

# Energiemanagement

## Vision

Als Gruppe wollen wir Expert\*innen für die Dimensionierung von Wärme- und elektrischen Energiesystemen unter Berücksichtigung des Lebenszyklus der Komponenten werden. Auf dieser Grundlage wollen wir ein Energiesystem mit den geringsten Umweltauswirkungen entwerfen. Dann werden unsere gesammelten Informationen gesammelt und öffentlich zugänglich gemacht, so dass jeder sie nutzen kann.

## Zielsetzung

Optimale Ausnutzung natürlicher Ressourcen zur Energieerzeugung und -speicherung mit dem Ziel, komplette Eigenständigkeit zu erreichen.

### Ausblick weitere Recherchen

- Lokale Rechte und Vorschriften
- Reduzieren, Wiederverwenden und Recyceln von Komponenten (3R-Modell)
- Bedürfnisse und Anforderungen für das Leben in Spanien in Zusammenarbeit mit der lokalen Bevölkerung
- Welche staatlichen Förderprojekte (EU & DE) sind speziell im E-Bereich möglich?
- Wie bekommen wir eine Anschubfinanzierung von Kooperationspartner?
- Suche nach Elektroingenieuren, die das System installieren dürfen
- Ökologische und ethische Auswirkungen von Batterien

### Energiebezugskosten

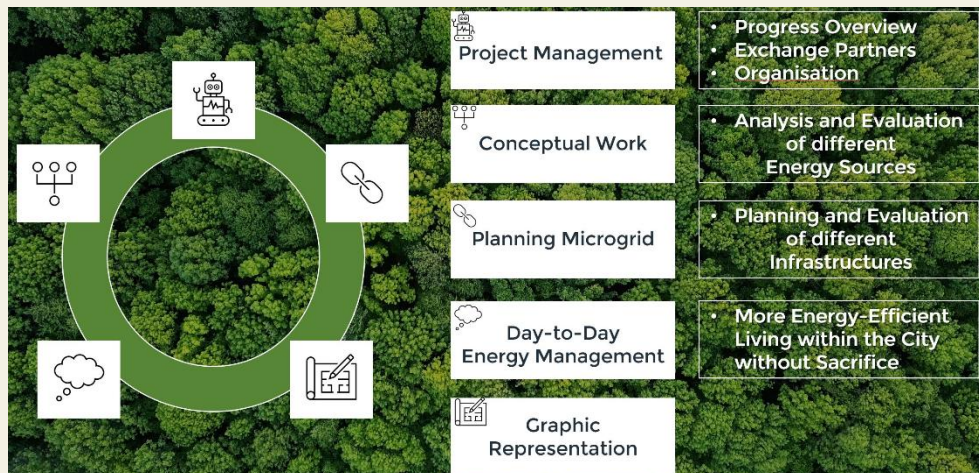
Ebenfalls werden die Energiebezugskosten bisher als konstant angenommen. Eine Prognose von Strom- und Wärmekosten kann helfen, die Kosteneinsparungen genauer zu prognostizieren, insbesondere, da sich bei den Energiebezugskosten eine steigende Tendenz abzeichnet.

### Umweltauswirkungen

#### CO<sub>2</sub>-Equivalent herstellerepezifisch

Ein weiterer Punkt ist eine Erweiterung der Datenbanken der Anlagen für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Bilanz. Anstatt eines statischen Wertes, der den Ausstoß pro Kilowattstunde angibt, liefert ein Modell bestehend aus CO<sub>2</sub>-Equivalent der Herstellung je Kilowatt Nennleistung und der Lebensdauer der Anlage eine genauere Alternative dar. Insbesondere, weil so berücksichtigt wird, ob eine Anlage annäherungsweise optimal betrieben wird, oder außerhalb ihres Optimums arbeitet. Eine höhere erzeugte Menge an Energie resultiert in diesem Fall in einer besseren Bewertung des Indikators CO<sub>2</sub>. Der Kennwert ist auf diese Art dynamisch. Ebenfalls kann berücksichtigt werden, ob eventuell benötigte Hilfsenergie aus regenerativen Quellen bezogen wird.

## Organisation



## Meilensteine

## Nachhaltigkeit



Abb.: Kern-SDGs der Gruppe Energiemanagement

## IST-Analyse

### Soziale Datenerhebung

Im Bereich Energie besteht nicht die Notwendigkeit, eine soziale Datenerhebung oder Akzeptanzanalyse durchzuführen. Konfliktfelder treten insbesondere bei persönlicher Betroffenheit, wie Lärm- oder Geruchsbelästigung, auf oder bei großen baulichen Veränderungen der Landschaft. Wenn das Planungsgebiet nicht in unmittelbarer Nähe von Wohngebieten liegt, fällt die soziale Datenerhebung im Bereich Energie aus. Sonst sollten für die verschiedenen Bereichen Befragungen durchgeführt werden.

### Objektive Analyse

Die Planung dezentraler Anlagen setzt die Kenntnis des Energiebedarfs voraus. Dieser soll vom Entscheidungsträger angegeben werden. Die optimale Dimensionierung dezentraler Energieversorgungssysteme kann am besten in Anlehnung an die Lastganglinien des entsprechenden Gebäudes errechnet werden.

Der Energiebedarf ist dem Entscheidungsträger aus Energieausweis des Gebäudes ersichtlich.

Im nächsten Schritt, bei der Standortanalyse, soll die theoretische Kompatibilität überprüft werden.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick, welche Kriterien für Photovoltaik und Kleinwindanlagen berücksichtigt werden sollen.

	Theoretische Kompatibilität	Technische Kompatibilität
Photovoltaik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solareinstrahlung</li> <li>- Verfügbare Fläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dachneigung</li> <li>- Dachausrichtung</li> <li>- Dachart</li> <li>- Dachgröße</li> <li>- Verschattung</li> <li>- Statik</li> <li>- Netzanschluss</li> </ul>
Kleinwindanlagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Windverhältnisse</li> <li>- Hauptwindrichtung</li> <li>- Verfügbare Fläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hindernisse Hauptwindrichtung</li> <li>- Schallemissionen</li> <li>- Abstandsfläche</li> <li>- Ggf. Statik</li> <li>- Netzanschluss</li> </ul>

Tab.: Theoretische und technische Kompatibilitätskriterien nach Referenztechnologie

Einzelne dieser Kriterien reichen in der Regel nicht aus, um die Technologieauswahl in Form eines Ausschlusskriteriums zu vereinfachen. Viele der Kriterien unterliegen einem funktionellen Zusammenhang oder sind gleichzeitig Eingangsgrößen für notwendige Berechnungsschritte zum Vergleich verschiedener Technologien.

Der Ausschluss einer Technologie kann also in der Regel nicht durch eine Grenzwertformulierung für Kategorien der Kompatibilitätsprüfung erfolgen, sondern über die Bewertung der Zielgrößen, wie Energieertrag oder Stromgestehungskosten, in Abhängigkeit der einzelnen Kompatibilitätskriterien.

### **Bewertung**

Das theoretische Kompatibilitätskriterium betrachtet die Anforderungen an die Flächen und an deren natürliche Gegebenheiten, wie z.B. die Windverhältnisse und Solarstrahlung.

# Inhaltsverzeichnis

## Inhalt

<b>Energiemanagement</b> .....	1
Vision.....	1
Zielsetzung .....	1
Organisation .....	2
Meilensteine .....	2
Nachhaltigkeit.....	2
IST-Analyse .....	2
<b>Energieerzeugung</b> .....	5
Umweltauswirkungen .....	5
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Blockheizkraftwerke (BHKW) .....	7
Wärmepumpen .....	12
Solarenergie .....	19
Solarthermie .....	19
Photovoltaik .....	25
Windkraftanlagen .....	44
PV-Wind-Wärmepumpe .....	54
<b>Energiespeicherung</b> .....	55
UPS-Systeme.....	55
Verbraucherprodukte .....	62
Mobile Energiespeicher .....	63
Verschleiß von Energiespeichern .....	72
<b>Energieinfrastruktur</b> .....	75
<b>Energiebedarf</b> .....	78

# Energieerzeugung

In den vergangenen Jahren hat sich die Erzeugungsstruktur in Deutschland wegen des Ausbaus von dezentralen erneuerbaren Energien verändert, wie die folgende Abbildung zeigt. Im Jahr 2002 waren 19 Gigawatt Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland installiert. Die Prozentzahl an installierter Netto-Leistung zur Stromerzeugung stieg auf 60 Prozent bis zum Jahr 2020 [Fraunhofer, I. S.E. (Energy charts): Energy charts. Nettostromerzeugung in Deutschland. [https://energy-charts.info/charts/energy\\_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2010](https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2010)].

Gründe dafür sind die Deregulierung und Liberalisierung der Energiemärkte, die Verfügbarkeit neuer, preisgünstiger und effizienterer Technologien für die dezentrale Energieerzeugung sowie entsprechende Anreize und politische Förderungen [Horenkamp, W; Hube, W; Jäger, J; Kleimaier, M; Kühn, W; Nestle, D; Pickhan, R; Pokojski, M; Raphael, T; Scheffler, J. (VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung): VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung, 2020].

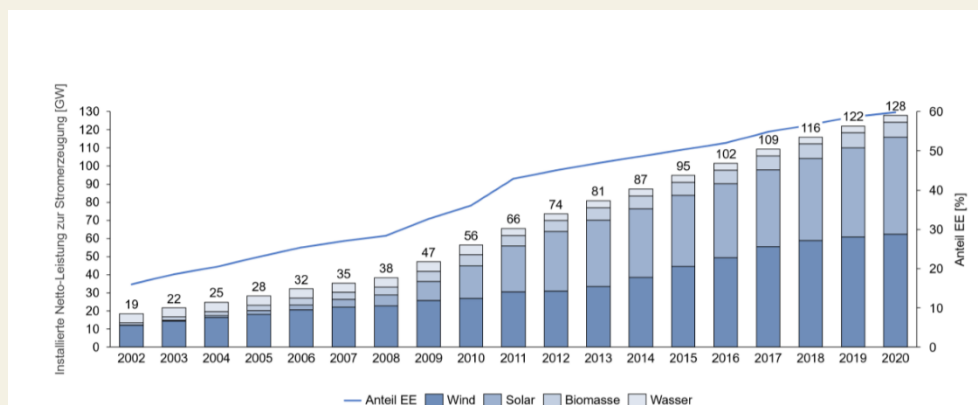


Abb.: Installierte Netto-Leistung aus diversen regenerativen Energien und Anteil von EE der gesamte installierte Netto- Leistung zur Stromerzeugung – Eigene Darstellung nach Fraunhofer (Energy Charts) 2020

## Bisherige Erkenntnisse

- Photovoltaikmodule sind besser als Windkraftanlagen, aufgrund der Höhenvorschriften, der einfacheren Wartung und des einfachen Aufstellungsverfahrens.
- Höhere Kosteneffizienz durch Überdimensionierung der PV-Paneele und Reduzierung der Speicher.
- Empfohlen zur Einspeisung überschüssiger Energie in das Stromnetz.
- Zunächst nur Lithium-Ionen-Zellen, da Wasserstoff in unserem Fall zu ineffizient und teuer ist.
- Heizsystem mit Wärmepumpe - entweder Luft zu Luft oder Erreich zu Luft.
- Ampel-Nachfrage-System wichtig für Nachfragesteuerung.

## Umweltauswirkungen

### CO2-Equivalente

### Statischen Werte

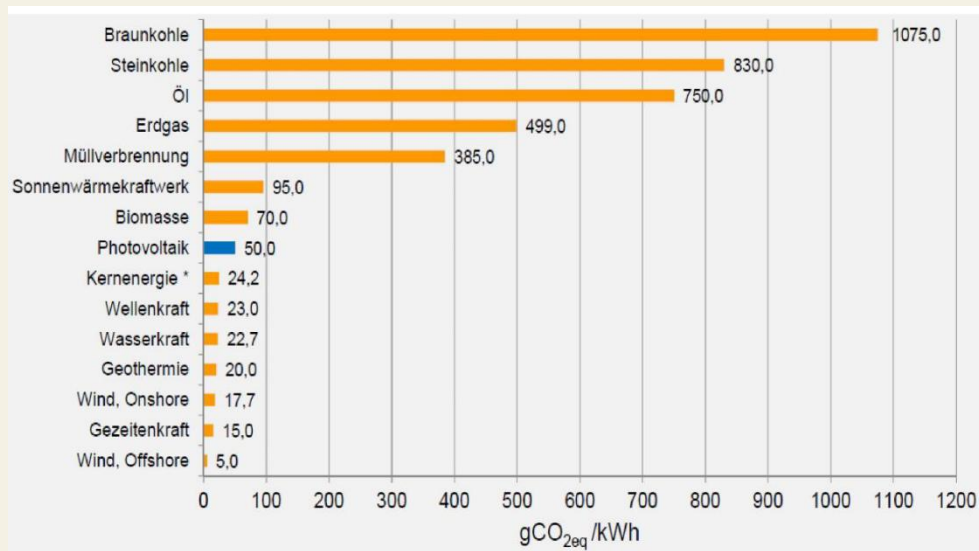


Abb.: CO<sub>2</sub>-Äquivalente verschiedener Stromerzeugungstechnologien (Dr. Harry Wirth, „Aktuelle Daken zur Photovoltaik in Deutschland“, 2020)

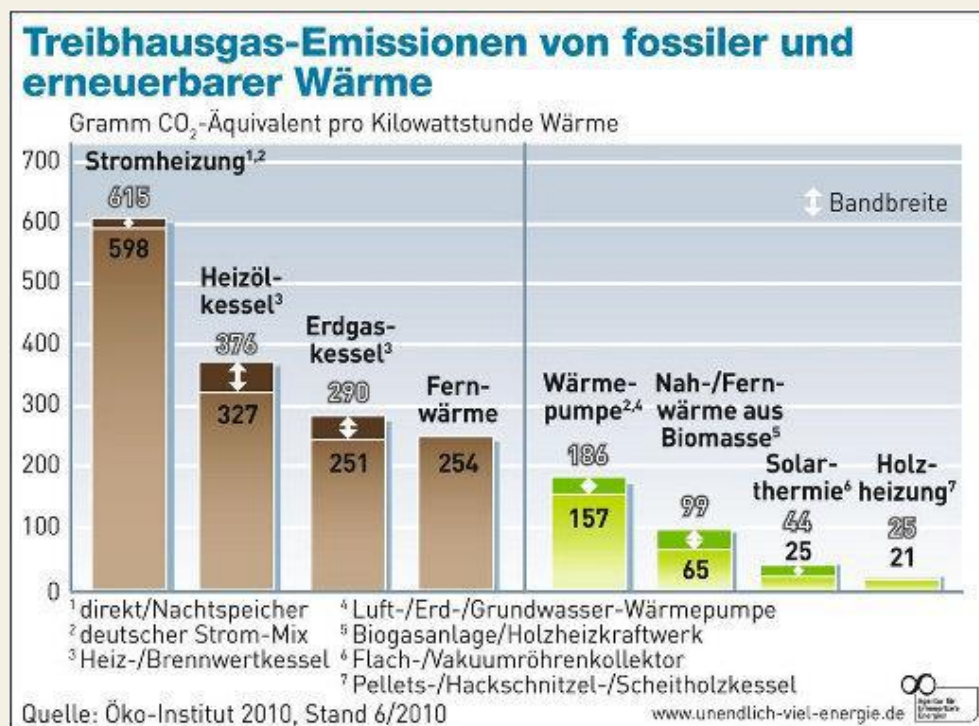


Abb.: CO<sub>2</sub>-Äquivalente verschiedener Wärmeerzeugungstechnologien (Agentur für Erneuerbare Energien, Mediathek. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek> (Zugriff am: 22. April 2021))

## Soziale Auswirkungen

### Versorgungssicherheit

Der Indikator Versorgungssicherheit sollte für die zukünftige Anwendung auch in der gewichteten Bewertung aller Technologien gemäß der Vorgehensweise für die detaillierte Betrachtung berechnet werden. Die berechneten Vollaststunden einer Technologie sind dagegen nicht sehr aussagekräftig.

## Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Blockheizkraftwerke (BHKW)

Kraftwärmekopplung beschreibt die Auskopplung von Wärme aus einem Kraftwerksprozess zur Stromgewinnung. Dabei wird bei einer Verbrennung entstehende Energie mechanisch in elektrische Energie umgewandelt. Die übrige Energie wird in Form von Wärme ohne weitere Umwandlung genutzt. Diese Technologie eignet sich jedoch im großindustriellen Maßstab aufgrund von fehlender Infrastruktur und von hohen Verlusten bei der Verteilung nicht für die Versorgung von Wohngebieten abseits der Erzeugung (vgl. [Thomas Bernd, „Mini Blockheizkraftwerke: Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten“, 2011, S. 15]). Für dezentrale Anwendungen im kleineren Maßstab wird dies in Form von sogenannten Blockheizkraftwerken realisiert.

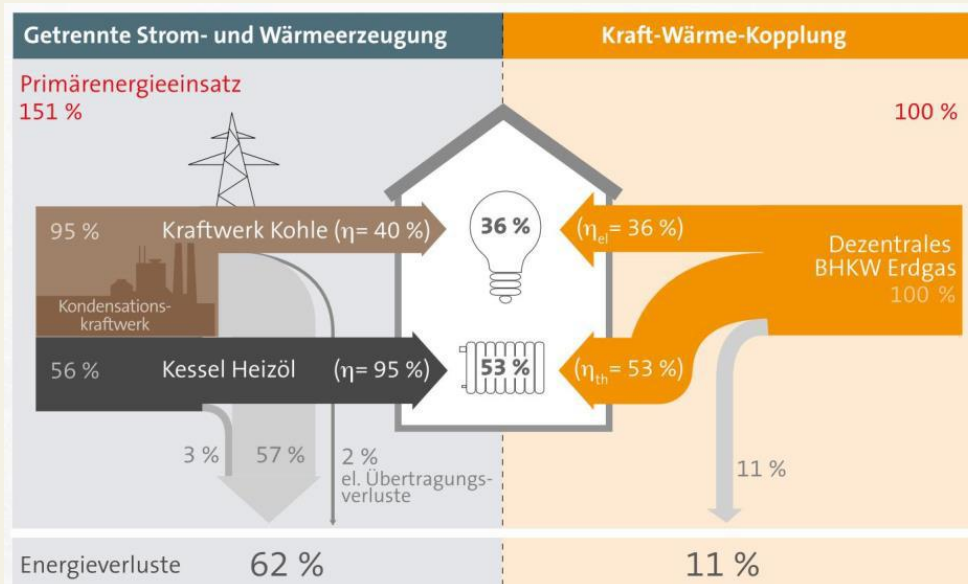


Abb.: Vergleich der Primärenergiebilanzen von Kraft-Wärme-Kopplung und getrennter Strom- und Wärmeerzeugung (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., „Mieterstrom mit KWK als Schlüssel zur Wärmewende“, 2020)

Diese zeichnen sich dadurch aus, dass die Strom- und Wärmegewinnung in einem Raum stattfindet und so hohe Gesamtwirkungsgrade erreicht werden (vgl. [Thomas Bernd, „Mini Blockheizkraftwerke: Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten“, 2011, S. 25]). Bei der Anwendung für die Versorgung eines Gebäudes werden die Anlagen dabei ähnlich wie ein Heizkessel benutzt (vgl. [Thomas Bernd, „Mini Blockheizkraftwerke: Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten“, 2011, S. 16]).

Aus der, in Abschnitt Solarthermie beschriebenen ergänzenden Funktion der Solarthermie bei der Wärmebereitstellung, lässt sich die Möglichkeit ableiten, diese Technologien für eine vollwertige Wärmeversorgung anzuwenden, bei der durch den Einsatz eines BHKW zusätzlich Strom anfällt, der den Fremdbezug von Energie weiter verringert.

Unter der Prämisse des Projekts, eine umweltfreundliche und CO<sub>2</sub>-arme Versorgung des Gebäudes zu gewährleisten, muss bei BHKW insbesondere auf die Frage des Brennstoffes eingegangen werden. Konventionelle Motoren-BHKW erzeugen die Energie aus einer Verbrennung von Heizöl oder Erdgas. Um den Einsatz eines BHKW unter diesen Gesichtspunkten in eine Untersuchung aufzunehmen, sollte der CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit dem, der bestehenden Versorgung verglichen werden, wenn eine vorhanden ist.

### Lebensdauer

Die Lebensdauer eines BHKW ist insbesondere von der Lebensdauer des Motors abhängig, da dieser unter dem größten Verschleiß leidet. Diese wird in [B. Thomas et al., „Gekoppelte Produktion von Kraft und Wärme aus Bio-, Klär- und Deponiegas in kleinen, dezentralen Stirling-Motor-Blockheizkraftwerken“, 2009, S. 40] und [BHKW-Infozentrum, Wie hoch ist die Lebensdauer eines Blockheizkraftwerkes (BHKW)? - BHKW-Infozentrum. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bhkw-infozentrum.de/faq-bhkw-kwk/wie-hoch-ist-die-lebensdauer-eines-blockheizkraftwerkes-bhkw> (Zugriff am: 25. Mai 2021)] auf zwischen 10 und 20 Jahre eingestuft. Für ein Berechnungsmodell wird eine Lebensdauer von 15 Jahren angenommen.

### Flächenbedarf

Um den Flächenbedarf eines BHKW in Abhängigkeit seiner Leistung abzubilden, werden verschiedene Referenzanlagen verglichen und ein funktionaler Zusammenhang erstellt.

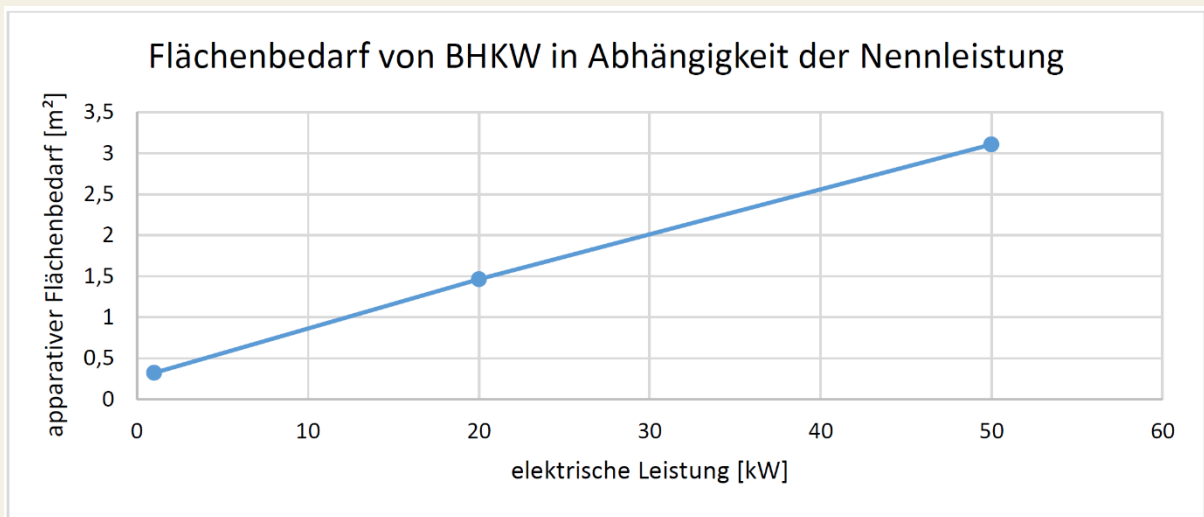


Abb.: Flächenbedarf in m<sup>2</sup> in Abhängigkeit der elektrischen Nennleistung in kWh eines BHKW

### Kennzahlen

#### Elektrische Wirkungsgrad $\eta_{el}$

Einer der wichtigsten Kennwerte für die für die Bewertung von BHKW ist der elektrische Wirkungsgrad.

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Brennstoff}}$$

$\eta_{el}$  elektrischer Wirkungsgrad

$P_{el}$  elektrische Leistung [kW]

$\dot{Q}_{Brennstoff}$  benötigter Brennstoff [kW]

#### Thermische Wirkungsgrad $\eta_{th}$

Einer der wichtigsten Kennwerte für die für die Bewertung von BHKW ist der thermische Wirkungsgrad.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{Brennstoff}}$$

$\dot{Q}_{Nutz}$  thermische Leistung [kW]

Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{ges}$

$$\eta_{ges} = \eta_{el} + \eta_{th} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{Brennstoff}}$$

#### Stromkennzahl $\sigma$

Die Stromkennzahl  $\sigma$  gibt Auskunft über das Verhältnis von erzeugter elektrischer Leistung zur erzeugten Nutzwärme.



$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}}$$

### Bewertung eines BHKW

Es ist zwischen einer wärmegeführten und einer stromgeführten Betriebsweise der Anlage zu unterscheiden. Eine wärmegeführte Betriebsweise hat den Vorteil, dass der Brennstoff optimal ausgenutzt wird (vgl. [M. G. Margrit Schaeede, „Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn“, S. 54]). Bei einer stromgeführten Betriebsweise ist die zusätzlich bereitgestellte elektrische Energie größer, die anfallende Wärme, muss jedoch gespeichert werden. Insbesondere in wärmeren Monaten hängt die Wirtschaftlichkeit einer stromgeführten Betriebsweise davon ab, wie viel Wärme genutzt werden kann oder ob diese saisonal gespeichert werden kann. Ebenfalls kann die Wärme, die bei der Stromgewinnung anfällt, die wirtschaftliche Funktion anderer Anlagen einschränken, wenn der Gesamtwärmebedarf durch die stromgeführte Erzeugung übersättigt wird. Die Wahl der Betriebsführung ist also abhängig davon, wie das BHKW im Bezug zum Wärme- und Strombedarf dimensioniert ist.

Benötigte Parameter für die Bewertung:

- Wärmeenergiebedarf
- Elektroenergiebedarf
- Temperaturen Heizungssystem
- Bezugskosten Strom
- Bezugskosten Wärme
- Thermischer Wirkungsgrad
- Elektrischer Wirkungsgrad
- Platzbedarf

Für BHKW lässt sich keine Vorauswahl aufgrund von Ausschlusskriterien treffen. Es kann allerdings eine Auswahl getroffen werden, ob das BHKW strom- oder wärmegeführt betrieben werden soll (vgl. Abbildung).

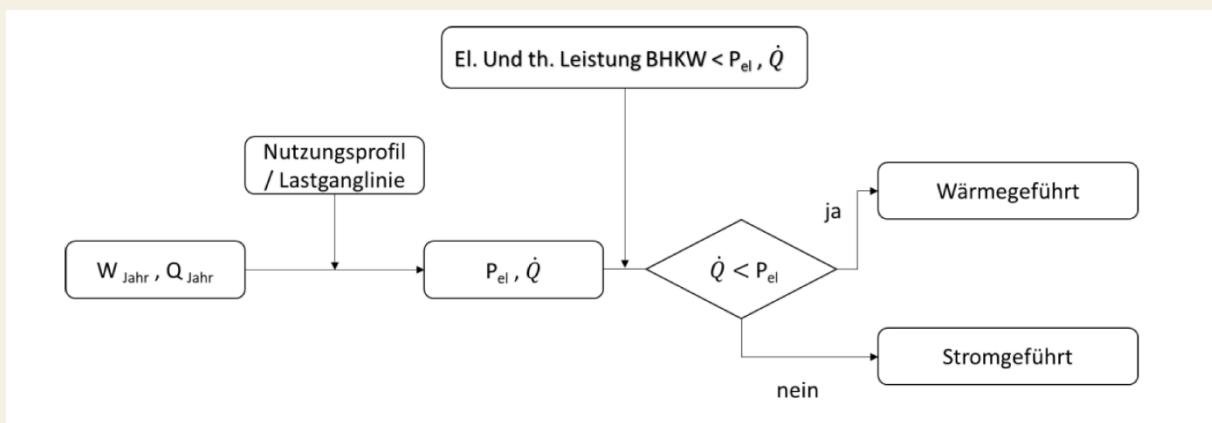


Abb.: Benötigte Werte für Ermittlung der Kenndaten einer Anlage

Die Abbildung zeigt den Entscheidungsweg für eine strom- oder wärmegeführte Betriebsweise eines BHKW. Aus dem jährlichen Strom- und Wärmebedarf des Gebäudes wird mit der thermischen und elektrischen Leistung des BHKW ermittelt, welcher Bedarf im Durchschnitt höher ist und damit das BHKW dimensioniert. Ist z.B. der elektrische Energiebedarf größer, wird nach dem Wärmebedarf ausgelegt und das BHKW wärmegeführt betrieben, um eine Überproduktion an Elektrizität zu vermeiden.

Aus einem Vergleich verschiedener KWK-Anlagen wurden Mittelwerte für den elektrischen und thermischen Wirkungsgrad von Klein-BHKW ermittelt. Diese ergeben sich zu  $\bar{\eta}_{el}=0,404$  und  $\bar{\eta}_{th}=0,436$ .

### Umweltauswirkungen

## CO<sub>2</sub>-Equivalent Emissionen

Der CO<sub>2</sub> Bedarf eines BHKW ist direkt vom Brennstoffbedarf abhängig. Um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß eines BHKW zu berechnen, wird das CO<sub>2</sub>-Equivalent des Energieträgers benutzt. Üblicherweise werden BHKW mit Erdgas betrieben. Das CO<sub>2</sub>-Equivalent von Erdgas wird nach [67] mit 247g/kWh bemessen.

## Wirtschaftlichkeit

Die Strom- und Wärmegestehungskosten eines BHKW sind in erster Linie abhängig von den Investitionskosten, sowie den laufenden Kosten für den Brennstoff.

## Investitionskosten (CAPEX)

Die spezifischen Investitionskosten variieren je nach Anlagengröße. Die Kosten sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Werte wurden den Quellen [Heizsparer, Mikro-BHKW - Kosten, Einsatz, Leistung, Anwendung - Daten & Fakten. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heizsparer.de/heizung/heizungssysteme/bhkw/mikro-bhkw> (Zugriff am: 7. Mai 2021)], [Kesselheld, Dachs BHKW: Modelle und Preise im Überblick - Kesselheld. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kesselheld.de/dachs-bhkw/> (Zugriff am: 7. Mai 2021)] entnommen.

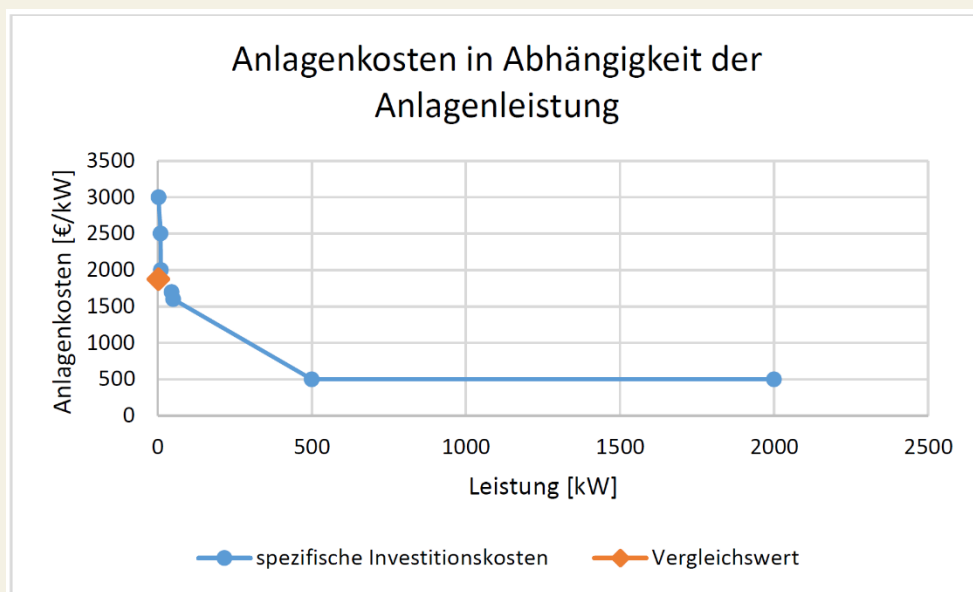


Abb.: Spezifische Investitionskosten in Abhängigkeit der Anlagengröße.

Mit steigender Nennleistung sinken die spezifischen Investitionskosten für BHKW-Anlagen. Ab einer Nennleistung von 500 kW belaufen sich die spezifischen Kosten für ein BHKW auf 500 €/kW. Über den in der Abbildung dargestellten Zusammenhang können die Investitionskosten für eine Anlage beliebiger Größe abgeschätzt werden. Zur Verifikation wird eine Anlage, für die Daten bestehen, mit dem funktionellen Zusammenhang verglichen (siehe obere Abbildung, Vergleichswert). Diese hat laut Datenblatt [HCS, „Senertec-Datenblatt Dachs Pro 20“.] eine elektrische Leistung von 19,2 kW und kostet nach online Angaben [Kesselheld, Dachs BHKW: Modelle und Preise im Überblick - Kesselheld. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kesselheld.de/dachs-bhkw/> (Zugriff am: 7. Mai 2021)] inklusive nötigem Zubehör und Montage 36.000 €. Damit ergeben sich spezifische Kosten von 1.875 €/kW. Diese liegen innerhalb der in [Heizsparer, Mikro-BHKW - Kosten, Einsatz, Leistung, Anwendung - Daten & Fakten. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heizsparer.de/heizung/heizungssysteme/bhkw/mikro-bhkw> (Zugriff am: 7. Mai 2021)] genannten Kosten für ein Mini-BHKW (10–15 kW) von 1.700 – 2.000 €/kW.

## Laufende Kosten (OPEX)

### Wartungskosten

Als Wartungskosten werden in [63] Kosten von 2–3ct.kWh elektrische Leistung genannt. Aus der jährlich bereitgestellten elektrischen Energie lassen sich die Wartungskosten berechnen.

$$I_{Wartung} = W_{el,jährlich} \cdot k_{Wartung}$$

$I_{Wartung}$	Wartungskosten [€]
$W_{el,jährlich}$	Jährliche elektrische Arbeit $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}}\right]$
$k_{Wartung}$	Spezifische Wartungskosten $\left[\frac{\text{ct.}}{\text{kWh}}\right]$

### Kosten Brennstoffverbrauch

Der Brennstoffverbrauch lässt sich anhand der bereitgestellten elektrischen und thermischen Leistung berechnen. Die Kosten für Erdgas als Brennstoff betragen dabei nach [Statistisches Bundesamt Deutschland, Erdgaspreise für Nicht-Haushalte: Deutschland. [Online]. Verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=61243-0014&language=de#abreadcrumb> (Zugriff am: 10. Mai 2021).] für einen „Nicht-Haushalt“ mit einem Energieverbrauch von 278kWh/a bis 2.778kWh/a 0,0444€/kWh. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Erzeugung der Anlage an den Energiebedarf angepasst ist. Das bedeutet, übersteigt die erzeugte Leistung den Leistungsbedarf wird angenommen, dass die erzeugte Leistung auf den benötigten Bedarf geregelt wird. Eine Beeinflussung des Wirkungsgrades bei Teillastverhalten kann dabei nicht berücksichtigt werden. Die Anlage wird nach dem mittleren jährlichen Verbrauchswert dimensioniert. Dabei wird das BHKW so ausgelegt, dass weder die elektrische noch die thermische Leistung den mittleren Verbrauch übersteigt.

Aus einem Vergleich verschiedener KWK-Anlagen wurden Mittelwerte für den elektrischen und thermischen Wirkungsgrad von Klein-BHKW ermittelt. Diese ergeben sich zu  $\bar{\eta}_{el}=0,404$  und  $\bar{\eta}_{th}=0,436$ .

Die jährlichen Kosten eines BHKW werden durch die Zuschläge nach KWKG [BGBl, „Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG 2020“, 2020] verringert. Nach KWKG § 7 Abs. 2 Nr. 1 sind die Zuschläge für eine KWK Anlage bei Eigenverbrauch für Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 50kW mit 4ct/kWh und bis 100kW mit 3ct/kWh festgelegt. Laut KWKG-Novelle 2020 ist der Zuschlag für Anlagen ab dem Jahr 2020 auf 8ct/kWh erhöht (vgl. [[Kraft-Wärme-Kopplung.de](https://kww.info/project/kwkg-2020/), KWKG Novelle 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://kww.info/project/kwkg-2020/> (Zugriff am: 11. Mai 2021)]). Die Zuschläge sind dabei nach der KWKG Novelle 2020 auf eine Laufzeit von 30.000 Vollbenutzungsstunden begrenzt.

### Soziale Auswirkungen

#### Gesundheit

BHKW-Anlagen werden in der Regel durch eine Verbrennung betrieben. Dabei entstehen unumgänglich Schadstoffe, wie CO<sub>2</sub> und Stickstoffoxide. Die Immission an Anwohner oder Angestellte in der Umgebung kann durch eine Abgasreinigung und ein gutes Konzept zur Schadstoffabfuhr minimiert werden. Der Indikator wird dennoch auf neutral gesetzt, da es sich um die einzige Technologie handelt, die meist auf einer Verbrennung basiert.

#### Ausblick weitere Recherchen

#### Energiebezugskosten

Ebenfalls werden die Energiebezugskosten bisher als konstant angenommen. Eine Prognose von Strom- und Wärmekosten kann helfen, die Kosteneinsparungen genauer zu prognostizieren, insbesondere, da sich bei den Energiebezugskosten eine steigende Tendenz abzeichnet.

#### Verschleiß der Anlage

Ein weiterer Einfluss, welcher bisher vernachlässigt ist, ist der Verschleiß von Anlagen und der damit einhergehende Wirkungsgradverlust. Das beeinflusst das zeitliche Verhalten der Energieerzeugung und -speicherung und damit auch alle anderen Indikatoren, die von der Energieerzeugung abhängen.

## Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe basiert auf dem Prinzip, in einem Kreislauf eines Mediums über die Zufuhr von mechanischer Energie thermische Energie bereitzustellen. Dabei wird Wärme auf einem geringen Temperaturniveau aufgenommen und über die Wärmepumpenschaltung durch Verdichtung auf ein höheres Temperaturniveau angehoben und zur Nutzung bereitgestellt (vgl. [H. Frey, Energieautarke Gebäude: Auf dem Weg zu Smart Energy Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 324]).

Wärmepumpen werden in der Regel für die Bereitstellung von Wärme für Heizungs- und Warmwassersysteme genutzt. Dabei ist ein entscheidendes Kriterium für die Effizienz der Anlagen die bereitgestellte Vorlauftemperatur der Anlage (vgl. U. Baden-Württemberg, „Energieeffiziente Wärmepumpen-Heizungsanlagen“, 2015).

### Lebensdauer

Die Lebensdauer von Wärmepumpen ist durch die bewegten Teile, wie Motoren, Pumpen und Verdichter begrenzt. Nach [S. Wolf, „Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme“, S. 17] liegt die Lebensdauer einer Wärmepumpenanlage üblicherweise zwischen 15 und 20 Jahren. Für ein Modell wird eine Lebensdauer von 17,5 Jahren angenommen.

### Flächenbedarf

Je nach Art der Wärmepumpe kann der Flächenbedarf stark variieren. Während Luft-Wasser- oder Luft-Luft-Wärmepumpen nur geringen apparativen Aufwand mit sich bringen, benötigen Erdwärmepumpen große Kollektorflächen oder Platz für Bohrungen. Das kann in Konkurrenz zu anderen Erzeugungstechnologien stehen. Ein Erdwärmekollektor kann z.B. die Verankerung der Aufständigung für eine Solar-Anlage, oder das Fundament für ein Kleinwindrad in der Umsetzbarkeit und Lokalisierung beeinflussen. Für eine Luft-Wasserwärmepumpe im Leistungsbereich von 5–16 kWth liegt der Flächenbedarf für das Wärmepumpenmodul, sowie das Außengerät bei ca. 1 m<sup>2</sup> (vgl. [Panasonic Deutschland, „Kombi-Hydromodule Aquera LT, Generation H Datenblatt“, 2018]).

### Typen

#### Erdwärmepumpen

Erdwärmepumpen beziehen die Wärme für den Prozess aus dem Erdreich. Der Vorteil dabei ist, dass im Erdreich ein konstantes Temperaturniveau vorliegt (vgl. Abbildung).

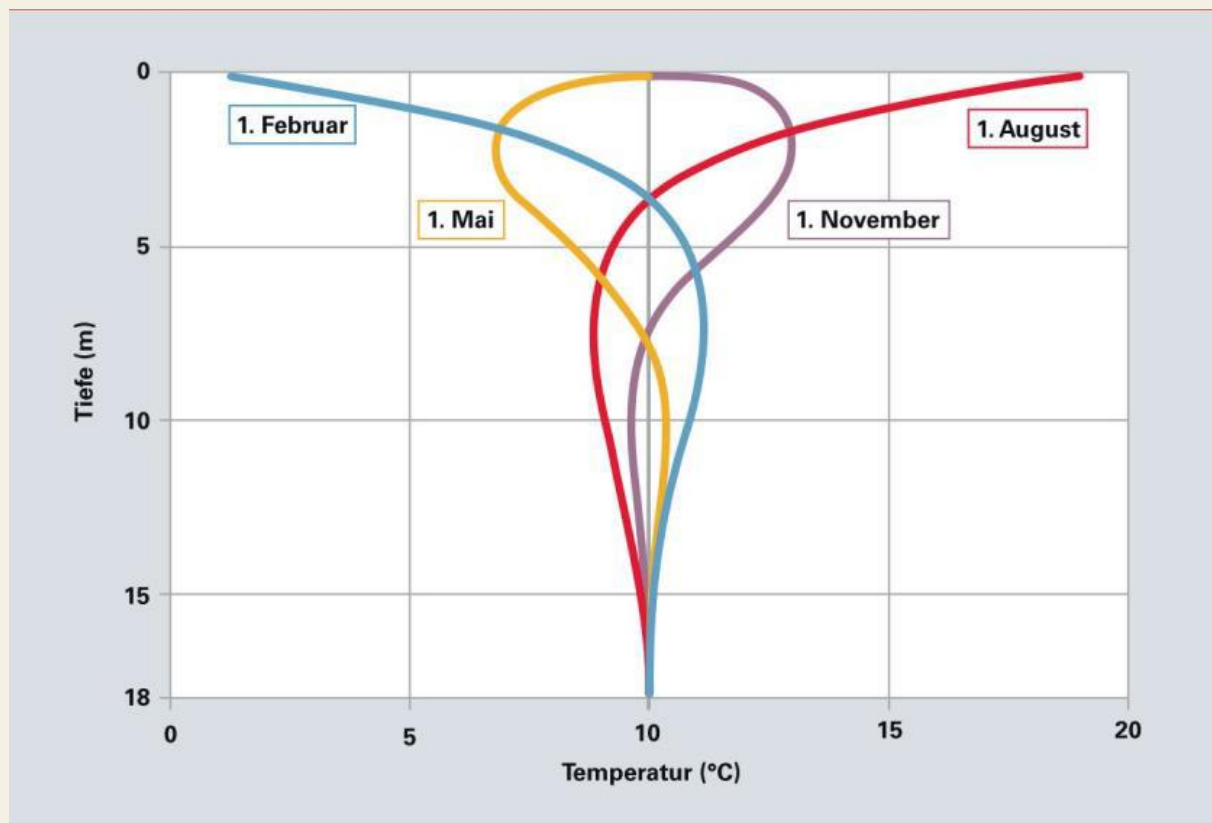


Abb.: Jährlicher Verlauf der Bodentemperatur nach Bodentiefe (S. Wolf, „Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme“)

Die Erschließung ist hingegen schwierig, da großflächige Aushebungen für den Bau eines Erdwärmekollektors oder Genehmigungen und Tiefenbohrungen für Erdwärmesonden nötig sind. Dies bringt verglichen mit anderen Wärmepumpen hohe Investitionskosten mit sich.

### **Wasser-Wasser-Wärmepumpen**

Wasser-Wasser-Wärmepumpen entziehen die Wärme für den Prozesskreislauf aus Grundwasser. Die Vorteile sind die gleichen, wie bei Erdwärmepumpen. Allerdings werden zur Entnahme und Rückgabe des Grundwassers zwei Brunnen benötigt. Da in das Grundwasser eingegriffen wird, ist eine Genehmigung der unteren Wasserbehörde nötig.

### **Luft-Wasser-Wärmepumpen**

Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen wird die benötigte Wärmeenergie aus der Umgebungsluft entzogen. Der apparative Aufwand ist geringer als bei Erdwärme- und Wasser-Wasser Wärmepumpen und die Investitionskosten somit auch. Der logistische Aufwand ist ebenfalls kleiner, da keine Bohrungen oder großflächigen Installationen benötigt werden. Somit bietet sich eine Luft-Wasser-Wärmepumpe für Bestandsgebäude besser an. Ein Nachteil ist, dass die Temperatur der Umgebungsluft starken Schwankungen unterliegt. Somit variieren die energetischen Kenngrößen der Anlage dauerhaft.

### **Luft-Luft-Wärmepumpen**

Luft-Luft-Wärmepumpen nutzen die beheizte Raumluft, um Wärme bereitzustellen. Bei dieser Art von Wärmepumpen muss darauf geachtet werden, dass nicht schon eine andere Nutzung der Raumluft z.B. in Form einer Wärmerückgewinnung der RLT-Anlagen vorgesehen ist.

### **Kenngrößen**

Die Kenngrößen, die für die Auslegung einer Anlage benötigt werden, belaufen sich auf die Jahresarbeitszahl (JAZ), die Leistungszahl  $\varepsilon$ , und den Heizenergiebedarf.

### **Leistungszahl $\varepsilon$**

Die Leistungszahl einer Wärmepumpe beschreibt das Verhältnis der abgegebenen Heizleistung einer Wärmepumpe zu der aufgewendeten elektrischen Energie (vgl. M. S. I. Tiator, „Wärmepumpen / Wärmepumpenanlagen“, 2007 und S. Wolf, „Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme“).

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}}$$

$\varepsilon$	Leistungszahl [-]
$\dot{Q}_H$	Heizwärmestrom [kW]
$P_{el}$	Elektrische Leistung [kW]

Die maximale Leistungszahl beschreibt “die theoretisch maximal erreichbare Leistungszahl [...] einer Wärmepumpe“ [H. Frey, Energieautarke Gebäude: Auf dem Weg zu Smart Energy Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 338] und berechnet sich zu:

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_{warm}}{T_{warm} - T_{kalt}}$$

$\varepsilon_{max}$	Maximale Leistungszahl
$T_{warm}$	Temperatur Wärmebereitstellung [K]
$T_{kalt}$	Temperatur Wärmeabgabe [K]

### Gütegrad

Der Gütegrad einer Wärmepumpe beschreibt das Verhältnis der Leistungszahl zur maximalen Leistungszahl und beträgt im Real-Fall zwischen 0,45 und 0,55 (vgl. [H. Frey, Energieautarke Gebäude: Auf dem Weg zu Smart Energy Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 339]).

$$\eta_{WP} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}}$$

$\eta_{WP}$	Gütegrad Wärmepumpe
-------------	---------------------

### Jahresarbeitszahl (JAZ)

Zur Kontrolle der Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe wird ebenfalls die Jahresarbeitszahl aus Messungen über einen Betriebszeitraum berechnet. Sie berechnet sich wie die Leistungszahl, allerdings über ein festes zeitliches Intervall.

$$JAZ = \frac{Q_H}{W_{el}} = \frac{\int_{t1}^{t2} \dot{Q}_H dt}{\int_{t1}^{t2} P_{el} dt}$$

$JAZ$	Jahresarbeitszahl
$Q_H$	Wärmemenge über Betrachtungszeitraum [kWh]
$W_{el}$	Elektrische Arbeit über den Betrachtungszeitraum [kWh]
$t1$	Startzeitpunkt des Betrachtungszeitraums
$t2$	Endzeitpunkt des Betrachtungszeitraums

### Leistungszahl (COP)

Für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen spielt insbesondere die Leistungszahl (COP) eine Rolle. In den Angaben von Herstellern ist die Leistungszahl für bestimmte Bedingungen gegeben (siehe [Panasonic Deutschland, „Kombi-Hydromodule Aquera LT, Generation H Datenblatt“, 2018]). Die Angaben umfassen den COP für verschiedene Außentemperaturen bei einer bereitgestellten Temperatur von 35°C. Die Außentemperatur variiert dabei zwischen -15°C und 7°C.

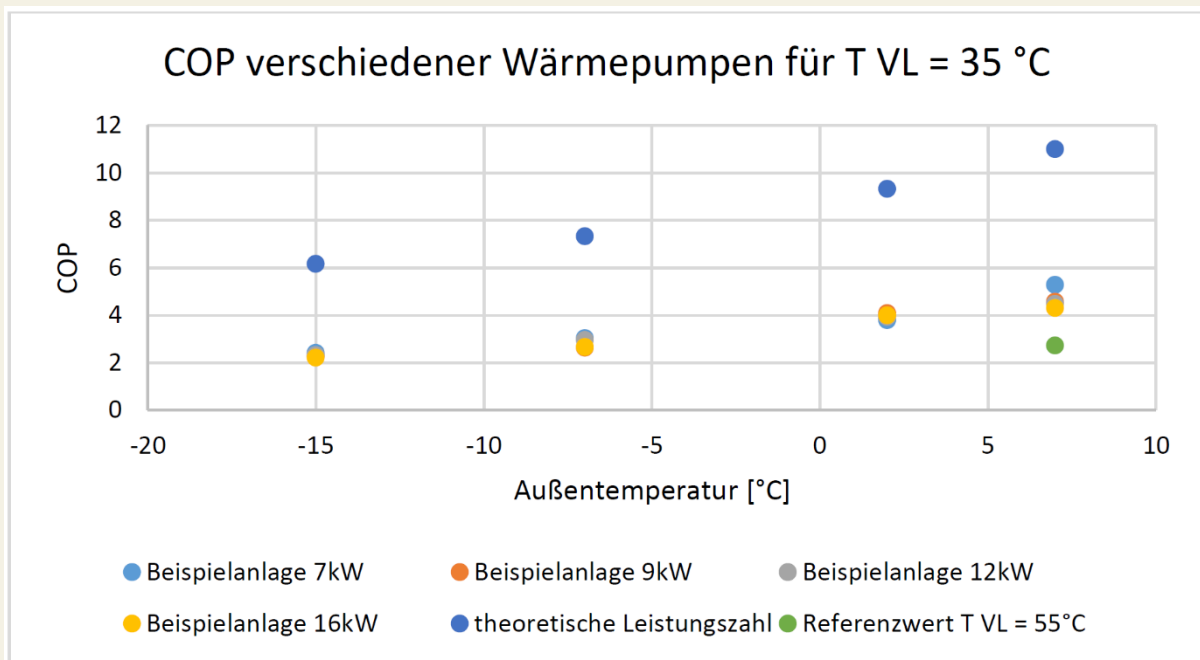


Abb.: COP in Abhängigkeit der Außentemperatur als Grundlage für die Darstellung einer Wärmepumpe in der Simulation [Panasonic Deutschland, „Kombi-Hydromodule Aquera LT, Generation H Datenblatt“, 2018]

Die Abbildung zeigt die Leistungszahlen verschiedener Wärmepumpen bei einer Bereitstellungstemperatur von 35 °C in Abhängigkeit von der Außentemperatur in °C.

Zudem ist ein Referenzwert jeder Anlage für eine Bereitstellungstemperatur von 55 °C bei einer Außentemperatur von 7 °C abgebildet. Es lässt sich erkennen, dass die Leistungszahl mit steigender Bereitstellungstemperatur sinkt. Ebenfalls ist für die einzelnen Punkte die maximale Leistungszahl nach Formel Maximale Leistungszahl für die gleichen Temperaturverhältnisse dargestellt. In der Simulation wird die Berechnung der theoretischen Arbeitszahl bis zu einer Außentemperatur von 15 °C durchgeführt. Ab höheren Temperaturen wird die theoretische Arbeitszahl gleich der bei einer Außentemperatur von 15 °C gesetzt. Es lässt sich feststellen, dass die theoretische und die tatsächlichen Leistungszahlen zueinander proportional sind.

Tab. : Leistungszahl und Verhältnis zur theoretischen Leistungszahl in Abhängigkeit der Außentemperatur bei einer Bereitstellungstemperatur von 35°C

Außentemperatur [°C]	COP	$\frac{COP}{COP_{theoretisch}}$
7	5,29	0,480675
2	3,79	0,40587376
-7	3,04	0,41434366
-15	2,42	0,39266591

Um einen Zusammenhang zwischen theoretischer und tatsächlicher Leistungszahl herzustellen, wird über den Wertebereich der Verhältnisse interpoliert. So kann für die stündlich gemessenen Werte der Außentemperatur die Leistungszahl, sowie die theoretische Leistungszahl für den Verlauf eines Jahres berechnet werden. Um den Einfluss der zu erreichenden Vorlauftemperatur zu berücksichtigen, muss noch eine Umrechnung in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur durchgeführt werden. Bei der durchgeführten Interpolation werden die stündlichen Werte für eine Vorlauftemperatur von 35 °C berechnet. Danach wird der Interpolationsfaktor in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur bestimmt. Dafür werden die Werte aus den Datenblättern bei einer Außentemperatur von 7 °C und Vorlauftemperaturen von 35 °C und 55 °C genutzt.

$$c_{VL} = \frac{COP(55\text{ °C}, 7\text{ °C}) - COP(35\text{ °C}, 7\text{ °C})}{55\text{ °C} - 35\text{ °C}}$$

$$COP(\vartheta_{VL}, \vartheta_a) = COP(35\text{ °C}, \vartheta_a) + c_{VL} \cdot (\vartheta_{VL} - 35\text{ °C})$$

In der folgenden Abbildung sind die Leistungszahlen für verschiedene Vorlauftemperaturen in Abhängigkeit des Jahrestemperaturverlaufs in Avantis, Aachen dargestellt.

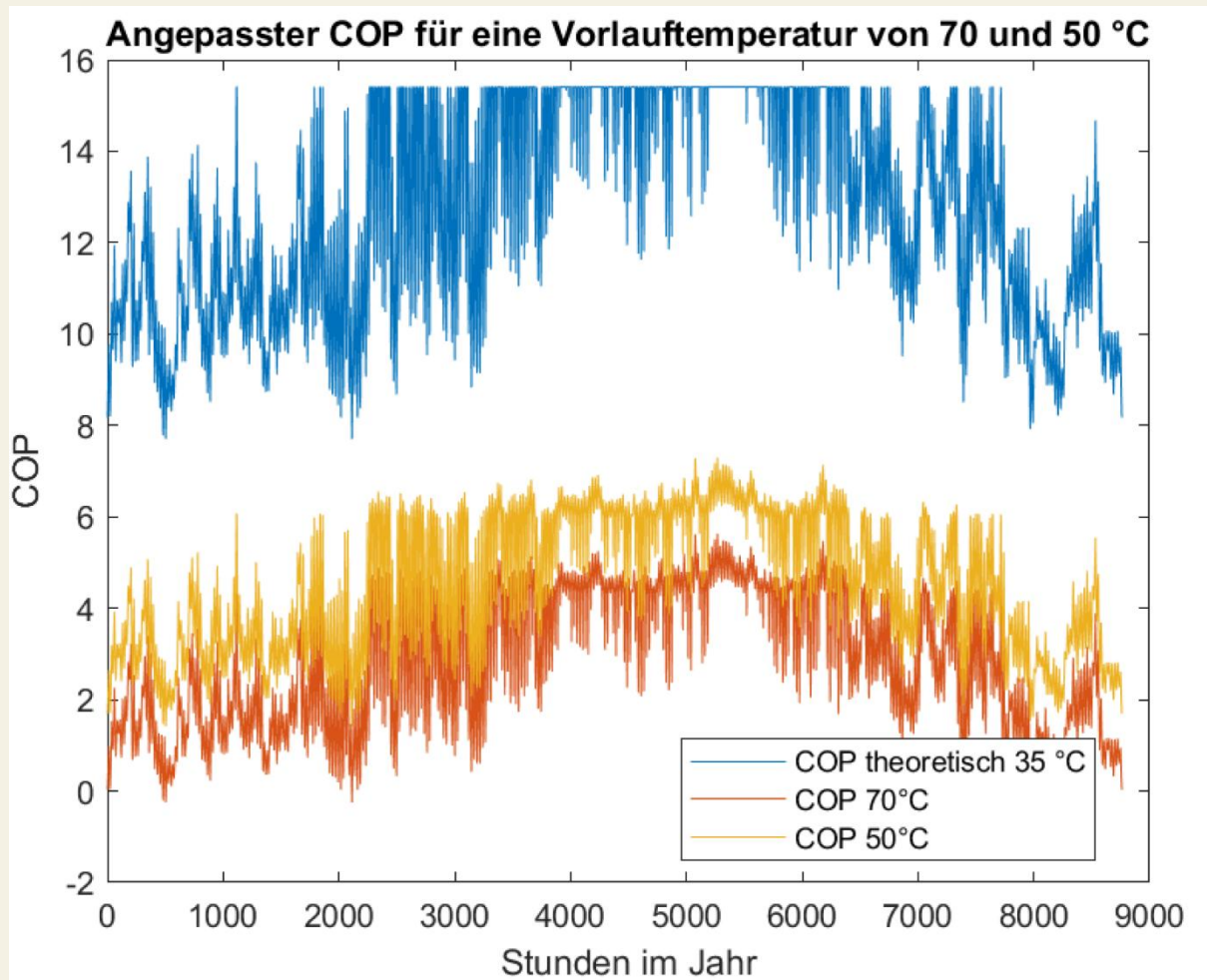


Abb.: Simulationsergebnisse COP für verschiedene Vorlauftemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperaturverlaufs

### Bewertung einer Wärmepumpenanlage

Benötigte Parameter für die Bewertung:

- Wärmeenergiebedarf
- Verfügbare Grundstücksfläche
- Temperaturen Heizungssystem
- Möglichkeit Umrüstung Heizungssystem
- Bezugskosten Strom
- Bezugskosten Wärme
- Leistungszahl



- Gütegrad

Ein direktes Ausschlusskriterium für die Anwendung einer Wärmepumpe ist das vorhandene Heizungssystem. Es wird ein Flächenheizungssystem, welches mit niedrigeren Vor- und Rücklauftemperaturen arbeitet, oder ein Heizungssystem, dass sich auf niedrige Vor- und Rücklauftemperaturen umrüsten lässt benötigt [H. Frey, Energieautarke Gebäude: Auf dem Weg zu Smart Energy Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 361]. Um mit solchen Heizsystemen die Behaglichkeit gewährleisten zu können, muss das Gebäude gut gedämmt sein (vgl. [U. Baden-Württemberg, „Energieeffiziente Wärmepumpen-Heizungsanlagen“, 2015, S. 3]).

Abb.: Logische Struktur Vorauswahl Wärmepumpe

Die vorherige Abbildung stellt die Entscheidungsstruktur in Abhängigkeit des Heizungssystems dar. Überschreitet die Vorlauftemperatur des Heizkreises einen Wert von 45°C wird geprüft, ob sich der Heizkreis auf einen Betrieb mit einer niedrigeren Temperatur nachrüsten lässt. Ist dies nicht der Fall, scheidet die Technologie durch die Vorauswahl für die Nutzung im Projekt aus. Ist eine Umrüstung möglich, wird ein Verweis erstellt, damit diese Kosten in späteren detaillierteren Analysen berücksichtigt werden. Für ein Modell werden Luft-Wasser-Wärmepumpen betrachtet, da diese mit dem geringsten apparativen und logistischen Aufwand auch in Bestandsgebäuden integriert werden können.

### **Umweltauswirkungen**

#### **CO<sub>2</sub>-Equivalent Emissionen**

#### **Wirtschaftlichkeit**

Ein wichtiges Kriterium für den Einsatz einer Wärmepumpe ist die Wirtschaftlichkeit. Aus der Herleitung in [M. S. I. Tiator, „Wärmepumpen / Wärmepumpenanlagen“, 2007, S. 54-55] lässt sich ableiten, dass die Leistungszahl einer Erdwärmepumpe einen Wert von 3 überschreiten muss, damit der Gesamtwirkungsgrad den einer konventionellen Heizungsanlage übersteigt. Dabei wird ein Wert zwischen 4 und 5 als „gut“ angesehen (vgl. [H. Frey, Energieautarke Gebäude: Auf dem Weg zu Smart Energy Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 337], [M. S. I. Tiator, „Wärmepumpen / Wärmepumpenanlagen“, 2007, S. 55] und [H. Frey, Energieautarke Gebäude: Auf dem Weg zu Smart Energy Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 362]). Aus der in Formel „Maximale Leistungszahl“ beschriebenen Abhängigkeit der maximalen Leistungszahl folgt in Verbindung mit dem niedrigen Temperaturniveau von Erdwärme, Luft und Grundwasser eine Begrenzung der erzeugbaren Vorlauftemperatur auf ca. 50 °C (vgl. [H. Frey, Energieautarke Gebäude: Auf dem Weg zu Smart Energy Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 363] und [U. Baden-Württemberg, „Energieeffiziente Wärmepumpen-Heizungsanlagen“, 2015, S. 3]), wenn die Anlage wirtschaftlich betrieben werden sollen.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden die Investitionskosten einer Wärmepumpe benötigt. In diesem Fall wird eine Luft-Wasser-Wärmepumpe betrachtet, wenn es sich um ein bestehendes Gebäude handelt und Bodenkollektoren durch die bestehende Nutzung der Grundstücksfläche nicht möglich ist.

### **Soziale Auswirkungen**

#### **Gesundheit**

Beim Betrieb von Wärmepumpen fallen keine Schadstoffe an. Es wird elektrische Hilfsenergie benötigt, welche aber in der Regel schadstoffimmissionsfrei bereitgestellt wird. Die Wärmeübertragungsmedien werden in geschlossenen Kreisläufen geführt und es kann oft mit Wasser als Wärmeträger gearbeitet werden. Der Indikator kann als positiv bewertet werden.

### **Ausblick weitere Recherche**

#### **Energiebezugskosten**

Ebenfalls werden die Energiebezugskosten bisher als konstant angenommen. Eine Prognose von Strom- und Wärmekosten kann helfen, die Kosteneinsparungen genauer zu prognostizieren, insbesondere, da sich bei den Energiebezugskosten eine steigende Tendenz abzeichnet.

#### **Verschleiß der Anlage**

Ein weiterer Einfluss, welcher bisher vernachlässigt ist, ist der Verschleiß von Anlagen und der damit einhergehende Wirkungsgradverlust. Das beeinflusst das zeitliche Verhalten der Energieerzeugung und -speicherung und damit auch alle anderen Indikatoren, die von der Energieerzeugung abhängen.

### **Standortanforderungen**

Hier besteht das Potential in der Bewertung auch verschiedene Ausführungen dieser Technologie zu vergleichen und diejenige weiter zu betrachten, die die Standortanforderungen am besten erfüllt.

Hierbei beispielweise zwischen Wasser-Wasser Wärmepumpen und Erdwärmepumpen, welche verschiedene Vor- und Nachteile (vgl. oben) haben, die je nach Standortgegebenheiten eine Ausführung hervorheben oder schlecht bewerten können.

## Solarenergie

Photovoltaik bezeichnet die direkte Umwandlung solarer Strahlungsenergie in elektrische Energie mittels Solarzellen. Die installierte Leistung in Dachanlagen und Freiflächenanlagen stieg im Jahr 2019 im Vergleich zu 2002 um knapp 50 Prozent auf 49,2 Megawattstunden [Fraunhofer, I. S.E. (Energy charts): Energy charts. Nettostromerzeugung in Deutschland. [https://energy-charts.info/charts/energy\\_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2010](https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2010)].

Die Photovoltaik-Technologie bietet ein umfassendes Leistungsspektrum, das von autarken Systemen in Solarlampen bis hin zu Photovoltaikparks variieren kann.

In einem Solarmodul werden die einzelnen Solarzellen elektrisch verschaltet, um eine gewünschte Ausgangsspannung oder -strom zu erzeugen. Die Verschaltung kann entweder in Reihe oder parallel realisiert werden. Mehrere Module werden zu einem Generator verbunden. Der produzierte Strom wird zu einem Wechselrichter geführt. Dieser wandelt den Gleichstrom in Wechselstrom um, der dann über einen Zähler ins öffentliche Stromnetz eingespeist wird [Mertens, K. (Photovoltaik): Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. 4., aktualisierte Auflage Aufl. München: Hanser, Carl, 2018].

Die Leistung einer Anlage wird in Kilowatt-Peak (KWp) angegeben. Damit wird die Spitzenleistung der Anlage beschrieben, die diese unter Standardbedingungen erzielen kann. Als Standard-Bedingungen gelten eine Temperatur von 25 Grad Celsius, eine Einstrahlung von 1000 Watt pro Quadratmeter und ein Spektrum von AM 1,5. Je nach Modultyp und dem damit verbundenen Wirkungsgrad entspricht 1Kilowattpeak etwa 6 bis10 Quadratmeter Modulfläche [Mertens, K. (Photovoltaik): Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. 4., aktualisierte Auflage Aufl. München: Hanser, Carl, 2018].

Ein wesentliches Kriterium für die Wirtschaftlichkeit einer Photovoltaikanlage ist die jährliche Sonneneinstrahlung am betrachteten Standort.

Innerhalb der Europäischen Union schwankt die jährliche Solareinstrahlung zwischen von 850 kWh/(m2a) in Schweden bis zu rund 1.750 kWh/(m2a) in Südsanien.

In Deutschland werden auf den Nordseeinseln Werte bis zu 1.100 kWh/(m2a) und in Mitteldeutschland zwischen 930 und 1.000 kWh/(m2a) registriert. Die höchsten Jahressummen der Globalstrahlung von bis zu 1.200 kWh/(m2a) werden bereichsweise in Süddeutschland erreicht. Strahlungskartierungen dienen der übersichtlichen Darstellung der räumlichen Variationsbreite solarer Strahlung und werden für Ist-Analysen verwendet [Energieagentur, N. R.W. (Solaratlas für Nordrhein-Westfalen): Solaratlas für Nordrhein-Westfalen. In: Energieagentur NRW, Wuppertal 1998.].

## Solarthermie

Es ist dabei allerdings zu erwähnen, dass solare Wärmeerzeugung in der Regel nur unterstützend zur Warmwasserbereitung und Heizwassererwärmung genutzt wird. Eine Vollversorgung durch Solarthermie beinhaltet eine komplexe Regelung und ein Speichersystem. Das legt sich in zusätzlichen Kosten für die Wärmeversorgung nieder, was die Wärmekosten über den Wert einer konventionellen Wärmeversorgung treiben kann.

### Dachfläche

#### Definition von Dächern für die Berechnung von Solarthermie

Für Rechenmodell sollten verschiedene Dachbauformen berücksichtigt werden.

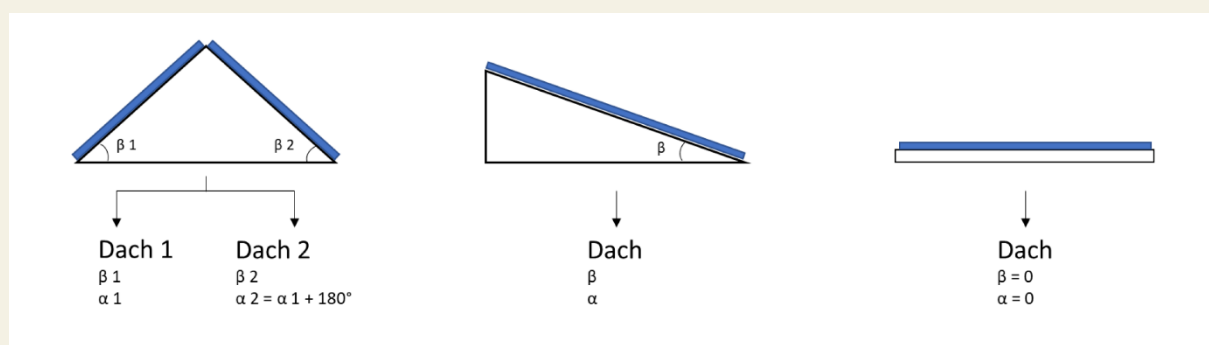


Abb.: Dachformen und Parameter für die Einstrahlungsberechnung

Bei angeschrägten Dachflächen muss für die Berechnung die Azimut-Ausrichtung der Dachseite berücksichtigt werden. Bei einem Flachdach können Azimut und Anstellwinkel gleich Null gesetzt werden.

### Flächenbedarf

Um den Flächenbedarf einer Solarthermieanlage zu berechnen, wird die benötigte Fläche durch die anhand der Simulation errechneten Energie geteilt, da der Energieertrag je nach Ausrichtung der Solaranlage variiert. Somit kann die gleiche Fläche PV unterschiedlichen Flächenbedarf ergeben.

### Lebensdauer

Die Lebensdauer von Solarthermieanlagen wird in einer Vielzahl von Quellen, wie z.B. [[Solarthermie.net](https://www.solarthermie.net), Wie hoch ist die Lebensdauer einer Solarthermie Anlage? [Online]. Verfügbar unter: <https://www.solarthermie.net/faq/wie-hoch-ist-die-lebensdauer-einer-solarthermie-anlage> (Zugriff am: 25. Mai 2021).] und [[Hausjournal.net](https://www.hausjournal.net), Lebensdauer einer Solaranlage für Warmwasser » Wissenswertes. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hausjournal.net/lebensdauer-solaranlage-warmwasser> (Zugriff am: 25. Mai 2021)] mit über 20 Jahren angegeben. Für ein Modell sollte die Lebensdauer mit 20 Jahren veranschlagt werden.

### Kennzahlen

#### Mittlere Temperatur $T_m$

Die mittlere Temperatur beschreibt den Mittelwert zwischen Ein- und Austrittstemperatur des Solarkollektors. Als wichtigster Kennwert für die Auslegung und Bewertung ist die modul- und flächenspezifische Leistung der Anlagen bei einer Globaleinstrahlung von  $GG=1000\text{Wm}^2$  für verschiedene Differenzen der mittleren Temperatur im Modul zur Außentemperatur  $T_m - T_a$  angegeben.

$$T_m = \frac{T_{C, \text{Ein}} + T_{C, \text{Aus}}}{2}$$

$T_m$	Mittlere Temperatur [K]
$T_{C, \text{Ein}}$	Eintrittstemperatur Kollektor [K]
$T_{C, \text{Aus}}$	Austrittstemperatur Kollektor [K]

Abb.: Dachformen und Parameter für die Einstrahlungsberechnung

Bei angeschrägten Dachflächen muss für die Berechnung die Azimut-Ausrichtung der Dachseite berücksichtigt werden. Bei einem Flachdach können Azimut und Anstellwinkel gleich Null gesetzt werden.

### Flächenbedarf

Um den Flächenbedarf einer Solarthermieanlage zu berechnen, wird die benötigte Fläche durch die anhand der Simulation errechneten Energie geteilt, da der Energieertrag je nach Ausrichtung der Solaranlage variiert. Somit kann die gleiche Fläche PV unterschiedlichen Flächenbedarf ergeben.

### Lebensdauer

Die Lebensdauer von Solarthermieanlagen wird in einer Vielzahl von Quellen, wie z.B. [[Solarthermie.net](https://www.solarthermie.net), Wie hoch ist die Lebensdauer einer Solarthermie Anlage? [Online]. Verfügbar unter: <https://www.solarthermie.net/faq/wie-hoch-ist-die-lebensdauer-einer-solarthermie-anlage> (Zugriff am: 25. Mai 2021).] und [[Hausjournal.net](https://www.hausjournal.net), Lebensdauer einer Solaranlage für Warmwasser » Wissenswertes. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hausjournal.net/lebensdauer-solaranlage-warmwasser> (Zugriff am: 25. Mai 2021)] mit über 20 Jahren angegeben. Für ein Modell sollte die Lebensdauer mit 20 Jahren veranschlagt werden.

### Kennzahlen

#### Mittlere Temperatur $T_m$

Die mittlere Temperatur beschreibt den Mittelwert zwischen Ein- und Austrittstemperatur des Solarkollektors. Als wichtigster Kennwert für die Auslegung und Bewertung ist die modul- und flächenspezifische Leistung der Anlagen bei einer Globaleinstrahlung von  $G_G=1000\text{Wm}^2$  für verschiedene Differenzen der mittleren Temperatur im Modul zur Außentemperatur  $T_m - T_a$  angegeben.

$$\eta_{th,Kollektor} = \frac{\dot{Q}_{Modul,G}}{G_G * A_{G,Modul}}$$

$\eta_{th,Kollektor}$	thermischer Wirkungsgrad Kollektor
$\dot{Q}_{Modul,G}$	erzeugter Wärmestrom bei $G_G$ [W]
$G_G$	Vorgegebener Globalstrahlungswert für Prüfung von Solarkollektoren $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$
$A_{G,Modul}$	Gesamtfläche eines Solarmoduls $[\text{m}^2]$

Werte der erzeugten Wärmeströme, sowie Modulflächen sind für verschiedene Betriebszustände der Kollektoren angegeben. Somit lässt sich der thermische Wirkungsgrad für ein Modul berechnen.

Mit dem Wirkungsgrad und den Strahlungswerten für den Standort lässt sich der Leistungsverlauf für eine gewählte Anzahl an Modulen berechnen.

#### Modulanzahl $n_{Kollektoren}$

Um eine einfache Abschätzung der benötigten Modulanzahl zu treffen, wird noch eine weitere Größe verwendet.

$ACO$	annual collector output $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2_{G,Modul} * \text{a}}\right]$
-------	---

Der ACO ist in den Solarkeymark-Datenbanken ebenfalls vermerkt. Damit lässt sich aus dem jährlichen Energiebedarf und dem ACO überschlägig die benötigte Modulanzahl für eine Bereitstellung der Wärme berechnen und somit der benötigte Platz für eine Vorab-Prüfung abschätzen (vgl. Formel).

$$n_{Kollektoren} = \frac{Q_{th}}{ACO * A_{G,Modul}}$$

$Q_{th}$	jährliche benötigte Energie [kWh]
$n_{Kollektoren}$	Anzahl Kollektoren

#### Energieertrag

Für den Energieertrag von Solarthermie spielen insbesondere zwei Faktoren eine große Rolle. Die Differenz zwischen mittlerer Kollektortemperatur und der Außentemperatur, da der Wärmeverlust mit größerer Temperaturdifferenz steigt. In der folgenden Abbildung sind die Wirkungsgrade verschiedener Plattenkollektoren in Abhängigkeit verschiedener Differenzen zwischen mittlerer Kollektortemperatur und Außentemperatur abgebildet. Somit erzielen solarthermische Plattenkollektoren in kalten Monaten einen geringeren Wärmeertrag als in warmen. Dieses Verhalten wird noch durch die Sonnenstände im Zusammenhang mit der Außentemperatur verstärkt. Der Ertrag verhält sich also entgegengesetzt zum Wärmebedarf.

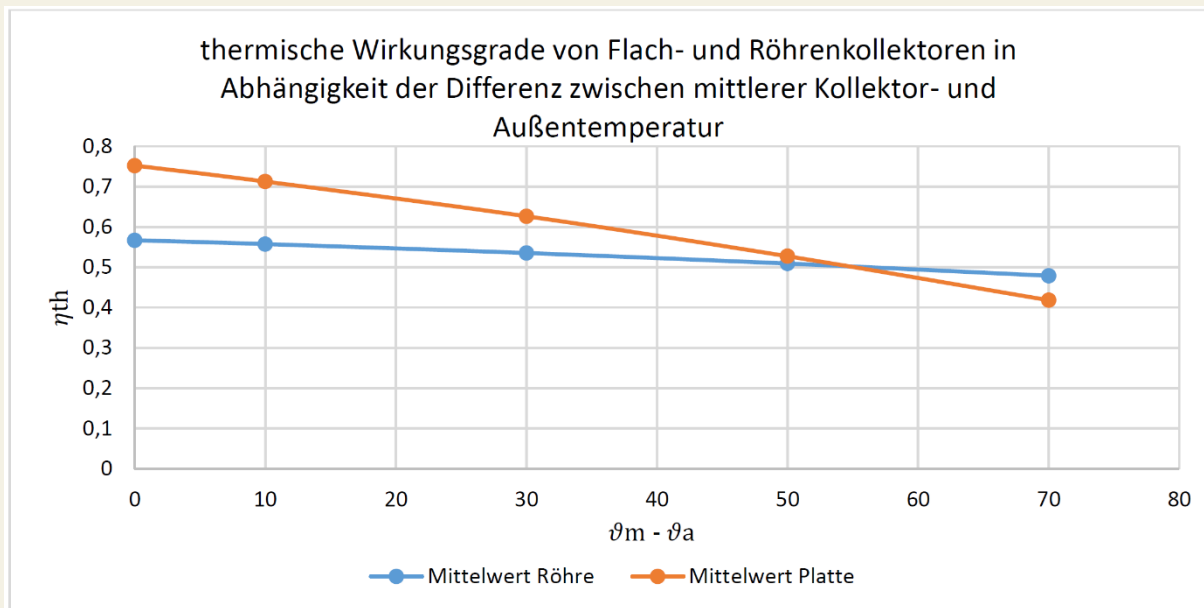


Abb.: Thermische Wirkungsgrade von Flach- und Röhrenkollektoren in Abhängigkeit der Differenz zwischen mittlerer Kollektor- und Außentemperatur

Des Weiteren spielen die Betriebstemperaturen des Heizungssystems, das versorgt werden soll, eine große Rolle. Geringere Betriebstemperaturen führen zu einer geringeren Differenz zur Außentemperatur und somit höheren Wirkungsgraden. Die mittleren Wirkungsgrade für Platten- und Röhrenkollektoren sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

In vorherigen Abbildung sind die thermischen Wirkungsgrade für Platten- und Röhrenkollektoren in Abhängigkeit der Differenz zwischen mittlerer Kollektortemperatur und der Umgebungstemperatur dargestellt. Für kleine Temperaturdifferenzen ist der Wirkungsgrad von Plattenkollektoren größer. Bei hohen Differenzen und somit höheren Betriebstemperaturen sinkt der Wirkungsgrad von Plattenkollektoren schneller als der von Röhrenkollektoren und ab einer Temperaturdifferenz von ca. 55 °C ist der Wirkungsgrad von Röhrenkollektoren größer. Es lässt sich also feststellen, dass Röhrenkollektoren sich besser für höhere Betriebstemperaturen anbieten. Hier muss noch erwähnt werden, dass es bei Flachkollektoren einen Unterschied zwischen handelsüblichen Kollektoren und Hochleistungsflachkollektoren gibt (vgl. [T. Schabbach und P. Leibbrandt, Solarthermie, 2014, S. 33]), welche für höhere Betriebstemperaturen ausgelegt sind. Die Wirkungsgrade wurden über die Bildung von Mittelwerten aus Datenblättern einer Vielzahl von Kollektoren gebildet und dieser Unterschied kann durch die Mittelwertbildung eventuell nicht ausführlich abgebildet werden.

Tbb.: Mittlere thermische Wirkungsgrade für Plattenkollektoren

<b>TM - TA</b>	<b>Mittlerer thermischer Wirkungsgrad Plattenkollektor</b>	<b>Mittlerer thermischer Wirkungsgrad Röhrenkollektor</b>
0	0,752231525	0,566885945
10	0,712544603	0,557400209
30	0,626398498	0,535179406
50	0,527169351	0,509015674
70	0,418110376	0,478796794

## Bewertung einer Solarthermieanlage

Für die Bewertung von Solarthermieanlagen wird sich auf den Bewertungsstandard der Organisation „Solarkeymark“ [Solar Keymark, Home. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.estif.org/solarkeymarknew/> (Zugriff am: 8. April 2021).] bezogen. Die Bewertung von Anlagen wird vorerst nur auf den deutschen / europäischen Raum ausgelegt und “Seit 2010 muss jeder Kollektor über das europäische Zertifizierungszeichen Solarkeymark verfügen” [T. Schabbach und P. Leibbrandt, Solarthermie, 2014, S. 36]. Diese online abrufbare Datenbank führt Datenblätter der verschiedenen Solarmodule in einer einheitlichen Dokumentation auf. Dies ermöglicht einen Vergleich der Module.

Benötigte Parameter für die Bewertung einer Solarthermieanlage:

- Wärmeenergiebedarf
- Verfügbare Dachfläche
- Tragfähigkeitsuntersuchung Dachflächen
- Verfügbare Grundstücksfläche
- Temperaturen Heizungssystem
- Möglichkeit Umrüstung Heizungssystem
- Sonneneinstrahlung
- Bezugskosten Strom
- Bezugskosten Wärme
- Thermischer Wirkungsgrad
- Jahresarbeitszahl
- Annual collector output

Für die Bewertung von Photovoltaik-, sowie Solarthermieanlagen muss der Einfluss der Positionierung der Anlagen auf die erzeugbare Energie berücksichtigt werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Anlagen nicht nur nach einer energieertragsoptimierten Ausrichtung montiert werden können. Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass eine Ausrichtung abweichend von bestehenden Strukturen zum Teil mit höheren Investitionskosten verbunden ist.

Ein Ausschlusskriterium für die Anwendung eines Solarkollektors ist die maximale Betriebstemperatur. Unterschreitet diese den Wert der benötigten bereitzustellenden Temperatur kann der Kollektor nicht verwendet werden.

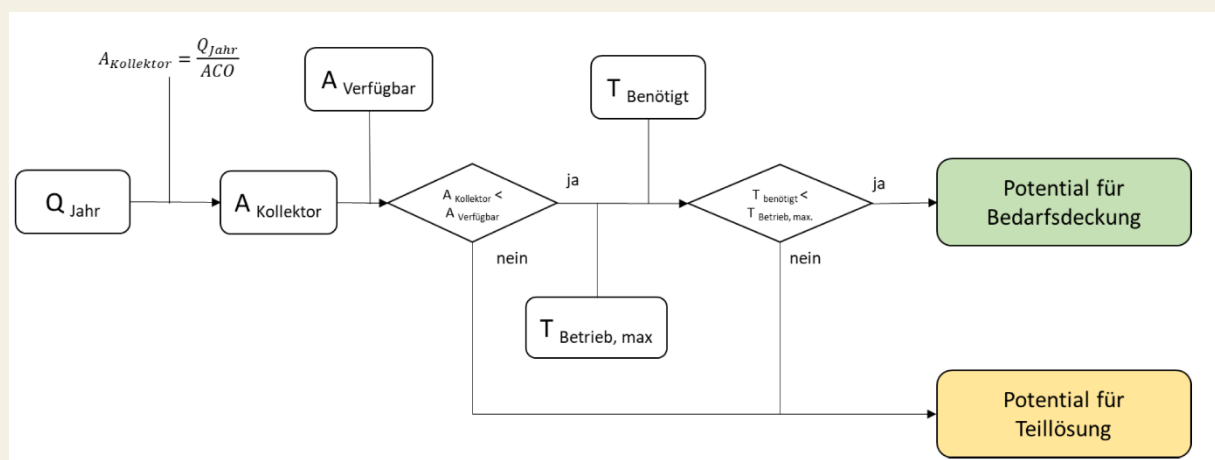


Abb.: Logische Struktur Vorentscheidung Solarthermie

## Umweltauswirkungen

## CO<sub>2</sub>-Equivalent Emissionen

Für die Wärmeerzeugung durch Solarthermie wird nach [Agentur für Erneuerbare Energien, Mediathek. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek> (Zugriff am: 22. April 2021)] ein CO<sub>2</sub>-Equivalent von 25 – 44 g/kWh angegeben. Für eine realistischere Simulation wird mit dem Mittelwert dieser Angabe von 35 g/kWh gerechnet.

## Wirtschaftlichkeit

Die Kosten einer Solarthermieanlage variieren abhängig von der Art des Kollektors und berechnen sich pro Quadratmeter.

## Kennzahlen (KPI's)

Die relevanten Kosten sind in der folgenden Tabelle für Flach- und Röhrenkollektoren aufgeführt.

Tbb.: Kosten für Solarthermieanlagen [Energie-experten, Alle Kosten einer Solarthermie-Anlage im Überblick. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/heizung/solarthermie/wirtschaftlichkeit/kosten> (Zugriff am: 21. April 2021)]

Kosten	Flachkollektor	Röhrenkollektor
Modulpreis €/m <sup>2</sup> [47]	200 – 600	350 - 850
Modulpreis €/m <sup>2</sup> [46]	250 - 350	450 - 950
Mittelwert €/m <sup>2</sup>	350	650
Unterkonstruktion €/m <sup>2</sup>	50 – 100	50 - 100
Solar-Wärmespeicher €	1000 – 1500 (300 – 400 l)	1000 – 1500 (300 – 400 l)
Solar-Kombispeicher €	2000 – 2800 (800 – 1000 l)	2000 – 2800 (800 – 1000 l)
(Heizungsunterstützung		
Rohrleitungen, Pumpen, Armaturen €	500 – 750	500 - 750
Instandhaltung €/a	50 – 100	50 - 100
Strom €/a	20 - 50	20 - 50

Die Werte aus der obigen Tabelle sind für ein Einfamilienhaus formuliert. Während die flächenspezifischen Kosten bei einem größeren, zu versorgenden Gebäude als konstant angenommen werden können, müssen Kosten für eine eventuell nötige Dimensionierung der Speicher berücksichtigt werden. Ebenfalls steigen bei größerer Kollektorfläche und größeren Volumenströmen und Verteilflächen die Kosten für Rohrleitungen, Pumpen und Armaturen. In diesem Fall wird von einer linearen Abhängigkeit zwischen der Kollektorfläche und den Kosten für Rohrleitungen, Pumpen und Armaturen ausgegangen. Der in [Energie-experten, Alle Kosten einer Solarthermie-Anlage im Überblick. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/heizung/solarthermie/wirtschaftlichkeit/kosten> (Zugriff am: 21. April 2021)] genannte Referenzwert für die Kosten ist eine Solarkollektorfläche von 5 m<sup>2</sup> für einen Flachkollektor und 4 m<sup>2</sup> für einen Röhrenkollektor.

Die Stromkosten werden in [Solaranlage Ratgeber, Alle gängigen Solarthermie-Kollektoren im Vergleich. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.solaranlage-ratgeber.de/solarthermie/solarthermie-technik/solarthermie-kollektoren-im-vergleich> (Zugriff am: 21. April 2021)] und [Energie-experten, Alle Kosten einer Solarthermie-Anlage im Überblick. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/heizung/solarthermie/wirtschaftlichkeit/kosten> (Zugriff am: 21. April 2021)] mit zwischen 20 und 50 €/a angegeben. Um diese genauer zu berechnen, werden eine Vielzahl



detaillierter Angaben benötigt, die komplette Auslegung der Anlage inklusive der Auswahl einer Pumpe, sowie der Berücksichtigung des bestehenden Heizungs- und/oder Warmwassernetzes. Das wird für die Berechnung nicht benötigt, wenn lediglich eine Dimensionierung, bzw. Plausibilitätsprüfung der verschiedenen Technologien durchgeführt wird.

### **Soziale Auswirkungen**

#### **Gesundheit**

Beim Betrieb von Solarthermieanlagen fallen keine Schadstoffe an. Es wird elektrische Hilfsenergie benötigt, welche aber in der Regel schadstoffimmissionsfrei bereitgestellt wird.

Die Wärmeübertragungsmedien werden in geschlossenen Kreisläufen geführt und es kann oft mit Wasser als Wärmeträger gearbeitet werden. Der Indikator kann als positiv bewertet werden.

#### **Ausblick weitere Recherchen**

#### **Standortanforderungen/Betriebsbedingungen**

Wie z.B. in Abbildung "Thermische Wirkungsgrade von Flach- und Röhrenkollektoren" verläuft der Wirkungsgrad eines Plattenkollektors abhängig von den Betriebsbedingungen anders als der eines Röhrenkollektors. Hier besteht das Potential in der Bewertung auch verschiedene Ausführungen dieser Technologie zu vergleichen und diejenige weiter zu betrachten, die die Standortanforderungen am besten erfüllt.

#### **Verschleiß der Anlage**

Ein weiterer Einfluss, welcher bisher vernachlässigt ist, ist der Verschleiß von Anlagen und der damit einhergehende Wirkungsgradverlust. Das beeinflusst das zeitliche Verhalten der Energieerzeugung und -speicherung und damit auch alle anderen Indikatoren, die von der Energieerzeugung abhängen.

## **Photovoltaik**

Photovoltaik (PV) beschreibt die Gewinnung von elektrischer Energie aus Sonnenstrahlung.

Es ist zu beachten, dass elektrische Energie durch PV nur tagsüber zur Verfügung steht. Um eine vollständige Versorgung eines Gebäudes durch PV zu ermöglichen, sind also Energiespeicher nötig (siehe Abb.).

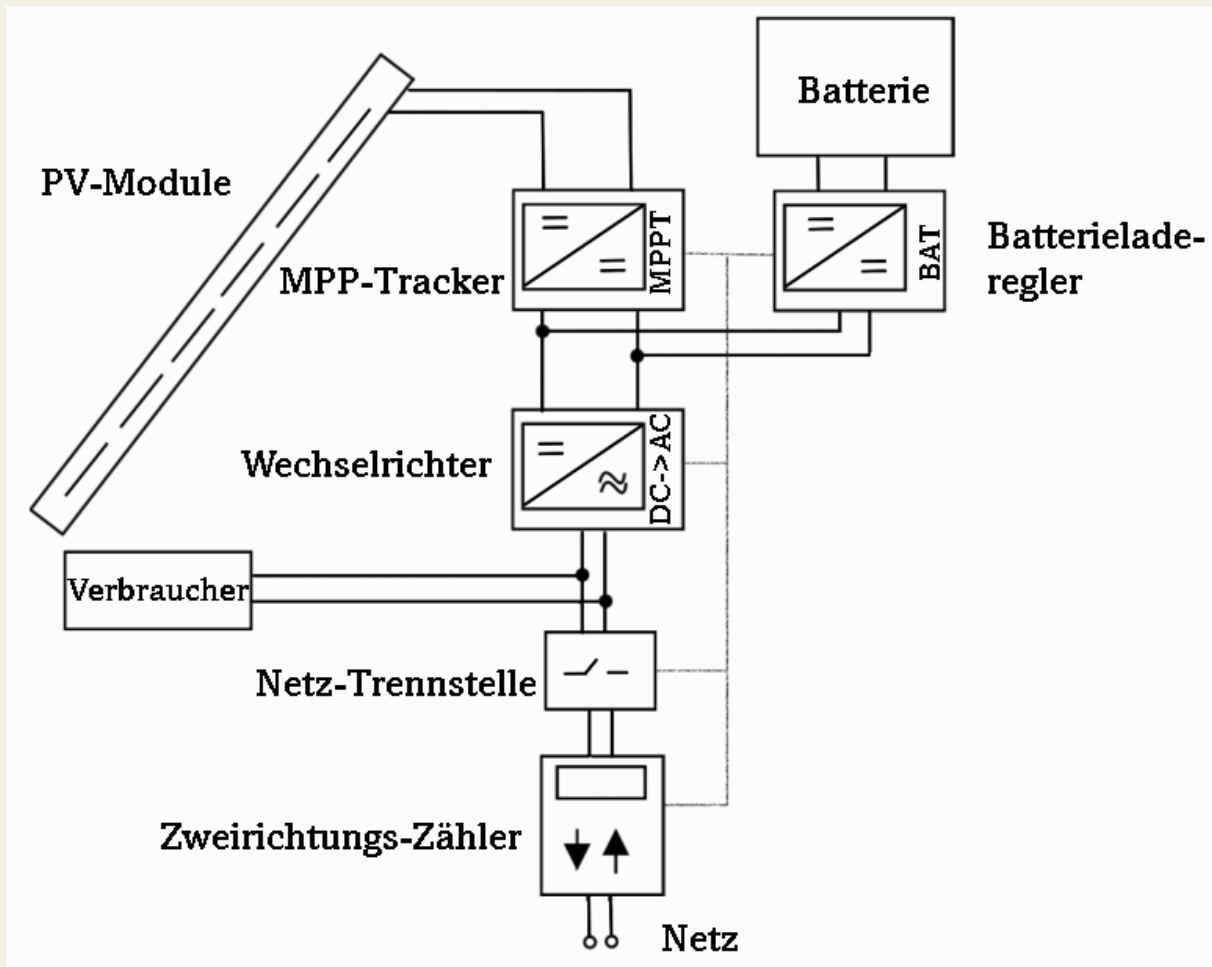


Abb.: Netzgekoppeltes Photovoltaiksystem mit DC-gekoppeltem Batteriespeicher (Übersetzt nach Quaschnig, V. (2019) Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Klimaschutz. 10., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser)

### Dachfläche

#### Definition von Dächern für die Berechnung von PV / Solarthermie

Für Rechenmodell sollten verschiedene Dachbauformen berücksichtigt werden.

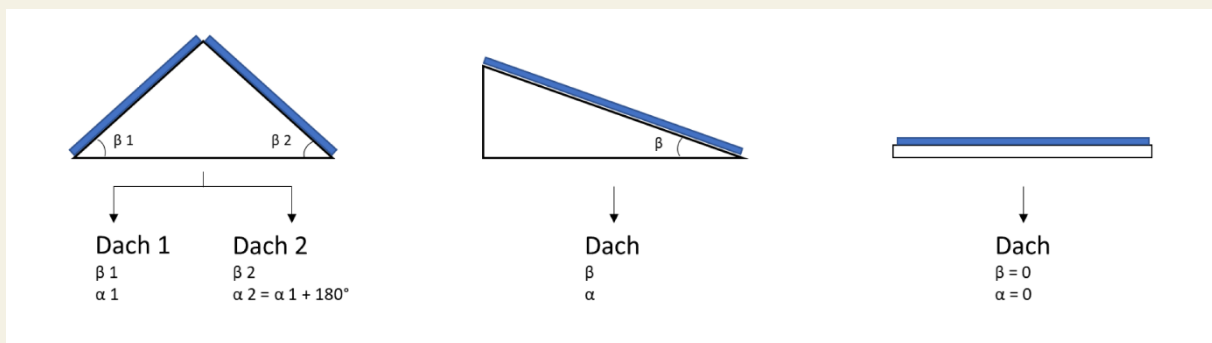


Abb.: Dachformen und Parameter für die Einstrahlungsberechnung

Bei angeschrägten Dachflächen muss für die Berechnung die Azimut-Ausrichtung der Dachseite berücksichtigt werden. Bei einem Flachdach können Azimut und Anstellwinkel gleich Null gesetzt werden.

### Flächenbedarf

Um den Flächenbedarf einer PV-Anlage zu berechnen, wird die benötigte Fläche durch die anhand der Simulation errechnete Energie geteilt, da der Energieertrag je nach Ausrichtung der PV-Anlage variiert. Somit kann die gleiche Fläche PV unterschiedlichen Flächenbedarf ergeben.

### Lebensdauer

Die Lebensdauer von Photovoltaikanlagen wird vom Fraunhofer ISE mit durchschnittlich 20 – 25 Jahren veranschlagt (vgl. [Fraunhofer ISE | Dr. Harry Wirth, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“, S. 36]). Dieser Wert findet sich ebenfalls auf zahlreichen Internetportalen. Als Lebensdauer für die Bewertung wird der Mittelwert von 22,5 Jahren genutzt. Bei Freiflächenanlagen wird die Lebensdauer nach [Photovoltaik.org, Photovoltaik Freiflächenanlagen. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.photovoltaik.org/beispiele/freiflaechenanlage> (Zugriff am: 10. Juni 2021)] auf bis zu 40 Jahre geschätzt.

### Kennzahlen

#### Elektrische Wirkungsgrad $\eta_{el}$

Der wichtigste Kennwert eines Photovoltaikmoduls ist der elektrische Wirkungsgrad eines Solarmoduls.

$$\eta_{el} = \frac{p_{el,Modul}}{G}$$

$p_{el,Modul}$  elektrische Leistung PV-Modul  $\left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right]$

$G$  Sonneneinstrahlung  $\left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right]$

Der elektrische Wirkungsgrad wird unter den sogenannten STC-Standardbedingungen (STC: Standard Test Conditions) ermittelt. Das bedeutet eine Temperatur der Solarzelle von 25 °C, eine Einstrahlung von 1000 kW/m<sup>2</sup> und eine bestimmte spektrale Lichtverteilung (vgl. [N. G. Simon Roberts, Gebäudeintegrierte Photovoltaik: Ein Handbuch. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2009, S. 30]).

Mit dem elektrischen Wirkungsgrad lässt sich nach Formel mit den täglichen oder monatlichen Einstrahlungswerten der Energieertrag berechnen.

#### Sonneneinstrahlung $G$

Bei der Bewertung einer Solaranlage muss beachtet werden, dass der Ertrag von der Sonneneinstrahlung abhängt, welche über das Jahr stark variiert (vgl. Abbildung)

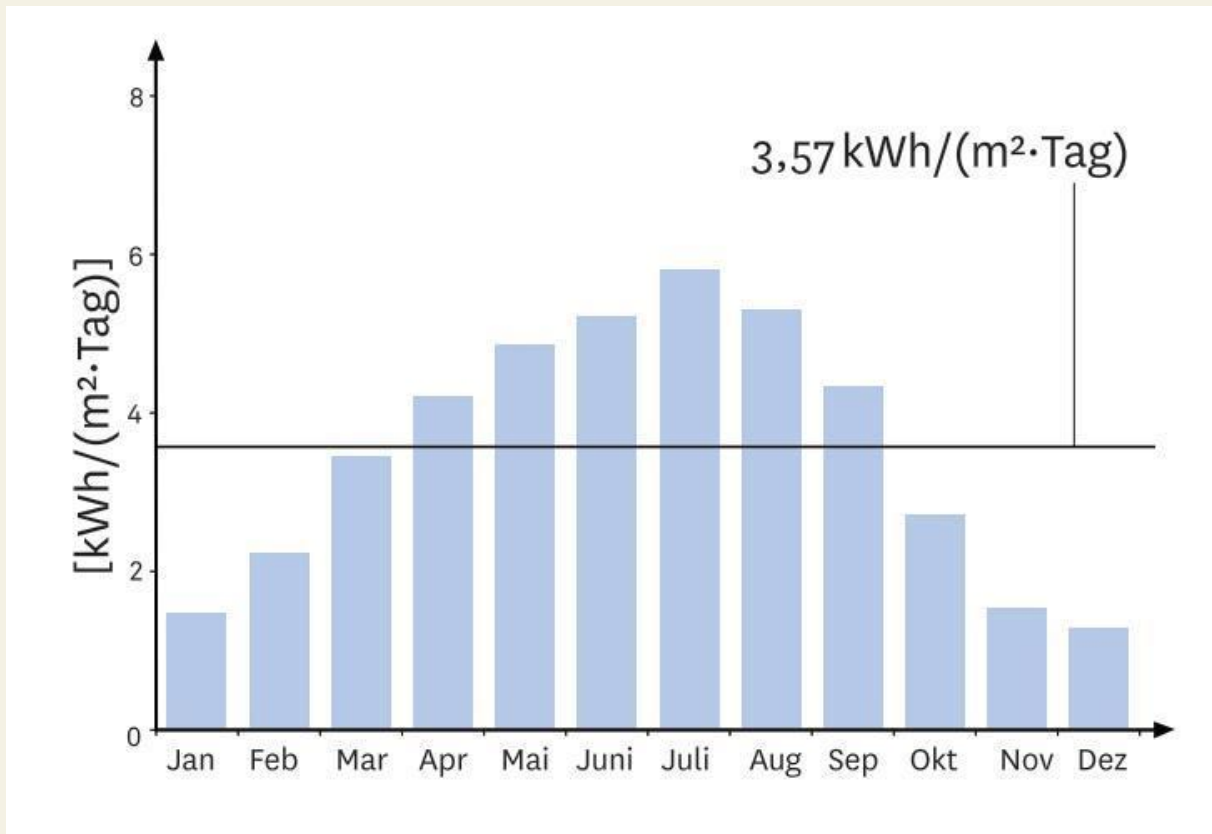


Abb.: Jährliche Einstrahlung in Monatsmittelwerten für einen Standort auf der Nordhalbkugel (N. G. Simon Roberts, Gebäudeintegrierte Photovoltaik: Ein Handbuch. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2009)

Das ist wichtig, weil erneuerbare Technologien noch immer nur bei sorgfältiger wirtschaftlicher Planung einen Vorteil gegenüber konventioneller Stromversorgung erreichen können. Der Einfluss der Ausrichtung der Anlage nach Himmelsrichtung auf die Strahlungsenergie auf einer um 30° aufgerichteten Fläche für die vier Haupthimmelsrichtungen untersucht

### Diffuse Strahlung

Die Sonneneinstrahlung auf die Kollektorflächen wird nach der Berechnung in [38, S. 72-82], bei der die Definitionen nach Din 5034 [DIN-Normenausschuss Lichttechnik, „DIN 5034-3, Tageslicht in Innenräumen – Teil 3: Berechnung“] benutzt werden dargestellt.

Bei der Berechnung des Anteils diffuser Strahlung auf eine geneigte Fläche wird der isotrope Ansatz gewählt. Das bedeutet, es wird die Annahme getroffen, dass die diffuse Strahlung zu gleichen Teilen aus allen Himmelsrichtungen vorliegt [V. Quaschnig, „Regenerative Energiesysteme Kapitel 2“, S. 77]. Damit berechnet sich die diffuse Strahlung zu:

$$E_{diff,gen} = E_{diff,hor} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \gamma_E)$$

$E_{diff,gen}$  Diffuse Strahlung auf geneigte Fläche  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$E_{diff,hor}$  Diffuse Strahlung auf horizontale Fläche  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$\gamma_E$  Anstellwinkel der horizontalen Ebene  $[^\circ]$

Diese Vereinfachung wird hier getroffen, da die Berechnung aufgrund des Dienstleistungscharakters des Projektziels so formuliert wird, dass mit möglichst wenigen, einfach verständlichen Eingaben eine aussagekräftige Entscheidungsgrundlage geschaffen werden soll.

### Bodenreflexion

Für die Berücksichtigung der Bodenreflexion auf eine geneigte Fläche wird ebenfalls ein isotroper Ansatz nach [V. Quaschnig, „Regenerative Energiesysteme Kapitel 2“, S. 78] benutzt. Dabei ist die Bestrahlungsstärke:

$$E_{refl,gen} = E_{G,hor} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \gamma_E)$$

$E_{refl,gen}$  Reflektierte Strahlung auf geneigte Fläche  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$E_{diff,hor}$  Globale Strahlung auf horizontale Fläche  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

A Albedo-Wert ( $A = 0,2$ )

### Gesamte Strahlung auf geneigte Fläche

Die gesamte Einstrahlung auf eine geneigte Fläche kann dann berechnet werden:

### Korrekturfaktor für Einstrahlung

Bei der Berechnung der Sonneneinstrahlung ist der Faktor Wetter noch nicht berücksichtigt. Durch einen Vergleich der Summe der berechneten jährlichen Einstrahlung und der gemessenen Einstrahlung kann ein Korrekturfaktor berechnet werden.

$$\Delta G_{Wetter} = \frac{G_{berechnet}}{G_{gemessen}}$$

Zum Vergleich von Messwerten und den Ergebnissen des Rechenmodells wird die Berechnung der jährlichen Sonneneinstrahlung für zwei Standorte durchgeführt, für die Messwerte vorhanden sind.

Ein Sonnenverlauf und der Einfluss von Ausrichtungen können nur mit Messwerten nicht genau berechnet werden.

### Peak-Leistung einer PV-Anlage

Mit der verfügbaren Dachfläche für und dem durchschnittlichen Wirkungsgrad lässt sich die Peak-Leistung einer PV-Anlage nach folgender Formel berechnen.

$$P_P = A_{Dach} \cdot \eta_{el}$$

Die berechnete Peak-Leistung der Anlage lässt sich dann nach Tabelle “Flächenspezifische Investitionskosten für Verschiedene PV-Modulgrößen” (siehe Kapitel Wirtschaftlichkeit unten) einteilen und die Investitionskosten können daraus abgeleitet werden.

### Bewertung/Auslegung von Photovoltaik

Bei einer detaillierten Auslegung einer PV-Anlage wird eine große Anzahl an Einflussfaktoren berücksichtigt, wie z.B. (vgl. [N. G. Simon Roberts, Gebäudeintegrierte Photovoltaik: Ein Handbuch. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2009, S. 42]):

- Orientierung und Neigung der PV-Module
- Möglichkeit von Verschattung
- Solare Erwärmung der Module

- Wirkungsgrad weiterer Systemkomponenten
- Wirkungsgrad in Abhängigkeit des verwendeten photovoltaischen Materials

Im Zuge der Technologiebewertung eines Projektes werden die Faktoren wie folgt berücksichtigt:

Die Orientierung und Neigung der PV-Module wird bei der Ertragsberechnung und der Analyse geeigneter Flächen am Standort berücksichtigt. Die mögliche Verschattung wird bei der theoretischen Kompatibilitätsprüfung des Standortes berücksichtigt und die Auswahl der möglichen PV-Flächen in Abhängigkeit davon getroffen.

Die solare Erwärmung der Module wird nicht berücksichtigt, da die Modultemperatur über das Jahr zwar stark schwankt, aber der Einfluss einer Temperaturabweichung gering ist (vgl. [N. G. Simon Roberts, Gebäudeintegrierte Photovoltaik: Ein Handbuch. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2009, S. 42]).

Der Wirkungsgrad weiterer Systemkomponenten wird nach [N. G. Simon Roberts, Gebäudeintegrierte Photovoltaik: Ein Handbuch. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2009, S. 42] mit 85% angenommen.

Der elektrische Wirkungsgrad des photovoltaischen Materials wird durch das Erstellen einer Datenbank aus verschiedenen gängigen PV-Modulen und einer Mitteilung des Wirkungsgrades berücksichtigt, um eine ausgewogene Beurteilung zu ermöglichen, die sich nicht an außergewöhnlich hohen Wirkungsgraden bestimmter Module orientiert und die Technologie zu optimistisch bewertet.

#### **Werte für die Bewertung von Photovoltaik**

- Energiebedarf
- Verfügbare Grundstücksfläche
- Verschattete Flächen
- Verfügbare Dachfläche
- Dachausrichtung
- Dachwinkel
- Dachstatik
- Sonneneinstrahlung
- Bezugskosten Strom
- Elektrischer Wirkungsgrad
- Prüfung Fördermöglichkeiten
- Ergänzende Versorgung oder Inselbetrieb gewünscht?

Für die Bewertung von Photovoltaik-, sowie Solarthermieanlagen muss der Einfluss der Positionierung der Anlagen auf die erzeugbare Energie berücksichtigt werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Anlagen nicht nur nach einer energieertragsoptimierten Ausrichtung montiert werden können. Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass eine Ausrichtung abweichend von bestehenden Strukturen zum Teil mit höheren Investitionskosten verbunden ist.

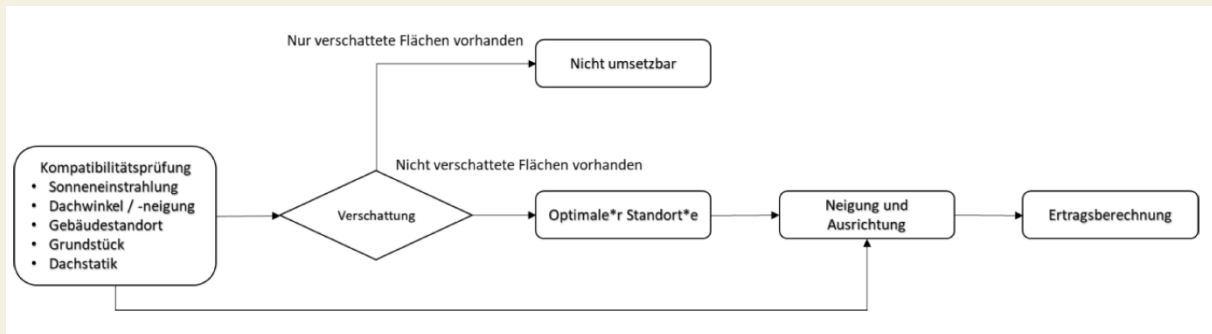


Abb.: Bewertungsstruktur Photovoltaik

Zunächst muss getestet werden, ob nicht verschattete Flächen vorhanden sind. Ist dies der Fall, werden mögliche Standorte und damit die mögliche Modulfläche bei optimaler Ausrichtung berechnet.

### Modultypen

Modultyp	Wirkungsgrad	Vorteile	Nachteile
sc-Si	25-27% unter Laborbedingungen, 16-22% für kommerzielle Nutzung	verwendet reines Silizium und hat den höchsten Wirkungsgrad	Der Herstellungsprozess ist sowohl material- als auch energieintensiv
mc-Si	15-18%	Eine geeignete Alternative aufgrund ihrer geringeren Kosten	Weniger effizient als sc-Si Zellen
a-Si	6-9%	Am günstigsten auf dem Markt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringerer Wirkungsgrad als bei kristallinen Modulen</li> <li>• Geringere Leistungsabgabe bei direkter Sonneneinstrahlung</li> </ul>

Tab.: Überblick über die untersuchten Module mit deren wichtigsten Vor- & Nachteile (Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M. and Parisi, M.L. (2020) 'Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels', *Energies*, 13(1), p. 252)

### Umweltauswirkung

#### Energiebedarf

Tabelle 2 : Gesamt-Energiebedarf für sc-Si Module (Eigene Darstellung)

Quelle	Gesamtenergiebedarf MJ/m <sup>2</sup>
(Kato <i>et al.</i> , 1998)	11.673
(Alsema <i>et al.</i> , 1998)	6.000
(Alsema and Nieuwlaar, 2000)	5.700
(Knapp and Jester, 2001)	5.253
(de Wild-Scholten, 2009)	2.860
<b>Mittelwert</b>	<b>6.297</b>

Tabelle 3: Gesamt-Energiebedarf für mc-Si Module (Eigene Darstellung)

Quelle	Gesamtenergiebedarf MJ/m <sup>2</sup>
(Kato <i>et al.</i> , 1998)	3.380
(Alsema <i>et al.</i> , 1998)	4.200
(Frankl <i>et al.</i> , 1998)	4.600
(Battisti and Corrado, 2005)	5.150
(Alsema and Wild, 2005)	3.940
(Pacca <i>et al.</i> , 2007)	4.322
(de Wild-Scholten, 2009)	3.120
<b>Mittelwert</b>	<b>4.101</b>

Tabelle 4: Gesamt-Energiebedarf für a-Si Module (Eigene Darstellung)

Quelle	Gesamtenergiebedarf MJ/m <sup>2</sup>
(Kato <i>et al.</i> , 1998)	1.587
(Frankl <i>et al.</i> , 1998)	1.200
(Alsema and Nieuwlaar, 2000)	940
(Alsema and Nieuwlaar, 2000)	1.600
(Ito <i>et al.</i> , 2008)	1.202
<b>Mittelwert</b>	<b>1.305</b>

Wie aus Tabelle 2 Tabelle 4 deutlich hervorgeht, benötigen kristalline Module wesentlich mehr Energie als die hier untersuchten Module der 2. Generation (Amorphes Silizium). Im Durchschnitt hatten sc-Si-Module einen Energiebedarf von ca. 6300 MJ/m<sup>2</sup>, mc-Si 4100 MJ/m<sup>2</sup> und a-Si-Module die niedrigsten Werte mit durchschnittlich nur 1300 MJ/m<sup>2</sup>.

Der Vorteil von amorphen Si-Zellen ist, dass sie etwa um den Faktor 100 dünner hergestellt werden können als kristalline Zellen, was zu einer erheblichen Materialeinsparung und einer wirtschaftlicheren Produktion führt (Quaschnig, 2019).

Bei amorphem Silizium beispielsweise hat jedes zusätzliche Element, das dem Modul hinzugefügt wird, aufgrund des geringen Energiebedarfs eine größere Auswirkung als bei mono- und polykristallinen Modulen. So tragen beispielsweise der Transport oder der Rahmen des Moduls mit etwa 15-25 % zum Gesamtenergiebedarf von Dünnschichtmodulen bei. Daher ist ein rahmenloses Design besonders wichtig, um den Gesamtenergiebedarf von Dünnschicht-PV-Modulen zu reduzieren (Kumar *et al.*, 2014).

#### **EBPT (Energy Payback Time)**

Die Energie Payback Time (Energierücklaufzeit) ist definiert als der Zeitraum, den ein System zur Nutzung erneuerbarer Energien benötigt, um die gleiche Energiemenge (in Form von Primärenergieäquivalenten) zu erzeugen, die für die Herstellung des Systems selbst verwendet wurde (Fthenakis *et al.*, 2011).



Bei einem PV-Moduls ist es einfach gesagt die Zeit, die ein Modul Strom produzieren muss, um die Energie zurückzugewinnen, die für die Herstellung des Moduls benötigt wurde.

Tabelle 5: Die Minimum und Maximum Werte der EBPT für Monokristalline Module (Eigene Darstellung)

Quelle	Anmerkungen	EBPT/Jahren	
		Min	Max
(Fukurozaki <i>et al.</i> , 2013)	1,2kWp große Anlage	2,47	3,13
(Kim <i>et al.</i> , 2014)		3,11	4,65
(Wilson and Young, 1996)	System ohne Batterie	7,40	12,10
(Kato <i>et al.</i> , 1998)		8,90	8,90
(Jungbluth <i>et al.</i> , 2005)		3,00	6,00
(García-Valverde <i>et al.</i> , 2009)	4,2kWp große Anlage	9,08	9,08
(Kaldellis <i>et al.</i> , 2010)		3,50	6,00
(Kannan <i>et al.</i> , 2006)	2,7kWp große Anlage	4,50	4,50
(Knapp and Jester, 2001)		4,10	4,10
(Nawaz and Tiwari, 2006)		7,00	26,00
<b>Mittelwert</b>		<b>5,30</b>	<b>8,44</b>

Tabelle 6: Die Minimum und Maximum Werte der EBPT für Polykristalline Module (Eigene Darstellung)

Quelle	Anmerkungen	EBPT/Jahren	
		Min	Max
(Fu <i>et al.</i> , 2015)		2,00	6,00
(Hou <i>et al.</i> , 2016)		1,60	2,30
(Akinyele <i>et al.</i> , 2017)	1,5kW große Anlage	0,82	2,30
(Luo <i>et al.</i> , 2018)	Verwendete Technik: Al-BSF/PERC conventional/PERC frameless double glass (Singapore)	1,01	1,08
(Mohr <i>et al.</i> , 2013)		3,40	3,40
(Ito <i>et al.</i> , 2008)		3,00	8,00
(Kato <i>et al.</i> , 1998)		2,40	2,40
(Alsema and Nieuwlaar, 2000)	Dachmontage	2,50	3,00
(Alsema and Nieuwlaar, 2000)	Bodenmontage	3,00	4,00
(Ito <i>et al.</i> , 2003)	100MW große Anlage (Gobi Wüste in China)	2,00	2,00
(Sumper <i>et al.</i> , 2011)	200kW große Anlage mit Dachmontage	1,70	9,00
(Phylipsen and Alsema, 1995)		2,70	2,70
(Pacca <i>et al.</i> , 2007)	BOS und Transport mitberücksichtigt	7,50	7,50
(Jungbluth <i>et al.</i> , 2005)		3,00	6,0
<b>Mittelwert</b>		<b>2,61</b>	<b>9,08</b>

Tabelle 7: Die Minimum und Maximum Werte der EBPT für a-Si Module (Eigene Darstellung)

Quelle	Anmerkungen	EBPT/Jahren	
		Min	Max
(Kim and Fthenakis, 2011)	Verwendete Technologien: (nc-Si/a-Si), multi junction a-Si Cradle to gate	0,70	0,90
(Mohr <i>et al.</i> , 2013)	Verwendete Technologien: a-Si/nc-Si	2,30	2,30
(Srinivas, 1991)	Module mit 5% Wirkungsgrad	2,60	2,60
(Srinivas, 1991)	Module mit 10% Wirkungsgrad	0,92	0,92
(Kato <i>et al.</i> , 1998)		2,10	2,10
(van Sark <i>et al.</i> , 2007)		2,00	2,00
(Alsema <i>et al.</i> , 1998)		0,70	1,10
<b>Mittelwert</b>		<b>1,61</b>	<b>1,70</b>

Monokristalline Module wiesen EPBTs von ungefähr 2,5 bis 26 Jahren auf (siehe Tabelle 5). Die Zahl von 26 Jahren war hauptsächlich auf den schlechten Standort und den niedrigen Wirkungsgrad zurückzuführen, die vom Autor festgelegt wurden. Jedoch benötigen die monokristallinen Module durchschnittlich zwischen 5,3 und 8,4 Jahren, um die benötigte Energie wieder zu gewinnen.

Bei den polykristallinen Modulen lag der Durchschnitt ebenfalls bei 9 Jahren im schlechtesten und bei 2,6 Jahren im besten Fall. Die Ähnlichkeit in der Reichweite von poly und monokristallinen Modulen ist darauf zurückzuführen, dass beide einen ähnlichen Wirkungsgrad haben (Mono i.d.R höher als Poly). Allerdings benötigten polykristalline Module im besten Fall fast die Hälfte der Zeit, die monokristalline Module benötigten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese im Produktionsprozess weniger Energie verbrauchen (siehe Tabellen 2 und 3).

Die niedrigsten EBPTs zwischen den untersuchten Typen wurden für amorphes Silizium aufgezeichnet (siehe Tabelle 7). Sie betragen im Durchschnitt weniger als 2 Jahre für das beste und das schlechteste Szenario.

### Treibhausgasemissionen

Tabelle 8: Die Minimum und Maximum Werte der GHG für sc-Si Module (Eigene Darstellung)

Quelle	GHG gCO <sub>2</sub> -eq/kWh	
	Min	Max
(Jungbluth <i>et al.</i> , 2005)	39,00	110,00
(Alsema and Wild, 2005)	41,00	41,00
(Kato <i>et al.</i> , 1998)	61,00	61,00
(García-Valverde <i>et al.</i> , 2009)	131,00	131,00
(Kannan <i>et al.</i> , 2006)	165,00	165,00
(Alsema and Wild, 2005)	35,00	35,00
(de Wild-Scholten, 2009)	30,00	30,00
(Ito <i>et al.</i> , 2010)	50,00	50,00
<b>Mittelwert</b>	<b>69,00</b>	<b>77,87</b>

Tabelle 9: Die Minimum und Maximum Werte der GHG für mc-Si Module (Eigene Darstellung)

Quelle	GHG gCO <sub>2</sub> -eq/kWh	
	Min	Max
(Stylos and Koroneos, 2014)	12,28	58,81
(Hou <i>et al.</i> , 2016)	30,10	87,30
(Luo <i>et al.</i> , 2018)	20,90	30,20
(Kato <i>et al.</i> , 1998)	20,00	20,00
(Alsema and Nieuwlaar, 2000)	50,00	60,00
(Ito <i>et al.</i> , 2010)	12,00	12,00
(Alsema and Wild, 2005)	35,00	35,00
(Sumper <i>et al.</i> , 2011)	22,00	180,00
(Pacca <i>et al.</i> , 2007)	72,40	72,40
(Jungbluth <i>et al.</i> , 2005)	39,00	110,00
<b>Mittelwert</b>	<b>31,36</b>	<b>66,57</b>

Tabelle 10: Die Minimum und Maximum Werte der GHG für a-Si Module (Eigene Darstellung)

Quelle	GHG gCO <sub>2</sub> -eq/kWh	
	Min	Max
(van der Meulen and Alsema, 2011)	40,00	70,00
(Nieuwlaar and Alsema, 1998)	19,00	30,00
(Kato <i>et al.</i> , 1998)	17,00	17,00
<b>Mittelwert</b>	<b>25,33</b>	<b>39,00</b>

Im Durchschnitt haben sc-Si-Module die höchsten Emissionen unter den 3 Typen, wobei die Werte zwischen 69 gCO<sub>2</sub>eq/kWh und 77 gCO<sub>2</sub>eq/kWh liegen (siehe Tabelle 8). Diese Werte mögen hoch erscheinen, was darauf zurückzuführen ist, dass einige Module sehr schlecht abschnitten, andere jedoch Emissionen von nur 30 gCO<sub>2</sub>eq/kWh aufwiesen. Der spezifische Grund für diese Unterschiede wurde nicht genannt und ist auf Basis der vorliegenden Studien nicht nachvollziehbar.

Polykristalline Module erreichten niedrige Werte mit 31 gCO<sub>2</sub>eq/kWh im besten und 66 gCO<sub>2</sub>eq/kWh im schlechtesten Fall (siehe Tabelle 9). Die niedrigsten Werte wurden schließlich bei den a-Si-Modulen mit Emissionen von nur 25 gCO<sub>2</sub>eq/kWh bis 39 gCO<sub>2</sub>eq/kWh beobachtet. Dieses lässt sich mit dem unterschiedlichen Energiebedarf begründen, der in den Tabelle 2 und Tabelle 4 angegeben ist. Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Zellproduktion und

die Modulmontage die Phasen waren, die den höchsten Energiebedarf und damit die größten Emissionen hatten. (Huang et al., 2017)

### **Fazit**

Nach Auswertung der unterschiedlichen Faktoren, wurde deutlich, dass die a-Si Module hinsichtlich der Umweltauswirkungen die besten Ergebnisse aufweisen. Hierbei ist zu beachten, dass diese auch den geringsten Wirkungsgrad aufweisen. Daraus resultierend benötigen die Module auch mehr Fläche als herkömmliche Module, um die gleiche Leistung zu produzieren. Daher spielt die verfügbare freie Fläche eine entscheidende Rolle bei der Entscheidung, welcher Typ für die jeweilige Situation am besten geeignet ist.

Interessant ist, dass alle 3 Arten weitaus weniger Treibhausgasemissionen aufweisen als konventionelle Energieträger, wie z.B. Kohle, bei der die Treibhausgasemissionen zwischen 369 gCO<sub>2</sub>eq/kWh (mit Co<sub>2</sub>-Rückgewinnung) und 1023 gCO<sub>2</sub>eq/kWh (ohne Co<sub>2</sub>- Rückgewinnung) liegen (Gibon et al., 2023).

Ein weiterer Faktor, der in Betracht gezogen werden sollte, ist die Entsorgung der Solarmodule am Ende ihrer Lebensdauer. In Anbetracht der Tatsache, dass Solarmodule in der Regel aus Materialien, wie Glas, Aluminium und Silizium bestehen, die zu 100%, 100 % und 95 % recycelt werden können (Jung et al., 2016; Latunussa et al., 2016; Huang et al., 2017).

So hat sich beispielsweise gezeigt, dass das Recycling von c-Si im Vergleich zur Herstellung von Solarzellen einen erheblichen Rückgang des Treibhauspotenzials um bis zu 20 % bewirkt (Cucchiella et al., 2015).

### **Wirtschaftlichkeit**

#### **Kennzahlen (KPI's)**

- Net savings (NS) ist das Einkommen oder die Ersparnisse, die von der Entwicklerfirma verwendet werden können. Je größer dieser Wert, ist , desto besser.
- Savings-to-investment ratio (SIR) ist ein Vergleich der jährlichen Einsparungen mit der ursprünglichen Investition in eine Maßnahme und soll >1 sein.
- Net present value (NPV) ist der Gegenwartswert der zukünftigen Cashflows und soll positiv und möglichst groß sein.
- Internal rate of return (IRR) ist ein Indikator für die Analyse des Risikos einer Investition
- Discounted payback period (DPB) ist die Zeit, die benötigt wird, um die anfänglichen Investitionskosten unter Berücksichtigung des Abzinsungssatzes zurückzugewinnen

Quelle: Ludin, N. (2019) 'Life Cycle Cost Assessment of Photovoltaic Systems in the APEC Region'.

#### **Aufteilung der Kosten**

Abbildung 5 :Aufteilung der Kosten für ein 1 MW großes Projekt in Gujarat ,Indien (Eigene Darstellung nach Ranganath and Sarkar, 2021)

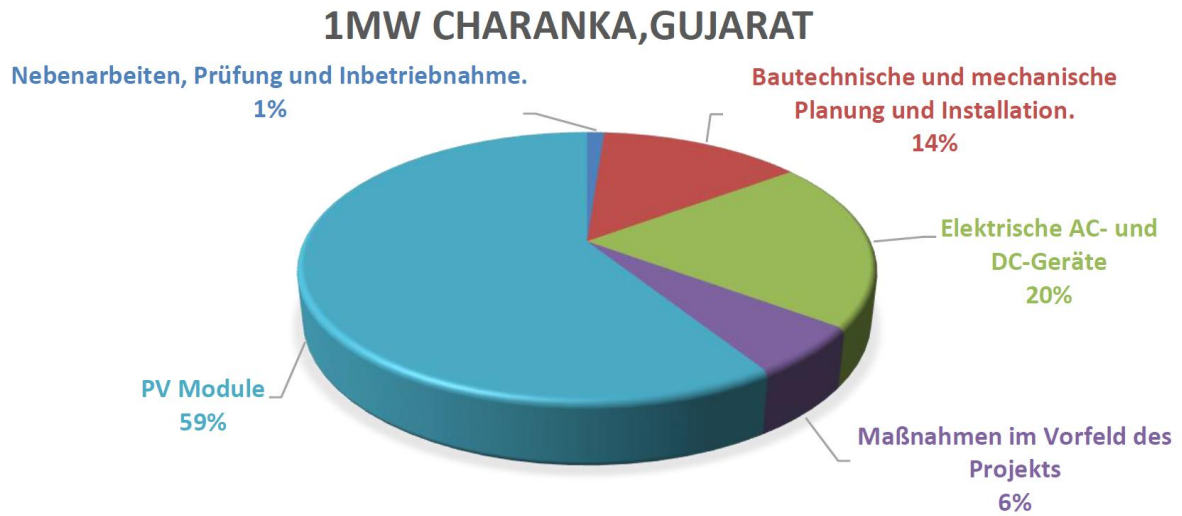


Abbildung 6: Aufteilung der Kosten für ein 5 MW großes Projekt in Rajasthan, Indien (Eigene Darstellung nach Ranganath and Sarkar, 2021)

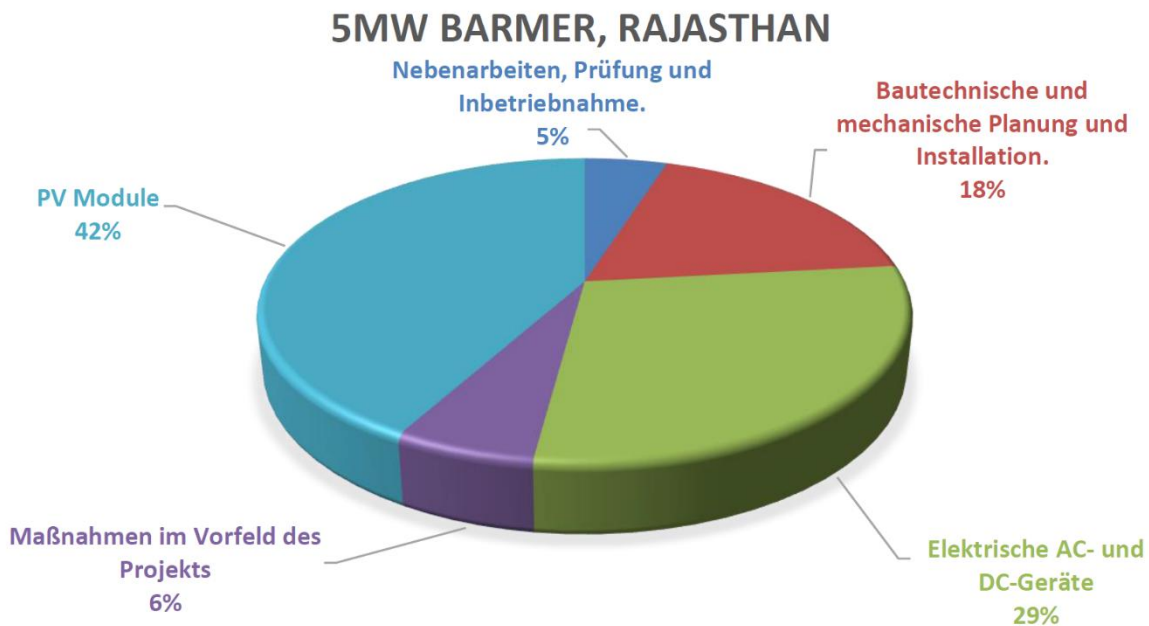
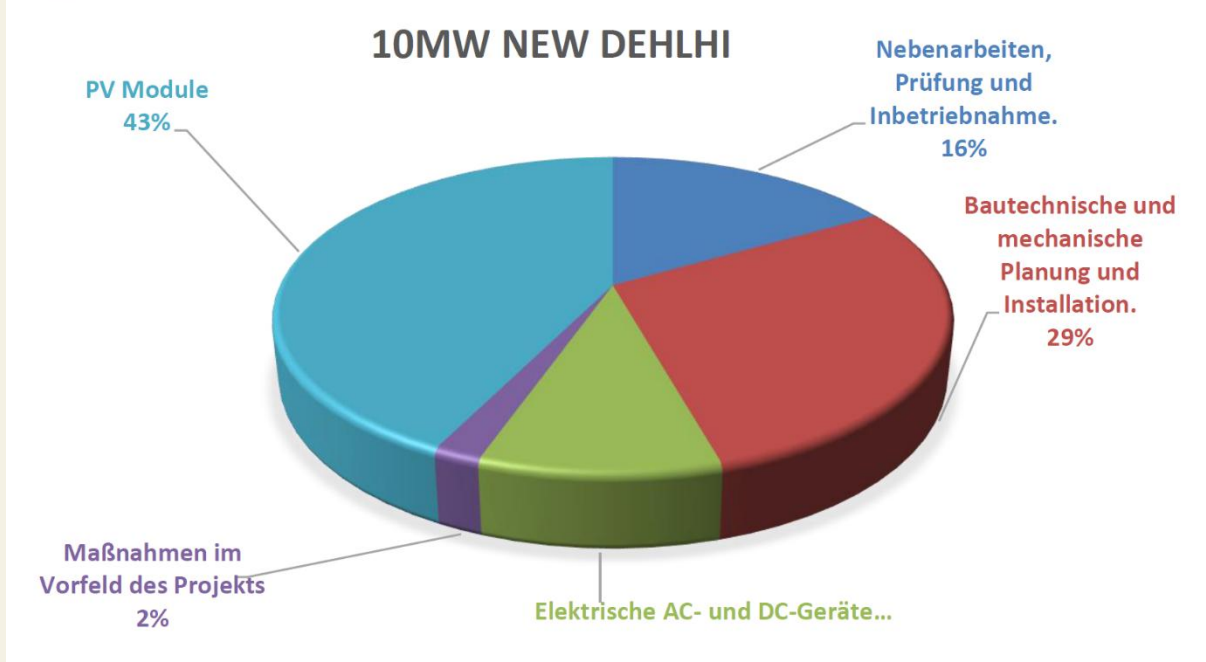


Abbildung 7: Aufteilung der Kosten für ein 10 MW großes Projekt in New Delhi, Indien (Eigene Darstellung nach Ranganath and Sarkar, 2021)



Aus den Abbildung 5, Abbildung 6 & Abbildung 7 lässt sich schließen, dass die Panels zwar nicht die gesamten Kosten für ein funktionsfähiges System ausmachen, aber eine entscheidende Rolle bei der Preisklasse spielen. Deshalb werden im Folgenden deren Kosten genauer betrachtet.

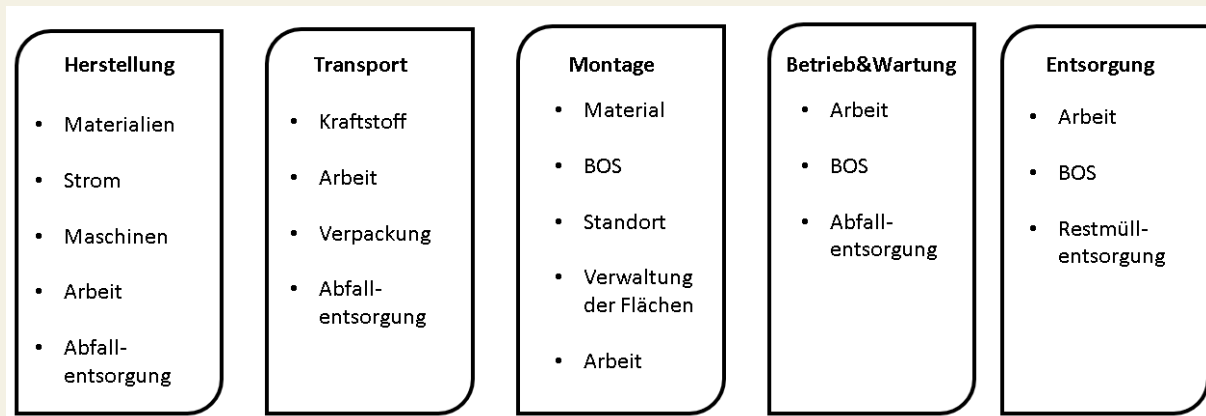


Abb.: Kosten, die eine Solaranlage umfasst (Darstellung nach Ludin, N. (2019) 'Life Cycle Cost Assessment of Photovoltaic Systems in the APEC Region')

Auf Grund der geographischen Festlegung des Projekts Aldea in Spanien werden zuerst die Kosten für den europäischen Markt betrachtet. Im Zeitraum zwischen Dezember 2009 und Dezember 2021 sanken die Kosten der verkauften kristallinen Solar-PV-Module um 91 % (AL-Zoghoul et al., 2022). Für diesen Kostenrückgang wurden mehrere Erklärungen vorgeschlagen, wie z. B. öffentliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen und verschiedene Folgen des Marktwachstums (Bettencourt et al., 2013).

Abbildung 8: Jährlicher Durchschnittspreis für Solar-PV-Module nach Technologie, die zwischen 2017 und 2021 in Europa verkauft wurden (Eigene Darstellung nach AL-Zoghoul *et al.*, 2022)

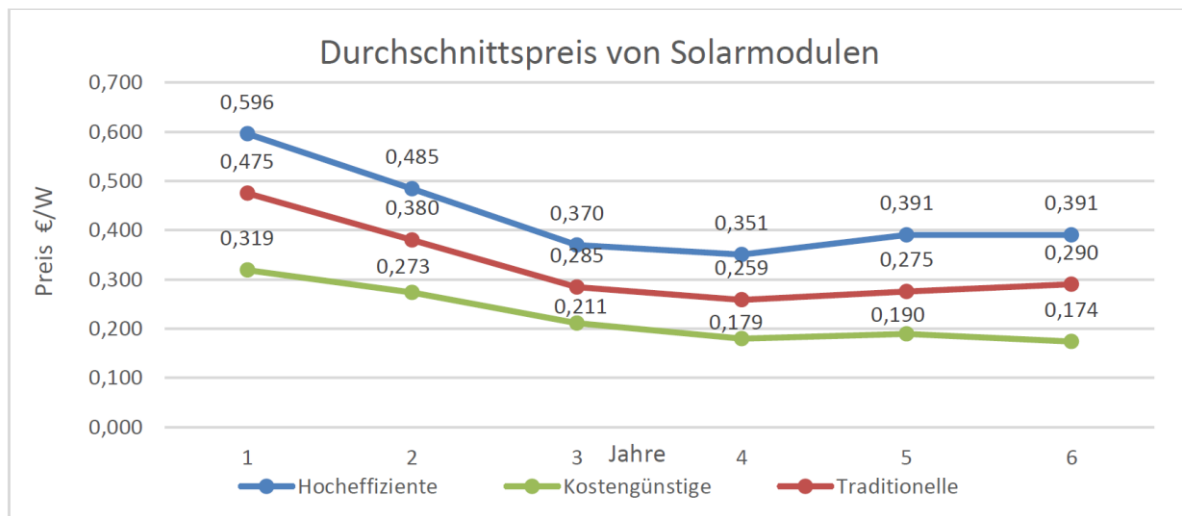


Abbildung 8 zeigt die Preisentwicklung der drei Panel-Technologien in den letzten Jahren und es fällt auf, dass die Preise bis 2021 stetig sanken und dann um 4-7% stiegen. Dies ist vor allem auf den Preisanstieg bei polykristallinem Material zurückzuführen, welches für die meisten Varianten unerlässlich ist (AL-Zoghoul *et al.*, 2022).

#### Amortisationszeiten

- Simple Payback period (SPB) ist die Zeit, die benötigt wird, um die anfänglichen Investitionskosten ohne Berücksichtigung des Abzinsungssatzes zurückzugewinnen (Einfache Amortisationszeit) (Ludin, N. (2019) 'Life Cycle Cost Assessment of Photovoltaic Systems in the APEC Region')

Tabelle 11 : Amortisationszeiten für unterschiedlich große Anlagen in verschiedenen Ländern (Eigene Darstellung)

Quelle	Standort	Jahr	System Größe/ kW	Simple Payback /Jahre
(Kessler, 2017)	NH; USA	2015	40,56	13,30
(Kessler, 2017)	NH; USA	2015	13,78	13,80
(Kessler, 2017)	NH; USA	2016	143,6	14,60
(Fahnehjelm and Ämting, 2016)	Sri Lanka	2016	2,00	8,23(Geringer Verbrauch) /4,13(Hoher Verbrauch)
(Fahnehjelm and Ämting, 2016)	Sri Lanka	2016	3,00	10,98(Geringer Verbrauch) /3,82(Hoher Verbrauch)
(Fahnehjelm and Ämting, 2016)	Sri Lanka	2016	4,00	13,72(Geringer Verbrauch) /4,34(Hoher Verbrauch)
(Ludin, 2019)	Malaysien	2015	100-500	13,00
(Ludin, 2019)	Thailand	2011	500-1000	10,00
(Ludin, 2019)	Indonesien	2014	>1000	9,00

Es handelte es sich bei den betrachteten Projekten um unterschiedliche Größenordnungen und Standorten. Deshalb ist zu beachten, dass diese Ergebnisse nur bedingt direkt vergleichbar sind, sondern lediglich einen ersten groben zeitlichen Rahmen zur Einschätzung geben kann. In allen Fällen war die Amortisationszeit mit durchschnittlich 12 Jahre kürzer als die durchschnittliche Lebensdauer von Solarmodulen, die 20-25 Jahre beträgt (Paiano, 2015).

## Fazit

Generell ist die Datenlage zu wirtschaftlichen Machbarkeitsstudien der verschiedenen Arten von Solarmodulen nicht ausreichend (Rethnam et al., 2019; Wang et al., 2019). Das erschwert die Beurteilung, welche Solarmodule finanziell rentabler sind.

Laut einer Studie von (Jiang et al., 2020), welche die Modulpreise für drei Paneltypen (normales monokristallines Modul, PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) monokristallines Modul und polykristallines Modul) bei Projekten gleicher Größe verglichen haben, kann der Schluss gezogen werden, dass monokristalline Module um 0,02-0,06 €/W teurer sind als polykristalline. Monokristalline Module haben einen Leistungsvorteil aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads bei schwacher Sonneneinstrahlung. Daher benötigen diese bei gleicher Leistung 3,5 % weniger Fläche als normale monokristalline Module und 8,5 % weniger als PERC-Module) (Jiang et al., 2020).

Im Gesamtsystem könnten auch Schritte unternommen werden, um die Kosten zu minimieren oder die Wirtschaftlichkeit des Systems zu maximieren.

Beispielsweise haben (Fahnehjelm and Ämting, 2016) gezeigt, dass die Amortisationszeit für die drei Systeme niedriger ist, wenn der Energiebedarf/-verbrauch höher war. Daraus lässt sich ableiten, dass es sinnvoll ist, die Größe der Anlage nach dem Energieverbrauch des Nutzers zu planen. Es ist nicht zielführend, das System überzudimensionieren, sondern sie nach dem jeweiligen Verbrauch bedarfsgerecht auszuliegen.

Zudem lohnt sich auch die Erzeugung von mehr Strom bei Verkaufsabsicht via Einspeisung ins Stromnetz nicht. Beispielsweise liegt aktuell der durchschnittliche Strompreis in Deutschland, liegt dieser aktuell bei 0,3 €/kWh (Fechner, 2023) und die Vergütung für den Verkauf von Solarstrom bei 0,087 €/kWh für Anlagen, die kleiner als 10 kWp sind (§ 49 EEG 2023 - Einzelnorm, 2023). Deswegen lohnt es sich für den Betreiber\*innen mehr den erzeugten Strom zu verbrauchen, statt zu verkaufen.

## Investitionskosten (CAPEX)

In [Dr. Christoph Kost, Dr. Thomas Schlegl und Fraunhofer ISE, „Stromgestehungskosten erneuerbare Energien“] werden für Photovoltaikanlagen drei Anlagendimensionen definiert, die unterschiedliche Investitionskosten haben.

Tab.: Flächenspezifische Investitionskosten für Verschiedene PV-Modulgrößen nach [Dr. Christoph Kost, Dr. Thomas Schlegl und Fraunhofer ISE, „Stromgestehungskosten erneuerbare Energien“]

	PV Dach klein (5 – 15 kWp)	PV Dach groß (100 – 1000 kWp)	PV Freifläche groß (ab 2000 kWp)
Investitionskosten [€/kWp]	1200 – 1400	800 – 1000	600 - 800
Mittel	1300	900	700

## Laufende Kosten (OPEX)

Um die laufenden Kosten einer PV-Anlage durch Versicherung, Instandhaltung, sowie Reparatur und Wartung zu berücksichtigen, können diese nach [DZ4, Kosten für Photovoltaik in 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dz-4.de/ratgeber/solaranlagen/photovoltaik/kosten#laufend> (Zugriff am: 13. April 2021)] mit ca. 4% der Investitionskosten pro Jahr veranschlagt werden. In unseren Bewertungen werden die jährlichen Kosten mit 4,5% veranschlagt, um eine zu positive Betrachtung der Technologie zu vermeiden.

## EEG Umlage

Die EEG-Umlage dient zur **Finanzierung des Ausbaus der Erneuerbaren Energien** und ist im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgelegt.

Nach diesem Gesetz sind die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) verpflichtet, den Strom von Erneuerbare-Energien-Anlagen (EE-Anlagen), die ins öffentliche Netz einspeisen, zu einer festgelegten Vergütung abzunehmen; der Strom wird entweder direkt oder über Direktvermarkter an der Strombörse oder im außerbörslichen Stromhandel verkauft.



Mögliche Differenzen zwischen den Stromproduktionskosten und dem Marktpreis gleicht die [Marktprämie](#) aus, die über die EEG-Umlage finanziert wird. Die EEG-Umlage zahlen alle Stromverbraucher über **einen Anteil an ihren Strombezugskosten**, Ausnahmeregelungen gelten für stromverbrauchsintensive Industriezweige.

Auch Eigenversorger müssen seit 2014 EEG-Umlage entrichten, sofern man nicht unter im EEG festgeschriebene Sonderregelungen fallen.

Nach der EEG Novelle 2021 [BGBl, „Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien: Erneuerbare- Energien-Gesetz - EEG 2021“, 2014] entfällt die EEG Umlage für Anlagen bis zu einer installierten Peak-Leistung von 30 kW und einem Eigenverbrauch von maximal 30 MWh pro Jahr. Übersteigt der Verbrauch diese Grenzen, muss für jede kWh Selbstbezug eine 40-prozentige EEG-Umlage gezahlt werden.

### **Soziale Auswirkungen**

Projekte für erneuerbare Energien wirken sich auf mehrere Dimensionen der sozioökonomischen Nachhaltigkeit eines bestimmten Gebiets aus (Delrio and Burguillo, 2008). Daher werden im Folgenden zunächst die Auswirkungen während der Herstellungsphase und dann während des Lebenszyklus (Installation, Betrieb und Entsorgung) erörtert.

### **Allgemein**

Bergbau, Verarbeitung, Abbau und Recycling sind alles Formen von Arbeit, die erhebliche Auswirkungen auf die Arbeitnehmer und die Gemeinden haben, in denen diese Tätigkeiten ausgeführt werden. Bei der Gewinnung von Quarzsand treten verschiedene Gesundheitsprobleme auf, da bei diesem Prozess, Verhüttung und Raffination giftige Stoffe freigesetzt werden (Gomez et al., 2017). Die Exposition gegenüber Siliziumdioxidstaub kann bei anfälligen Personen eine Reihe von pathologischen Reaktionen hervorrufen, darunter Lungenfibrose oder Pneumokoniose und chronisch obstruktive Lungenerkrankungen (Cohen and Velho, 2002).

Eine Möglichkeit, an Kupfernickel oder Blei zu gelangen, ist das Verschrotten von Schiffen am Ende ihrer Lebensdauer. Bei der Abwrackung von Schiffen werden in Ländern, wie Indien, Pakistan und Bangladesch, bekanntermaßen informelle Arbeitskräfte beschäftigt, für die kaum oder gar keine Gesundheits- und Sicherheitsvorschriften gelten. Landrechte sind ebenfalls ein großes Problem, da die Eigentumsrechte vieler indigener Völker für den Bau von Minen missachtet werden. Diese Minen nehmen auch einen großen Teil der Wasserreserven in Anspruch, die für die gesamte Bevölkerung bestimmt sind (Gomez et al., 2017).

### **Bau- und Betriebsphase**

Die folgenden Aspekte stellen einige soziale Auswirkungen dar:

- *Quantitative und qualitative Auswirkungen auf die Arbeitsplätze:*

Dabei sollten sowohl quantitative als auch qualitative Auswirkungen berücksichtigt werden. Ebenso wichtig wie die Zahl der in einem bestimmten Gebiet geschaffenen Arbeitsplätze ist deren Kontinuität (Delrio and Burguillo, 2008).

- *Einkommensschaffende Effekte:*

Die wichtigsten sind Zahlungen an örtliche Landwirte für die Pacht ihres Landes und Entschädigungen an die Gemeinde durch den Eigentümer der Anlage für erneuerbare Energien. Diese kann entweder in finanzieller Form oder in Form von Sachleistungen die Akzeptanz des Projekts durch die örtliche Gemeinschaft erleichtern (Delrio and Burguillo, 2008)

- *Demografische Auswirkungen:*

Vor dem Hintergrund der starken Abwanderung der Landbevölkerung besteht eines der Hauptanliegen darin, diesen Prozess zu stoppen. In dem die Bevölkerung einen Anreiz hat, in dem Land zu bleiben und diesen Trend im optimalen Fall umzukehren, indem die Zuwanderung in das lokale Gebiet gefördert wird. Daher sollten die Auswirkungen des Projekts auf Migration und Einwanderung analysiert werden (Delrio and Burguillo, 2008).

- *Auswirkungen auf die Energieversorgung:*

Ländliche Gebiete sind in der Regel nicht energieautark. Das EE-Projekt nutzt heimische Ressourcen und kann dieses Problem entschärfen, wenn ein erheblicher Teil des Energieverbrauchs in dem Gebiet durch die im Projekt erzeugte Energie gedeckt wird (Delrio and Burguillo, 2008).

- *Auswirkungen auf die allgemeine Bildung:*

Lokale Arbeitskräfte können im Rahmen eines Projekts eine spezielle Ausbildung erhalten, wodurch sich das Bildungs-/Ausbildungs-/Fähigkeitsniveau der Bevölkerung erhöht. Dennoch dürften die Auswirkungen bescheiden ausfallen, da die erforderlichen Fähigkeiten wahrscheinlich projektspezifisch sind (Delrio and Burguillo, 2008).

### Gesamtbetrachtung Lebenszyklus Auswirkung auf die Menschen, Spanien

Um die sozialen Auswirkungen besser zu verstehen und zu ermitteln, könnten die Auswirkungen nach der Lebenszyklusphase, in der sie auftreten, unterteilt werden.

Es wird eine Fallstudie in Ciudad Real, Spanien, erörtert, wo ein 50-MW-CSP-Kraftwerk auf einem 200 Hektar großen unfruchtbaren Gelände gebaut wurde. Dabei ergab die allgemeine Bewertung, dass die Lebenszyklusphase, die bei weitem am meisten zum sozialen Risiko des Systems beiträgt, die Betriebs- und Wartungsphase ist.

Die wichtigsten sozialen Risiken in Spanien, die mit der CSP (Concentrated Solar Powerplant) verbunden sind, stehen beispielsweise im Zusammenhang mit Geschlechterungleichheit bei der Arbeitsvergabe, Korruption bei den Unternehmen, Verletzungen von den ausländischen Arbeitskräften.

Die Ergebnisse der standortspezifischen Bewertung deuten darauf hin, dass die Bereitstellung von Strom aus einem CSP in Spanien eine leichte, aber positive Auswirkung auf den sozialen Wohlstand des Landes hat. Dieser Anstieg ist insbesondere in der Kategorie der sozioökonomischen Auswirkungen zu beobachten. Die Auswirkungskategorie kulturelles und natürliches Erbe bleibt durch das Kraftwerk unverändert, während die Kategorie Arbeitsrechte und menschenwürdige Arbeit eine kleine Verbesserung aufweist. Die Ergebnisse für die einzelnen Unterkategorien deuten auf negative soziale Auswirkungen in Bezug auf faire Löhne, Diskriminierung, faire Kompetenzen und Korruption hin. Diese Situation könnte durch eine stärkere Gleichstellung der Geschlechter und eine Verringerung des Lohngefälles zwischen den Arbeitnehmern verbessert werden (Corona et al., 2017).

Tabelle 12: Gewichtung der Schritte und Ergebnisse der sozialen Leistung nach Wirkungskategorien für den gesamten Lebenszyklus des Kraftwerks (Eigene Darstellung nach Corona et al., 2017)

	Gewichtung			Total
	Montage	Betrieb und Wartung	Demontage	
Arbeitsstunden pro Phase	394.357	1.440.256	82.261	1.916.874
Gewichtungsfaktoren	0,21	0,75	0,04	1,00
Arbeitsrechte und menschenwürdige Arbeit	0,04	0,12	0,00	0,17
Gesundheit und Sicherheit	0,05	0,19	0,01	0,25
Kulturelles und natürliches Erbe	0,00	0,00	0,00	0,00
Faire Beziehungen	0,06	0,21	0,01	0,29
Sozioökonomische Nachhaltigkeit	0,24	1,03	0,05	1,38
<b>Total</b>	<b>0,08</b>	<b>0,31</b>	<b>0,02</b>	<b>0,42</b>

Die nach der Anzahl der Stunden gewichteten Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt, wobei 2 die beste und -2 die schlechteste Bewertung darstellt. Die Kategorie mit der besten sozialen Leistung und positiven sozialen Auswirkungen innerhalb des Landes ist die sozioökonomische Nachhaltigkeit mit 1,38, gefolgt von der Gerechtigkeit der Beziehungen mit 0,29. Das Gesamtergebnis der CSP Anlage ist 0,42, was eine leicht positive soziale Auswirkung in Spanien darstellt.

### Auswirkung auf die Begünstigten vor Ort, Spanien

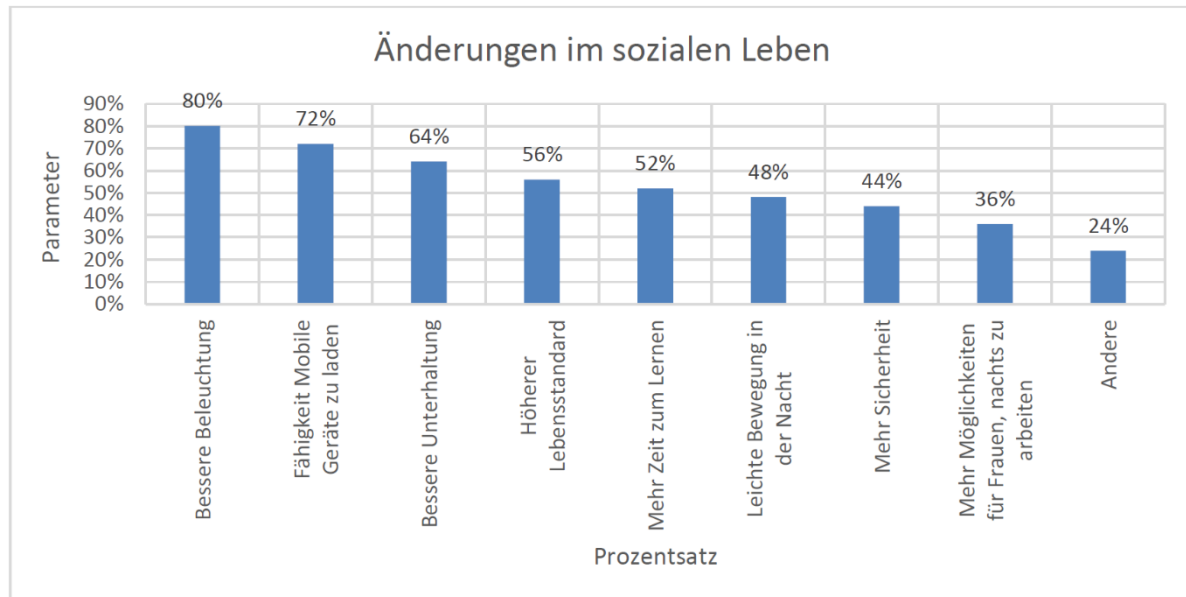
Da das Projekt Humanotop Aldea ein Thema von Interesse ist, sind auch Projekte in kleinerem Maßstab von großer Bedeutung.

Neben Großprojekten, die sich auf den Lebensstil einer ganzen Gemeinschaft auswirken, können Solar Home Systems (SHS) dort eine wichtige Rolle spielen, wo es keinen Anschluss an das Stromnetz gibt.

SHS können den Zugang zu Elektrizität zu geringen Kosten und daher können es mehr Menschen leisten. Eine Fallstudie mit drei Haushalten und zwei Lebensmittelgeschäften mit Solarsystemen mit einer Leistung von 30 bis 75 Wp zeigte, dass trotz der im Vergleich zum mittleren Einkommen hohen Installationskosten alle Nutzer\*innen mit diesem Ansatz zufrieden waren (Khan and Azad, 2014). Abbildung 9 zeigt, bei wie vielen Bewohnern in den einzelnen Bereichen Verbesserungen eingetreten sind. Aus diesem Diagramm kann man schließen, dass diese kleinen Projekte

einen großen Unterschied im Leben der Menschen machen können, die unter einer niedrigen oder nicht vorhandenen Energieversorgung leiden (Khan and Azad, 2014).

Abbildung 9 :Veränderungen im sozialen Leben der Bewohner in den untersuchten Fällen ( Eigene Darstellung nach Khan and Azad, 2014)



Beim Betrieb von Photovoltaikanlagen fallen keine Abgase oder andere Schadstoffe am Standort an. Somit wird der Indikator als positiv bewertet.

#### Fazit

Wie die obigen Beispiele zeigen, können negative soziale Auswirkungen in den Phasen vor der Produktion und teilweise auch während der Betriebsphase auftreten.

Um sich nicht an solchen Ungerechtigkeiten zu beteiligen, sind genaue Informationen über die Herkunft der verwendeten Ausrüstung erforderlich.

Beispielsweise führt (Silicon Valley Toxics Coalition, 2019) eine Rangliste der Hersteller von Solarmodulen auf der Grundlage von Faktoren, wie Arbeitnehmerrechte, Gesundheit und Sicherheit und die Lieferketten durch. In den Jahren 2018/19 wiesen viele globale Hersteller wie Jinko, Trina und JA Solar in den genannten Kriterien hohe positive Bewertungen auf.

#### Ausblick weitere Recherchen

##### Standortanforderungen/Betriebsbedingungen

Der Wirkungsgrad eines Kollektors ist unter anderem auch abhängig von den Betriebsbedingungen je nach Region. Hier besteht das Potential in der Bewertung auch verschiedene Ausführungen dieser Technologie zu vergleichen und diejenige weiter zu betrachten, die die Standortanforderungen am besten erfüllt.

##### Verschleiß der Anlage

Ein weiterer Einfluss, welcher bisher vernachlässigt ist, ist der Verschleiß von Anlagen und der damit einhergehende Wirkungsgradverlust. Das beeinflusst das zeitliche Verhalten der Energieerzeugung und -speicherung und damit auch alle anderen Indikatoren, die von der Energieerzeugung abhängen.

## Windkraftanlagen

Die Entstehung des Windes ist auf ungleichmäßige Sonneneinstrahlung auf die Erde zurückzuführen. Die Atmosphäre sowie die Wasser- und Landmassen werden unterschiedlich durch die solare Strahlungsenergie erwärmt. Durch die verschiedenen Temperaturen entstehen Druckunterschiede, die zur Bildung von Hoch- und Tiefdruckgebieten führen. Aus diesem Phänomen resultieren Luftmassenbewegungen, die jahreszeitlich, täglich und sogar im Minutenbereich stark schwanken [Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A. (Erneuerbare Energien): Erneuerbare Energien. 4., aktualisierte, korrigierte und ergänzte Au Aufl. [New York]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006].

Windkraftanlagen wandeln kinetische Energie in den Luftmassenbewegungen in mechanische Energie um. Diese Bewegungsenergie wird genutzt, um elektrische Energie zu erzeugen. Für die Energieumwandlung können zum einen das Widerstandsprinzip und zum anderen das Auftriebsprinzip angewendet werden.

Um die Anlagen wirtschaftlich betreiben zu können, muss die maximal mögliche Energie aus dem Wind gewonnen werden. Es werden maximal 59,3 Prozent der im Wind enthaltenen Energie in Nutzleistung umgewandelt, da die Luft hinter dem Durchgang durch die Windkraftanlage nicht auf null abgebremst werden kann, sondern noch eine bestimmte Restgeschwindigkeit aufweist [Hau, E. (Windkraftanlagen): Windkraftanlagen: Springer Berlin Heidelberg, 2016].

Es gibt Windkraftanlagen in verschiedenen Ausführungen. Für folgenden wird vorerst nur Windkraftanlagen mit horizontaler Achse betrachtet, da diese sich bereits etabliert haben und am weitesten ausentwickelt sind (vgl. [D. Hautmann, „Windkraft neu gedacht, Erstaunliche Beispiele für die Nutzung einer unerschöpflichen Ressource“, S. 112]).

Aufgrund der gegenläufigen Erträge von Photovoltaik und Windkraft, wird die gleichzeitige Nutzung für einen gleichmäßigeren Energieertrag empfohlen ( [D. Hautmann, „Windkraft neu gedacht, Erstaunliche Beispiele für die Nutzung einer unerschöpflichen Ressource“, S. 113]).

Bei der Bewertung von Windkraftanlagen lässt sich nicht mit einem einheitlichen Wirkungsgrad rechnen und die Erzeugung beliebig dimensionieren. Windkraftanlagen haben je nach Modell unterschiedliche Höhen, Rotorflächen, mechanische und elektrische Wirkungsgrade, sowie Auslegungsgeschwindigkeiten. Zudem ist die Leistung, die von einer Windkraftanlage erzeugt werden kann, abhängig von der Windgeschwindigkeit.

### Flächenbedarf

Der Flächenbedarf von Windkraftanlagen lässt sich nicht so pauschal bestimmen, wie bei anderen Technologien. Die dauerhaft versiegelte Fläche durch eine Windkraftanlage entsteht durch das Fundament zur Verankerung des Masts der Windkraftanlage. Für die Fundamentfläche wird ein Polynom auf Basis zweier Beispielanlagen ([Pro Windkraft Niedernhausen, Flächenbedarf Windkraft. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.prowindkraft-niedernhausen.de/niedernhausen/flaechenbedarf/> (Zugriff am: 18. Mai 2021)) und [B. Mayer-Mancini, „Dimension Windkraftanlagen“) herangezogen.

Tab.: Referenzanlagen für Bestimmung der Fundamentfläche

	Anlage 1 [55]	Anlage 2 [53]
Leistung [kW]	3000	5000
Fläche [m <sup>2</sup> ]	350	580

Zusätzlich zu dem Flächenbedarf des Fundaments entsteht ebenfalls ein Flächenbedarf für einen Kranstellplatz (nach [Pro Windkraft Niedernhausen, Flächenbedarf Windkraft. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.prowindkraft-niedernhausen.de/niedernhausen/flaechenbedarf/> (Zugriff am: 18. Mai 2021)) je nach Größe erforderlich) und Erschließungswege. Diese Faktoren können allerdings erst bei der Ausführungsplanung quantifiziert werden, da diese Anforderungen durch die Hersteller- und Montageunternehmen formuliert werden.

Zwar benötigen Windkraftanlagen bei der Installation nur verhältnismäßig wenig Fläche für den Mast, allerdings ist zu berücksichtigen, dass andere Gebäude oder Konstruktionen in der Nähe, die Luftströmung und somit die an der Turbine vorliegende Windgeschwindigkeit beeinträchtigen können. Dafür spielt eine individuelle Analyse der Windverhältnisse eine Rolle. Insbesondere in der Hauptwindrichtung am Standort sollten keine Hindernisse

vorhanden sein. Die folgende Abbildung beschreibt den Einfluss eines Hindernisses auf die Luftströmung, die von einer Windturbine genutzt werden soll.

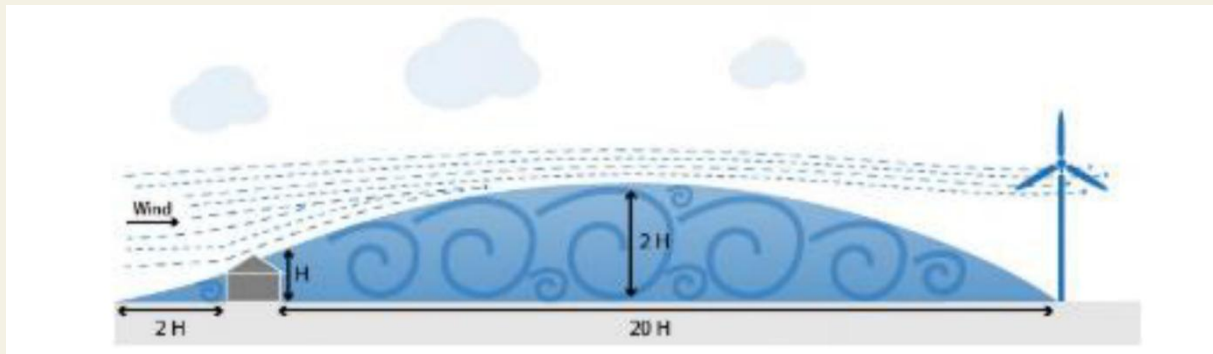


Abb.: Luftverwirbelungen durch Hindernisse bei Windkraftanlagen [Patrick Jüttemann, „Kleinwind-Marktbericht 2020“, 2020]

Dabei soll das Hindernis das Zwanzigfache seiner Höhe von der Windkraftanlage entfernt sein, oder die Rotorfläche an ihrem untersten Punkt mindestens doppelt so hoch, wie das Hindernis. Diese Bewertung bedarf ausführlicher und individueller Bewertung des Standortes und kann nicht einfach in die Simulation integriert werden. Um besonderen Einfluss von Hindernissen zu berücksichtigen, spielt die Hauptwindrichtung am Standort eine wichtige Rolle. Die Analyse und Bewertung der Hauptwindrichtung sind in Abschnitt Konzept Avantis erläutert und exemplarisch für den Standort Avantis durchgeführt.

### Windrichtung

Das Klima in Deutschland wird geprägt durch den Durchzug von Tiefdruckgebieten, deren Zugbahnen häufig von Südwest nach Nordost verlaufen. Dementsprechend lässt sich ein Vorherrschen von Winden aus Südwest bis West feststellen [Bürger, M. (Bodennahe Windverhältnisse und windrelevante Reliefstrukturen): Bodennahe Windverhältnisse und windrelevante Reliefstrukturen. In: Leibnitz-Institut für Länderkunde (ed) Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2003, S. 52–55].

Die Windrichtung wird mit einer Windfahne gemessen, die sich permanent mit dem Wind dreht. Ein Datenlogger zeichnet die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit pro Zeiteinheit auf. Die Windrichtung eines Standortes wird durch die Windrose dargestellt. Der Wind muss möglichst ohne Hindernisse aus der Hauptwindrichtung zur Windanlagen anströmen können [Jüttemann, P. (Kleinwindkraft für Gewerbe und Privat): Kleinwindkraft für Gewerbe und Privat. Planung, Technik und Markt. 2. Auflage Aufl., 2020].

Die folgende Abbildung stellt die Windgeschwindigkeiten sowie die Windrichtungen in Deutschland dar.



Abb.: Bodennahe Windverhältnisse in Deutschland [Bürger, M. (Bodennahe Windverhältnisse und windrelevante Reliefstrukturen): Bodennahe Windverhältnisse und windrelevante Reliefstrukturen. In: Leibniz-Institut für Länderkunde (ed) Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2003, S. 52–55]

### Lebensdauer

Die Lebensdauer einer Kleinwindkraftanlage wird nach [Patrick Jüttemann, „Kleinwind-Marktreport 2020“, 2020., S. 90] mit bis zu über 20 Jahren bemessen. Der größte Faktor ist der Verschleiß der beweglichen Teile im Generator der Windkraftanlage. Die Lebensdauer wird im Modell mit 20 Jahren angenommen.

## Typen

### Kleinwindanlagen

Kleinwindanlagen werden in Nordrhein-Westfalen im Windenergie-Erlass vom 11.07.2011 wie folgt definiert:

„Unter Kleinwindanlagen werden Anlagen unterhalb einer Anlagengesamthöhe von 50 m Höhe verstanden, die entsprechend der Regelungen der 4. BImSchV nicht unter die immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht fallen.“

Bislang waren Kleinwindanlagen in Deutschland im Gegensatz zu anderen Formen von erneuerbarer Stromerzeugung wegen ihrer Unwirtschaftlichkeit untergeordnet. Aufgrund der in Deutschland stetig steigenden Strompreise und der geringen Einspeisevergütung werden Kleinwindräder für die Selbstversorgung vor allem in Landwirtschafts- und Gewerbebetrieben attraktiver. Landwirtschafts- und Industriebetriebe haben einen erhöhten Energiebedarf und meistens auch den notwendigen Platz für die Installation einer Kleinwindanlage mit einer höheren Leistung.

### Leistungsklassen

Kleinwindanlagen können in Leistungsklassen unterteilt werden [Gehling, M. (Installierte Leistung, Stromerzeugung und Marktentwicklung von Kleinwindanlagen in Deutschland): Installierte Leistung, Stromerzeugung und Marktentwicklung von Kleinwindanlagen in Deutschland, 2019]:

- Mikro: 0 bis 1,5 kW
- Klein: 1,5 bis 10 kW
- Mittel: 10 bis 75 kW

Die am häufigsten installierten Anlagengrößen sind die Mikroanlagen. Sie werden für die Energieversorgung von Privathaushalten oder Inselnetzen im Bereich Garten, Ferienhaus sowie Segel- und Hausboot eingesetzt. Die Kleinwindanlagen werden sowohl im privaten als auch im gewerblichen Bereich eingesetzt.

Bei Anlagen bis zu 10 kW Leistung in Deutschland muss keine EEG-Umlage auf eigenverbrauchten Strom gezahlt werden. Somit können Windanlagen in der Mittelklasse an einem mittleren bis weniger guten Windstandort unwirtschaftlich sein.

Die obere Grenze der mittelgroßen Anlagen berücksichtigt auch die physikalische Grenze der Rotorfläche für Kleinwindenergieanlagen. Unter Berücksichtigung der Formel "Elektrische Leistung" und mit einer Rotorfläche von maximal 200 m<sup>2</sup> kann auch bei fortschreitender technischer Reife in den nächsten Jahren dem Wind nicht mehr als 75 Kilowatt nutzbare elektrische Leistung entzogen werden [Gehling, M. (Installierte Leistung, Stromerzeugung und Marktentwicklung von Kleinwindanlagen in Deutschland): Installierte Leistung, Stromerzeugung und Marktentwicklung von Kleinwindanlagen in Deutschland, 2019].

### Bau- und Genehmigungsrecht

Das Bau- und Genehmigungsrecht von Kleinwindanlagen unterscheidet sich maßgeblich von Großwindanlagen, da sie eine sehr niedrige Leistung aufweisen und in der aktuellen Genehmigungspraxis nicht als raumbedeutsame Anlagen gelten [Gehling, M. (Installierte Leistung, Stromerzeugung und Marktentwicklung von Kleinwindanlagen in Deutschland): Installierte Leistung, Stromerzeugung und Marktentwicklung von Kleinwindanlagen in Deutschland, 2019].

Die Baugenehmigung für die Errichtung einer Kleinwindanlage ist ein Einzelfallverfahren. Diese Verfahren können bundesweit höchst unterschiedlich ausfallen, da die Baugenehmigung für Kleinwindanlagen in den jeweiligen Landesbauordnungen getrennt voneinander geregelt wird. Darüber hinaus ist die Genehmigungspraxis der zuständigen Baubehörden unterschiedlich.

Alle Kleinwindanlagen mit einer Gesamthöhe über 10 Meter benötigen eine Baugenehmigung. Unterschreitet die Anlagehöhe die 10 Meter, können sie in mehreren Bundesländern ohne Genehmigung aufgestellt werden [Gehling, M. (Installierte Leistung, Stromerzeugung und Marktentwicklung von Kleinwindanlagen in Deutschland): Installierte Leistung, Stromerzeugung und Marktentwicklung von Kleinwindanlagen in Deutschland, 2019].

Die Abstandsflächen im Zusammenhang mit Kleinwindanlagen besagt, wie weit entfernt sich die Windanlage von anderen Bauwerken und der Grundstücksgrenze befinden muss. Vorgaben zu Mindestabständen findet man in den Landesbauordnungen, wobei diese auch vom Gebietstyp abhängen. Berechnungsmaßstab ist die Höhe der

Windanlage, die sich auf die Gesamthöhe der Windanlage, d.h. der Rotormitte plus Rotorradius, bezieht. Laut Jüttemann 2020 beträgt in NRW die Tiefe der Abstandsfläche 0,5 H, wobei in Gewerbe- und Industriegebieten die Tiefe auf 0,25 reduziert werden kann [Jüttemann, P. (Kleinwindkraft für Gewerbe und Privat): Kleinwindkraft für Gewerbe und Privat. Planung, Technik und Markt. 2. Auflage Aufl., 2020].

## Kennwerte

### Leistungsbeiwert

Der Leistungsbeiwert gibt das Verhältnis von genutzter Leistung zur im Wind enthaltenen Leistung an. Dieser kann mit folgender Formel bestimmt werden:

$$c_p = \frac{P_{Nutz}}{P_0}$$

P bezeichnet die elektrische Leistung der Anlage,  $c_p$  den Leistungsbeiwert nach der obigen Formel,  $\eta_R$  den Wirkungsgrad durch Strömungsverluste,  $\eta_m$  den Wirkungsgrad der mechanischen Bauteile,  $\eta_e$  den Wirkungsgrad der elektrischen Bauteile,  $\rho$  die Dichte der Luft,  $A$  die überstrichene Fläche der Rotoren und  $v$  die Windgeschwindigkeit. Die Windgeschwindigkeit hat dabei einen großen Einfluss auf die elektrische Leistung der Anlage, da sie mit der dritten Potenz in die Gleichung eingeht. Aus diesem Grund ist die Standortanalyse für die Entscheidung für Windkraftanlagen von großer Bedeutung. Allerdings steigt die Windgeschwindigkeit mit steigender Entfernung vom Boden und deswegen können Kleinwindanlagen nicht die elektrische Leistung wie Großanlagen erreichen [Wetter, C; Brüggling, E; Ortmann, J; Wiggers, P; Emaus, J; Canter-Cremers, H; Willemsen, O; Wanink, F. (Regionale Kleinwindkraftanlagen in der EUREGIO): Regionale Kleinwindkraftanlagen in der EUREGIO. Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt, 2014].

### Elektrische Leistung

Die elektrische Leistung, die dem Wind entnommen werden kann, berechnet sich mit der folgenden Formel:

$$P = c_p \cdot \eta_R \cdot \eta_m \cdot \eta_e \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

### Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit nimmt mit steigender Höhe kontinuierlich zu, bis sie schließlich einen konstanten Wert erreicht. In niedrigeren Höhenmetern wird die Windgeschwindigkeit vor allem durch die Bodenrauigkeit und die damit verbundene Reibung abgebremst. Die Windgeschwindigkeit nimmt vom Erdboden kontinuierlich mit immer kleiner werdender Zuwachsrate zu, bis sie schließlich einen konstanten Wert erreicht. Der konstante Höhenwind, auch geostrophischer Wind genannt, unterliegt nicht dem Einfluss von Turbulenzen und Oberflächenrauigkeiten [Hau, E. (Windkraftanlagen): Windkraftanlagen: Springer Berlin Heidelberg, 2016].

Für den Vergleich von bodennahen Windverhältnissen ist es deshalb eine notwendige Voraussetzung, dass die Messungen in gleicher Höhe über Grund und über Flächen mit gleicher, möglichst geringer Rauigkeit stattfinden. Die Messung wird üblicherweise in 10 Meter Höhe durchgeführt [Jüttemann, P. (Kleinwindkraft für Gewerbe und Privat): Kleinwindkraft für Gewerbe und Privat. Planung, Technik und Markt. 2. Auflage Aufl., 2020].

Die folgende Abbildung zeigt den Effekt der unterschiedlichen Rauigkeiten der Oberfläche auf die Windgeschwindigkeit abhängig von der Höhe. Die Windgeschwindigkeit steigt, in einer Landschaft mit vielen Hindernissen, wie höhen Gebäuden oder Bäumen, langsamer an [Hau, E. (Windkraftanlagen): Windkraftanlagen: Springer Berlin Heidelberg, 2016].



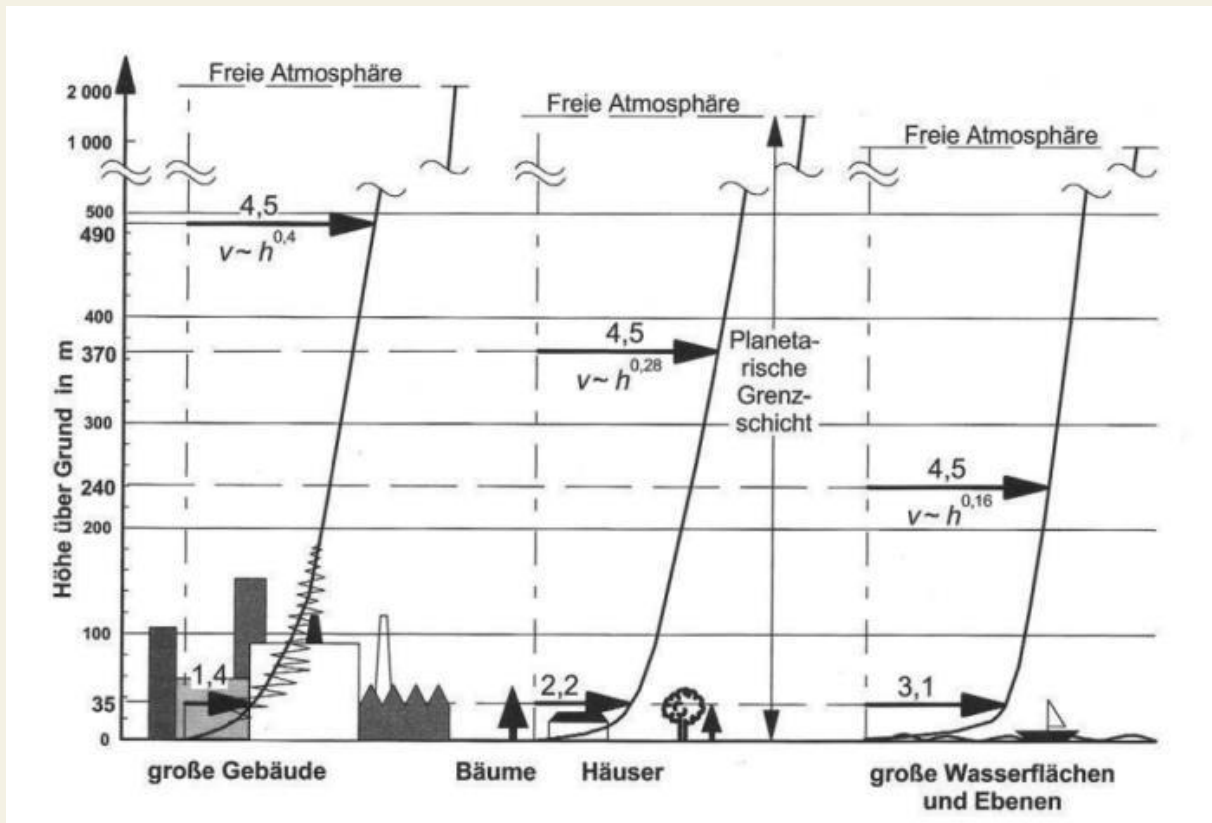


Abb.: Einfluss der Rauigkeit der Oberfläche auf das vertikale Windprofil [Kaltschmitt, M; Streicher, W; Wiese, A. (Erneuerbare Energien): Erneuerbare Energien. 4., aktualisierte, korrigierte und ergänzte Au Aufl. [New York]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006].

Wind ist nicht nur in der Stärke, sondern auch in der Richtung veränderlich. Über einen längeren Zeitraum bilden sich an einem Standort Hauptwindrichtungen heraus. Die Hauptwindrichtung ist die Richtung, in die der Wind häufig und besonders stark weht [Jüttemann, P. (Kleinwindkraft für Gewerbe und Privat): Kleinwindkraft für Gewerbe und Privat. Planung, Technik und Markt. 2. Auflage Aufl., 2020].

### Turbinenkennlinie

Eine grundlegende Kenngröße für die Beurteilung ist die Turbinenkennlinie (siehe Abbildung).

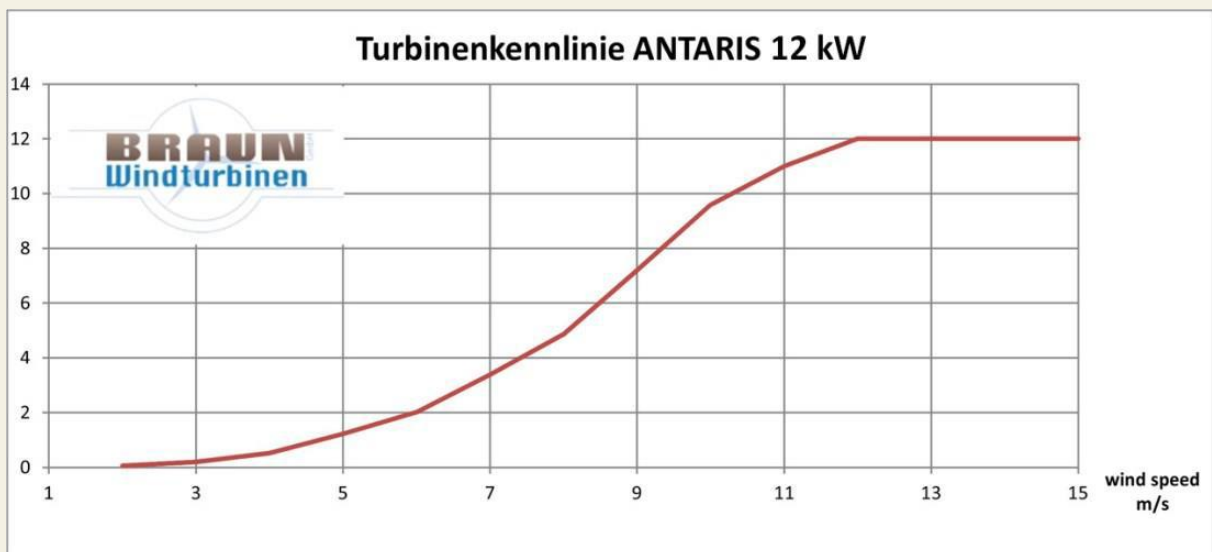


Abb.: Kennlinie einer Windturbine mit Nennleistung 12 kW: Leistung [kW] in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit [m/s] (BRAUN Windturbinen GmbH, ANTARIS 12.0 kW. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.braun-windturbinen.com/produkte/antaris-kleinwindanlagen/antaris-12-kw/> (Zugriff am: 3. März 2021))

Die Turbinenkennlinie beschreibt die erzeugte elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Wie sich an dem Beispiel in der obigen Abbildung erkennen lässt, wird die Nennleistung der Windkraftanlage erst bei hohen Windgeschwindigkeiten erreicht und kann nicht einfach für die Planung der Stromversorgung verwendet werden. Stattdessen wird die Turbinenkennlinie auf die gemessene Windgeschwindigkeit angewendet und so die Leistung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit über den Betrachtungszeitraum eines Jahres aufsummiert.

Um eine Kennlinie für verschiedene Anlagen erstellen zu können, muss ein funktionaler Zusammenhang in Abhängigkeit verschiedener Kenngrößen erstellt werden. Diese umfassen die Nennleistung, die Windgeschwindigkeit, bei der die Nennleistung erreicht wird und die Windgeschwindigkeit, ab der die Windkraftanlage Strom produziert. Die Kennlinie einer Windkraftanlage gleicht in ihrem Verlauf einem Polynom dritten Grades. Es wird zuerst eine allgemeine Polynomgleichung dritten Grades formuliert, die von der Windgeschwindigkeit  $v$  abhängig ist.

$$f(v) = a \cdot v^3 + b \cdot v^2 + c \cdot v + d$$

Unter Betrachtung der Kennlinie einer Windkraftanlage lassen sich einige Bedingungen ablesen, die erfüllt sein müssen. Die Nennleistung wird bei einer angegebenen Windgeschwindigkeit erreicht und bildet das Maximum der Funktion. Bei einer Windgeschwindigkeit von 0 m/s ist die Leistung gleich 0 und das Minimum der Funktion.

Um zu berücksichtigen, dass eine Windkraftanlage erst ab einer Einschaltwindgeschwindigkeit beginnt Strom zu produzieren, wird die Funktion wie folgt aufgestellt:

$$P(v) = - \frac{2 \cdot P_{nenn}}{(v_{nenn} - v_{ein})^3} \cdot (v - v_{ein})^3 + \frac{3 \cdot P_{nenn}}{(v_{nenn} - v_{ein})^2} \cdot (v - v_{ein})^2$$

### Einspeisbeginn

Ein weiterer Kennwert ist der Einspeisebeginn: Diese Größe gibt Auskunft darüber, ab welcher Windgeschwindigkeit die Windkraftanlage beginnt, Strom zu produzieren.

### Bewertung einer Windkraftanlage

Parameter für die Bewertung:

- Elektroenergiebedarf
- Durchschnittliche Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Windmessung
- Bezugskosten Strom
- Elektrischer Wirkungsgrad
- Platzbedarf
- Lärmemissionen

Für die Bewertung einer Windkraftanlage spielen die Windverhältnisse am Standort die größte Rolle ([D. Hautmann, „Windkraft neu gedacht, Erstaunliche Beispiele für die Nutzung einer unerschöpflichen Ressource“, S. 114]). Für eine Vorentscheidung gemäß Abbildung reicht eine Betrachtung des Jahresmittels in der Region. Bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit kleiner 4 m/s kann eine Windkraftanlage in der Regel nicht wirtschaftlich betrieben werden ([D. Hautmann, „Windkraft neu gedacht, Erstaunliche Beispiele für die Nutzung einer unerschöpflichen Ressource“, S. 114]). Spätestens bei der Planung, aber auch für den genauen Vergleich einer Windkraftanlage mit anderen Technologien und die Dimensionierung sollten jedoch Windmessungen über den

Verlauf von mindestens einem Jahr am geplanten Aufstellort durchgeführt werden. So werden auch Windflauten mit berücksichtigt. Diese lassen sich aus dem jährlichen Mittelwert nicht erkennen und das Erzeugungsprofil der Windkraftanlage so nicht prognostizieren.

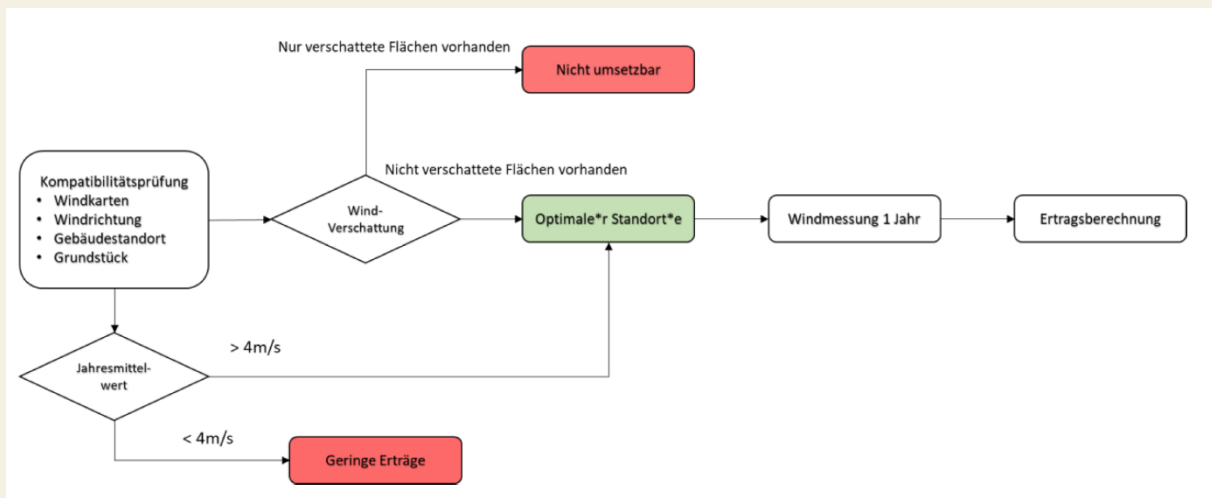


Abb.: Bewertungsstruktur für eine Windkraftanlage

Dabei wird die grundsätzliche Umsetzbarkeit der Installation einer Anlage zuerst über eine Prüfung von Standortgegebenheiten und Wetterdaten kontrolliert. Bei bestandener Kontrolle werden weitere Berechnungsschritte für eine detailliertere Bewertung durchgeführt.

## Umweltauswirkung

### CO<sub>2</sub>-Equivalent Emissionen

Die Erzeugung von elektrischer Energie durch Onshore-Windkraftanlagen ist mit einer CO<sub>2</sub>-Entstehung von 17,7 g/kWh belastet.

Die Erzeugung offshore bringt ein weitaus geringeres CO<sub>2</sub>-Equivalent mit sich, da offshore bessere Windverhältnisse vorliegen. Die CO<sub>2</sub>-Erzeugung ist also abhängig von den Windverhältnissen des Standorts.

Für die Bewertung wurde mit dem gemittelten Wert aus [Agentur für Erneuerbare Energien, Mediathek. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek> (Zugriff am: 22. April 2021)] gerechnet.

## Wirtschaftlichkeit

### Kennzahlen (KPI's)

#### Investitionskosten (CAPEX)

Die Investitionskosten einer Kleinwindkraftanlage belaufen sich zwischen 10.000 €/kW<sub>nenn</sub> und 3.000 €/kW<sub>nenn</sub>. Aus der Auswertung der Preisangaben für Windkraftanlagen nach [Patrick Jüttemann, „Kleinwind-Marktreport 2020“, 2020] und den sinkenden spezifischen Kosten bei steigender Nennleistung (vgl. [Kleine Windkraftanlagen | [klein-windkraftanlagen.com](http://klein-windkraftanlagen.com), Kosten u. Wirtschaftlichkeit einer Kleinwindkraftanlage | FAQ. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klein-windkraftanlagen.com/kosten-wirtschaftlichkeit-kleinwindkraftanlage/> (Zugriff am: 18. Mai 2021)]) lässt sich eine funktionale Beschreibung der spezifischen Investitionskosten herleiten (siehe folgende Abbildung). Diese wird bis zu einer Nennleistung von 12 kW definiert. Ab einer größeren Nennleistung werden die spezifischen Investitionskosten konstant mit dem in [Kleine Windkraftanlagen | [klein-windkraftanlagen.com](http://klein-windkraftanlagen.com), Kosten u. Wirtschaftlichkeit einer Kleinwindkraftanlage | FAQ. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klein-windkraftanlagen.com/kosten-wirtschaftlichkeit-kleinwindkraftanlage/> (Zugriff am: 18. Mai 2021)] und [B. Mayer-Mancini, „Dimension Windkraftanlagen“.] genannten unteren Wert von 3.000 €/kW angenommen.

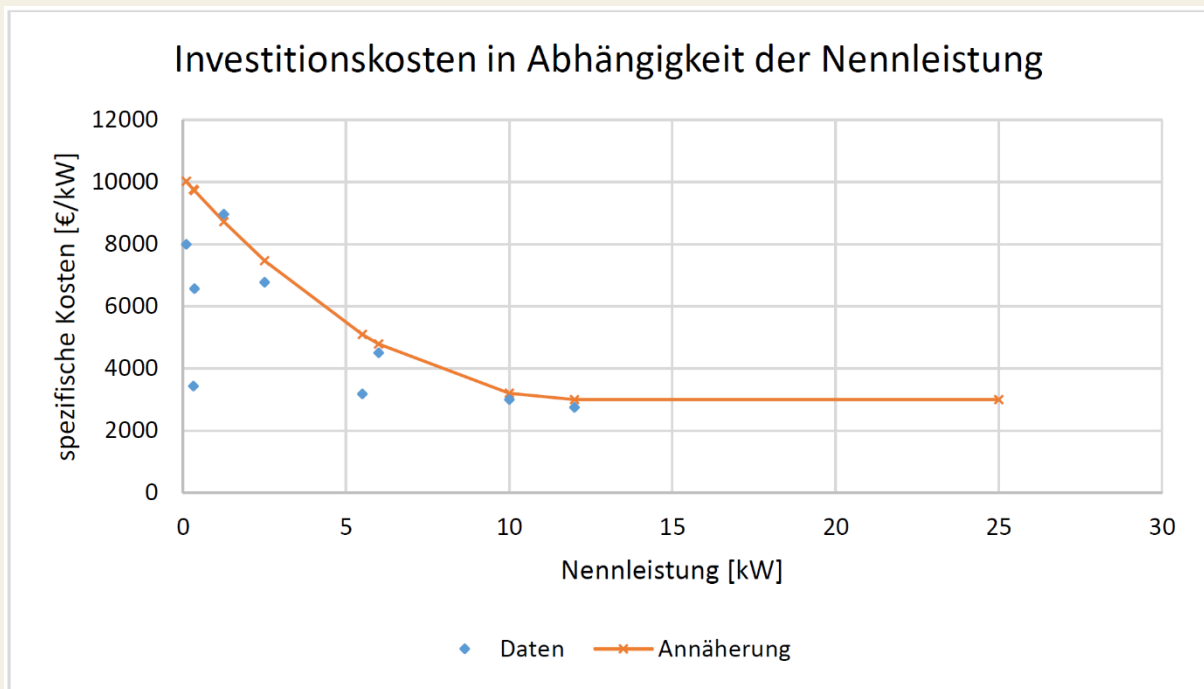


Abb.: Investitionskosten von Kleinwindkraftanlagen in Abhängigkeit der installierten Nennleistung

Als jährliche Kosten werden in [Kleine Windkraftanlagen | [klein-windkraftanlagen.com](https://www.klein-windkraftanlagen.com), Alles über Preise für Kleinwindkraftanlagen. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klein-windkraftanlagen.com/allgemein/preise-fuer-kleinwindkraftanlagen-fehlinvestitionen-vermeiden/> (Zugriff am: 29. April 2021).] und [Patrick Jüttemann, „Kleinwind-Marktreport 2020“, 2020] ca. zwei Prozent der Investitionskosten genannt. Ab einer Nennleistung von über 1,5 kW ist nach [Kleine Windkraftanlagen | [klein-windkraftanlagen.com](https://www.klein-windkraftanlagen.com), Alles über Preise für Kleinwindkraftanlagen. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klein-windkraftanlagen.com/allgemein/preise-fuer-kleinwindkraftanlagen-fehlinvestitionen-vermeiden/> (Zugriff am: 29. April 2021)] mit zusätzlichen Kosten für die Montage durch Dienstleister von mindestens 1.000 € zu rechnen.

## Soziale Auswirkungen

### Gesundheit

Beim Betrieb von Windkraftanlagen werden keine Schadstoffe freigesetzt. Allerdings emittieren Windkraftanlagen Infraschall. Die gesundheitliche Auswirkung einer anhaltenden Infraschallbelastung durch Windkraftanlagen ist nicht ausreichend untersucht, um sie genau beurteilen zu können. Um dieses Risiko aber nicht außer Acht zu lassen, wird der Indikator als neutral angenommen.

### Lärmemissionen

Gegenüber vielen anderen Anlagen, die hier behandelt werden, muss bei Windkraftanlagen darauf geachtet werden, dass es erhebliche Akzeptanzprobleme bei der deutschen Bevölkerung gibt. Die Anwendung in der Nähe von Wohngebieten erschwert sich dadurch erheblich. Die Nutzung an Gewerbestandorten ist weniger bedenklich (vgl. [B. Adler, Moderne Energiesysteme – ein Beitrag zur Energiewende. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 15]).

Als Reaktion auf die Anwohnerakzeptanz sind je nach Installationsgebiet verschiedene Lärm-Toleranzgrenzen vom Gesetzgeber festgelegt. Für Wohngebiete beträgt die Obergrenze für Geräuschemissionen 35 Dezibel, während in Industriegebieten bis zu 70 Dezibel erlaubt sind (vgl. [D. Hautmann, „Windkraft neu gedacht, Erstaunliche Beispiele für die Nutzung einer unerschöpflichen Ressource“, S. 112]). An Industriestandorten können also in der Regel größere Windkraftanlagen vorgesehen werden als in Wohngebieten.

## Ausblick weitere Recherchen

### Verschleiß der Anlage

Ein weiterer Einfluss, welcher bisher vernachlässigt ist, ist der Verschleiß von Anlagen und der damit einhergehende Wirkungsgradverlust. Das beeinflusst das zeitliche Verhalten der Energieerzeugung und -speicherung und damit auch alle anderen Indikatoren, die von der Energieerzeugung abhängen.

#### **Standortanforderungen/Betriebsbedingungen**

Der Wirkungsgrad von Windkraftanlagen ist unter anderem auch abhängig von den Betriebsbedingungen je nach Region. Hier besteht das Potential in der Bewertung auch verschiedene Ausführungen dieser Technologie zu vergleichen und diejenige weiter zu betrachten, die die Standortanforderungen am besten erfüllt.

## PV-Wind-Wärmepumpe

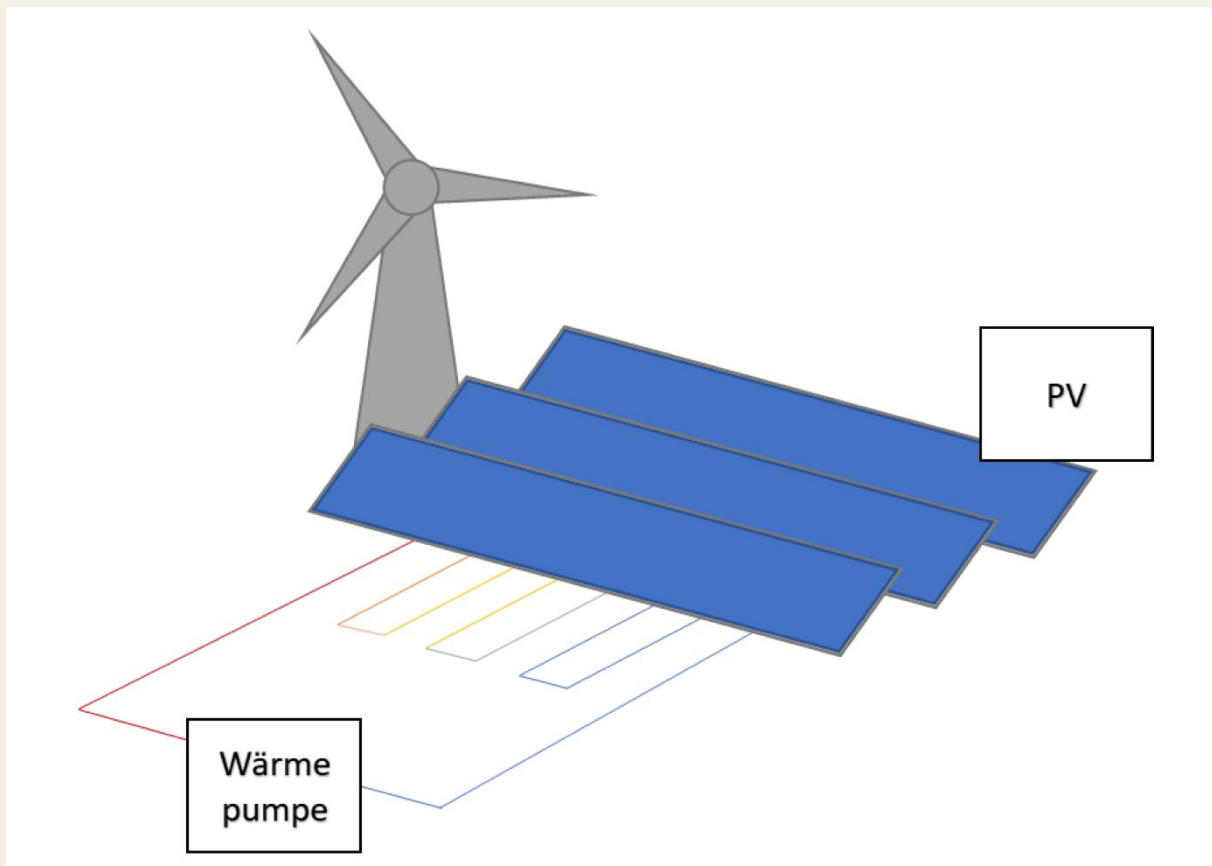


Abb.: Beispielskizze zu mehrfacher Flächennutzung

Die Abbildung dient der Verdeutlichung der Komplexität der Bestimmung der Verteilung von Technologien auf den Flächenbedarf von verschiedenen Technologien. Die Schwierigkeit besteht hier darin, dass verschiedene Technologien die Fläche auf eine andere Art nutzen. Anhand von der obigen Abbildung kann das mit den Technologien Windkraft, Photovoltaik und einer Erdwärmepumpe auf einer Freifläche erläutert werden.

Die Kollektoren einer Erdwärmepumpe verlaufen unterirdisch, während die Photovoltaikmodule oberirdisch auf einer Aufständerung angebracht sind. Die gleiche Fläche kann von zwei Technologien genutzt werden. Gleichzeitig erscheint die Windkraftanlage wie die Photovoltaik als eine oberflächliche Technologie. Allerdings wird insbesondere bei größeren Windkraftanlagen ein großes und Tiefes Fundament benötigt, um den Windlasten standzuhalten.

Ein Windrad konkurriert also sowohl oberirdisch als auch unterirdisch mit anderen Technologien. Gleichzeitig schränkt eine Windkraftanlage die Positionierung von Solaranlagen durch die entstehende Verschattung ein. Je nach Höhe von Windkraftanlage und Solarmodulen können die Solarmodule ebenfalls durch das Windverschattungsprinzip (siehe Abb. in Kapitel Photovoltaik) die Positionierung der Windkraftanlage beeinflussen. Durch diese gegenseitige Beeinflussung kann Fläche entstehen, die oberirdisch nicht sinnvoll genutzt werden kann.

Um diesen Komplexen Zusammenhang abzubilden wäre eine detaillierte Abbildung des Standorts nötig, um die nutzbaren Flächen je nach Technologie zu charakterisieren.

Mit einem dreidimensionalen Modell des Standorts in Verbindung mit dem bereits bestehenden Modell zur Sonnenposition, sowie dem berücksichtigten Jahresverlauf der Windgeschwindigkeit sind die Grundlagen für eine Detaillierung eines Modells gegeben.

# Energiespeicherung

## Parameter:

- Nutzbare Kapazität
- Max. kontinuierliche Ausgangsleistung
- Max. Stromstärke
- Skalierbarkeit
- Garantie
- Preis
- Typ
- Standort (Transport)

Company	Location	Name	Type	Usable Capacity [kWh]	Max. continuous output power [kW]	Max. Current [A]	Recommended ambient temperature [C]	Warranty [years]	Remarks	Price [Euro]
LG	Europe	RESU10H Prime		9.6	5	14.3	15 - 30		Max. 2 connected in parallel	
		RESU16H Prime		16.0	7	20	15 - 30		Max. 2 connected in parallel	
Home Power Solutions	Germany	Picea		36 (Brutto) / 20 (Netto)	7.2			10		70 000 - 100 000
Tesla	USA	Powerwall	Li-ion	13.5	5.8				Wechselrichter kommt dazu; Verbindung mit Wärmepumpe möglich	7 300
Varta	Worldwide	Varta Element Backup 6/12/18	NMC	5.9 / 11.7 / 17.7	1.8 / 3.7 / 4.0			10	AC all-in-one system; customizable	8 000-15 000
Huawei	China	Luna2000 5/10/15/50	LFP	5 / 10 / 15	2.5 / 5 / 5		15 - 30	10	Max. 30 kWh capacity	3 500 - 8 050
RCT Power	Germany		LFP	3.46 / 5.18 / 6.91 / 8.64 / 10.37		25		10		1 300 - 8 100

Abb.: Übersicht möglicher Option an Energiespeichern

## UPS-Systeme

Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme (UPS) sind kritische Komponenten in vielen Infrastrukturen, die eine kontinuierliche Stromversorgung erfordern. Sie sind speziell darauf ausgelegt, bei einem Stromausfall oder bei Schwankungen in der Stromversorgung Energie bereitzustellen.

Ein typisches UPS-System besteht aus einem oder mehreren Energiespeichern (häufig Batterien), einem Wechselrichter, der Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt, und einer Steuereinheit, die den Betrieb des Systems überwacht und steuert.

Es gibt drei Haupttypen von UPS-Systemen: Online, Line-Interactive und Standby.

- Online-UPS-Systeme bieten den höchsten Schutzgrad. Sie arbeiten ständig im Batteriebetrieb und schalten bei einem Stromausfall nicht um, was zu einer nahtlosen Versorgung führt.
- Line-Interactive-UPS-Systeme haben eine eingebaute Spannungsregelung, die dazu beiträgt, Schwankungen in der Eingangsspannung auszugleichen, ohne dass die Batterie verwendet werden muss.
- Standby-UPS-Systeme, auch Offline-UPS genannt, schalten bei einem Stromausfall oder einer signifikanten Spannungsschwankung auf Batteriebetrieb um.

Die Größe und Kapazität eines UPS-Systems kann stark variieren. Kleine Systeme können dazu dienen, einzelne Geräte wie Computer und Server zu schützen, während größere Systeme in der Lage sind, ganze Gebäude oder sogar industrielle Einrichtungen zu versorgen.

Obwohl die meisten UPS-Systeme auf Batterietechnologie basieren, gibt es auch andere Formen der Energiespeicherung, die in UPS-Systemen verwendet werden können. Dazu gehören beispielsweise Brennstoffzellen und Schwungräder. Diese alternativen Energiespeicher können in bestimmten Anwendungen Vorteile bieten, beispielsweise in Bezug auf Langlebigkeit und Umweltfreundlichkeit.

### Energiespeichersysteme für UPS

1. **Batteriebasierte Systeme:** Diese sind die am häufigsten verwendeten Energiespeicher in UPS-Systemen. Sie sind in der Lage, kurze bis mittellange Stromausfälle zu überbrücken, je nach Größe und Kapazität des Batteriesatzes. Die Leistung reicht von wenigen Kilowatt bis hin zu mehreren Megawatt.
2. **Brennstoffzellen-Systeme:** Brennstoffzellen können eine längere Überbrückungszeit als Batterien bieten, je nach Größe der Brennstoffzelle und der Menge des verfügbaren Brennstoffs. Sie sind in der Lage, Leistungen im Bereich von Kilowatt bis Megawatt bereitzustellen.
3. **Schwungrad-Systeme (Flywheels):** Schwungradsysteme können sehr kurze Stromausfälle überbrücken, typischerweise im Bereich von Sekunden bis wenigen Minuten. Sie sind in der Lage, hohe Leistungen im Bereich von Megawatt zu liefern.
4. **Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES):** Diese Systeme können sehr hohe Leistungen liefern und sehr kurze Stromausfälle überbrücken. Sie sind in der Lage, Leistungen im Bereich von Megawatt bis Gigawatt zu liefern.
5. **Doppelschichtkondensatoren:** Diese Systeme können kurze Stromausfälle überbrücken und hohe Leistungen liefern. Sie sind in der Lage, Leistungen im Bereich von Kilowatt bis Megawatt zu liefern.
6. **Superkondensatoren (auch bekannt als SuperCaps oder Ultrakondensatoren):** Diese Art von Energiespeicher sind in der Lage, sehr schnell Energie aufzunehmen und abzugeben, was sie ideal für Anwendungen macht, bei denen es auf schnelle Energieimpulse ankommt. Sie haben eine hohe Leistungsdichte, können aber im Vergleich zu anderen Energiespeichern weniger Energie speichern, was sie für längere Stromausfälle weniger geeignet macht. Superkondensatoren haben eine extrem lange Lebensdauer und sind in der Lage, hohe Leistungen im Bereich von Kilowatt bis Megawatt zu liefern.
7. **Druckluftspeichersysteme (CAES):** Druckluftspeichersysteme sind eine andere Option für UPS-Systeme. Sie verwenden elektrische Energie, um Luft unter hohem Druck in unterirdischen Hohlräumen zu speichern. Bei Bedarf wird die Druckluft freigesetzt und durch eine Turbine geleitet, um elektrische Energie zu erzeugen. Diese Systeme sind in der Lage, Leistungen im Bereich von Megawatt bis Gigawatt zu liefern. Sie können lange Überbrückungszeiten bieten, was sie zu einer attraktiven Option für Anwendungen macht, die eine längere unterbrechungsfreie Stromversorgung erfordern.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Auswahl des richtigen Energiespeichersystems von mehreren Faktoren abhängt, einschließlich der spezifischen Anforderungen der Anwendung, der verfügbaren Infrastruktur, den Kosten und der Umweltverträglichkeit. Daher ist es empfehlenswert, eine gründliche Analyse durchzuführen, um das am besten geeignete System zu identifizieren.

### **Batterie Systeme für UPS System**

**Blei-Säure-Batterien:** Diese Art von Batterien sind eine der ältesten und am weitesten verbreiteten Arten von wiederaufladbaren Batterien. Sie sind in der Lage, moderate Stromausfälle zu überbrücken und können Leistungen im Bereich von Kilowatt bis Megawatt liefern. Blei-Säure-Batterien haben eine geringere Energiedichte und eine kürzere Lebensdauer im Vergleich zu einigen moderneren Batterietechnologien, sie sind jedoch aufgrund ihrer niedrigen Kosten und der Tatsache, dass sie leicht zu recyceln sind, weiterhin eine beliebte Wahl für viele Anwendungen.

**Lithium-Ionen-Batterien:** Lithium-Ionen-Batterien sind eine weitere verbreitete Technologie für UPS-Systeme. Sie besitzen eine höhere Energiedichte und eine längere Lebensdauer als Blei-Säure-Batterien. Darüber hinaus haben sie eine ausgezeichnete Lade- und Entladungs-Effizienz und können auch bei häufiger Nutzung eine lange Lebensdauer aufweisen. Allerdings sind sie teurer und erfordern ein sorgfältiges Management, um eine Überhitzung oder Überladung zu vermeiden, was ihre Nutzung in einigen Anwendungen einschränken könnte.

**Nickel-Cadmium-Batterien:** Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd) sind für ihre Robustheit und Zuverlässigkeit bekannt. Sie bieten eine gute Leistung auch bei niedrigen Temperaturen und sind gegenüber Tiefentladung resistent, was sie zu einer guten Wahl für anspruchsvolle Anwendungen macht. Allerdings haben sie eine niedrigere Energiedichte als Lithium-Ionen- und Blei-Säure-Batterien und sie enthalten Cadmium, ein giftiges Schwermetall, was zu Umweltbedenken führt.

**Nickel-Metallhydrid-Batterien:** Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) sind eine Alternative zu NiCd-Batterien, da sie ähnliche Leistungsmerkmale aufweisen, aber kein Cadmium enthalten. Sie haben eine höhere Energiedichte als NiCd-Batterien, aber eine geringere als Lithium-Ionen-Batterien. Sie können unter einem breiten Temperaturbereich arbeiten und sind gegenüber Tiefentladung resistent.



Die Wahl der besten Batterietechnologie für ein UPS-System hängt von vielen Faktoren ab, einschließlich der Anforderungen an die Leistung, die Überbrückungszeit, die Lebensdauer, die Umweltbedingungen und die Kosten. Es ist daher wichtig, diese Aspekte gründlich zu analysieren, um die am besten geeignete Lösung auszuwählen.

### Design eines kleinen UPS-Systems für den Heimcomputer

Beim Design eines kleinen UPS-Systems für einen Heimcomputer sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen.

1. **Größe der Anlage:** Die Größe des Systems wird hauptsächlich durch die Leistungsaufnahme des Computers bestimmt. Ein typischer Heimcomputer benötigt etwa 300-500 Watt. Daher sollte das UPS-System in der Lage sein, mindestens diese Leistung bereitzustellen.
2. **Überbrückungszeit:** Dies ist die Zeit, die das UPS-System Strom liefern kann, wenn die Stromversorgung ausfällt. Eine Überbrückungszeit von 5-10 Minuten sollte ausreichen, um alle geöffneten Dokumente zu speichern und den Computer sicher herunterzufahren.
3. **Batterietyp:** Aufgrund ihrer höheren Energiedichte und längeren Lebensdauer sind Lithium-Ionen-Batterien eine gute Wahl für ein kleines UPS-System. Sie sind allerdings auch teurer als andere Batterietypen.
4. **Wechselrichter:** Der Wechselrichter sollte in der Lage sein, den Gleichstrom der Batterie in den Wechselstrom umzuwandeln, den der Computer benötigt. Ein Online-Wechselrichter bietet die höchste Qualität der Stromversorgung, ist aber auch teurer.
5. **Zusätzliche Funktionen:** Einige UPS-Systeme bieten zusätzliche Funktionen, wie z.B. Überspannungsschutz und automatische Spannungsregelung. Diese können nützlich sein, um die Lebensdauer des Computers zu verlängern und Datenverluste zu verhindern.

Es ist wichtig, alle diese Faktoren zu berücksichtigen, um ein UPS-System zu entwerfen, das sowohl effektiv als auch kosteneffizient ist.

### Rotary UPS-Systeme

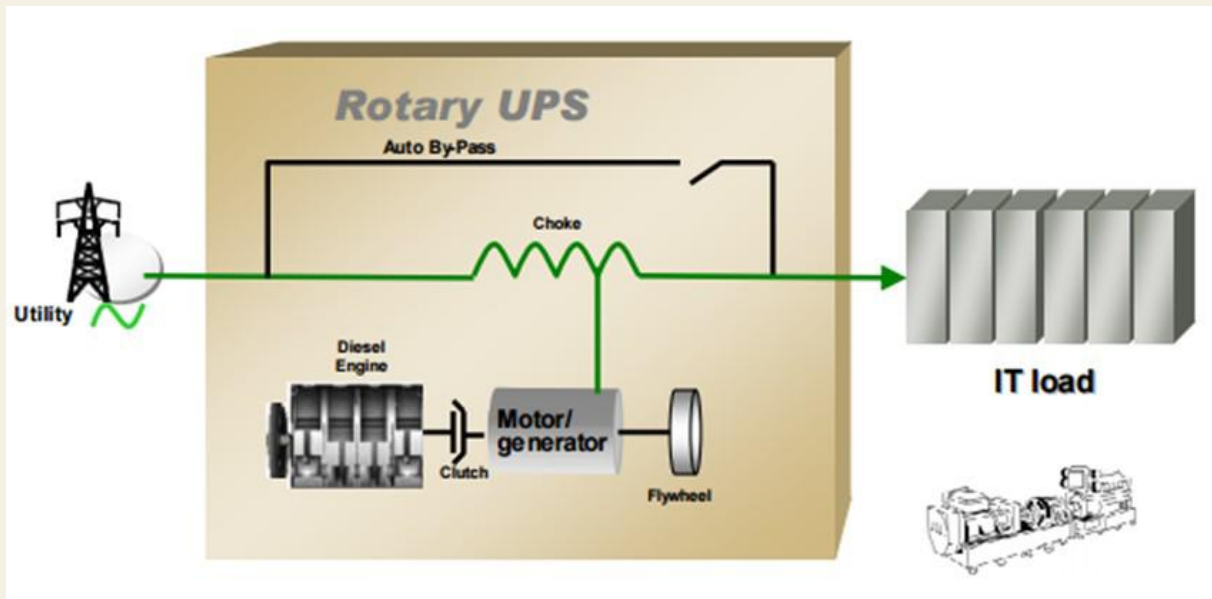
Rotary UPS-Systeme, auch bekannt als dynamische UPS-Systeme, sind eine Art von unterbrechungsfreier Stromversorgung, die eine Kombination aus mechanischen Komponenten und elektronischen Komponenten verwendet, um eine zuverlässige und effiziente Stromversorgung zu gewährleisten.

Diese Systeme nutzen ein Schwungrad, einen Elektromotor und einen Generator, um Energie zu speichern und bereitzustellen. Im Normalbetrieb wird der Netzstrom verwendet, um den Elektromotor anzutreiben, der wiederum das Schwungrad in Bewegung setzt. Wenn der Netzstrom ausfällt, wird die kinetische Energie des Schwungrads genutzt, um den Generator anzutreiben und so elektrische Energie zu erzeugen.

Rotary UPS-Systeme bieten eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Arten von UPS-Systemen:

- Sie haben eine hohe Leistungsfähigkeit, was sie ideal für Anwendungen macht, die hohe Leistungen erfordern.
- Sie sind in der Lage, Stromausfälle von wenigen Sekunden bis zu mehreren Minuten zu überbrücken.
- Sie haben eine hohe Zuverlässigkeit und eine lange Lebensdauer, da sie weniger bewegliche Teile haben, die ausfallen können.
- Sie sind in der Lage, kontinuierlich zu arbeiten, ohne dass eine Batterie benötigt wird, was sie umweltfreundlicher und kosteneffizienter macht.

Jedoch sind sie in der Anschaffung teurer als andere UPS-Systeme und sie erfordern mehr Platz und spezielle Kühlung, was sie für kleinere Anwendungen weniger geeignet macht. Trotzdem sind sie eine ausgezeichnete Wahl für Anwendungen, die eine hohe Leistung und Zuverlässigkeit erfordern, wie z.B. Rechenzentren, Krankenhäuser und Industrieanlagen.



Quelle: <http://blog.schneider-electric.com/power-management-metering-monitoring-power-quality/2017/05/01/static-rotary-ups-best-application/>

### VFI UPS-Systeme

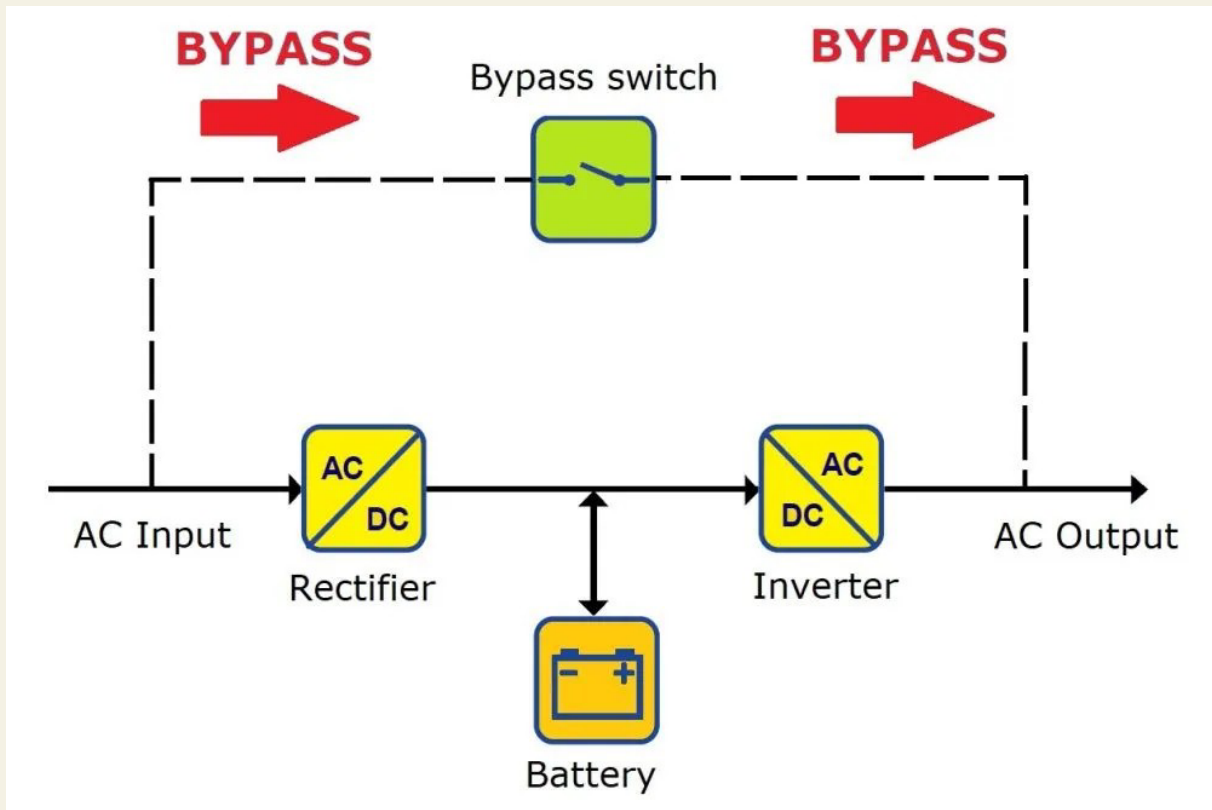
VFI (Voltage and Frequency Independent) UPS-Systeme, auch als Online-UPS-Systeme bekannt, bieten den höchsten Schutzgrad aller UPS-Systeme. Sie sind ständig im Batteriebetrieb und schalten bei einem Stromausfall nicht um, was zu einer nahtlosen Stromversorgung führt.

Ein VFI-UPS-System besteht aus einem Gleichrichter, der den Eingangs-Wechselstrom (AC) in Gleichstrom (DC) umwandelt, einer Batterie, die den Gleichstrom speichert, und einem Wechselrichter, der den Gleichstrom zurück in Wechselstrom umwandelt. Dieser ständige Wechsel von AC zu DC und zurück zu AC ermöglicht es dem VFI-UPS-System, eine konstante Stromversorgung zu liefern, unabhängig von Schwankungen in der Eingangsstromversorgung.

VFI-UPS-Systeme sind ideal für Anwendungen, die eine hohe Qualität der Stromversorgung erfordern, wie beispielsweise Server, Telekommunikationssysteme und medizinische Geräte. Sie sind in verschiedenen Größen erhältlich, von kleinen Einheiten für einzelne Geräte bis hin zu großen Systemen, die ganze Gebäude oder Einrichtungen versorgen können.

Ein weiterer Vorteil des VFI-UPS-Systems besteht darin, dass es in der Lage ist, eine Vielzahl von Störungen in der Stromversorgung zu korrigieren, einschließlich Spannungsschwankungen, Frequenzschwankungen und Stromausfälle. Es bietet daher einen umfassenden Schutz für empfindliche Geräte und kritische Anwendungen.

Trotz der höheren Kosten und der größeren Größe im Vergleich zu anderen UPS-Systemen, sind VFI-UPS-Systeme oft die bevorzugte Wahl für Anwendungen, die eine hohe Zuverlässigkeit und eine hohe Qualität der Stromversorgung erfordern.



Quelle: <https://www.eetimes.eu/data-center-ups-requirements-drive-shift-to-sic/>

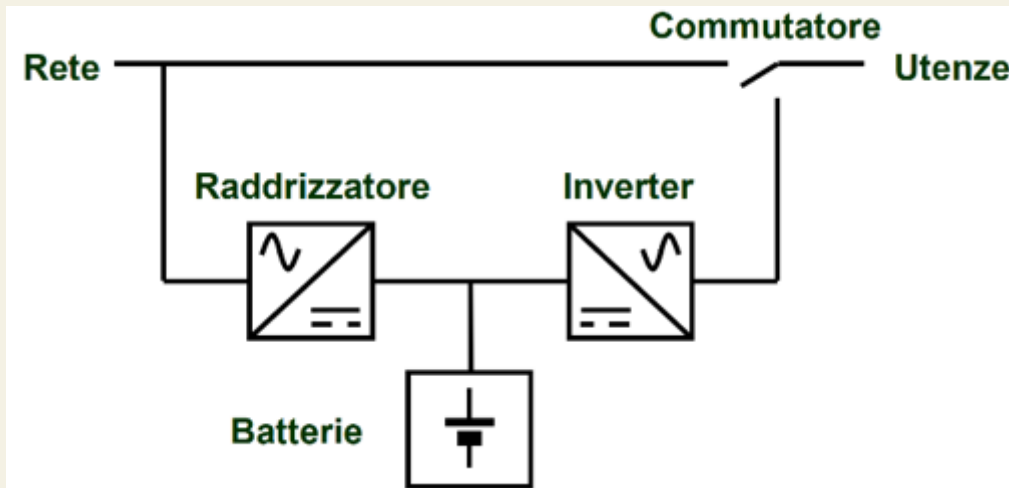
### VFD UPS-Systeme

VFD (Voltage and Frequency Dependent), auch als Offline-UPS oder Standby-UPS bekannt, ist eine Art von unterbrechungsfreier Stromversorgung (UPS), die in der Regel in kleineren Anwendungen eingesetzt wird. Ein VFD-UPS-System ist normalerweise nicht ständig mit der Eingangsstromversorgung verbunden. Stattdessen schaltet es automatisch auf Batteriebetrieb um, wenn es eine Unterbrechung oder eine signifikante Änderung in der Eingangsstromversorgung feststellt.

Ein VFD-UPS-System besteht aus einer Batterie und einem Wechselrichter. Im Normalbetrieb wird die Eingangs-Wechselspannung (AC) direkt an die Ausgabe durchgegeben, während gleichzeitig die Batterie aufgeladen wird. Wenn der Eingangsstrom ausfällt oder außerhalb der festgelegten Grenzen liegt, schaltet das System automatisch auf Batteriebetrieb um und der Wechselrichter wandelt den Gleichstrom (DC) der Batterie in Wechselstrom (AC) um.

VFD-UPS-Systeme sind in der Regel günstiger und kleiner als andere Arten von UPS-Systemen. Sie sind ideal für Anwendungen, die eine grundlegende Unterbrechungsfreie Stromversorgung benötigen, wie z. B. Desktop-Computer, Heimunterhaltungssysteme und Netzwerkgeräte.

Es ist jedoch zu beachten, dass VFD-UPS-Systeme nicht in der Lage sind, Spannungsschwankungen und Frequenzschwankungen zu korrigieren, solange sie nicht außerhalb der festgelegten Grenzen liegen. Daher bieten sie nicht den gleichen Grad an Schutz wie ein VFI-UPS-System und sind möglicherweise nicht für Geräte geeignet, die eine hohe Qualität der Stromversorgung erfordern.



Quelle: <http://www.01net.it/guida-normativa-ups/>

### VI UPS-Systeme

VI (Voltage Independent), auch als Line-Interactive UPS bekannt, ist eine Art von unterbrechungsfreier Stromversorgung (UPS), die sich durch eine Kombination aus Offline- und Online-UPS-Funktionen auszeichnet. Ein VI-UPS-System bleibt ständig mit der Eingangsstromversorgung verbunden und ist in der Lage, kleinere Spannungsschwankungen auszugleichen, ohne auf Batteriebetrieb umzuschalten.

Ein VI-UPS-System besteht aus einer Batterie, einem Wechselrichter und einem Spannungsregler. Der Spannungsregler überwacht ständig die Eingangsspannung und passt sie bei Bedarf an, um eine stabile Ausgangsspannung zu gewährleisten. Bei größeren Spannungsschwankungen oder bei einem Stromausfall schaltet das System automatisch auf Batteriebetrieb um und der Wechselrichter wandelt den Gleichstrom (DC) der Batterie in Wechselstrom (AC) um.

VI-UPS-Systeme bieten einen höheren Schutzgrad als VFD-UPS-Systeme, da sie in der Lage sind, Spannungsschwankungen auszugleichen, ohne die Batterie zu nutzen. Sie sind jedoch weniger effizient als VFI-UPS-Systeme, da sie nicht ständig im Batteriebetrieb arbeiten und daher eine geringfügige Verzögerung beim Umschalten auf Batteriebetrieb aufweisen können.

Trotzdem sind VI-UPS-Systeme eine beliebte Wahl für Anwendungen, die einen mittleren Schutzgrad erfordern, wie z. B. Server, Netzwerkgeräte und kleinere Datenzentren. Sie bieten eine gute Balance zwischen Kosten, Leistung und Schutzgrad.

Zusätzlich zu den genannten Vorteilen, bieten VI-UPS-Systeme auch die Flexibilität, verschiedene Arten von Batterien zu verwenden, einschließlich Blei-Säure, Lithium-Ionen und Nickel-Cadmium. Dies erlaubt es den Benutzern, die Batterie zu wählen, die am besten zu ihren spezifischen Bedürfnissen und Budget passt. Trotzdem ist es wichtig, die Vor- und Nachteile jeder Batterieart zu verstehen, um die beste Entscheidung zu treffen.

### Zuverlässigkeit eines UPS-Systems

Die Zuverlässigkeit eines unterbrechungsfreien Stromversorgungssystems (UPS) kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden, einschließlich der Qualität der Komponenten, der Wartung und des Designs des Systems. Die Zuverlässigkeit kann durch die Berechnung der Ausfallrate oder der mittleren Zeit zwischen Ausfällen (MTBF) gemessen werden.

1. **Ausfallrate:** Dies ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein System innerhalb eines bestimmten Zeitraums ausfällt. Sie wird normalerweise in Ausfällen pro Million Betriebsstunden ausgedrückt. Eine geringe Ausfallrate deutet auf eine hohe Zuverlässigkeit hin.
2. **MTBF (Mean Time Between Failures):** Dies ist die durchschnittliche Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Ausfällen in einem System, das repariert werden kann. Eine hohe MTBF deutet auf eine hohe Zuverlässigkeit hin.

Um die Ausfallrate oder die MTBF zu berechnen, müssen die Ausfallraten der einzelnen Komponenten des UPS-Systems bekannt sein. Diese Informationen können normalerweise vom Hersteller der Komponenten bereitgestellt werden.

Darüber hinaus ist es wichtig, die Auswirkungen von geplanten und ungeplanten Wartungsarbeiten auf die Zuverlässigkeit des UPS-Systems zu berücksichtigen. Regelmäßige Wartungsarbeiten können dazu beitragen, die Zuverlässigkeit des Systems zu erhöhen, indem potenzielle Probleme frühzeitig erkannt und behoben werden.

Es ist auch wichtig, die Auswirkungen von Fehlern oder Ausfällen in einem Teil des Systems auf den Gesamtbetrieb zu berücksichtigen. Ein gut gestaltetes UPS-System sollte in der Lage sein, einen einzelnen Ausfall zu isolieren und zu verhindern, dass er sich auf andere Teile des Systems auswirkt.

Schließlich sollte bei der Berechnung der Zuverlässigkeit eines UPS-Systems auch die Qualität der Stromversorgung berücksichtigt werden. Eine schlechte Stromqualität kann die Zuverlässigkeit des Systems beeinträchtigen und zu häufigeren Ausfällen führen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Berechnung der Zuverlässigkeit eines UPS-Systems eine komplexe Aufgabe ist, die eine gründliche Analyse der verschiedenen Faktoren erfordert, die die Leistung und den Betrieb des Systems beeinflussen können.

Die Parallelschaltung von Komponenten in einem UPS-System kann die Zuverlässigkeit des Systems erheblich erhöhen. Wenn Komponenten parallel geschaltet sind, kann das System im Falle eines Ausfalls einer Komponente weiterhin funktionieren, da die anderen Komponenten die Last übernehmen. Dies wird als Redundanz bezeichnet.

Darüber hinaus kann die Parallelschaltung auch die Gesamtleistung des Systems erhöhen, da die Leistung der einzelnen Komponenten addiert wird. Dies kann besonders nützlich sein, wenn das System eine große Last versorgen muss.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Parallelschaltung von Komponenten auch einige Herausforderungen mit sich bringen kann. Beispielsweise müssen die Komponenten so konzipiert und konfiguriert sein, dass sie die Last gleichmäßig aufteilen. Andernfalls könnte eine Komponente überlastet werden, was zu einem vorzeitigen Ausfall führen kann.

Darüber hinaus können durch die Parallelschaltung zusätzliche Kosten entstehen, sowohl für die Anschaffung der zusätzlichen Komponenten als auch für die Wartung und das Management des Systems. Daher ist es wichtig, die Kosten und Vorteile der Parallelschaltung sorgfältig abzuwägen.

### **Wartung eines UPS-Systems**

Die Wartung eines UPS-Systems ist ein kritischer Aspekt, um seine Zuverlässigkeit und Langlebigkeit zu gewährleisten. Eine regelmäßige Wartung kann dazu beitragen, mögliche Probleme frühzeitig zu erkennen und zu beheben, bevor sie zu ernsthaften Ausfällen führen.

Einige der wichtigsten Wartungsmaßnahmen für ein UPS-System umfassen:

**Batterieprüfung:** Die Batterien sind eine der wichtigsten Komponenten eines UPS-Systems und ihre Leistung und Zustand sollten regelmäßig überprüft werden. Dies kann beinhalten, den Batterieladezustand zu überprüfen, die Batteriezellen auf physische Schäden oder Anzeichen von Leckagen zu inspizieren und die Batteriekontakte auf Korrosion zu prüfen.

**Reinigung:** Staub und Schmutz können sich im Laufe der Zeit in den Komponenten des UPS-Systems ansammeln und seine Leistung beeinträchtigen. Eine regelmäßige Reinigung kann dazu beitragen, diese Probleme zu vermeiden und die Lebensdauer des Systems zu verlängern.

**Thermische Überwachung:** Eine übermäßige Hitze kann die Leistung und Lebensdauer des UPS-Systems erheblich beeinträchtigen. Eine regelmäßige thermische Überwachung kann dazu beitragen, überhitzte Komponenten frühzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen.

**Überprüfung der elektrischen Verbindungen:** Lose oder korrodierte elektrische Verbindungen können zu Spannungsschwankungen und anderen Problemen führen. Eine regelmäßige Überprüfung und Wartung der elektrischen Verbindungen kann dazu beitragen, diese Probleme zu vermeiden.

Es ist wichtig zu beachten, dass die spezifischen Wartungsanforderungen von UPS-System zu UPS-System variieren können, abhängig von Faktoren wie dem spezifischen Modell, der Umgebung, in der es installiert ist, und den

spezifischen Anforderungen der Anwendung. Daher ist es empfehlenswert, die vom Hersteller bereitgestellten Wartungsanleitungen zu befolgen und bei Bedarf einen qualifizierten Service-Techniker zu konsultieren.

## Verbraucherprodukte

Energiespeicher spielen eine entscheidende Rolle in einer Vielzahl von Verbraucherprodukten, von Mobiltelefonen und Laptops bis hin zu Elektrofahrzeugen und Haushaltsenergiesystemen. Die spezifischen Anforderungen an Energiespeicher für Verbraucherprodukte können jedoch je nach Produkt und Anwendung erheblich variieren.

### Anforderungen

Die wichtigsten Anforderungen für Energiespeicher in Verbraucherprodukten sind in der Regel:

1. **Energiedichte:** Die Energiedichte bezieht sich auf die Menge an Energie, die ein Energiespeicher pro Volumen- oder Gewichtseinheit speichern kann. Produkte wie Mobiltelefone und Laptops erfordern Energiespeicher mit hoher Energiedichte, da sie in der Regel klein und leicht sein müssen.
2. **Leistungsdichte:** Die Leistungsdichte bezieht sich auf die Menge an Energie, die ein Energiespeicher pro Zeiteinheit liefern kann. Produkte, die hohe Leistung benötigen, wie z.B. Elektrofahrzeuge, erfordern Energiespeicher mit hoher Leistungsdichte.
3. **Lebensdauer und Zuverlässigkeit:** Verbraucher erwarten, dass ihre Produkte über einen langen Zeitraum hinweg zuverlässig funktionieren. Daher müssen Energiespeicher in der Lage sein, über viele Jahre hinweg eine konstante Leistung zu liefern, ohne dass ihre Leistungsfähigkeit signifikant abnimmt.
4. **Sicherheit:** Die Sicherheit ist ein zentraler Aspekt bei der Entwicklung von Energiespeichern für Verbraucherprodukte. Energiespeicher müssen so konzipiert sein, dass sie sicher in Betrieb genommen und entsorgt werden können, und sie müssen in der Lage sein, Fehlfunktionen oder Unfälle zu verhindern.

### Hauptbedenken

Trotz der vielen Fortschritte in der Energiespeichertechnologie gibt es immer noch einige wichtige Bedenken, die bei der Entwicklung von Verbraucherprodukten berücksichtigt werden müssen:

1. **Kosten:** Energiespeicher können einen erheblichen Teil der Gesamtkosten eines Produkts ausmachen, besonders bei Produkten, die eine große Menge an Energie benötigen, wie z.B. Elektrofahrzeuge. Die Senkung der Kosten von Energiespeichern bleibt daher eine wichtige Herausforderung.
2. **Umweltauswirkungen:** Die Herstellung und Entsorgung von Energiespeichern kann erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben. Es ist daher wichtig, nachhaltige Methoden für die Herstellung und das Recycling von Energiespeichern zu entwickeln.
3. **Energieeffizienz:** Während Energiespeicher immer effizienter werden, bleibt die Energieeffizienz ein wichtiges Anliegen. Energiespeicher müssen so effizient wie möglich sein, um die Leistung der Produkte zu maximieren und die Betriebskosten für die Verbraucher zu minimieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Energiespeicher eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung und Leistung von Verbraucherprodukten spielen. Trotz der Herausforderungen bieten sie enorme Möglichkeiten für die Entwicklung von Produkten, die leistungsfähiger, effizienter und umweltfreundlicher sind.

### Tragbare Geräte

Tragbare Geräte wie Smartphones, Laptops und tragbare Musikplayer haben unseren Alltag revolutioniert. Diese Geräte sind auf leistungsstarke, langlebige und sichere Energiespeichertechnologien angewiesen. Die am häufigsten verwendete Technologie für diese Geräte sind Lithium-Ionen-Batterien. Sie bieten eine hohe Energiedichte und eine lange Lebensdauer, haben aber auch Herausforderungen in Bezug auf Kosten, Umweltauswirkungen und Sicherheit. Neuere Technologien wie Lithium-Polymer-Batterien und Festkörperbatterien werden ebenfalls erforscht und könnten in Zukunft in tragbaren Geräten eingesetzt werden. Es ist entscheidend, dass die Energiespeichertechnologien mit der zunehmenden Nachfrage und den sich ändernden Anforderungen der Verbraucher Schritt halten.

Obwohl Lithium-Ionen-Batterien in tragbaren Geräten wie Smartphones, Laptops und Musikplayern weit verbreitet sind, werden Blei-Säure-Batterien in einigen Anwendungen immer noch häufig eingesetzt.

Blei-Säure-Batterien sind die älteste Art von wiederaufladbaren Batterien und wurden für eine Vielzahl von Anwendungen verwendet, von Automobilen bis hin zu Großenergiespeichersystemen. Sie sind bekannt für ihre Robustheit, ihre Fähigkeit, hohe Ströme zu liefern, und ihre relativ geringen Kosten.

In tragbaren Geräten sind Blei-Säure-Batterien jedoch weniger häufig zu finden. Dies liegt vor allem an ihrer geringeren Energiedichte im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien, was sie größer und schwerer für die gleiche Menge an gespeicherter Energie macht. Dies kann sie für tragbare Geräte, die leicht und kompakt sein müssen, weniger attraktiv machen.

Darüber hinaus haben Blei-Säure-Batterien eine kürzere Lebensdauer als Lithium-Ionen-Batterien und sind nicht so gut in der Lage, schnell aufgeladen zu werden. Sie können auch mehr Wartung erfordern, da sie anfällig für das sogenannte "Sulfatieren" sind, wenn sie nicht regelmäßig vollständig aufgeladen werden.

Trotzdem werden Blei-Säure-Batterien in einigen tragbaren Geräten immer noch verwendet, insbesondere in solchen, die hohe Ströme benötigen oder in rauen Umgebungen eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür könnten einige Arten von Notstromversorgungssystemen oder tragbaren Starthilfegeräten für Fahrzeuge sein.

### **Direkte Methanol-Brennstoffzellen in tragbaren Geräten**

Direkte Methanol-Brennstoffzellen (DMFCs) sind eine vielversprechende Technologie für tragbare Geräte. Sie wandeln Methanol, einen flüssigen Alkohol, direkt in elektrische Energie um. Dies geschieht durch eine elektrochemische Reaktion, bei der Methanol und Sauerstoff zu Wasser, Kohlendioxid und Elektrizität reagieren.

Im Vergleich zu herkömmlichen Batterien haben DMFCs mehrere Vorteile. Erstens haben sie eine höhere Energiedichte, was bedeutet, dass sie mehr Energie pro Volumen- oder Gewichtseinheit liefern können. Zweitens sind sie nachfüllbar, was bedeutet, dass sie durch Hinzufügen von mehr Methanol schnell "aufgeladen" werden können. Drittens haben sie eine längere Laufzeit, da Methanol eine hohe Energiedichte hat und die Brennstoffzelle kontinuierlich Energie erzeugt, solange Methanol vorhanden ist.

Diese Merkmale machen DMFCs besonders attraktiv für tragbare Geräte wie Laptops, Kameras und Mobiltelefone, die oft hohe Energieanforderungen haben und für längere Zeit ohne Zugang zu einer Steckdose arbeiten müssen. Darüber hinaus könnte die Fähigkeit, schnell nachzufüllen, den Benutzern ermöglichen, Ersatz-Methanolpatronen mit sich zu führen, um ihr Gerät unterwegs "aufzuladen".

Trotz dieser Vorteile gibt es noch einige Herausforderungen, die überwunden werden müssen, bevor DMFCs in tragbaren Geräten weit verbreitet sind. Zu diesen Herausforderungen gehören die Notwendigkeit, die Leistung, Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Brennstoffzellen zu verbessern, die Kosten zu senken und Lösungen für den Umgang mit dem bei der Reaktion erzeugten Kohlendioxid zu finden. Außerdem müssen Sicherheitsfragen im Zusammenhang mit dem Umgang mit Methanol, einem leicht entflammbaren und giftigen Stoff, angegangen werden.

## **Mobile Energiespeicher**

Energiespeicher spielen eine entscheidende Rolle in der Mobilität, insbesondere in Bezug auf Elektrofahrzeuge. Sie speichern die Energie, die zur Stromversorgung des Elektromotors benötigt wird, und ermöglichen so die Fortbewegung des Fahrzeugs. Ohne effektive und effiziente Energiespeicher könnten Elektrofahrzeuge nicht die Reichweite und Leistung bieten, die für eine praktische Nutzung notwendig sind.

Darüber hinaus sind Energiespeicher auch für die Effizienz und Leistung von Elektrofahrzeugen unerlässlich. Sie ermöglichen es den Fahrzeugen, überschüssige Energie, die zum Beispiel beim Bremsen erzeugt wird, zu speichern und später wieder zu verwenden. Dies erhöht die Gesamteffizienz des Fahrzeugs und trägt zur Reduzierung des Energieverbrauchs bei.

Mit der zunehmenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen und der steigenden Nachfrage nach mobilen Energielösungen wird die Bedeutung von Energiespeichern in der Mobilität weiter zunehmen. Gleichzeitig stellen die steigenden Anforderungen an Leistung, Effizienz und Sicherheit von Energiespeichern die Forschung und Entwicklung vor große Herausforderungen. Es ist daher wichtig, kontinuierlich neue und verbesserte Energiespeichertechnologien zu erforschen und zu entwickeln, um diesen Anforderungen gerecht zu werden.

### **Elektrifizierung des privaten Transports**

Die Elektrifizierung des privaten Transports ist ein entscheidender Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Mobilität. Sie beinhaltet den Übergang von Fahrzeugen, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, zu Fahrzeugen, die ganz oder teilweise mit Elektrizität angetrieben werden.

Es gibt drei Haupttypen von elektrischen Fahrzeugen: Hybridfahrzeuge, Plug-in-Hybridfahrzeuge und vollelektrische Fahrzeuge.

**Hybridfahrzeuge** haben sowohl einen Verbrennungsmotor als auch einen Elektromotor. Sie können die Energie, die normalerweise beim Bremsen verloren geht, wieder zurückgewinnen und für den Antrieb des Fahrzeugs nutzen. Die Batterie dieser Fahrzeuge wird jedoch nur durch den Motor und das Regenerativbremssystem aufgeladen, nicht durch das Stromnetz.

**Plug-in-Hybridfahrzeuge** sind eine Weiterentwicklung der Hybridfahrzeuge. Sie haben ebenfalls einen Verbrennungsmotor und einen Elektromotor, aber ihre Batterie kann auch direkt aus dem Stromnetz aufgeladen werden. Dies ermöglicht es ihnen, für kurze Strecken ausschließlich mit Elektrizität zu fahren.

**Vollelektrische Fahrzeuge** werden ausschließlich mit Elektrizität betrieben und emittieren daher keine Abgase. Sie müssen regelmäßig an einer Ladestation aufgeladen werden.

Die Speicherkapazität, Reichweite und Ladezeit sind wichtige Faktoren, die bei der Wahl eines elektrischen Fahrzeugs zu berücksichtigen sind.

**Speicherkapazität** bezieht sich auf die Menge an Energie, die die Batterie eines elektrischen Fahrzeugs speichern kann. Sie wird in Kilowattstunden (kWh) gemessen. Eine höhere Speicherkapazität ermöglicht in der Regel eine größere Reichweite, aber auch eine längere Ladezeit.

**Reichweite** ist die Entfernung, die ein elektrisches Fahrzeug mit einer voll aufgeladenen Batterie zurücklegen kann. Die tatsächliche Reichweite kann je nach Faktoren wie dem Fahrstil, der Geschwindigkeit, dem Gelände und dem Wetter variieren.

**Ladezeit** ist die Zeit, die benötigt wird, um die Batterie eines elektrischen Fahrzeugs aufzuladen. Sie hängt von der Kapazität der Batterie und der Leistung der Ladestation ab. Schnellladestationen können eine Batterie in weniger als einer Stunde auf 80% ihrer Kapazität aufladen, während normale Ladestationen mehrere Stunden benötigen können.

## Hybridfahrzeuge

**HEV (Hybrid Electric Vehicle):** HEV steht für Hybrid Electric Vehicle oder Hybridfahrzeug. Bei diesen Fahrzeugen arbeiten ein Verbrennungsmotor und ein Elektromotor parallel. Der Verbrennungsmotor treibt das Fahrzeug bei hohen Geschwindigkeiten an, während der Elektromotor bei niedrigen Geschwindigkeiten und beim Beschleunigen zum Einsatz kommt. Der Elektromotor kann auch die Energie, die beim Bremsen entsteht, in elektrische Energie umwandeln und in der Batterie speichern (Regeneratives Bremsen). Beispiele für HEVs sind der Toyota Prius oder der Honda Insight.

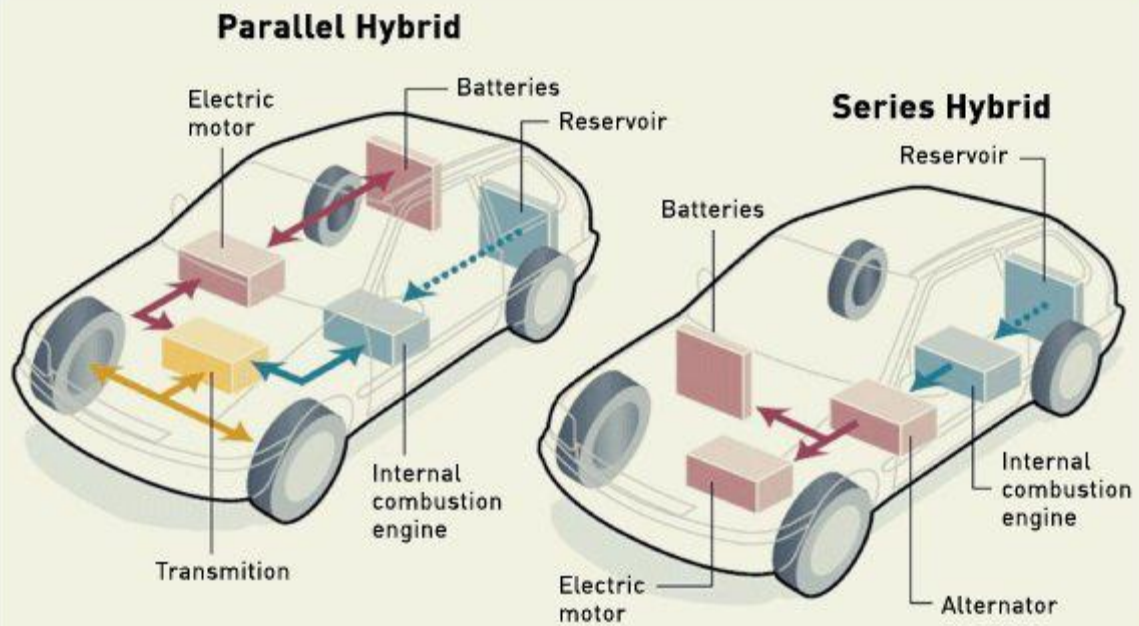
**PHEV (Plug-In Hybrid Electric Vehicle):** PHEV steht für Plug-In Hybrid Electric Vehicle oder Plug-in-Hybridfahrzeug. Diese Fahrzeuge ähneln HEVs, können jedoch auch an der Steckdose aufgeladen werden. Dies ermöglicht es ihnen, für kurze Strecken (30-50 km) ausschließlich mit Strom zu fahren. Wenn die Batterie leer ist, arbeitet das Fahrzeug wie ein herkömmliches Hybridfahrzeug und nutzt den Verbrennungsmotor. Beispiele für PHEVs sind der Chevrolet Volt oder der Mitsubishi Outlander PHEV.

**Parallel-Hybrid:** Bei einem Parallel-Hybrid arbeiten der Verbrennungsmotor und der Elektromotor zusammen, um das Fahrzeug anzutreiben. Beide Motoren sind direkt mit dem Getriebe verbunden und können das Fahrzeug unabhängig voneinander oder gemeinsam antreiben. Diese Konfiguration ist effizient bei konstanten hohen Geschwindigkeiten, wie sie zum Beispiel auf der Autobahn auftreten.

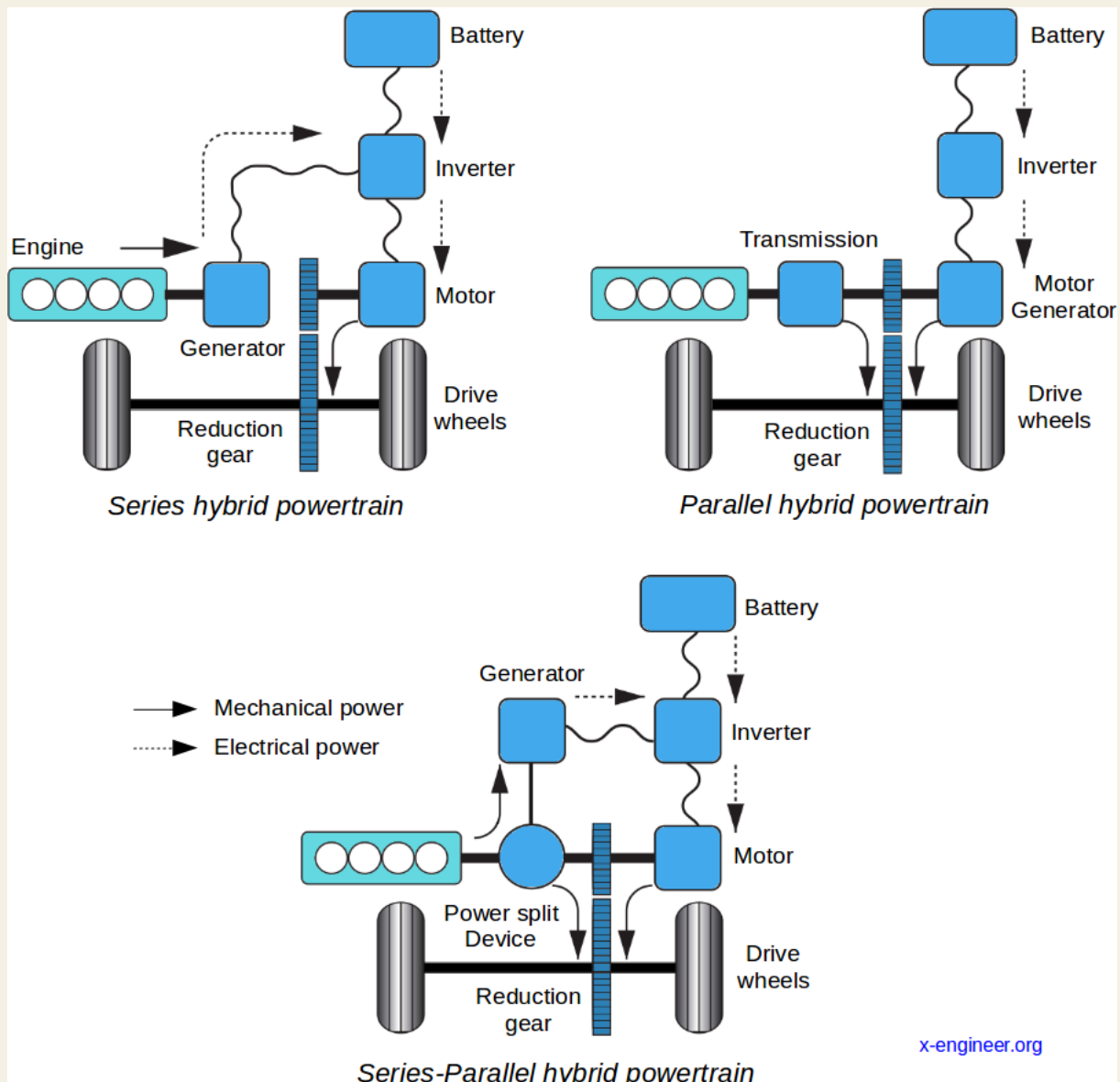
**Seriell-Hybrid:** Bei einem seriellen Hybrid treibt der Verbrennungsmotor einen Generator an, der wiederum den Elektromotor mit Strom versorgt. Der Elektromotor ist der einzige Motor, der das Fahrzeug antreibt. Der Verbrennungsmotor dient nur zur Stromerzeugung und ist nicht mechanisch mit den Rädern verbunden. Diese Konfiguration ist effizient bei niedrigen Geschwindigkeiten und variierenden Lasten, wie sie zum Beispiel im Stadtverkehr auftreten.



## THE TWO TYPES OF HYBRID VEHICLES



Quelle: <https://yocharge.com/in/ev/types/>



Quelle: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/what-is-a-hybrid-electric-vehicle-hev/>

Obwohl Hybridfahrzeuge viele Vorteile bieten, darunter eine verbesserte Kraftstoffeffizienz und reduzierte Emissionen im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungsfahrzeugen, sind sie auch Gegenstand einiger Kritikpunkte und Herausforderungen:

1. **Kosten:** Eine der größten Hürden für viele potenzielle Käufer von Hybridfahrzeugen sind die initialen Anschaffungskosten. Hybridfahrzeuge sind in der Regel teurer als ihre herkömmlichen Pendanten. Diese höheren Kosten sind zum Teil auf die zusätzlichen Komponenten wie den Elektromotor und die Batterie zurückzuführen. Obwohl sich diese Kosten im Laufe der Zeit durch den geringeren Kraftstoffverbrauch amortisieren können, stellt die höhere Anfangsinvestition eine signifikante Barriere für viele Menschen dar.
2. **Batterielebensdauer und -leistung:** Während die Batterietechnologie in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht hat, bleibt die Lebensdauer der Batterien ein Anliegen für Hybridfahrzeugbesitzer. Mit der Zeit kann die Batterie an Leistung verlieren, was die Gesamtleistung und Effizienz des Fahrzeugs beeinträchtigen kann. Darüber hinaus können die Kosten für den Austausch der Batterie, wenn sie das Ende ihrer Lebensdauer erreicht, erheblich sein.
3. **Umweltauswirkungen:** Hybridfahrzeuge sind zwar für ihre reduzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen bekannt, aber sie sind nicht ohne Umweltauswirkungen. Die Produktion der Batterien für Hybridfahrzeuge erfordert die Gewinnung von seltenen Materialien, die oft unter umweltschädlichen Bedingungen abgebaut werden.

Diese Prozesse können erhebliche Umweltauswirkungen haben. Darüber hinaus stellen ausgediente Batterien ein Entsorgungsproblem dar, da sie potenziell schädliche Substanzen enthalten.

4. **Leistung:** Einige Kritiker weisen darauf hin, dass Hybridfahrzeuge, insbesondere solche, die für maximale Effizienz ausgelegt sind, nicht die gleiche Leistung oder Beschleunigung wie herkömmliche Fahrzeuge bieten können. Dies kann für einige Fahrer, die es gewohnt sind, sofort auf die volle Leistung ihres Fahrzeugs zugreifen zu können, ein Nachteil sein.
5. **Komplexität und Wartung:** Die Kombination eines Verbrennungs- und eines Elektromotors in einem Fahrzeug erhöht die Komplexität des Systems. Dies kann zu höheren Wartungskosten führen, da mehr Komponenten gewartet, repariert oder ersetzt werden müssen. Es kann auch eine Herausforderung sein, qualifizierte Techniker zu finden, die in der Lage sind, an den spezifischen Systemen und Technologien von Hybridfahrzeugen zu arbeiten.
6. **Eingeschränkte Reichweite im reinen Elektromodus:** Bei Plug-in-Hybridfahrzeugen, die auch über externe Stromquellen aufgeladen werden können und für kurze Strecken ausschließlich elektrisch fahren können, ist die Reichweite im reinen Elektromodus oft begrenzt. Dies bedeutet, dass das Fahrzeug für längere Fahrten auf den Verbrennungsmotor angewiesen ist, was den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen erhöht.

Diese Herausforderungen sind jedoch nicht unüberwindlich und die ständigen Fortschritte in der Technologie und den Produktionsmethoden versprechen, viele dieser Probleme in der Zukunft zu lindern.

### **Biokraftstoffe vs. Elektroantrieb**

Biokraftstoffe und Elektroantriebe sind zwei mögliche Alternativen zu konventionellen fossilen Brennstoffen für den Antrieb von Fahrzeugen. Jede Technologie hat ihre eigenen Vorteile und Herausforderungen und kann unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt haben.

**Biokraftstoffe** werden aus Biomasse, also aus Pflanzen und tierischen Abfällen, hergestellt. Sie gelten als erneuerbare Energiequelle, da die Biomasse nachwächst und beim Wachstum CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre bindet, was den Treibhauseffekt mindert. Es gibt verschiedene Arten von Biokraftstoffen, darunter Bioethanol, Biodiesel und Biogas. Sie können in herkömmlichen Verbrennungsmotoren verwendet werden, was sie zu einer praktikablen Option für die bestehende Fahrzeugflotte macht.

Allerdings gibt es auch Herausforderungen im Zusammenhang mit Biokraftstoffen. Eine der größten ist der Landverbrauch. Die Produktion von Biokraftstoffen erfordert große Mengen an Land für den Anbau der Biomasse. Dies kann zu Landnutzungskonflikten führen, da dieselben Flächen auch für den Anbau von Nahrungsmitteln oder zur Erhaltung natürlicher Ökosysteme benötigt werden könnten. Darüber hinaus kann die Produktion von Biokraftstoffen, je nach Art der Biomasse und der Produktionsmethoden, mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden sein, darunter Wasserverbrauch, Bodenverschlechterung und Biodiversitätsverlust.

**Elektroantriebe** hingegen nutzen elektrische Energie, die in Batterien gespeichert ist, um ein Fahrzeug anzutreiben. Sie produzieren keine direkten Emissionen und können sehr effizient sein. Darüber hinaus können sie mit Strom aus erneuerbaren Quellen geladen werden, was ihre Umweltauswirkungen weiter reduzieren kann.

Elektroautos haben jedoch auch ihre eigenen Herausforderungen. Eine der größten ist die Reichweite: Elektroautos können in der Regel nicht so weit fahren wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, bevor sie wieder aufgeladen werden müssen. Dies kann ein Hindernis für ihre Akzeptanz sein, insbesondere in Gebieten, in denen Ladestationen nicht weit verbreitet sind. Darüber hinaus können die Batterien, die für Elektroautos benötigt werden, teuer sein und erhebliche Umweltauswirkungen bei ihrer Herstellung und Entsorgung haben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl Biokraftstoffe als auch Elektroantriebe potenzielle Vorteile gegenüber konventionellen fossilen Brennstoffen bieten können, aber auch ihre eigenen Herausforderungen haben. Eine nachhaltige Mobilitätsstrategie wird wahrscheinlich eine Kombination aus verschiedenen Technologien und Ansätzen erfordern, um den unterschiedlichen Bedürfnissen und Rahmenbedingungen gerecht zu werden.

Eine interessante Betrachtung in diesem Zusammenhang ist die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie durch Photovoltaik (PV) und deren Nutzung für Elektroautos. Studien haben gezeigt, dass ein Elektroauto, das mit Strom aus einer Photovoltaikanlage betrieben wird, eine bis zu 16-mal größere Reichweite hat als ein Fahrzeug, das mit Biokraftstoff aus Biomasse betrieben wird, die auf der gleichen Fläche angebaut wurde. Dies liegt daran, dass die Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie durch Photovoltaik wesentlich effizienter ist als der Prozess der Biomasseproduktion und -umwandlung in Biokraftstoff. Diese Erkenntnis unterstreicht das

Potential der Elektromobilität in Kombination mit erneuerbaren Energien als ein Schlüsselement für eine nachhaltige und effiziente Mobilitätszukunft.

### **Einführung und Energieeffizienz: Brennstoffzellenfahrzeuge vs. Elektrofahrzeuge**

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCVs) und Elektrofahrzeuge (EVs) sind zwei Arten von emissionsfreien Fahrzeugen, die als Alternativen zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren gelten. Beide verwenden elektrische Antriebe, aber sie speichern und erzeugen Energie auf unterschiedliche Weise.

FCVs erzeugen Strom durch eine chemische Reaktion zwischen Wasserstoff (einem Brennstoff) und Sauerstoff. Diese Reaktion findet in einer Brennstoffzelle statt. Das einzige Nebenprodukt dieser Reaktion ist Wasser, wodurch FCVs keine schädlichen Emissionen verursachen.

Auf der anderen Seite verwenden EVs eine Batterie, um Energie zu speichern, die dann verwendet wird, um einen Elektromotor anzutreiben. Die Batterie wird durch Anschluss an das Stromnetz aufgeladen. Da EVs keinen Brennstoff verbrennen, verursachen sie ebenfalls keine schädlichen Emissionen.

In Bezug auf die Energieeffizienz haben Studien gezeigt, dass EVs im Allgemeinen effizienter als FCVs sind. Elektrofahrzeuge können etwa 80 % der in der Batterie gespeicherten Energie nutzen, während Brennstoffzellenfahrzeuge nur etwa 40-60% der Energie aus dem Wasserstoff nutzen können. Dies liegt an den Verlusten, die bei der Umwandlung von Wasserstoff in Elektrizität auftreten.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Gesamteffizienz eines Fahrzeugs auch von anderen Faktoren abhängt, wie z.B. der Effizienz der Energieerzeugung und -verteilung. Zum Beispiel, wenn der Strom für die Aufladung der EV-Batterien aus fossilen Brennstoffen erzeugt wird, könnte die Gesamteffizienz des Fahrzeugs niedriger sein. Ebenso könnte die Gesamteffizienz eines FCVs höher sein, wenn der Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird.

In Bezug auf den Energieverbrauch ist es auch erwähnenswert, dass Wasserstofffahrzeuge in der Regel etwa das 2,5-fache an Energie benötigen im Vergleich zu Elektrofahrzeugen. Dies liegt hauptsächlich an den Energieverlusten, die bei der Herstellung, Speicherung und Umwandlung von Wasserstoff in Elektrizität auftreten. Während Elektrofahrzeuge die Energie direkt aus dem Stromnetz in ihre Batterien speichern und dann zur Stromerzeugung nutzen, erfordert der Prozess bei Wasserstofffahrzeugen mehrere Schritte - jeder mit eigenen Energieverlusten. Daher, obwohl Wasserstoff eine hohe Energiedichte aufweist und Wasserstofffahrzeuge schnell aufgetankt werden können, führt der höhere Gesamtenergieverbrauch zu geringerer Effizienz im Vergleich zu Elektrofahrzeugen.

### **Gravimetrische Energiedichte vs. Leistungsdichte**

Gravimetrische Energiedichte und Leistungsdichte sind wichtige Parameter zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit verschiedener Energiespeichertechnologien. Hier ist ein ausführlicher Vergleich für Super-Cap, Pb-Acid (Blei-Säure), NiCd (Nickel-Cadmium), NiMH (Nickel-Metallhydrid), NaNiCl<sub>2</sub> (Zebra), Li-Polymer, High Power Li-ion und High Energy Li-ion:

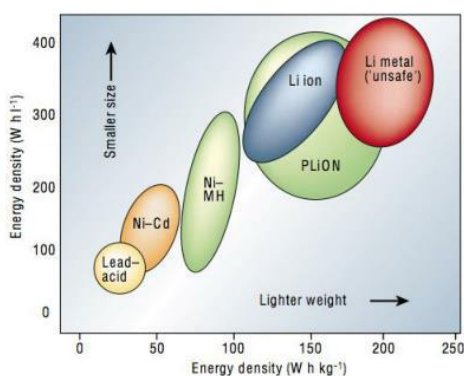
- **Super-Cap:** Super-Capacitors, auch bekannt als Ultrakondensatoren, zeichnen sich durch ihre hohe Leistungsdichte aus. Sie können sehr schnell große Mengen an Energie liefern, was sie ideal für Anwendungen macht, die schnelle Energieentladungen erfordern, wie z.B. beim Anfahren eines Fahrzeugs. Ihre Energiedichte ist jedoch im Vergleich zu anderen Technologien gering, was bedeutet, dass sie nicht viel Energie speichern können und daher schnell leer sind.
- **Pb-Acid (Blei-Säure):** Blei-Säure-Batterien sind eine altbewährte Technologie mit moderater Leistungsdichte und geringer Energiedichte. Sie sind relativ kostengünstig und robust, aber sie sind schwer und haben eine begrenzte Lebensdauer. Sie werden oft in Anwendungen verwendet, in denen Gewicht und Energieeffizienz weniger wichtig sind, wie z.B. in Notstromversorgungen und Gabelstaplern.
- **NiCd (Nickel-Cadmium):** Nickel-Cadmium-Batterien haben eine moderate Leistungsdichte und Energiedichte. Sie sind bekannt für ihre Fähigkeit, über einen weiten Temperaturbereich zu arbeiten und viele Lade-/Entladezyklen zu überstehen. Allerdings sind sie umweltschädlich und werden in vielen Ländern aufgrund ihres hohen Cadmiumgehalts, einem giftigen Schwermetall, zunehmend durch andere Technologien ersetzt.
- **NiMH (Nickel-Metallhydrid):** Nickel-Metallhydrid-Batterien haben eine ähnliche Leistungsdichte wie NiCd, aber eine höhere Energiedichte. Sie sind umweltfreundlicher als NiCd, haben aber eine geringere Lebensdauer und können unter dem "Memory-Effekt" leiden, bei dem die Batteriekapazität mit der Zeit abnimmt.

- **NaNiCl<sub>2</sub> (Zebra):** Natrium-Nickelchlorid-Batterien, auch bekannt als Zebra-Batterien, haben eine hohe Leistungsdichte und eine moderate Energiedichte. Sie können bei sehr hohen Temperaturen arbeiten und sind daher ideal für Anwendungen, bei denen hohe Temperaturen erwartet werden, wie z.B. in Elektrofahrzeugen.
- **Li-Polymer:** Lithium-Polymer-Batterien haben eine hohe Leistungsdichte und eine hohe Energiedichte. Sie sind leicht, können in vielen verschiedenen Formen hergestellt werden und haben eine gute Energiedichte. Allerdings sind sie teurer als andere Batterietechnologien und können Sicherheitsprobleme aufweisen, wenn sie nicht ordnungsgemäß gehandhabt werden.
- **High Power Li-ion:** Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien haben eine sehr hohe Leistungsdichte und eine moderate Energiedichte. Sie können sehr schnell geladen und entladen werden, was sie ideal für Anwendungen macht, die schnelle Energieentladungen erfordern, wie z.B. Elektrofahrzeuge.
- **High Energy Li-ion:** Hochenergie-Lithium-Ionen-Batterien haben eine hohe Leistungsdichte und eine sehr hohe Energiedichte. Sie können große Mengen an Energie speichern, was sie ideal für Anwendungen macht, die eine lange Batterielebensdauer erfordern, wie z.B. Elektrofahrzeuge und Energiespeicherung für erneuerbare Energien

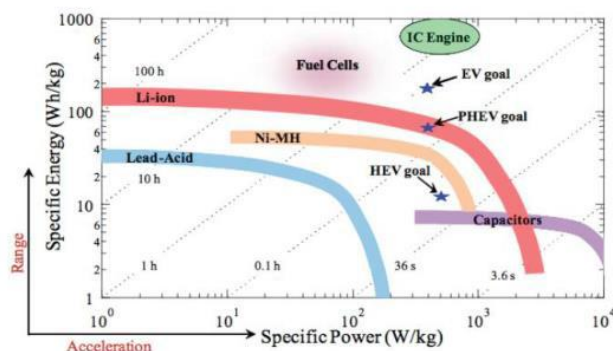
## Energy Density and Power Density

- High energy density with respect to other rechargeable batteries
- Low energy density with respect to IC engine and fuel cells
- Power density comparable to IC Engine

Compared to other rechargeable batteries<sup>1</sup>



Compared to IC engine and fuel cells<sup>2</sup>



<sup>1</sup>Tarascon, J.M. & Armand, M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature* **414**, 359–367 (2001).

<sup>2</sup>Srinivasan, V. Batteries for vehicular applications, AIP conference proceedings, 1044, 283 (2008).

Es ist wichtig zu beachten, dass keine dieser Technologien in allen Aspekten überlegen ist. Der beste Energiespeicher hängt von den spezifischen Anforderungen des Anwendungsfalls ab, einschließlich Faktoren wie Kosten, Sicherheit, Lebensdauer und Umweltauswirkungen.

### Kosten Beispiel Li-ion Batterie

Die Kosten für Lithium-Ionen-Batterien sind ein entscheidender Faktor für die wirtschaftliche Attraktivität von Elektrofahrzeugen und erneuerbaren Energiespeichern. In den letzten Jahren sind diese Kosten deutlich gesunken, was die Kosteneffizienz dieser Anwendungen verbessert hat. Diese Kostensenkung ist auf eine Kombination verschiedener Faktoren zurückzuführen.

Die **Materialkosten** machen einen erheblichen Teil der Gesamtkosten einer Lithium-Ionen-Batterie aus. Dies umfasst die Kosten für die Rohstoffe, die zur Herstellung der Batterie benötigt werden, wie Lithium, Kobalt und Nickel. Diese Kosten können stark schwanken, je nach Verfügbarkeit und Nachfrage nach diesen Rohstoffen auf dem Weltmarkt. Insbesondere Lithium und Kobalt, die für die Herstellung von Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien essentiell sind, sind begrenzte Ressourcen, deren Verfügbarkeit und Preis von verschiedenen geopolitischen und wirtschaftlichen Faktoren abhängen können.

Die **Produktions- und Fertigungskosten** sind ein weiterer wichtiger Kostenfaktor. Dies umfasst die Kosten für den Betrieb der Fertigungsanlagen, die zur Herstellung der Batterien benötigt werden, sowie die Kosten für die Arbeit und das technische Know-how, die zur Überwachung und Steuerung des Produktionsprozesses benötigt werden. Durch Verbesserungen in der Produktionstechnologie und durch Effizienzsteigerungen in der Fertigung können diese Kosten jedoch reduziert werden.

Die **Forschungs- und Entwicklungskosten** können ebenfalls einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten einer Lithium-Ionen-Batterie haben. Diese Kosten sind mit der Entwicklung neuer Batterietechnologien und -designs verbunden, die eine höhere Leistung, eine längere Lebensdauer oder eine bessere Sicherheit bieten können. Diese Investitionen in Forschung und Entwicklung können jedoch langfristig zu Kosteneinsparungen führen, indem sie effizientere oder kostengünstigere Batterietechnologien ermöglichen.

Der **Energieaufwand für die Herstellung** von Lithium-Ionen-Batterien ist ein weiterer wichtiger Kostenfaktor. Dies bezieht sich auf die Menge an Energie, die benötigt wird, um die Rohstoffe abzubauen, zu verarbeiten und in eine fertige Batterie umzuwandeln. Je energieintensiver dieser Herstellungsprozess ist, desto höher sind die Kosten.

Die zukünftige Entwicklung der Preise für Lithium-Ionen-Batterien hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Einerseits könnten weitere Verbesserungen in der Batterietechnologie und in den Produktionsprozessen zu weiteren Kostensenkungen führen. Andererseits könnten steigende Preise für Rohstoffe oder Engpässe bei der Rohstoffversorgung diesen Kostensenkungstrend bremsen.

Darüber hinaus könnten auch politische und regulatorische Entwicklungen einen Einfluss auf die Kostenentwicklung haben. Zum Beispiel könnten Subventionen für erneuerbare Energien oder strengere Emissionsstandards die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien erhöhen und damit zu Kostensenkungen durch Skaleneffekte führen. Umgekehrt könnten Restriktionen oder Zölle auf die Einfuhr von Batterierohstoffen oder Umweltauflagen für die Batterieproduktion die Kosten erhöhen.

### **Batteriefabriken und das Beispiel der Tesla Giga Factory**

Im Zentrum der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien stehen spezialisierte Batteriefabriken. Ein prominentes Beispiel dafür ist die Tesla Giga Factory.

Die Tesla Giga Factory, die sich in Nevada, USA, befindet, gehört zu den größten und fortschrittlichsten Batteriefabriken der Welt. Sie wurde speziell für die Großserienproduktion von Lithium-Ionen-Batterien für Teslas Elektrofahrzeuge und Energiespeicherprodukte entwickelt. Dabei stellt die Fabrik einen wichtigen Baustein in Teslas Bestreben dar, Elektromobilität in den Mainstream zu bringen.

Die Giga Factory ist ein Paradebeispiel für die Skaleneffekte in der Batterieproduktion. Durch die Konzentration auf einen einzigen Produktionsstandort und die Integration so vieler Produktionsschritte wie möglich unter einem Dach, konnte Tesla erhebliche Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen erreichen. Dies hat es dem Unternehmen ermöglicht, die Kosten seiner Batterien deutlich zu senken und damit die Wirtschaftlichkeit seiner Elektrofahrzeuge zu verbessern.

Das Design und die Betriebsweise der Giga Factory spiegeln auch Teslas Engagement für Nachhaltigkeit und erneuerbare Energien wider. Die Fabrik wurde so konzipiert, dass sie zu einem großen Teil mit erneuerbarer Energie betrieben werden kann, insbesondere durch eine große Solaranlage auf dem Dach der Fabrik. Darüber hinaus hat Tesla in der Fabrik umfangreiche Maßnahmen zur Energieeffizienz und zum Recycling implementiert, um den ökologischen Fußabdruck der Batterieproduktion zu minimieren.

Die Tesla Giga Factory zeigt, dass die Massenproduktion von Lithium-Ionen-Batterien auf eine umweltfreundliche und kosteneffiziente Weise möglich ist. Sie dient als Vorbild für andere Batteriehersteller und könnte einen wichtigen Beitrag zur Verbreitung von Elektrofahrzeugen und erneuerbaren Energiespeichern leisten.

Darüber hinaus hat Tesla angekündigt, weitere Gigafactories in anderen Teilen der Welt zu errichten, darunter in Europa und Asien, um die Produktionskapazität weiter zu steigern und die Lieferkette zu optimieren. Diese globalen Produktionsstätten werden es Tesla ermöglichen, lokales Know-how zu nutzen und gleichzeitig die Transportkosten

und die damit verbundenen Emissionen zu reduzieren. Sie zeigen auch Teslas Engagement, lokale Wirtschaften zu fördern und Arbeitsplätze zu schaffen.

Insgesamt ist die Tesla Giga Factory nicht nur ein wichtiger Bestandteil von Teslas Bestreben, die Elektromobilität voranzutreiben, sondern auch ein leuchtendes Beispiel dafür, wie innovatives Denken und nachhaltige Praktiken die Art und Weise verändern können, wie wir Energie speichern und nutzen.

### **Virtuelle Großspeicher durch verteilte Speicherung in Fahrzeugen**

Ein interessantes Konzept im Bereich der Energieversorgung und -speicherung ist die Idee der virtuellen Großspeicher durch verteilte Speicherung in Fahrzeugen. Dieses Modell, oft auch als Vehicle-to-Grid (V2G) bezeichnet, nutzt Elektrofahrzeuge nicht nur als Verbraucher, sondern auch als mobile Energiespeicher, die in das Stromnetz integriert sind.

Durch das Aufladen der Fahrzeugbatterien zu Zeiten niedriger Stromnachfrage oder hoher Erzeugung aus erneuerbaren Quellen und das Zurückleiten von Strom ins Netz zu Zeiten hoher Nachfrage können Elektrofahrzeuge dazu beitragen, die Netzstabilität zu verbessern und die Kosten für den Netzbetrieb zu senken. Darüber hinaus kann die in den Fahrzeugbatterien gespeicherte Energie als Notstromversorgung genutzt werden.

Durch die Kombination von Tausenden oder sogar Millionen von Elektrofahrzeugen kann auf diese Weise ein virtueller Großspeicher entstehen, der erhebliche Mengen an Energie speichern und bereitstellen kann. Dies könnte ein wertvolles Instrument zur Integration erneuerbarer Energien in das Stromnetz sein, da es die Speicherung von überschüssiger Energie aus Wind- und Sonnenenergie ermöglicht und diese Energie bei Bedarf wieder abgibt.

Um dieses Modell umzusetzen, sind jedoch einige Herausforderungen zu bewältigen. Dazu gehören technische Fragen wie die Entwicklung von geeigneten Ladesystemen und Kommunikationstechnologien, um die Fahrzeuge effizient in das Stromnetz zu integrieren. Es sind auch regulatorische Fragen zu klären, wie die Festlegung von Preismodellen und Tarifen für das Laden und Entladen von Fahrzeugbatterien und die Sicherstellung, dass die Fahrzeugeigentümer für die Bereitstellung von Speicherkapazität angemessen vergütet werden.

Darüber hinaus gibt es auch Herausforderungen in Bezug auf die Akzeptanz der Fahrzeugbesitzer. Um das Fahrzeug als Speicher nutzen zu können, muss es an das Stromnetz angeschlossen sein, wenn es nicht gefahren wird. Dies könnte die Fahrzeugnutzung einschränken und erfordert ein gewisses Maß an Flexibilität von den Fahrzeugbesitzern. Auch die Frage, wie sich das häufige Laden und Entladen auf die Lebensdauer der Fahrzeugbatterie auswirkt, muss noch geklärt werden.

Trotz dieser Herausforderungen bietet das Konzept der virtuellen Großspeicher durch verteilte Speicherung in Fahrzeugen ein erhebliches Potenzial für die Energiewende. Es könnte dazu beitragen, den Anteil erneuerbarer Energien im Strommix zu erhöhen, die Netzstabilität zu verbessern und die Kosten für den Netzbetrieb zu senken. Mit der zunehmenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen könnte dieses Modell in Zukunft eine immer wichtigere Rolle spielen.

### **Dual Use von Infrastruktur und Fahrzeugen zur Bereitstellung von Regelenergie**

Eine interessante Perspektive im Kontext der Fahrzeug-zu-Netz-Integration ist die Möglichkeit eines "Dual Use" von Infrastruktur und Fahrzeugen, um sowohl positive als auch negative Regelenergie bereitzustellen. In diesem Modell fungieren Elektrofahrzeuge nicht nur als mobile Energiespeicher, sondern auch als flexible Lasten, die sowohl Strom aus dem Netz aufnehmen (positive Regelenergie) als auch in das Netz einspeisen können (negative Regelenergie).

Positive Regelenergie bezieht sich auf die Fähigkeit des Systems, zusätzliche Energie aufzunehmen, wenn im Netz ein Überschuss an Strom vorhanden ist, beispielsweise während Perioden hoher Erzeugung aus erneuerbaren Energien oder niedriger Nachfrage. Negative Regelenergie hingegen bezieht sich auf die Fähigkeit des Systems, Energie ins Netz zurückzuspeisen, wenn die Nachfrage das Angebot übersteigt.

Im Kontext der Elektromobilität kann dies beispielsweise so aussehen, dass Fahrzeuge während Zeiten hoher Stromerzeugung und/oder niedriger Nachfrage aufgeladen werden (positive Regelenergie). Wenn die Nachfrage anschließend das Angebot übersteigt, könnten diese Fahrzeuge dann die in ihren Batterien gespeicherte Energie ins Netz zurückspeisen (negative Regelenergie). Auf diese Weise könnten Elektrofahrzeuge dazu beitragen, das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage im Stromnetz aufrechtzuerhalten und damit zur Stabilität des Netzes beitragen.

Diese Dual-Use-Fähigkeit kann jedoch nur dann voll ausgeschöpft werden, wenn die entsprechende Infrastruktur vorhanden ist. Dazu gehören bidirektionale Ladesysteme, die sowohl das Aufladen der Fahrzeugbatterien aus dem

Netz als auch das Rückleiten von Energie ins Netz ermöglichen. Darüber hinaus sind intelligente Lademanagementsysteme erforderlich, die das Laden und Entladen der Fahrzeuge in Abhängigkeit von der aktuellen Netzsituation steuern können.

Die Nutzung von Elektrofahrzeugen zur Bereitstellung von Regelenergie stellt eine interessante Möglichkeit dar, die Flexibilität des Energiesystems zu erhöhen und die Integration von erneuerbaren Energien zu erleichtern. Sie könnte auch neue Geschäftsmodelle für Fahrzeugbesitzer und Energieversorger ermöglichen, zum Beispiel durch die Vergütung der Bereitstellung von Regelenergie. Allerdings sind noch einige technische und regulatorische Fragen zu klären, um dieses Potenzial voll auszuschöpfen.

### **Second-Life stationärer Speicher**

Der Übergang von konventionellen Verbrennungsmotoren zu alternativen Fahrzeugantrieben wird vom Gesetzgeber als mögliche Maßnahmen gesehen, die CO<sub>2</sub> Emissionen im Bereich Mobilität zu reduzieren. Die EU hat festgelegt, dass die für das Jahr 2021 festgelegten Grenzwerte für die CO<sub>2</sub> Emissionen von PKWs von 95 Gramm pro Kilometer bis zum Jahr 2030 auf 58,4 Gramm reduziert werden soll [VDA (CO<sub>2</sub>-Regulierung bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen): CO<sub>2</sub>-Regulierung bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen. Regulierung nach 2021, 2020].

Es wird prognostiziert, dass die elektrische Mobilität bis zum Jahr 2030 einen globalen Marktanteil von insgesamt 48 Prozent übernehmen wird. Im Jahr 2020 betrug der Marktanteil lediglich 7 Prozent [Mosquet, X; Zablit, H; Dinger, D; Xu, G; Andersen, M; Tominaga, K. (The Electric Car Tipping Point): The Electric Car Tipping Point. The Future of Powertrains for Owned and Shared Mobility, 2018].

Die Zunahme an elektrischen Fahrzeugen wird das deutsche Stromnetz stark beanspruchen. Insbesondere in ländlichen Gebieten, wo mehr dezentrale Anlagen installiert werden, entsteht die Notwendigkeit des Netzausbaus, um die zukünftig erhöhte Stromnachfrage auszugleichen.

Der Anstieg an elektrischen Fahrzeugen wird sich in der Anzahl an verfügbaren Traktionsbatterien bemerkbar machen. Hersteller garantieren einen sicheren Einsatz von Traktionsbatterien in elektrischen Fahrzeugen bis zu einer Restkapazität von 80 Prozent. Eine Weiternutzung der Traktionsbatterie in elektrischen Fahrzeugen unterhalb dieser Restkapazität ist infolge des hohen Gewichts nicht mehr lukrativ. Die Batterien müssen somit ausgetauscht werden [Hollah, A. M; Kreisköther, K. D; Kampker, A; Lienemann, C. (Electromobile Remanufacturing - Nutzenpotenziale für batterieelektrische Fahrzeuge): Electromobile Remanufacturing - Nutzenpotenziale für batterieelektrische Fahrzeuge. 5th Conference on Future Automotive Technology Focus Electromobility, 2016].

Die Anwendung von Traktionsbatterien als stationärer Speicher kann die Lebensdauer der Traktionsbatterie verlängern und den Ressourcenverbrauch für die Produktion von neuen Batterien reduzieren.

Stationäre Speicher können verschiedene Funktionen erfüllen. Zum einen können stationäre Speicher im privaten oder gewerblichen Bereich für die Erhöhung des Eigenverbrauchs von selbst produziertem Strom benutzt werden. Zum anderen kann die Nutzung von Batteriespeichern als Instrument der Netzdienstleistung dienen und Strom in das Netz einspeisen, wenn die Nachfrage steigt, oder die überschüssige Energieproduktion speichern [Schneider, C; Kirch, T. (Rechtliche Rahmenbedingungen für Stromspeicher): Rechtliche Rahmenbedingungen für Stromspeicher. In: Recht der Energiewirtschaft 2016, S. 6].

Das Ziel des Projekts ist zukünftig, diverse Logistikzentren mit Fahrzeugen für Logistikdienstleistungen mit stationären Speichern aus Second-Life Batterien auszustatten.

## **Verschleiß von Energiespeichern**

Ein weiterer Einfluss, welcher bisher vernachlässigt ist, ist der Verschleiß der Speicher und der damit einhergehende Wirkungsgradverlust. Das beeinflusst das zeitliche Verhalten der Energiespeicherung und damit auch alle anderen Indikatoren, die davon abhängen.

### **Einfluss des Verschleißes auf den Wirkungsgrad von Energiespeichern**

Der Verschleiß von Energiespeichern und der damit einhergehende Wirkungsgradverlust sind von entscheidender Bedeutung für die langfristige Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von Energiespeichersystemen. Während viele Aspekte der Energiespeicherung intensiv erforscht und optimiert werden, ist der Einfluss des Verschleißes oft vernachlässigt worden, obwohl er einen erheblichen Einfluss auf das zeitliche Verhalten der Energiespeicherung hat.

### **Definitionen**



1. **Verschleiß:** Verschleiß bezieht sich auf den graduellen Verlust an Material und Funktionalität einer Komponente im Laufe ihrer Nutzungsdauer aufgrund von mechanischem Abrieb, chemischer Zersetzung oder anderen physikalischen Prozessen.
2. **Wirkungsgradverlust:** Der Wirkungsgradverlust eines Energiespeichers beschreibt die Abnahme der Effizienz, mit der Energie in das System eingespeist, gespeichert und wieder entnommen wird. Dieser Verlust entsteht durch verschiedene Faktoren wie thermische Verluste, interne Widerstände und den Verschleiß der Speicherkomponenten.

### Betroffene Technologien

1. **Batteriespeicher:** In Batteriespeichersystemen führt der Verschleiß der Elektrodenmaterialien und Elektrolyten zu einer allmählichen Verringerung der Speicherkapazität und des Wirkungsgrades. Insbesondere bei Lithium-Ionen-Batterien können Phänomene wie der Kapazitätsverlust und die Erhöhung des Innenwiderstands auftreten, die den Wirkungsgrad beeinträchtigen. Um diesen Verschleiß zu minimieren, werden Fortschritte in der Materialwissenschaft und Konstruktionsmethoden unternommen. Technologien wie adaptive Batteriemangement-Systeme (BMS) und intelligente Ladealgorithmen überwachen und steuern den Betrieb der Batterien, um die Lebensdauer zu maximieren und den Wirkungsgrad zu optimieren.

Neben der Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien konzentriert sich die Forschung auch auf die Optimierung von Elektrolyten und Separatoren, um die Stabilität und Lebensdauer der Batterien zu verbessern. Ein neuer Ansatz besteht darin, adaptive Steuerungs- und Diagnosesysteme zu entwickeln, die den Betrieb der Batterien in Echtzeit überwachen und anpassen können, um den Verschleiß zu minimieren.

2. **Pumpenspeicher:** Bei Pumpenspeicherkraftwerken beeinträchtigt der Verschleiß der Turbinen- und Pumpenkomponenten sowie der Rohrleitungen den Gesamtwirkungsgrad des Systems. Der ständige Kontakt mit Wasser und die Belastung durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten können zu Erosion und Korrosion führen, was den Verschleiß beschleunigt. Um diesen Effekt zu mildern, werden regelmäßige Inspektionen, Wartungen und gegebenenfalls Reparaturen durchgeführt. Zudem wird intensiv an neuen Materialien und Beschichtungen geforscht, die eine verbesserte Beständigkeit gegenüber Verschleiß bieten und so den Wirkungsgrad steigern können.

Neue Forschungsansätze zielen darauf ab, durch Computational Fluid Dynamics (CFD) und Finite-Elemente-Analysen die Strömungsprofile in Pumpenspeicherkraftwerken zu optimieren, um den Verschleiß an kritischen Komponenten zu reduzieren. Zudem werden Materialien mit verbesserten tribologischen Eigenschaften erforscht, um den Verschleiß durch Erosion und Abrasion zu verringern.

3. **Supraleitende Magnetenergiespeicher (SMES):** In SMES-Systemen können magnetische Feldverluste und mechanische Belastungen aufgrund von Stromfluktuationen zu einem Wirkungsgradverlust führen. Die Verwendung von supraleitenden Materialien in Magnetspulen kann dazu beitragen, die Verluste zu minimieren, jedoch sind diese Materialien anfällig für thermische Instabilität und mechanischen Stress. Fortschritte in der Kühltechnologie, insbesondere in Hochtemperatur-Supraleitern, zielen darauf ab, den Verschleiß zu reduzieren und die Effizienz von SMES-Systemen zu verbessern.

Die aktuelle Forschung konzentriert sich auf die Entwicklung von supraleitenden Materialien mit höherer kritischer Stromdichte und mechanischer Stabilität, um den Verschleiß in SMES-Systemen zu minimieren. Außerdem werden neue Kühltechnologien erforscht, wie beispielsweise die Verwendung von kryogenen Flüssigkeiten oder Hochtemperatur-Supraleitern, um den Energieverlust durch Wärmeentwicklung zu reduzieren.

### Herausforderungen und Problemstellungen im Bereich des Verschleißes von Energiespeichern

1. Eine Herausforderung besteht darin, die Komplexität des Verschleißes in Energiespeichersystemen vollständig zu verstehen und geeignete Modelle zur Vorhersage und Analyse des Verschleißverhaltens zu entwickeln.
2. Die Integration von fortgeschrittenen Überwachungssystemen und Diagnosetechnologien in bestehende Energiespeichersysteme stellt eine weitere Herausforderung dar, da dies oft mit Kompatibilitätsproblemen und Datenschutzfragen verbunden ist.
3. Die Skalierung von Verschleißminimierungsstrategien von Laborskalen auf industrielle Anwendungen erfordert eine sorgfältige Optimierung und Validierung, um die Effektivität und Wirtschaftlichkeit sicherzustellen.

Insgesamt erfordert die Bewältigung dieser Herausforderungen eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschungsinstitutionen, Industrie und Regierungsbehörden, um innovative Lösungen zu entwickeln, die den Verschleiß von Energiespeichern reduzieren und ihre Leistungsfähigkeit maximieren

#### **Fazit**

Der Verschleiß von Energiespeichern und der damit verbundene Wirkungsgradverlust sind kritische Faktoren, die bei der Planung, Implementierung und Wartung von Energiespeichersystemen berücksichtigt werden müssen. Durch fortlaufende Forschung und technologische Innovationen strebt die Energiespeicherindustrie danach, den Verschleiß zu minimieren und die Effizienz der Energiespeicherung kontinuierlich zu verbessern, um eine nachhaltige und zuverlässige Energieversorgung zu gewährleisten. Eine ganzheitliche Betrachtung des Verschleißes und seiner Auswirkungen ist von entscheidender Bedeutung, um die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit von Energiespeichersystemen zu maximieren.

# Energieinfrastruktur

In den vergangenen Jahren hat sich die Erzeugungsstruktur in Deutschland wegen des Ausbaus von dezentralen erneuerbaren Energien verändert, wie die folgende Abbildung zeigt. Im Jahr 2002 waren 19 Gigawatt Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland installiert. Die Prozentzahl an installierter Netto-Leistung zur Stromerzeugung stieg auf 60 Prozent bis zum Jahr 2020 [Fraunhofer, I. S.E. (Energy charts): Energy charts. Nettostromerzeugung in Deutschland. [https://energy-charts.info/charts/energy\\_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2010](https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2010)].

Gründe dafür sind die Deregulierung und Liberalisierung der Energiemärkte, die Verfügbarkeit neuer, preisgünstiger und effizienterer Technologien für die dezentrale Energieerzeugung sowie entsprechende Anreize und politische Förderungen [Horenkamp, W; Hube, W; Jäger, J; Kleimaier, M; Kühn, W; Nestle, D; Pickhan, R; Pokojski, M; Raphael, T; Scheffler, J. (VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung): VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung, 2020].

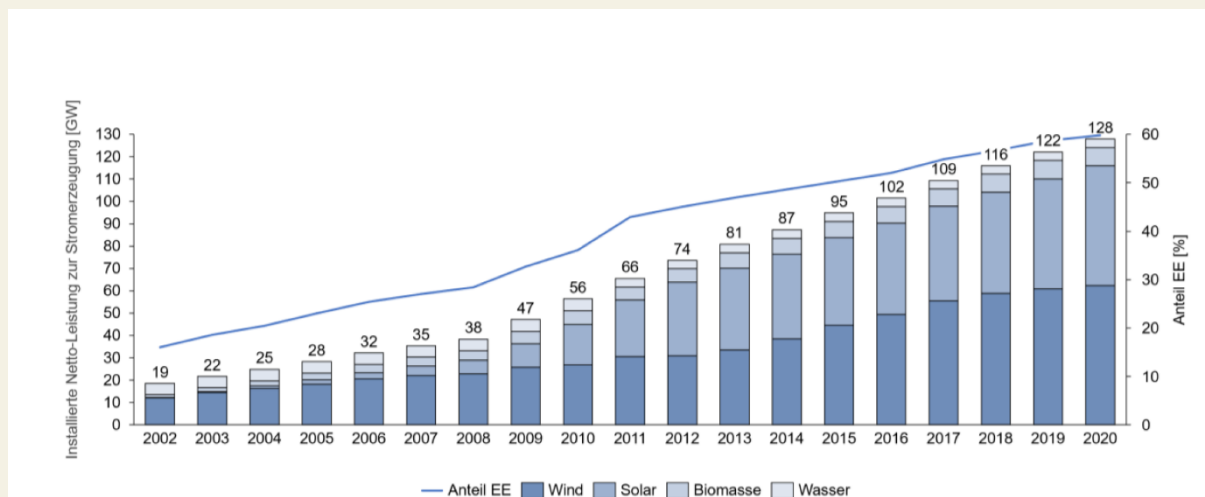


Abb.: Installierte Netto-Leistung aus diversen regenerativen Energien und Anteil von EE der gesamte installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung – Eigene Darstellung nach Fraunhofer (Energy Charts) 2020

## Dezentrale Energieversorgung

Wegen der rasanten Entwicklung der erneuerbaren Energien steht eine Vielfalt an Technologieoptionen sowie an Technologievarianten zur Verfügung. Die dezentrale Energieerzeugung wird als lokale, verbrauchsnahe Versorgungsform verstanden, die die bestehende zentrale Versorgung ergänzt und im besten Fall ersetzt. Der Einsatz von Speichersystemen ermöglicht es, Erzeugung und Nachfrage zu entkoppeln.

## Spannungsebene und Netzfrequenz

Die dezentrale Erzeugung variiert stark von gebäudebezogenen Versorgungsformen bis zur Windenergienutzung im Offshore-Bereich. Mit Ausnahme großer Windparks mit installierter Leistung im mehrstelligen Megawatt-Bereich, die die erzeugte Energie direkt in das Übertragungsnetz einspeist, ist der Großteil der dezentralen Energieerzeugung an das Verteilungsnetz angeschlossen [Horenkamp, W; Hube, W; Jäger, J; Kleimaier, M; Kühn, W; Nestle, D; Pickhan, R; Pokojski, M; Raphael, T; Scheffler, J. (VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung): VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung, 2020].

Die erzeugte elektrische Energie muss durch das Netzsystem transportiert, übertragen und verteilt werden, um den Verbraucher zu erreichen.

Dies erfolgt in hierarchisch gestuften Spannungsebenen (siehe folgende Abbildung).

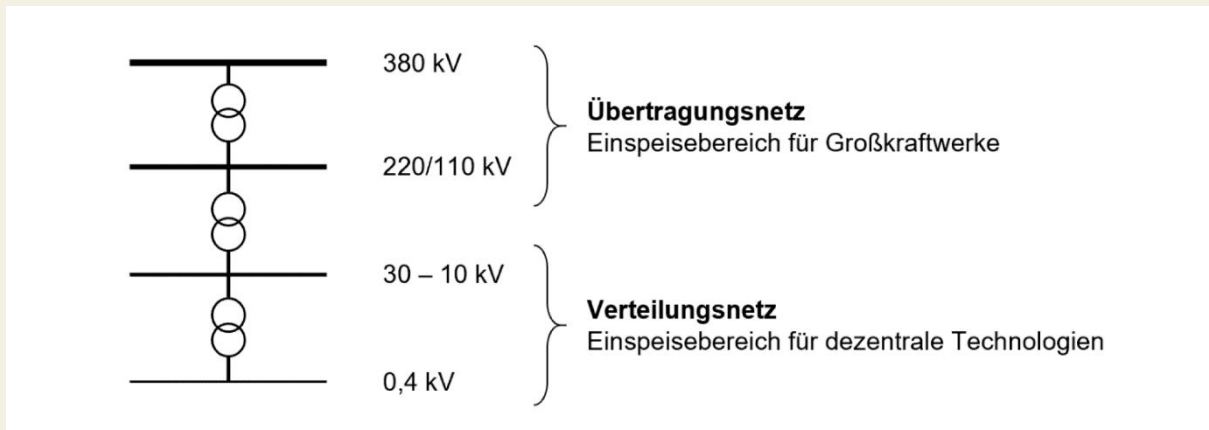


Abb.: Aufbau des Stromnetzes - Eigene Darstellung nach Horenkamp et al. 2020

Bei der Höchstspannungsebene wird Strom mit einer Spannung von 220 und 280 Kilovolt transportiert. Der über große Kraftwerke, wie Kohle- und Atomkraftwerke oder Off-Shore Windparks, in dieses Netz eingespeiste Strom soll mit möglichst geringen Verlusten über große Distanzen mittels Freileitungen transportieren werden. Umspannwerke transformieren die Spannung und übergeben die Energie an die darunterliegende Netzebene.

Die Hochspannungsebene (110 Kilovolt) bezieht ihre Energie aus den vorgelagerten Transportnetzen sowie von mittleren Kraftwerken wie Gaskraftwerken. Diese Energie wird entweder an lokale Verteilungsnetze oder an Sondervertragskunden weitergegeben. Zur flächendeckenden regionalen Verteilung wird die Energie an die Mittelspannungsnetze übergeben, die eine Spannung von 10 bis 30 Kilovolt aufweisen.

An die Mittelspannungsebene sind von der Verbrauchseite viele Industrie- und Gewerbekunden wie Fabriken und große Einkaufshäuser angeschlossen.

Die Niederspannungsnetze (400 Volt) sind „die letzte Meile“ zum Verbraucher, wo viele Millionen Endverbraucher angeschlossen sind. Am Hausanschlusskasten endet das öffentliche Stromversorgungsnetz [Wittenberg, P. (Der Wandel der Stromnetze): Der Wandel der Stromnetze. Eine Herausforderung für die sichere Energieversorgung. Weinheim, 2014; Schwab, A. J. (Elektroenergiesysteme): Elektroenergiesysteme. Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. 3. neu bearbeitete und erweiterte Aufl. Aufl. Heidelberg, New York: Springer, 2012].

Photovoltaik-Parks sowie kleine Windanlagen speisen in die Mittelspannungsnetze. An die Hochspannungsnetze sind größere Windparks, wie On-Shore Windparks, angeschlossen [Wittenberg, P. (Der Wandel der Stromnetze): Der Wandel der Stromnetze. Eine Herausforderung für die sichere Energieversorgung. Weinheim, 2014].

Ländliche Gebiete sind wegen des Platzbedarfs für die Installation von EE-Anlagen bevorzugt. In diesen Gebieten ist der Strombedarf gering, sodass mehr Strom produziert als benötigt wird. Das bedeutet, dass die Verteilungsnetzbetreiber mit dem Ausbau erneuerbarer Energien vor einer großen Herausforderung stehen.

### Lastganglinie

Bei der Auslegung energietechnischer Anlagen muss beachtet werden, dass der Energiebedarf einer zeitlichen Auflösung unterliegt, die als Lastganglinie bezeichnet wird. Lastganglinien weisen saisonale Abhängigkeiten auf. Im Sommer werden geringe Lasten festgestellt, aber auch über die Feiertage bricht die Last ein. Weiterhin sind wöchentliche und tägliche Saisonalitäten bei der Betrachtung von Lastganglinien erkennbar. Zum einen herrscht wochentags eine höhere Last als am Wochenende vor. Zum anderen kann sich ein Unterschied zwischen Tag und Nacht herausstellen. Erklären lässt sich das sowohl aus dem Verhalten von privaten Verbrauchern, die an Wochenenden und in der Nacht einen geringen Verbrauch haben, als auch aus dem industriellen und gewerblichen Verbrauchsverhalten [Horenkamp, W; Hube, W; Jäger, J; Kleimaier, M; Kühn, W; Nestle, D; Pickhan, R; Pokojski, M; Raphael, T; Scheffler, J. (VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung): VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung, 2020]. Je nach Gebäudetypologie sind verschiedene Lastganglinien festzustellen. Diese Gebäudetypen können in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) sowie Haushalte unterteilt werden. In Industrien wird ein großer Anteil der Energie für das Kühlen oder Lüften verbraucht. In Haushalten spielt die Raumkühlung nur eine untergeordnete Rolle [Hausladen, G; Auer, T; Schneegans, J; Klimke, K; Riemer, H; Trojer, B; Qian, L; Borja Torrejon, M. de (Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme. Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden): Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher

Bauweisen und technischer Systeme. Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden, 2014]. In Industriebetrieben ist ein hoher Energieverbrauch durch Büronutzung, Maschinenbetrieb und Behaglichkeitsanforderungen während der Arbeitszeiten zu erwarten. Zwischen den Betriebszeiten und am Wochenende wird der Energiebedarf auf ein verhältnismäßig konstantes Grundniveau zurückgefahren. Die Verteilung des Einflusses auf Wärme- und Strombedarf ist abhängig davon, welchen Bedarf die Maschinen am Standort haben. Gleichzeitig ist der Stromverbrauch durch Büronutzung und Beleuchtung direkt von den Betriebszeiten abhängig. Der Wärmeverbrauch hängt vom Nutzungskonzept ab.

# Energiebedarf

## Gebäudetyp

Bei der Betrachtung eines Gebäudes oder Gebäudekomplexes kann der Großteil der benötigten Informationen in der Regel über den Gebäudebetreiber eingeholt werden. Die energetischen Bilanzgrenzen lassen sich leicht ziehen, da meist die Wärme- und Stromrechnungen des Betreibers die gesamte benötigte Energie darstellen können. Bei der Betrachtung einer Region gestaltet sich die Analyse allein durch die Anzahl an verschiedenen Betreibern, Parteien und Verbrauchsprofilen schwierig. Es ist ein weitaus größeres Ausmaß an Abstimmung nötig.

Ein potenzieller Vorteil, den der Bezug auf eine Region gegenüber einem Gebäudekomplex bietet, ist eine diversere Verteilung von Verbrauchern und Verbrauchsprofilen. Gebäudekomplexe haben in der Regel eine Nutzung (beispielsweise Büronutzung, industrielle Nutzung, Wohnnutzung). Die Erzeugung muss demnach dem Nutzungsprofil angepasst werden, um wirtschaftlich betrieben zu werden. Bei der Betrachtung einer Region ist eine diverse Verteilung von Verbraucherklassen zu erwarten. Manche dieser Verbraucherklassen ergänzen sich in Ihren Verbrauchsprofilen, sodass ein weniger volatiles Lastprofil für die Region entsteht. Als Beispiel lässt sich hier die Korrelation zwischen dem Lastprofil eines Büro-Gebäudes und dem eines Haushaltes formulieren.

## Wohngebäude

### Energiebedarf

Der Energiebedarf eines Haushalts hängt von der Anwesenheit der Bewohner ab. Hier existieren die Lastspitzen in der Regel vor und nach der Arbeit / Uni / Schule.

Durch ein intelligentes Lastmanagement lässt sich die Energieerzeugung auf dieses Verhalten anpassen und somit Energie gegenüber einer einzeln geplanten Versorgung einsparen. Ebenfalls kann überschüssige Energie zwischen einzelnen (selbsterzeugenden) Verbrauchern nach Bedarf „hin- und hergeschoben“ werden, sodass weniger Energie aus dem Netz bezogen werden muss.

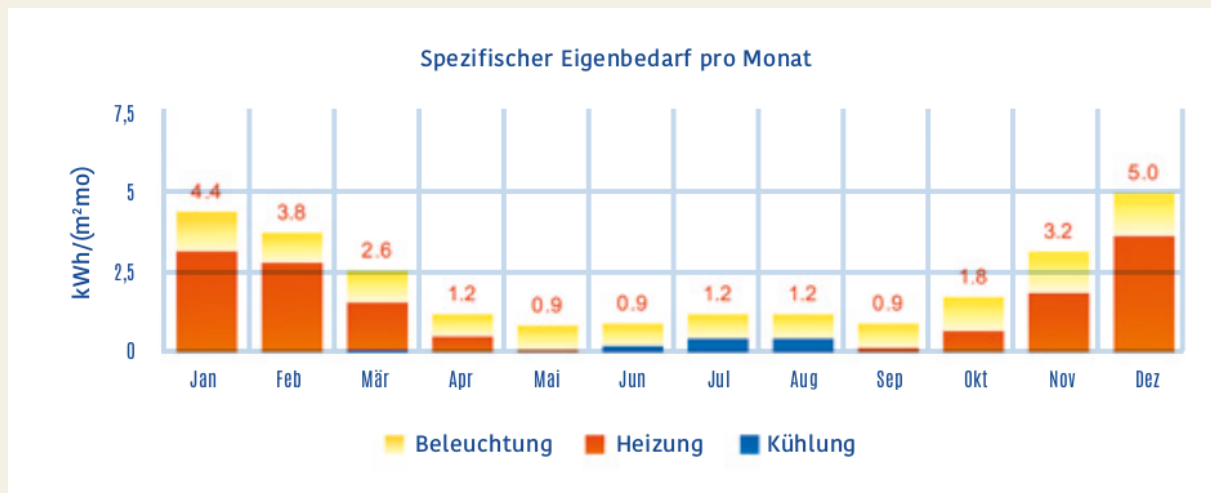


Abb.: Schematische Darstellung des Energiebedarfs-Verlaufs über ein Jahr (David Geisler-Moroder, Oliver Ebert, Bert Junghans, Matthias Werner, Abbildung komplexer lichttechnischer und thermischer Vorgänge in Gebäuden. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.aee.at/aee/index.php?option=com\\_content&view=article&id=983&Itemid=113](https://www.aee.at/aee/index.php?option=com_content&view=article&id=983&Itemid=113) (Zugriff am: 22. Januar 2021))

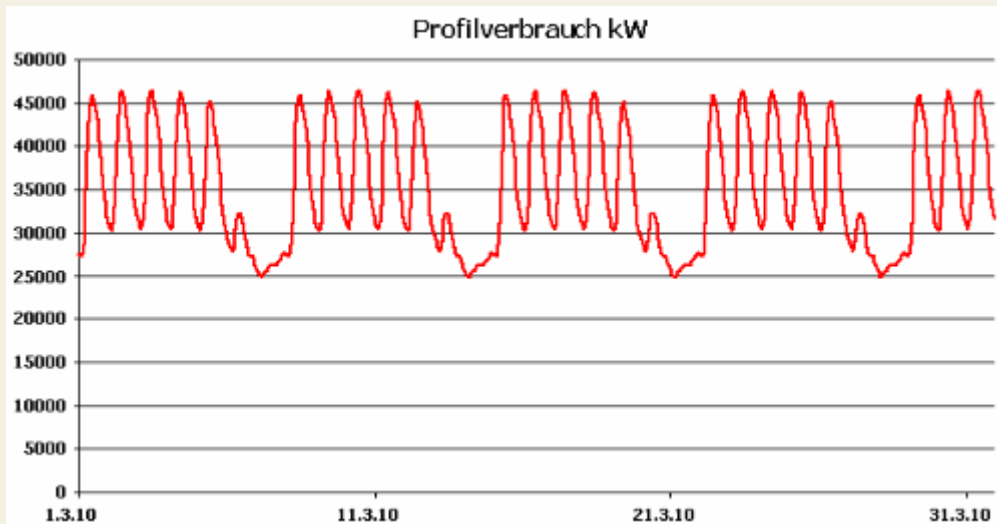


Abb.: Schematische Darstellung des Energiebedarfs-Verlaufs über einen Monat (Brickelbrit, Lastgangbepreisung. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.bricklebrit.com/index.html> (Zugriff am: 22. Januar 2021))

### Rahmenbedingungen

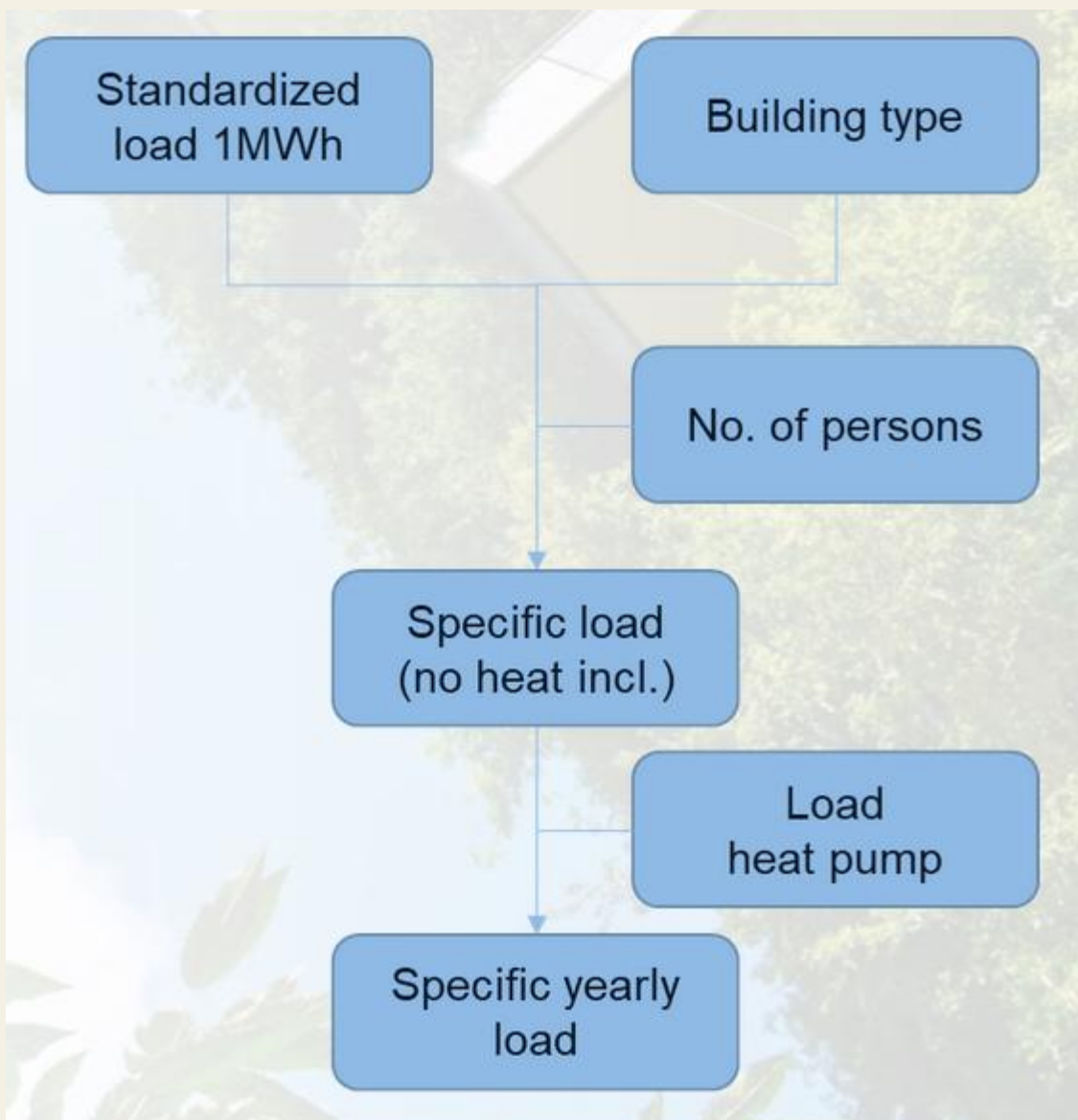


Abb.: Herangehensweise Bestimmung Verbrauch

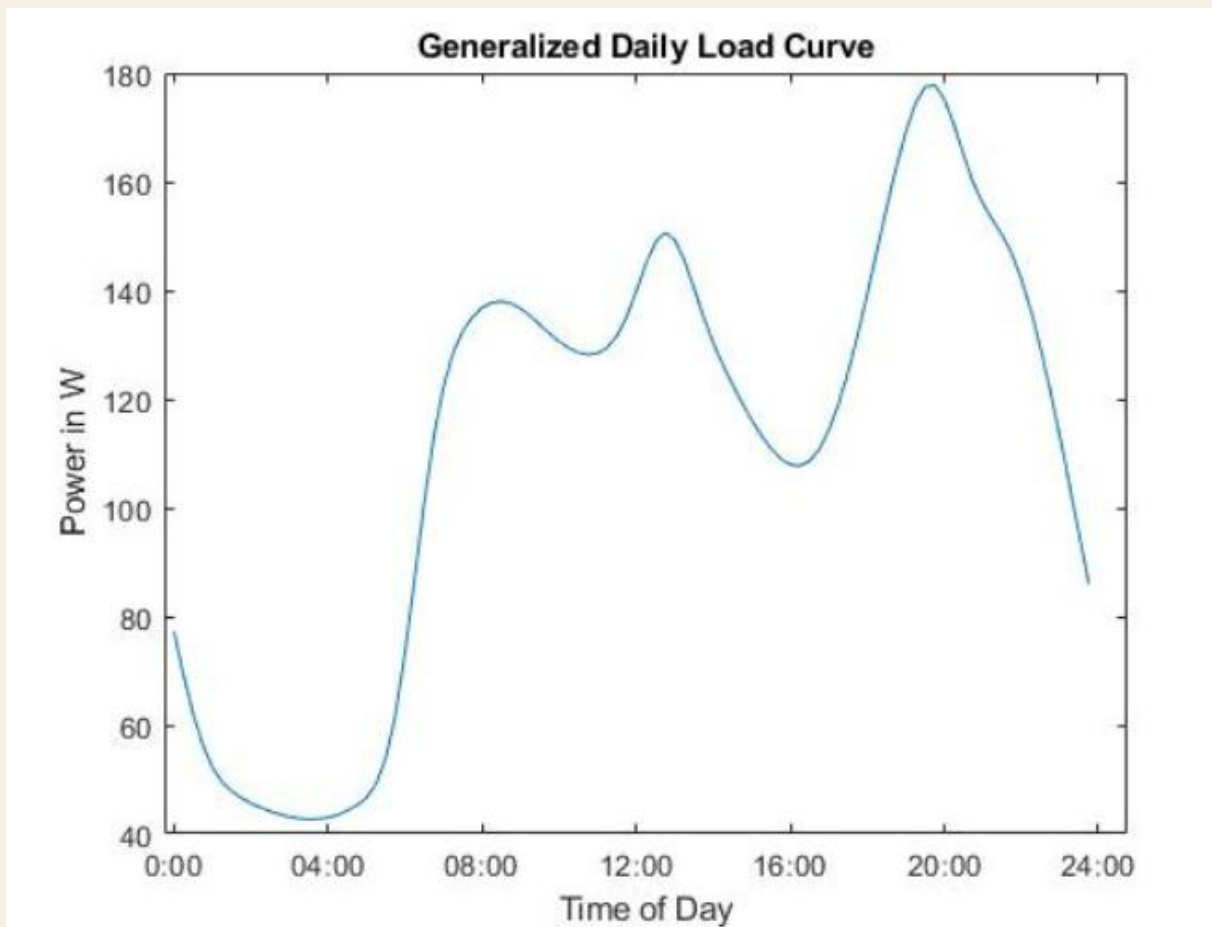


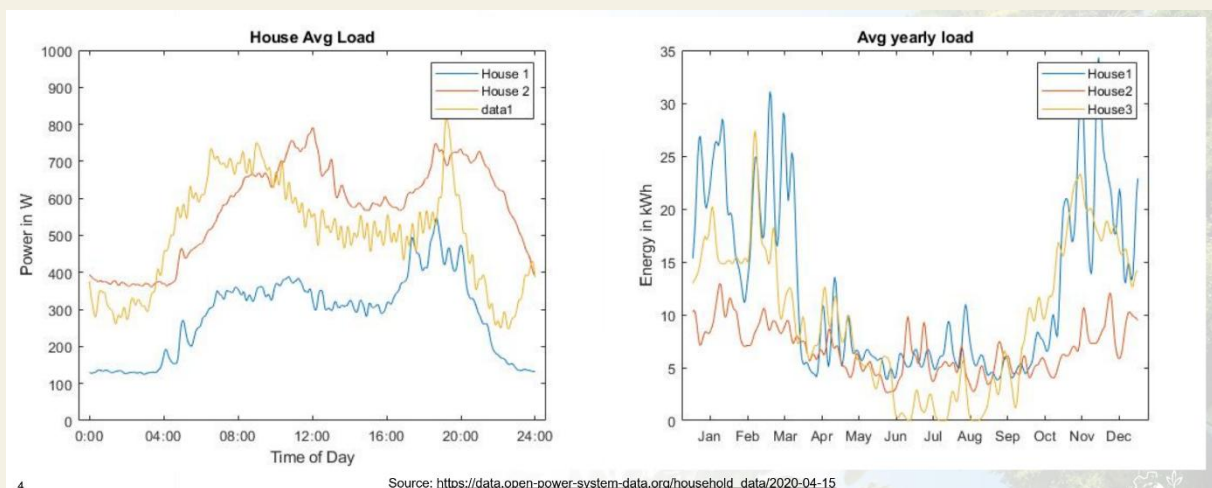
Abb.: Generalisiertes tägliches Standardlastprofil

### Rahmenbedingungen

- Standardlastprofile von bdew
- Standardisierte jährliche Lastprofile für verschiedene Nutzungsarten einschließlich Haushalte
- Alle Profile sind aus Gründen der Skalierbarkeit auf einen Jahresverbrauch von 1000 kWh gemittelt

### Elektrizität: Wohngebäude

Beobachtung: Muster in den Lastprofilen von Wohngebäuden



4

Source: [https://data.open-power-system-data.org/household\\_data/2020-04-15](https://data.open-power-system-data.org/household_data/2020-04-15)



## Elektrizität: Wärme

- Wärmeversorgungstechnik: Wärmepumpe
- Thermische Belastung führt nur zu zusätzlicher elektrischer Belastung

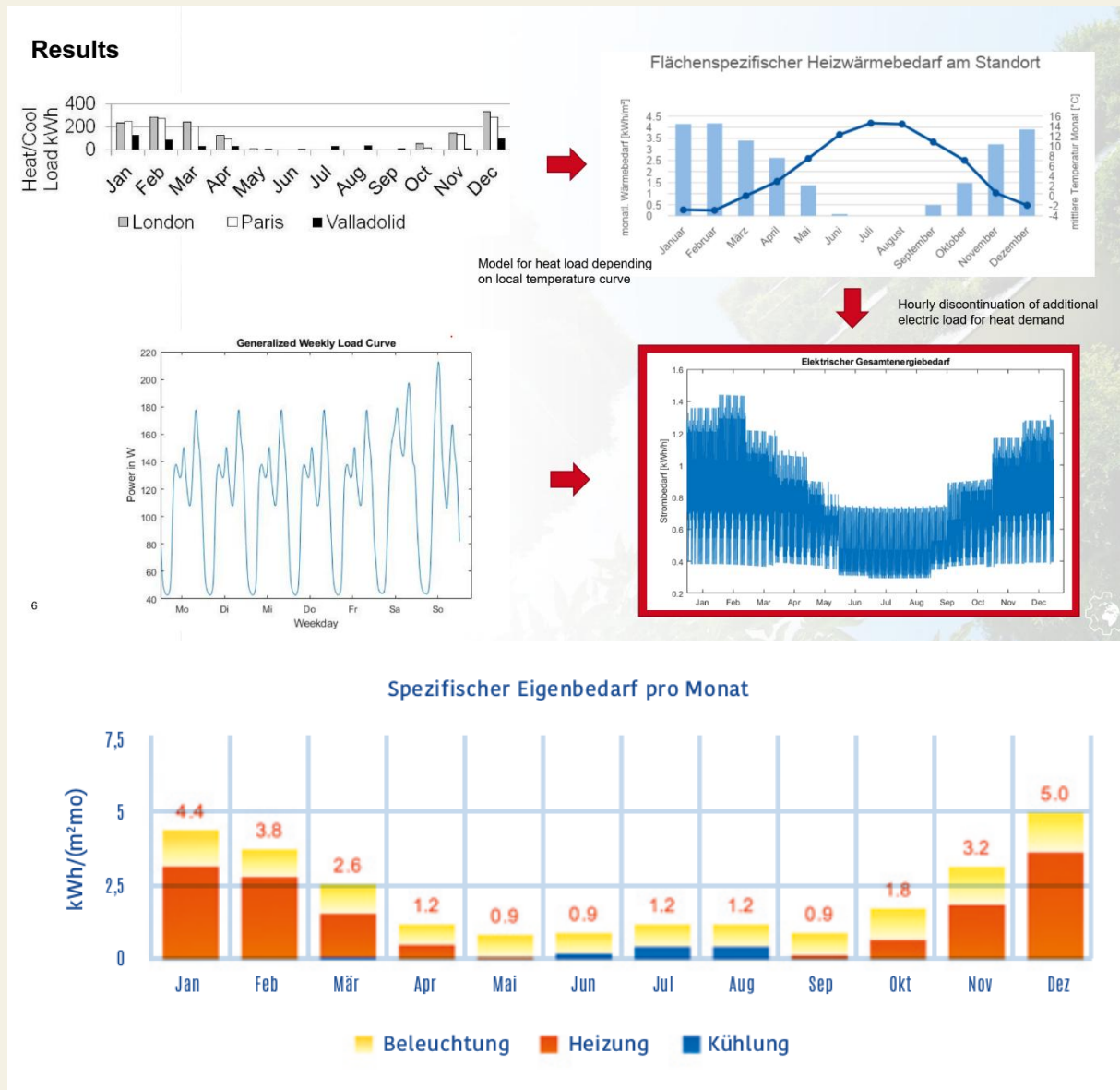
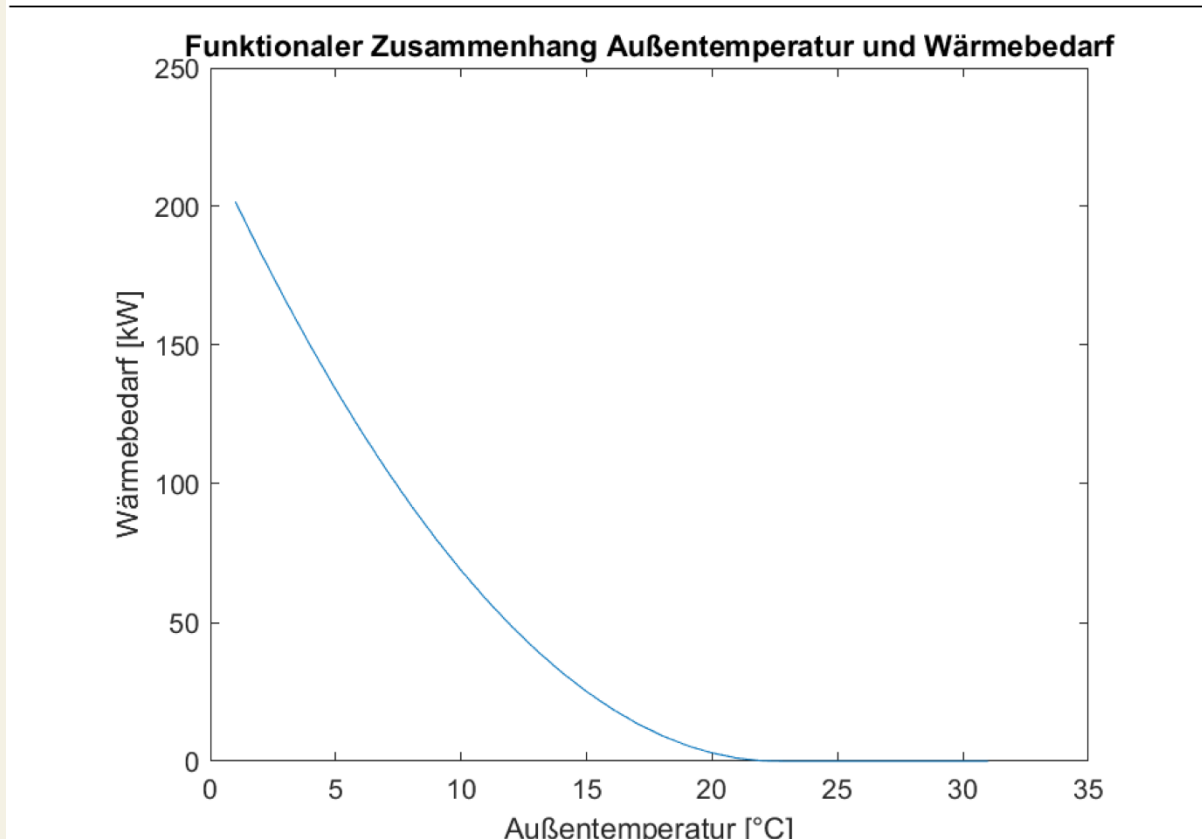


Abb.: Schematische Darstellung des Energiebedarfs-Verlaufs über ein Jahr (David Geisler-Moroder, Oliver Ebert, Bert Junghans, Matthias Werner, Abbildung komplexer lichttechnischer und thermischer Vorgänge in Gebäuden. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.aee.at/aee/index.php?option=com\\_content&view=article&id=983&Itemid=113](https://www.aee.at/aee/index.php?option=com_content&view=article&id=983&Itemid=113) (Zugriff am: 22. Januar 2021))

Aus dem in der Abbildung beschriebenen Verhalten lässt sich jedoch schließen, dass die, für die Monate Januar bis März aufgenommenen Wärmeverbräuche dem jährlichen Maximum entsprechen. Über die Bildung eines arithmetischen Mittelwerts lässt sich der maximale Wärmebedarf im Monat berechnen.

Datenpunkte für die Beschreibung der Außentemperaturabhängigkeit:

<b>Außentemperatur [°C]</b>	<b>6,07</b>	<b>13,6</b>	<b>22</b>
Wärmebedarf [kW]	105,4	27,78	0



Die Abbildung stellt die Funktion dar, die den Zusammenhang zwischen Außentemperatur und dem Wärmebedarf in kW beschreibt. Zwischen den Datenpunkten aus der Tabelle wurde eine Interpolation zweiten Grades durchgeführt.

### Bürogebäude/Industriegebäude

#### Energiebedarf

Der Energiebedarf eines Bürogebäudes wird zu großen Teilen durch die Anwesenheit von Angestellten bestimmt. Somit ist insbesondere der Strombedarf in den Arbeitszeiten zwischen 07:00 Uhr und 17:00 Uhr am größten.

Zu beachten ist beim Wärmebedarf auch was die Bewohner\*innen für Tätigkeiten in einem Gebäude haben. In der folgenden Tabelle sind die Mindesttemperaturen für verschiedene Arbeitsbedingungen angegeben:

<b>Überwiegende Körperhaltung</b>	<b>Arbeitsschwere</b>	
	Leicht	Mittel
Sitzen	20 °C	19 °C
Gehen / Stehen	19 °C	17 °C

Nach [Ausschuss für Arbeitsstätten, „Technische Regeln für Arbeitsstätten“, 2010, S. 4] beträgt die maximal zulässige Temperatur an einem Arbeitsplatz 26 °C.

#### Ausblick weitere Recherche

#### Energiebezugskosten

Bei Energiebezugskosten spielt ebenfalls der Gebäudetyp eine Rolle. Es bestehen verschiedene Verträge je nach Abnehmer. Bei industriellen und Gewerblichen Abnehmern ist die Preisberechnung abhängig der Peakleistung zu beachten. Hier können Energiespeicher durch die Senkung der Peakleistung geringere Energiebezugskosten bewirken und somit noch über die Erhöhung der Eigennutzung hinaus einen weiteren wirtschaftlichen Vorteil bewirken.

### **Verschiedene Gebäudetypen**

Eine sinnvolle Erweiterung der Betrachtung besteht darin, für verschiedene Gebäude Nutzungsprofile und Lastgänge auszuarbeiten. Diese variieren je nach Standorttyp (Industrie, Einfamilienhaus, Gewerbe, etc.). Sind die Lastgänge nicht einsehbar, oder wird ein Modell benötigt, dass aus monatlichem oder jährlichem Energiebedarf einen Lastgang erstellen kann.

Zusätzlich besteht so die Möglichkeit auch bei Neubauten vorab den Energiebedarf anhand der Planungsunterlagen für ein entstehendes Gebäude abzuschätzen und in die Bewertung einfließen zu lassen.