422az
Nutzung des Stroms im Radius von 4,5 km von der Erzeugung bei Nennleistung bis 1 MW	Allgemeine Erlaubnis über die Steuerbefreiung erteilt; kein Antrag erforderlich	§ 9 Abs. 1 Nr. 3a StromStG § 10 Abs. 2 Nr. 1 StromStV	-

Tab. 2: Stromsteuerliche Pflichten von PV-Anlagenbetreibern



© Dominik Ketz, Bezirksregierung Köln

3. Wirtschaftlichkeit

Kosten

Die Kosten von PV-Anlagen setzen sich aus Investitions- und Betriebskosten zusammen und sind von vielen Faktoren abhängig. Zur vereinfachten Bewertung der Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen werden häufig Stromgestehungskosten (€/kWh) angegeben. Stromgestehungskosten (Erzeugungskosten) sind die durchschnittlichen Gesamtkosten pro erzeugte Kilowattstunde über die gesamte Lebensdauer einer Anlage. Für PV-Anlagen ergeben sich derzeit Stromgestehungskosten von etwa 4 – 7 ct/kWh bei Freiflächenanlagen im MW-Bereich und 6 – 14 ct/kWh bei Dachanlagen. Sie schließen Investitions- und Betriebskosten mit ein und hängen stark von Anlagentyp und Standort ab.

Investitionskosten

Investitionskosten werden zur besseren Vergleichbarkeit in Abhängigkeit zur installierten Nennleistung angegeben. Je nach Typ und Größe können die Investitionskosten zwischen 700 und 2.000 €/kWp variieren. Investitionskosten setzen sich aus den Kosten für Planung, Anschaffung und Montage zusammen.

Freiflächenanlagen weisen in der Regel niedrigere spezifische Investitionskosten auf als Dachanlagen, da aufgrund ihrer Größe Skaleneffekte auftreten. Schwimmende Anlagen erfordern hingegen spezielle Montagesysteme und wasserfeste Komponenten, was derzeit zu höheren spezifischen Investitionskosten führt. Tabelle 3 zeigt Richtwerte für Investitionskosten für verschiedene Anlagentypen.

Anlagentyp	Investitionskosten €/kWp
Dachanlagen Klein, < 30 kWp	1.000 – 2.000
Dachanlagen Groß, > 30 kWp	900 – 1.600
Freiflächenanlagen	700 – 900
Förderbandanlagen	700 – 900
Schwimmende Anlagen	700 – 1.000

Tab. 3: Typische Investitionskosten verschiedener PV-Anlagentypen

Betriebskosten

Die laufenden Betriebskosten setzen sich typischerweise aus Wartung, Versicherung, Reinigung und Pacht zusammen und liegen bei allen Anlagentypen jährlich etwa bei 1 – 3 % der Investitionskosten. Für Gewinnungsstätten in der Steine- und Erden-Industrie sind Pachtausgaben in der Regel nicht zu erwarten, da die PV-Anlagen auf Betriebsflächen errichtet werden können, wodurch sich die Betriebskosten signifikant reduzieren können.

Amortisationsdauer

Die Amortisationsdauer einer PV-Anlage wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst, darunter Standortvoraussetzungen, Erträge sowie die Höhe der Vergütung für eingespeisten Strom. Unter Annahme typischer Richtwerte kann eine Abschätzung der Amortisationsdauer berechnet werden. Abbildung 6 zeigt eine Beispielrechnung zur Bestimmung der Amortisationsdauer für eine 910 m lange Förderband-PV-Anlage.

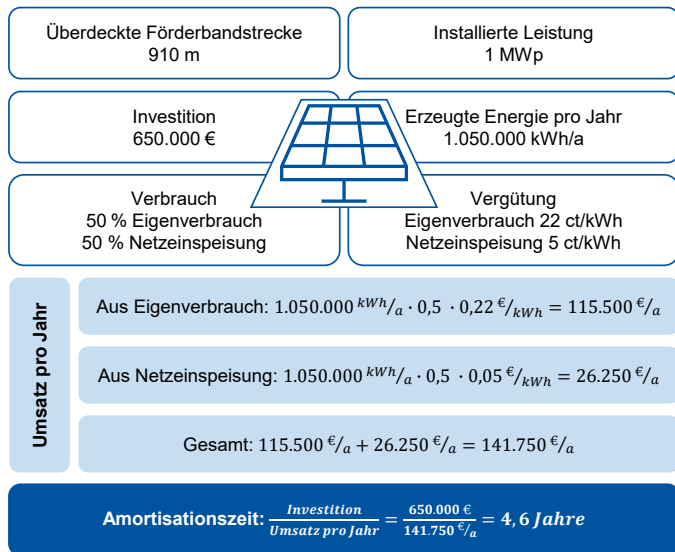


Abb. 6: Beispielrechnung zu der Amortisationsdauer einer Förderband-PV-Anlage



Vermarktung

Die wirtschaftlich sinnvollste Option für Betreiber von PV-Anlagen ist der Selbstverbrauch des erzeugten Stroms. Dadurch können die Kosten für den Strombezug aus dem Netz gesenkt werden, während die Einnahmen für eingespeistem Strom oft nur gering sind, da diese meist lediglich mit wenigen Cent pro Kilowattstunde vergütet werden. Wenn jedoch das PV-Potenzial eines Betriebs groß genug ist und die Erzeugung den eigenen Verbrauch übersteigt, kann überschüssiger Strom ins öffentliche Netz eingespeist und vergütet werden. Für die Vermarktung stehen grundsätzlich zwei Optionen zur Verfügung:

- **Einspeisevergütung nach EEG**
- **Direktvermarktung außerhalb des EEG**

Vergütung nach EEG

Um eine Einspeisevergütung gemäß EEG zu erhalten, sind die installierte Leistung und Förderfähigkeit der Anlage entscheidend. Anlagen mit einer installierten Leistung unter 100 kWp können bei gegebener Förderfähigkeit eine feste Einspeisevergütung beanspruchen. Bei einer installierten Leistung ab 100 kWp muss der erzeugte Strom direkt vermarktet werden. Dies erfolgt meist über ein Direktvermarktungsunternehmen an der Strombörse. Unterschreiten die daraus resultierenden Erlöse den festgelegten anzulegenden Wert für die Vergütung von PV-Strom, wird die Differenz durch die sogenannte Marktpremie ausgeglichen. Ein Überschreiten des anzulegenden Wertes ist im Gegenteil immer möglich. Ab einer Leistung von 1.000 kWp kann die Marktpremie jedoch nur in Anspruch genommen werden, wenn im Rahmen eines Ausschreibungsverfahrens bei der Bundesnetzagentur ein Zuschlag erteilt wurde.

Für die Inanspruchnahme der Einspeisevergütung gemäß dem EEG ist die Errichtung der PV-Anlage auf einer nach § 48 EEG förderfähigen Fläche zwingende Voraussetzung. In Kontext von Betrieben der Steine- und Erden-Industrie sind insbesondere folgende Flächentypen relevant:

- **Flächen an oder auf Gebäuden, sowie baulichen Anlagen** (z. B. Aufbereitungsanlagen)
- **Künstliche oder erheblich veränderte Gewässer gemäß § 3 WHG** (z. B. Baggerseen oder Absetzanlagen)
- **Konversionsflächen aus wirtschaftlicher Nutzung**
- **Flächen mit einem durchgeführten Planfeststellungsverfahren**

Gebäudebezogene Anlagen sind grundsätzlich immer förderfähig. Auch schwimmende PV-Anlagen können gefördert werden, da sie ausschließlich auf künstlichen Gewässern installiert werden dürfen.

Freiflächenanlagen sind unter bestimmten Bedingungen ebenfalls vergütungsfähig. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn ein Bebauungsplan existiert, der die Errichtung von PV-Anlagen ausdrücklich zulässt, oder wenn es sich um sogenannte Konversionsflächen handelt. Konversionsflächen sind ehemals industriell genutzte Flächen, die nach Aufgabe der ursprünglichen Nutzung über einen längeren Zeitraum keiner festgelegten Nutzung mehr dienen. Dazu zählen in der Regel auch ausgeschöpfte Abbauflächen oder Abraumhalden.

Für bergbauliche Vorhaben, die dem Bundesberggesetz unterliegen und einer Umweltverträglichkeitsprüfung nach dem Umweltverträglichkeitsgesetz bedürfen, ist ein Planfeststellungsverfahren nach dem Verwaltungsverfahrensgesetz erforderlich (§52 Abs. 2a BbergG). In solchen Fällen kann die Einspeisevergütung nach dem EEG auf Grundlage der Genehmigung gewährt werden. Der Abbau von Steinen und Erden fällt jedoch regelmäßig nicht in den Anwendungsbereich des Bundesberggesetzes, sodass hier andere Voraussetzungen erfüllt werden müssen, um eine EEG-Vergütung zu erhalten.

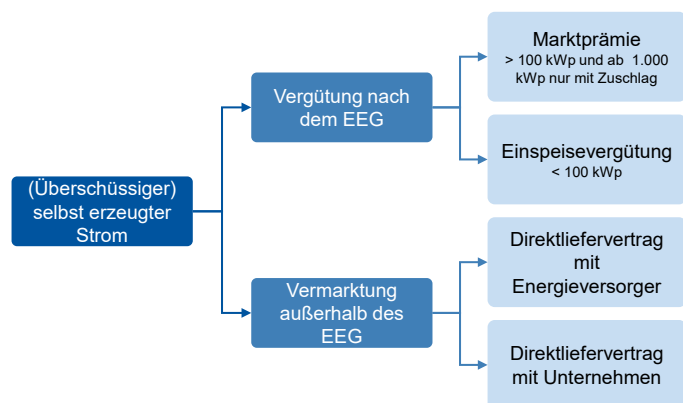


Abb. 7: Möglichkeiten der Vergütung von PV-Strom

Direktvermarktung

Neben der Vergütung nach dem EEG bleibt die Möglichkeit, den erzeugten Strom ohne zusätzliche Marktprämie direkt zu vermarkten. Im Rahmen eines Stromliefervertrages (Power Purchase Agreement) kann die Lieferung des Stroms zu einem festgelegten Preis und über einen bestimmten Zeitraum vereinbart werden. Es wird empfohlen, Stromlieferverträge unter Zuhilfenahme eines Rechtsbeistandes zu erstellen. Solche Direktlieferungen nehmen in der Regel nur Energieversorger oder Unternehmen mit hohem Strombedarf an.

Betreibermodelle

PV-Anlagen können nach unterschiedlichen Modellen betrieben werden. Welches Betreibermodell im Einzelfall sinnvoll ist, hängt im Wesentlichen von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, den Eigentumsverhältnissen und der gewünschten Einflussnahme auf Planung und Betrieb der Anlage ab. Abbildung 8 gibt einen kompakten Überblick über die Vor- und Nachteile zu unterschiedlichen Betreibermodellen.



Abb. 8: Vor- und Nachteile der verschiedenen Betreibermodelle



© AdobeStock_513005164

4. Betrieb und Rückbau

Wartung

Die regelmäßige Wartung und Prüfung von PV-Anlagen liegt im Interesse des Betreibers, da sie zur Sicherheit, Zuverlässigkeit und Ertragsstabilität beiträgt. Der Betreiber ist dadurch rechtlich und versicherungstechnisch abgesichert. Außerdem können Mängel frühzeitig erkannt und behoben werden, was sich auf lange Sicht auch wirtschaftlich auszahlt. Der Betriebssicherheitsverordnung zufolge muss ein Anlagenbetreiber durch regelmäßige Prüfungen den Schutz von Personen sicherstellen. Die Gefährdung von Personen durch fehlende Sicherheitsprüfungen kann zu strafrechtlichen Konsequenzen führen. Tabelle 4 stellt kompakt eine empfohlene Prüfung auf drei Ebenen vor. Für die Wartung einer PV-Anlagen kann z. B. das Montageunternehmen beauftragt werden, sofern die Dienstleistung

angeboten wird. Mit dem Unternehmen wird ein Wartungsvertrag abgeschlossen, in dem die durchzuführenden Maßnahmen, der Turnus und die Kosten für regelmäßige Wartungen vereinbart werden. Die Kosten hängen dabei wesentlich von der Größe der Anlage, dem Umfang der Prüfungen und den Gegebenheiten vor Ort ab.

Die erste Prüfung einer PV-Anlage sollte innerhalb der gesetzlichen Gewährleistungsfrist stattfinden, die oft zwei Jahre beträgt. So kann der Anspruch auf kostenlose Mängelbeseitigung geltend gemacht werden, falls bei der Anlage durch die Montage verschuldete Fehler auftreten.

	Wo?	Was?	Wer?
Täglich	Wechselrichter	Kontrolle der Betriebsanzeige	Betreiber
Monatlich	Betriebsdatenüberwachung (System)	Kontrolle des Betriebszustandes per Fernüberwachung (Für den Brandschutz ist insbesondere auf Isolationsfehler zu achten) Fehlermeldungen analysieren und geeignete Maßnahmen ergreifen	Betreiber/ Elektrofachkraft
	Zähler	Ertragskontrolle: regelmäßig die Zählerstände protokollieren und analysieren (entfällt bei automatischer Betriebserfassung und -auswertung)	Betreiber/ Elektrofachkraft
	Generatorfläche	Sichtprüfung, ob gravierende offensichtliche Mängel vorhanden sind, wie z. B. herunterhängende Module, Modulklammern, Montagegestellteile oder Solarleitungen	Betreiber
Alle vier Jahre	Gesamtanlage	Wiederholung der Messungen und Prüfungen entsprechend VDE 0105-100; bzw. VDE 0126-23	Elektrofachkraft

Tab. 4: Kontrolle und Wartung von PV-Anlagen

Staub und Reinigung

In Gewinnungsbetrieben kommt es durch die täglichen Betriebsabläufe wie Bohren, Sprengen und Laden, sowie durch die Nutzung schwerer Maschinen auf losem Untergrund zu einer erhöhten Staubbelastung in der Luft und auf umliegenden Flächen. Auf PV-Modulen abgelagerter Staub verringert den Ertrag. Besonders Feinstaub mit Partikeln kleiner als 10 µm und 2,5 µm sorgt für eine geringere Leistung. Der Feinstaub bildet eine einheitliche Schicht auf den Modulen, sodass weniger Strahlung auf die Zellen treffen kann. Die Menge des auf den Modulen abgelagerten Staubes wird durch viele Faktoren beeinflusst, darunter z. B. Niederschlag, Wind und die Neigung der Module.

Wegen der Ablagerung von Partikeln oder sonstigen Verunreinigungen wird für PV-Anlagen eine regelmäßige Reinigung empfohlen. Neben der zufälligen, natürlichen Reinigung durch Niederschläge werden die Reinigung mit Wasser oder mechanische Reinigung, z. B. mit einem Besen, vorgeschlagen.

Nachteile hierbei sind z. B. ein hoher Aufwand, großer Wasserbedarf oder auch die Gefahr der Beschädigung der Module. Es existieren auch innovative Konzepte zur Selbstreinigung der Module, die den Staub durch Beschichtungen oder elektrische Felder abstoßen. Diese Konzepte haben sich jedoch bisher aus Kosten- und Effektivitätsgründen nicht durchgesetzt.

Letztendlich ist die Erforderlichkeit von Reinigungen und deren zeitliche Abstände stark standortbedingt. Sie sollte durch Sichtprüfungen und die Überwachung der erzeugten Leistung und der Witterung im Einzelfall geplant werden.

Rückbau

Die Lebensdauer von PV-Modulen beträgt im Regelfall 25 bis 30 Jahre, wobei Hersteller moderner Module häufig eine Leistungsgarantie von bis zu 30 Jahren angeben. Nach Ablauf der Nutzung gelten PV-Module rechtlich als Elektro-Altgeräte und ihre Entsorgung unterliegt dem Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG). Laut ElektroG sind Hersteller dazu verpflichtet Altgeräte zurückzunehmen. In Deutschland erfolgt die Rücknahme oft über herstellerübergreifende Systeme wie PV Cycle. Auch der Anlagenmonteur kann den Rückbau übernehmen. Für den Rückbau und die Entsorgung können bei großen Anlagen Kosten in Höhe von bis zu 5 % der Investitionskosten entstehen, weshalb die Schritte schon bei der Investitionsplanung zu berücksichtigen sind.



<https://pvcycle.de/>



© AdobeStock_245458406



© AdobeStock_425747154

5. Umweltaspekte

Ökobilanz

Die ökologische Betrachtung von PV-Anlagen fällt insgesamt sehr positiv aus. Potenziell negative Umweltauswirkungen beschränken sich auf die Herstellung und die Entsorgung der Komponenten. Die energetische Amortisation der Anlagen beträgt je nach Standort und Typ etwa ein bis zwei Jahre. Das bedeutet, dass die Anlage innerhalb dieses Zeitraums die Energiemenge erzeugt, die für ihre Herstellung aufgewendet wurde. Über eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren erzeugen PV-Anlagen etwa das 10- bis 15-Fache dieser Energiemenge.

Durch den CO₂-freien Betrieb von PV-Anlagen werden im Vergleich zum Strombezug aus dem Netz erhebliche Treibhausgasemissionen vermieden. Der Emissionswert von PV-Strom liegt unter Berücksichtigung der Herstellung bei etwa 43 – 63 g CO₂ pro erzeugter Kilowattstunde Strom. Demgegenüber verursachen fossile Kraftwerke etwa 746 g CO₂ je Kilowattstunde.

Die Integration von PV-Anlagen an Gewinnungsstandorten trägt zu einer erheblichen Reduzierung der betrieblichen Treibhausgasemissionen bei.

Auch hinsichtlich potenzieller Schadstofffreisetzung wie Blei oder Cadmium bestehen nach aktueller Datenlage selbst bei mechanischer Beschädigung der Module keine signifikanten Risiken.

Ökopunkte

Das Konzept der Ökopunkte dient als Instrument zur Bewertung ökologischer Aufwertungsmaßnahmen auf Flächen. Ökopunkte werden für Projekte vergeben, die die naturschutzfachliche Qualität einer Fläche verbessern und können als Ausgleichsmaßnahmen für Eingriffe in Natur und Landschaft eingesetzt oder auf dem Markt gehandelt werden.

Obwohl PV-Anlagen nicht unmittelbar Ökopunkte generieren – da ihr primärer Zweck die Energieerzeugung ist – können sie durch Kombination mit zusätzlichen Maßnahmen solche Punkte erzielen. Beispiele hierfür sind das Anlegen extensiver Blühwiesen, die Etablierung strukturreicher Biotope oder eine extensive Weidenutzung. Dabei ist es wichtig, die ökologische Qualität über Zeiträume von mindestens 20 bis 30 Jahren dauerhaft zu sichern.

Die konkrete Umsetzung und Anerkennung solcher Maßnahmen sind in Deutschland nicht bundeseinheitlich geregelt, sondern obliegen den einzelnen Bundesländern. Das Grundprinzip ist folgendes: Abhängig vom Ausgangszustand und dem neu hergestellten Zustand einer Fläche werden Ökopunkte auf das Ökokonto des Vorhabenführenden gutgeschrieben, soweit die Maßnahme den Bestimmungen des Bundesnaturschutzgesetzes entspricht. Dazu muss ein formeller Antrag an die untere Naturschutzbehörde gestellt, sowie Nachweise erbracht werden, die die ökologische Qualitätssteigerung beweisen. Gegebenenfalls werden fachliche Gutachten angeordnet. Genaue Informationen können den Informationsangeboten des betreffenden Bundeslandes entnommen werden.

Ökologische Gestaltung

Neben den vielen positiven Aspekten von Anlagen zur Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen, gilt es zu berücksichtigen, dass diese auch negative Auswirkungen auf Umwelt und Biodiversität haben können. Potenzielle schädliche Auswirkungen sind bestmöglich zu verhindern, zu minimieren und auszugleichen. Das ist besonders in der Planungs-, Bau- und Betriebsphase der Anlagen umfassend zu berücksichtigen.

Standortauswahl

Der Grundstein für eine umweltfreundliche Anlage wird in der Planungsphase mit der Auswahl eines bestmöglich geeigneten Standortes gelegt. Besonders vorbelastete Standorte wie Konversionsflächen und sonstige brachliegende ehemals baulich genutzte Flächen gelten aus naturschutzfachlicher Sicht als geeignet. In Gewinnungsbetrieben stellen Halden oder ausgeschöpfte Abbaubereiche wirksame Standorte für PV-Anlagen dar.

Umweltprüfung

Ist für die Genehmigung einer PV-Anlage eine Bauleitplanung erforderlich, erfolgt im Zuge dieser eine Umweltprüfung sowie das Verfassen eines Umweltberichts. Hierzu ist eine Kartierung notwendig, für welche über das Jahr verteilt drei Termine vor Ort eingeplant werden müssen. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für Entscheidungen über Kompensationsmaßnahmen gemäß der Eingriffsregelung des Bundesnaturschutzgesetzes. Sollten schädliche Auswirkungen auf Böden, Wasserqualität, Luftqualität oder ansässige Pflanzen- und Tierarten nicht verhindert oder ausreichend abgeschwächt werden können, sind entsprechende Kompensationsmaßnahmen notwendig, bspw. das Anlegen von Ausgleichsflächen von ähnlicher Qualität.

Das anlagen- und standortspezifische Konzept einer PV-Anlage kann z. B. durch Organisationen wie EULE hinsichtlich der Naturverträglichkeit bewertet und zertifiziert werden. Hierbei wird die Wahl des Standorts, die Gestaltung der Anlage, die naturschutzfachliche Aufwertung und Pflege, sowie die Umsetzung eines Öffentlichkeitskonzepts untersucht.

Umweltschutz während Bau, Betrieb und Rückbau

Auch während der Bauarbeiten kann die Naturverträglichkeit erhöht werden, indem natürliche Strukturen erhalten und Störungen ansässiger Lebewesen vermieden werden. Idealerweise sollten Bauarbeiten im Rahmen der ökologischen Baubegleitung durch einen Landschaftsarchitekten/-planer überwacht werden.

Während des Betriebs einer PV-Anlage sind nur wenige schädliche Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten. Um diese weiter zu minimieren, sollten Wartungsarbeiten außerhalb der Ruhe-/Brutzeiten von Tieren liegen und Reinigungsarbeiten ohne chemische Zusätze erfolgen. Empfehlenswert ist eine extensive Grünpflege, z. B. Beweidung mit Schafen. Weitere Maßnahmen werden in Abbildung 9 (Folgeseite) dargestellt.

Nach Ablauf der Lebensdauer der PV-Anlage ist der Betreiber zum Rückbau verpflichtet. Dabei können ähnliche Maßnahmen wie beim Bau getroffen werden, um Flora und Fauna so wenig wie möglich zu stören.



© AdobeStock_110422041

Vereinbarkeit mit Rekultivierung

Bereits mit der Genehmigung eines Abbauprojektes wird festgelegt, wie die durch den Abbau überprägten Flächen wiedernutzbar gemacht werden sollen und ihre ökologische Wertigkeit gesteigert oder wiederhergestellt werden soll.

Kompensation

Unabhängig vom Standort einer PV-Anlage müssen die gesetzlichen Kompensationspflichten gemäß § 15 BNatSchG eingehalten werden. Diese Vorschriften gelten unabhängig davon, ob Flächen zuvor bereits vorbelastet war oder rekultiviert wurde. Auf ehemaligen Abbaufächen oder anderen vorgeprägten Flächen ist ebenfalls eine Prüfung der Eingriffsregelung erforderlich. Die Verwendung von rekultivierten Abbaufächen zur Energieerzeugung mit PV steht grundsätzlich im Einklang mit den Zielen des Bundesnaturschutzgesetzes und stellt eine Möglichkeit dar, Flächen sinnvoll zu renaturieren und einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

Umwidmung

Nach der Rohstoffgewinnung werden Flächen oftmals dem Naturschutz gewidmet, oder auch landwirtschaftlich genutzt. Die Nutzung für PV-Anlagen ist dann in der Regel nur nach einer Umwidmung im Flächennutzungsplan durch die Gemeinde möglich. Dabei müssen mögliche Veränderungen von Schutzgütern wie Wasser, Boden, Flora und Fauna untersucht und bewertet werden. Die Entscheidungen unterliegen Einzelfallprüfungen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Errichtung einer PV-Anlage mit extensiver Grünlandpflege den ökologischen Wert einer Abbaufäche steigert. Das liegt an der oftmals niedrigen ökologischen Wertigkeit von Abbaufächen, da sie durch den aktiven Rohstoffabbau vorbelastet sind. Haben sich während des Abbaus seltene Lebensräume entwickelt, müssen Naturschutz und Energieerzeugung sorgfältig gegeneinander abgewogen werden.

Eine Umwidmung der Flächen kann in einigen Fällen vermieden werden, wenn die Nutzungsformen Energieerzeugung und Landwirtschaft kombiniert werden, indem Grünflächen um Module herum mit Schafen oder Agri-PV-Anlagen realisiert werden.

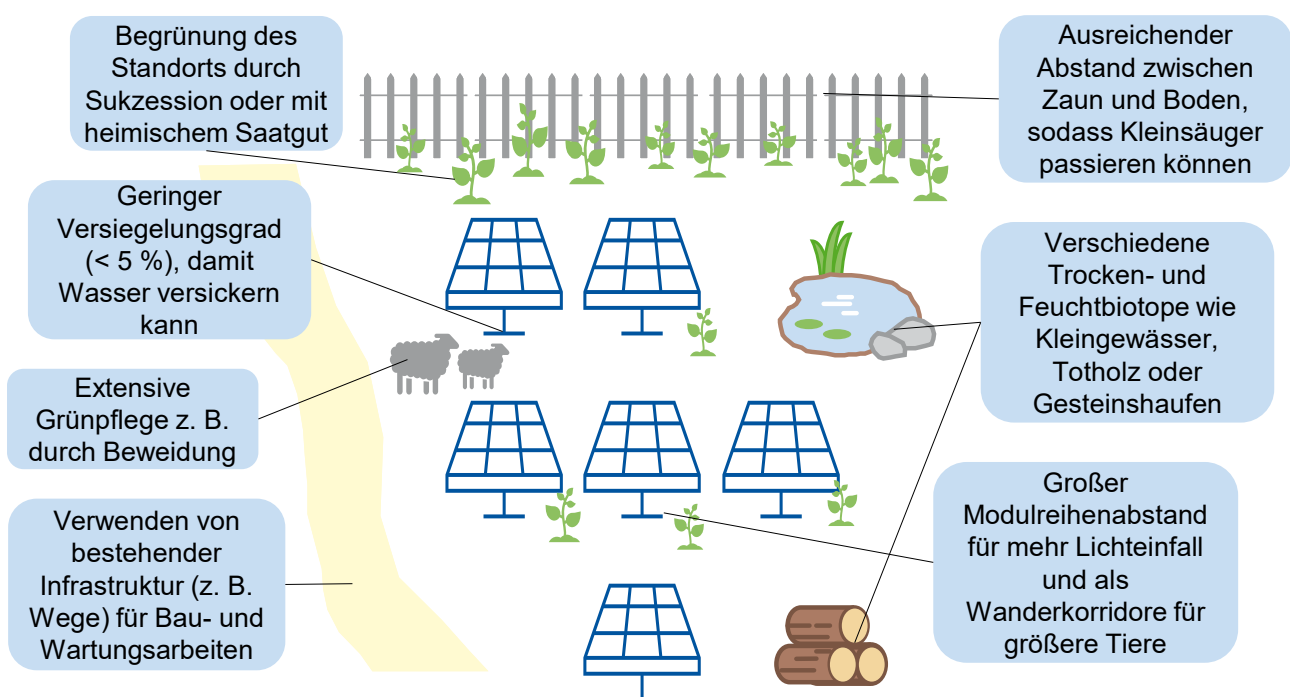


Abb. 9: Möglichkeiten zur ökologischen Aufwertung einer Freiflächenanlage



© AdobeStock_496015455

6. Systemüberblick und Technik

Modultypen

Die zentrale Rolle bei der Umwandlung von Sonnenlicht in Strom in PV-Anlagen übernehmen die Solarmodule, die aus einer Vielzahl einzelner Solarzellen bestehen. In der Praxis haben sich insbesondere Module auf Siliziumbasis etabliert. Dabei werden einige Typen mit unterschiedlichen Eigenschaften unterschieden:

- **Monokristalline Module** zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 23 % aus und haben den größten Marktanteil.
- **Polykristalline Module** sind in der Anschaffung günstiger, jedoch mit einem geringfügig niedrigeren Wirkungsgrad verbunden.
- **Dünnschichtmodule** zeichnen sich durch geringes Gewicht und Flexibilität aus, weisen jedoch eine geringere Energieeffizienz auf und werden daher vorrangig in Spezialanwendungen verwendet.
- **Glas-Glas-Module** bieten eine erhöhte mechanische Stabilität und eine verlängerte Lebensdauer.
- **Bifaziale Module** ermöglichen durch beidseitige Lichtaufnahme einen höheren spezifischen Ertrag und sind auf Wasser- und Freiflächen geeignet.

Die Auswahl des jeweiligen Modultyps erfolgt unter Berücksichtigung standortbezogener Einstrahlungswerte, statischer Anforderungen, gestalterischer Aspekte sowie wirtschaftlicher Rahmenbedingungen.

Komponenten

Montagesysteme

Die mechanische Befestigung der Module erfolgt über spezifische Montagesysteme, die in Abhängigkeit von Untergrund, Gebäudestruktur und Belastungsanforderungen ausgewählt werden. Für Flachdächer und Freiflächen kommen in der Regel schräg aufgeständerte Systeme zum Einsatz, während bei geneigten Dächern mit Dachhaken und Montageschienen gearbeitet wird.

Wechselrichter

Der Wechselrichter übernimmt die elektrische Umwandlung des durch die Module erzeugten Gleichstroms in netzkonformen Wechselstrom. Moderne Wechselrichter übernehmen darüber hinaus Funktionen des Last- und Einspeisemanagements sowie der Netzstützung und können mit Fernwirktechnik kombiniert werden. Unterschieden wird hierbei in:

- **Stringwechselrichter**, die für einzelne Stränge von Modulen ausgelegt sind,
- **Mikrowechselrichter**, die unmittelbar an einzelnen Modulen installiert werden und sich bei teilweiser Verschattung als vorteilhaft erweisen,
- **Zentralwechselrichter**, die gesamten Anlagen dienen.

Solarkabel und Schutzkomponenten

Die elektrische Verbindung der Komponenten erfolgt über UV-beständige, speziell für PV-Anwendungen ausgelegte Solarkabel. Die Verlegung dieser Kabel muss fachgerecht erfolgen, wobei insbesondere eine dauerhafte Verlegung im Wasser oder ungeschützt unter direkter Sonneneinstrahlung zu vermeiden ist. Ergänzt wird das elektrische System durch eine Reihe von Schutzkomponenten, die dem Personen- und Anlagenschutz in Fehlerfällen dienen.

Messeinrichtungen

Zur bilanziellen Erfassung des Energieflusses dient ein bidirektionaler Stromzähler. Dieser erfasst sowohl den Netzbezug eines Stromabnehmers, als auch die Einspeisung überschüssiger elektrischer Energie aus der PV-Anlage. In größeren Anlagen können zusätzliche messtechnische Einrichtungen wie Messwandler, Rundsteuerempfänger oder Fernzugriffseinrichtungen erforderlich sein.

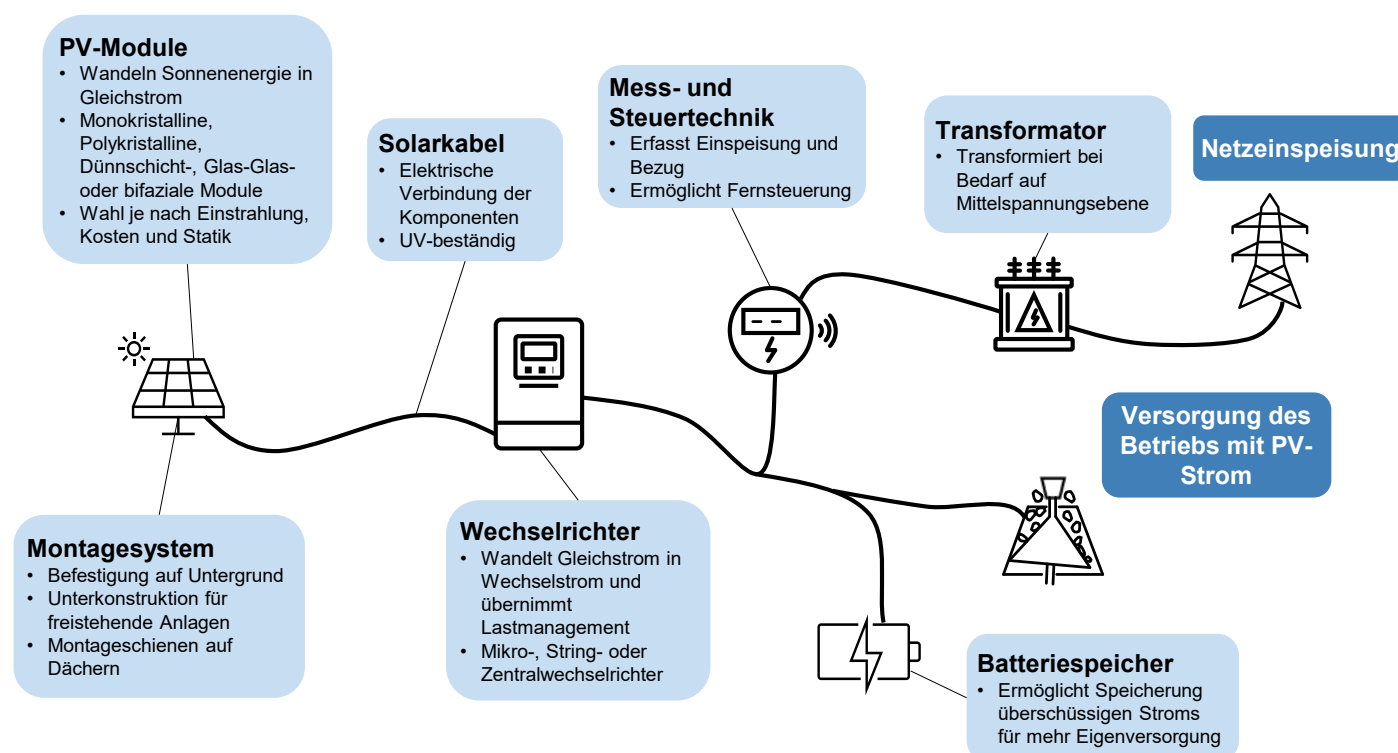


Abb. 10: Die Komponenten einer PV-Anlage

Die Anforderungen an die Steuerbarkeit und Messbarkeit einer PV-Anlage sind im EEG 2023 geregelt. Demnach müssen Anlagen durch den Netzbetreiber fernsteuerbar sein sofern kein intelligentes Messsystem mit Steuerbox installiert ist. Andernfalls wird die Einspeiseleistung auf 60 % der installierten Nennleistung begrenzt. Bei Anlagen mit einer Leistung über 25 kW, deren Strom direkt vermarktet wird, ist darüber hinaus auch sicherzustellen, dass der Direktvermarkter Zugriff auf aktuelle Leistungsdaten hat und steuernd eingreifen kann.

Systemtypen

PV-Anlagen lassen sich in unterschiedliche Systemtypen unterteilen. Am weitesten verbreitet sind netzgekoppelte Anlagen, die den erzeugten Strom bevorzugt zur Eigenversorgung nutzen und überschüssige Energie ins öffentliche Netz einspeisen. Inselanlagen, die autark betrieben werden, spielen in mitteleuropäischen Stromversorgungssystemen nur eine untergeordnete Rolle. Je nach verfügbaren Flächen können gebäudebezogene, freistehende oder schwimmende PV-Anlagen errichtet werden.



7. Check-Liste zur Planung und Umsetzung von Photovoltaikanlagen

Projektinitialisierung

Ziel: Machbarkeitsprüfung, Zieldefinition und Vorbereitung der nächsten Schritte.

Phase 1	Verfügbarkeit geeigneter Flächen prüfen	○ Dachflächen, Freiflächen, Förderbänder, Wasserflächen ○ Flächengröße, Lage, Ausrichtung und Neigung ○ Dauer der Verfügbarkeit (z. B. Genehmigungen, Pachtverhältnisse) ○ Einschränkungen durch den laufenden Betrieb, Lagerung oder Emissionen (z. B. Staub)
	Ziele und Nutzungskonzept der Anlage definieren	○ Eigenverbrauch mit Überschusseinspeisung, Volleinspeisung ○ CO₂-Reduktionsziele, Energiekosten senken, Unabhängigkeit vom Netz
	Energiebedarf analysieren	○ Jahresstromverbrauch, Tages- und Lastgangprofile ○ Identifikation von Lastspitzen (Lastmanagement möglich?)
	Bestehende technische Infrastruktur erfassen	○ Netzanschlusspunkt, Trafostation, Zählerplatz, Leerrohre ○ IT-Infrastruktur (für Monitoring und Steuerung)
	Finanzierungs- und Betreiberkonzepte klären	○ Eigenfinanzierung, Leasing, Contracting, Bürgerbeteiligung ○ Förderprogramme (z. B. KfW, BAFA, Landesförderungen) ○ Wirtschaftlichkeitsbetrachtung/ ROI/ Amortisationszeit
	Rechtliche Rahmenbedingungen prüfen	○ Flächennutzungsplan, Bebauungsplan ○ Genehmigungspflichten (BImSchG, BauO, EEG) ○ Umweltauflagen (z. B. Naturschutz, Bodenschutz, Rekultivierungsaufgaben)
	Stakeholder und Partner identifizieren	○ Kontakt zu Planungsbüros, Gutachtern, Netzbetreibern ○ Einbindung interner Abteilungen: Technik, Umwelt, Recht, Einkauf

Technische und Genehmigungsplanung

Ziel: Konkrete Projektplanung mit technischer Auslegung und Vorbereitung der Umsetzung.

Phase 2	Planungsbüro beauftragen	○ Erstellung eines Pflichtenhefts ○ Erfahrung mit Industriebrachen, Umgang mit Staub?
	Flächenauswahl finalisieren	○ Nutzungsvereinbarung (Pachtvertrag, Nutzungsdauer, Dienstbarkeiten) ○ Prüfung: Untergrundbeschaffenheit, Tragfähigkeit, Versickerung ○ Verschattung, Schnee-/Windlastzonen, Umweltbelastungen
	Anlagendimensionierung	○ Modulauslegung nach Fläche, Neigung, Ausrichtung ○ Optimierung für Eigenbedarf oder Einspeisung ○ Batteriespeicher (optional) integrieren?
	Genehmigungsverfahren durchführen	○ Baugenehmigung, Netzanschlusszusage, Umweltprüfung ○ Ggf. UVP, Denkmalschutz, Immissionsschutz
	Technische Komponenten festlegen	○ PV-Module, Wechselrichter, Unterkonstruktion (z. B. Ballastierung statt Verschraubung) ○ Blitzschutz, Verkabelung, Monitoring-System
	Netzanschlussbegehren stellen	○ Abstimmung mit Netzbetreiber: Anschlussleistung, Einspeisemanagement ○ Wartungsvertrag, Versicherung (Haftpflcht, Ertragsausfall, Diebstahl, Elementarschäden)
	Verträge und Absicherungen	○ Einzäunung, Brandschutz, Videoüberwachung ○ Förderanträge stellen und Fristen beachten
	Ausgleichs- und Kompensationsmaßnahmen	○ Ggf. ökologische Ausgleichsflächen bei Freiflächenanlagen

Bau und Installation

Ziel: Bau der PV-Anlage unter Berücksichtigung betrieblicher und ökologischer Anforderungen.

Phase 3	Baustellenorganisation	○ Anlieferung, Lagerflächen, Bodenschutz (Verdichtung vermeiden) ○ Sicherheitsvorkehrungen: Fluchtwege, Baustellenabsicherung
	Aufbau der Anlage	○ Fundamente, Ballastierung (z. B. auf Halden) ○ Montage Unterkonstruktion und Module ○ Elektroarbeiten: Verkabelung, Zähleranlage, Netzverbindung
	Schnittstellen zum Betrieb sichern	○ Koordination mit Produktionszeiten, keine Betriebsunterbrechung

Inbetriebnahme

Ziel: Abnahme, Test und Anbindung an das öffentliche Netz.

Phase 4	Technische Abnahme	○ Durch Gutachter, Planungsbüro oder Sachverständige ○ Prüfung auf VDE-Normen, Sicherheitsstandards
	Netzseitige Inbetriebnahme	○ Zählersetzung, Freigabe durch Netzbetreiber
	Vertragliche Umsetzung	○ Einspeisevertrag, Meldung bei der Bundesnetzagentur (MaStR) ○ EEG-Vergütung / Direktvermarktung / Smart-Meter-Pflichten

Betrieb und Wartung

Ziel: Sicherstellung von Effizienz, Langlebigkeit und Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Phase 5	Monitoring und Steuerung	○ Online-Überwachung: Leistung, Ausfälle, Abweichungen ○ Verbrauchsoptimierung bei Eigenverbrauch
	Wartung und Pflege	○ Regelmäßige Inspektion, technische Wartung ○ Reinigung (je nach Staubbelastung der Umgebung)
	Reporting und Bewertung	○ Energieberichte, CO₂-Einsparung, Wirtschaftlichkeitsauswertung

Rückbau / End-of-Life-Management

Ziel: Ordnungsgemäßer Rückbau nach Nutzungsende unter Einhaltung gesetzlicher Vorgaben.

Phase 6	Demontage der Anlage	○ Fachgerechter Rückbau von Modulen, Gestellen, Kabeln ○ Rückbau der Fundamente, Entfernung versiegelter Flächen
	Recycling / Wiederverwertung	○ Verwertung nach WEEE-Richtlinie, Rücknahmesysteme der Hersteller
	Wiederherstellung der Fläche	○ Ggf. Rekultivierung, Begrünung oder Nachnutzung

8. Anhang

Landesbauordnungen der einzelnen Bundesländer



Solarkataster der einzelnen Bundesländer



Weiterführende Informationsangebote

- **Informationen der Bundesnetzagentur zu Ausschreibungsverfahren und Netzanschluss:**
https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Home/home_node.html
- **Leitfaden von Rechtsanwälten über Bauleitplanung:**
<https://www.wirtschaft.nrw/system/files/media/document/file/kurzleitfaden-bauleitungsrechtliche-grundlagen-fur-freiflachen-photovoltaik-anlagen-nrw.pdf>
- **Zusammenfassung der Verbraucherzentrale zum aktuellen EEG:**
<https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/erneuerbare-energien/eeg-202324-was-heute-fuer-photovoltaikanlagen-gilt-75401>
- **Informationen über PV des Umweltbundesamtes:**
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik#Ökobilanz>
- **Aktuelle Fakten zu PV in Deutschland des Fraunhofer ISE:**
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>
- **Leitfaden der TH Bingen über Naturverträglichkeit von PV Parks**
<https://www.th-bingen.de/hochschule/presse-oeffentlichkeitsarbeit/mitteilung/leitfaden-fuer-naturvertraegliche-und-biodiversitaetsfoerdernde-solarparks-veroeffentlicht>
- **Informationen des Nabu über Naturverträglichkeit von PV-Parks**
<https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/erneuerbare-energien-energie-wende/solarenergie/29906.html>
- **Leitfaden des Bundesverbandes neue Energiewirtschaft über Biodiversität in PV-Parks**
<https://www.bne-online.de/bne-pressemitteilung-studienveroeffentlichung-artenvielfalt-im-solarpark/>
- **Informationen des Landesamtes für Gesundheit und Arbeitsschutz NRW über Prüfungen von PV-Anlagen:**
https://www.komnet.nrw.de/_sitetools/dialog/43933
- **Studie des Fraunhofer ISE über Stromgestehungskosten von erneuerbaren Energien:**
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>
- **Publikation des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft zum aktuellen EEG:**
<https://www.bdew.de/service/publikationen/erste-hinweise-zur-auslegung-des-neuen-8-eeg-2023/>
- **Informationen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie zum Netzanschluss von Erzeugungsanlagen:**
<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/05/20240517-beschleunigter-netzanschluss-von-stromerzeugungs-und-strom-speicheranlagen.html>

Gesetzestexte

- Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG)
- Baugesetzbuch (BauGB)
- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG)
- Stromsteuergesetz (StromStG)
- Verordnung zur Durchführung des Stromsteuergesetzes (StromStV)
- Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG)
- Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (BNatSchG)



© Dominik Ketz, Bezirksregierung Köln

MRE – Institute of Mineral Resources Engineering

RWTH Aachen University

Wüllnerstr. 2

52062 Aachen

www.mre.rwth-aachen.de

Copyright © 2025. Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil oder Element dieses Dokuments darf ohne schriftliche Genehmigung des Institute of Mineral Resources Engineering der RWTH Aachen University in irgendeiner Form reproduziert, elektronisch gespeichert oder übertragen werden.