Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland

Aktuelle Fassung abrufbar unter www.pv-fakten.de

Zusammengestellt von:
Dr. Harry Wirth
Bereichsleiter Power Solutions
Fraunhofer ISE

Kontakt:
Sophia Judith Bächle
Presse und Public Relations
Telefon: +49 (0) 7 61 / 45 88 - 5215
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
presse@ise.fraunhofer.de

Zitierhinweis: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Harry Wirth, Fraunhofer ISE, Download von www.pv-fakten.de, Fassung vom 16.6.2025

Fraunhofer ISE

Inhalt

1. Wozu dieser Leitfaden? ... 5

2. Wieviel Photovoltaik wird für die Energiewende benötigt? ... 5

3. Liefert PV relevante Beiträge zur Stromversorgung? ... 6

4. Ist PV-Strom zu teuer? ... 7

4.1 Stromgestehungskosten ... 8

4.2 Einspeisevergütung ... 9

4.3 Preisbildung an der Strombörse und der Merit Order Effekt ... 11

4.4 Ermittlung der Differenzkosten ... 12

4.5 EEG-Umlage ... 13

5. Subventionen und Strompreise ... 13

5.1 Wird PV-Strom subventioniert? ... 13

5.2 Wird die fossile Stromerzeugung subventioniert? ... 14

5.3 Verteuert der PV-Ausbau den Strombezug? ... 15

6. Exportieren wir massiv PV-Strom ins europäische Ausland? ... 16

7. Können kleine PV-Anlagen attraktive Renditen bringen? ... 17

8. Ist die Versorgung mit Solarkomponenten gesichert? ... 19

9. Erzeugt die PV-Branche nur Arbeitsplätze in Asien? ... 21

10. Welche Fördermittel fließen in die PV-Forschung? ... 22

11. Überlastet PV-Strom unser Energiesystem? ... 23

11.1 Übertragung und Verteilung ... 23

11.2 Volatilität ... 24

11.2.1 Ist Solarstrom-Produktion planbar? ... 24

11.2.2 Ergänzen sich Sonnen- und Windstrom? ... 25

11.3 Erreicht die Netzeinspeisung die installierte Leistung? ... 26

11.4 Geht viel PV-Strom durch Redispatch verloren? ... 27

11.5 Konflikte mit trägen Kraftwerken ... 27

11.6 Muss der PV-Ausbau auf Speicher warten? ... 28

11.7 Gefährdet volatiler Solarstrom die Versorgungssicherheit? ... 29

12. Gibt es in Deutschland genügend Flächen für PV? ... 30

13. Ist PV-Strom ein Privileg von Eigenheimbesitzern? ... 34

14. Zerstören PV-Anlagen ökologisch wertvolle Flächen? ... 35

15. Finden PV-Kraftwerke Akzeptanz in der Bevölkerung? ... 35

16. Arbeiten PV-Anlagen in Deutschland effizient? ... 37

16.1 Sind PV-Anlage nur auf optimal ausgerichteten Dächern wirtschaftlich? ... 39

16.1.1 Steildach Ost-/West ... 39

16.1.2 Vertikale Südfassade ... 40

16.2 Degradieren PV-Module? ... 40

16.3 Verschmutzen PV-Module? ... 41

16.4 Arbeiten PV-Anlagen selten unter Volllast? ... 41

17. Liefert PV relevante Beiträge zum Klimaschutz? ... 43

17.1 Gefährdet der anthropogene CO_2-Ausstoß das globale Klima? ... 43

17.2 Liefert PV relevante Beiträge zur Senkung des CO_2-Ausstoßes? ... 45

17.3 Verschlingt die Produktion von PV-Modulen mehr Energie als diese liefern können? ... 48

17.4 Entstehen bei der Produktion von PV weitere klimaschädliche Gase? ... 49

18. Heizen PV-Module die Erde auf? ... 49

18.1 Lokale Effekte ... 50

18.1.1 Heizen PV-Module ihre Umgebung auf? ... 50

18.1.2 Reflektieren PV-Module Solarstrahlung in die Umgebung? ... 50

18.1.3 Speichern PV-Module die Sonnenwärme? ... 51

18.2 Globale Effekte ... 51

18.2.1 Verstärkt die Solarstromproduktion den Treibhauseffekt? ... 51

18.2.2 Heizen PV-Module die Erdatmosphäre auf? ... 51

19. Können PV-Module blenden? ... 51

20. Geben PV-Module gesundheitsschädliche Strahlung ab? ... 52

21. Ersetzen PV-Anlagen thermische Kraftwerke? ... 53

22. Können wir einen wesentlichen Teil unseres Energiebedarfs durch PV-Strom decken? ... 54

22.1 Ausgangspunkt: Energiebedarf und Energieangebot ... 54

22.2 Energieszenarien ... 56

22.3 Transformationsschritte ... 59

22.3.1 Verstetigung der PV-Stromerzeugung ... 59

22.3.2 Ausbau von flexiblen Erzeugungskapazitäten ... 61

22.3.3 Erhöhung der Energieeffizienz ... 62

22.3.4 Lastmanagement ... 64

22.3.5 Ausgewogener Zubau von PV- und Windkraftkapazitäten ... 67

22.3.6 Kraft-Wärme-Kopplung ... 67

22.3.7 Elektrische Energiespeicherung ... 68
22.3.8 Netzausbau ... 72
22.3.9 Energieträgerimport ... 73
22.3.10 Übersicht ... 73

22.4 Muss die Energiewende auf die Bundespolitik warten? ... 75

23. Brauchen wir eine PV-Produktion in Deutschland? ... 76

24. Braucht es ein Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)? ... 76

25. Enthalten PV-Module giftige Substanzen? ... 77

25.1 Waferbasierte Module ... 77

25.2 Dünnschicht-Module ... 77

25.3 Solarglas ... 78

25.4 Rücknahme und Recycling ... 78

26. Sind Rohstoffe zur Produktion von PV-Modulen ausreichend verfügbar? 79

27. Erhöhen PV-Anlagen das Brandrisiko? ... 79

27.1 Können defekte PV-Anlagen einen Brand auslösen? ... 79

27.2 Gefährden PV-Anlagen die Feuerwehrleute? ... 80

27.3 Behindern PV-Module den direkten Löschangriff über das Dach? ... 81

27.4 Entstehen beim Brand von PV-Modulen giftige Immissionen? ... 81

28. Anhang: Fachbegriffe ... 81

28.1 Modulwirkungsgrad ... 81

28.2 Nennleistung eines PV-Kraftwerks ... 82

28.3 Jahresvolllaststunden (Jahresvollbetriebsstunden) ... 82

28.4 Jahresnutzungsgrad (Kapazitätsfaktor) ... 82

28.5 Spezifischer Ertrag ... 82

28.6 Systemwirkungsgrad ... 82

28.7 Performance Ratio ... 82

28.8 Grundlast, Mittellast, Spitzenlast, Netzlast und Residuallast ... 83

28.9 Stromerzeugung und -verbrauch ... 83

29. Anhang: Abkürzungen ... 84

30. Anhang: Umrechnungstabellen [EEBW] ... 85

31. Anhang: Quellen ... 86

32. Anhang: Abbildungen ... 94

1. Wozu dieser Leitfaden?

Deutschland lässt das fossil-nukleare Energiezeitalter hinter sich. Photovoltaik (PV) wird in unserer nachhaltigen Energiezukunft eine zentrale Rolle spielen. Die vorliegende Zusammenstellung aktueller Fakten, Zahlen und Erkenntnisse soll eine gesamtheitliche Bewertung des Photovoltaik-Ausbaus in Deutschland unterstützen.

2. Wieviel Photovoltaik wird für die Energiewende benötigt?

Um unseren gesamten Energiebedarf aus Erneuerbaren Energien (EE) zu decken, ist ein massiver Ausbau der installierten PV-Leistung notwendig, neben einer Reihe weiterer Maßnahmen. Abbildung 1 zeigt die benötigte PV-Nennleistung gemäß einer Auswahl von Studien und Szenarien ab dem Erscheinungsjahr 2021 ([ISE3], [ISI], [DIW], [ARIA1], [BDI], [ESYS], [Prog], [IEE], [HTW2], [ÜNB2], [AGORA2], [Aurora]).

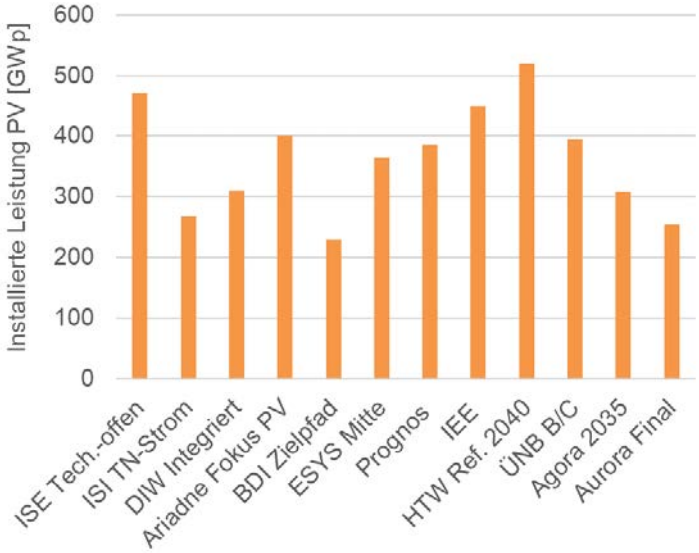


Abbildung 1: PV-Ausbau zum Erreichen der Klimaneutralität im Sektor Energiewirtschaft, Studien benannt nach ausführender Institution und Szenario.

Die Szenarien treffen unterschiedliche Annahmen zu Randbedingungen, bspw. für Energieimporte, Effizienzsteigerungen und Akzeptanz. Manche Studien betrachten lediglich das Stromsystem, andere das gesamte Energiesystem.
Im EEG 2023 ist ein PV-Ausbau auf 215 GW_P bis 2030 und auf 400 GW_P bis 2040 vorgesehen. Der jährliche Netto-Zubau soll bis 2026 auf einen Höchstwert von 22 GW_P klettern. Zunehmend müssen auch Altanlagen ersetzt werden. Diese Ersatzinstallationen fallen derzeit noch wenig ins Gewicht, sie steigen jedoch im voll ausgebauten Zustand bei einer angenommenen Nutzungsdauer von knapp 30 Jahren auf ca. 15 GW_P pro Jahr. In den

Jahren 2013 – 2018 wurden im Mittel nur 1,9 GW_P/a installiert (Abbildung 2). Der Zubau von **16,9 GW_P** im Jahr 2024 erhöhte die installierte Leistung auf **100 GW_P** [ISE4], verteilt auf über **4,8 Mio. Anlagen** [BSW], inklusiv Steckersolargeräte.

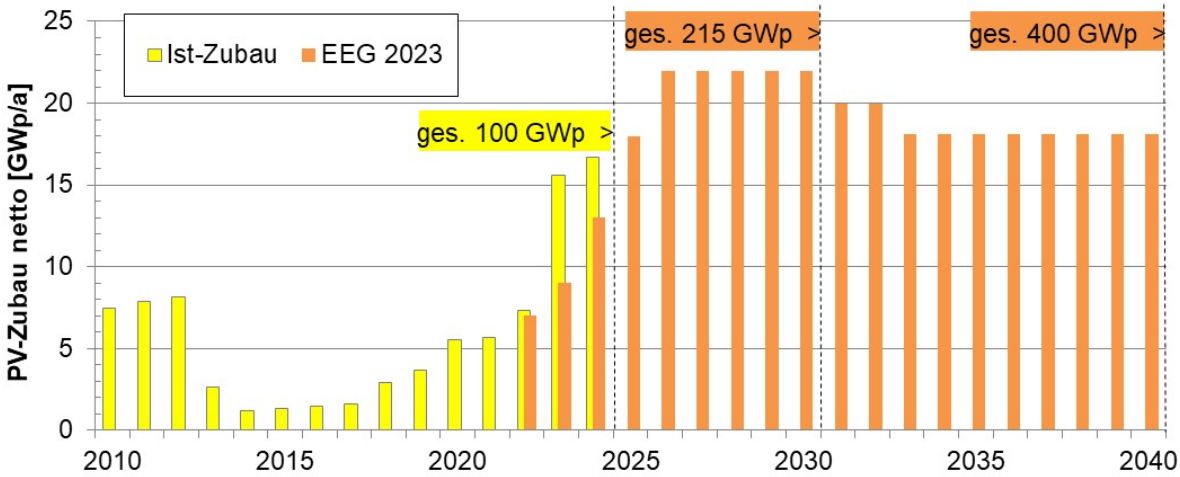


Abbildung 2: Netto-PV-Zubau: Ist-Werte bis 2024, Ausbaupfad zur Erreichung der gesetzlichen Ziele [ISE4], [BSW], [EEG2023].

3. Liefert PV relevante Beiträge zur Stromversorgung?

Ja.
Mit einer Stromerzeugung von **72,6 TWh** im Jahr 2024 deckte die PV knapp **14 %** des Bruttostromverbrauchs [AGEE] in Deutschland (Abbildung 3). Alle Erneuerbaren Energien (EE) kamen zusammen auf **53 %**.

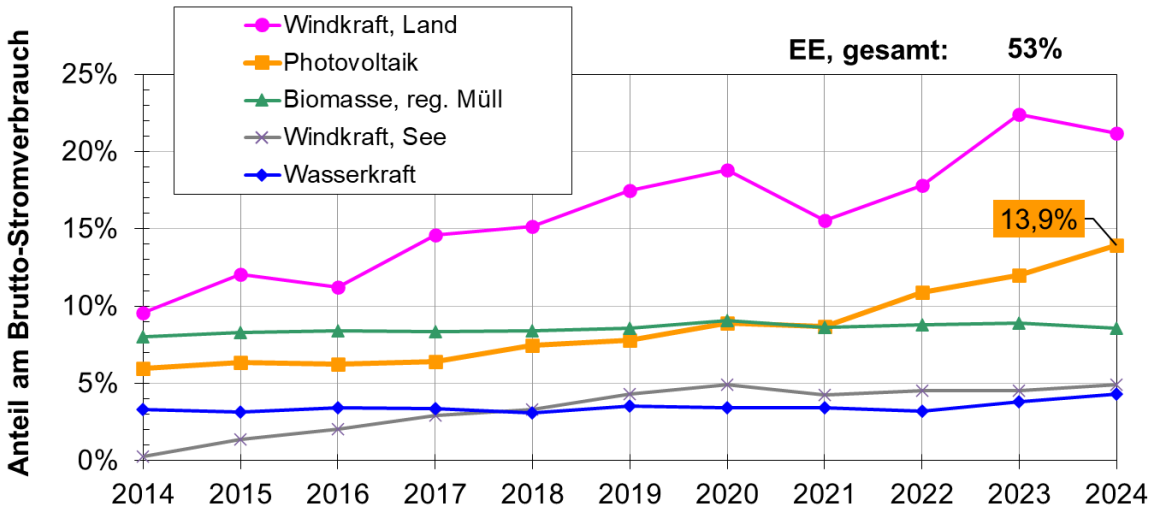


Abbildung 3: Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland [ISE4] Stand 12.3.2025, [AGEE].

Der Bruttostromverbrauch ist die Bezugsgröße für die gesetzlichen Ausbauziele der Energiewende und schließt Netz- und Eigenverbrauchsverluste ein (Abschnitt 28.9). An sonnigen Tagen deckt PV-Strom zeitweise über 90 % unseres Strombedarfs.
Bei einem prognostizierten Bruttostromverbrauch von 658 TWh im Jahr 2030 wird der geplante PV-Ausbau auf 215 GW_P zu einem Solarstromanteil von etwa 30 % führen, die EE insgesamt sollen 80 % erreichen.

4. Ist PV-Strom zu teuer?

PV-Strom war einmal sehr teuer.
Vergleicht man die Stromgestehungskosten von neuen Kraftwerken verschiedener Technologien, dann schneidet PV sehr günstig ab [ISE1]. Insbesondere große PV-Kraftwerke produzieren konkurrenzlos günstigen Strom. Dabei ist der Kostenvergleich noch erheblich verzerrt, solange für Brennstoffe zwar Bereitstellungskosten, aber weder die vollen Kreislaufkosten mit Rückholung von CO_2, noch die Folgekosten unterbrochener Kreisläufe, d.h. die Kosten der Klimakrise betrachtet werden.
Die Grenzkosten für Atomstrom liegen in der Größenordnung von 1 ct/kWh, für Kohlestrom 3 – 7 ct/kWh, für Gasstrom 6 – 9 ct/kWh, dazu kommen die Fixkosten der Kraftwerke (z.B. Investition, Kapital). Die Grenzkosten decken im Wesentlichen die Bereitstellung des Brennstoffes ab, nicht jedoch die Neutralisierung der strahlenden Abfälle bzw. umweltbelastenden Emissionen (CO_2, NO_x, SO_x, Hg). Bisher bleiben externe Kosten und Risiken bezüglich Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschäden bei der Preisbildung weitgehend unberücksichtigt ([UBA3], [FÖS1], [FÖS2]). Die Ausblendung dieser externen Kosten stellt eine massive Subventionierung der betroffenen Energieträger dar (Abschnitt 5.2).
Um die Energiewende zu fördern und Investitionen in PV-Anlagen verschiedener Größe anzuregen, trat am 1. April 2000 das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Kraft. Es soll dem Anlagenbetreiber bei garantierter Stromabnahme einen wirtschaftlichen Betrieb mit angemessenem Gewinn ermöglichen. Ziel des EEG ist weiterhin, die Stromgestehungskosten aus EE durch die Sicherung eines substanziellen Marktes für EE-Systeme kontinuierlich zu reduzieren (s. Abschnitt 4.1).
Der Aufbau der PV-Erzeugungskapazitäten ist nur ein Teil der Transformationskosten, die mit der Energiewende einhergehen. Lange Zeit stand dieser Teil im Vordergrund der Diskussion. In den letzten Jahren wurde PV zunehmend systemrelevant, womit weitere Transformationsschritte und Kostenarten in das Blickfeld rücken. Neben der Stromerzeugung aus EE geht es um

- die Flexibilisierung des Verbrauchs
- die Elektrifizierung (Sektoren Wärme, Mobilität)
- den Aufbau netzdienlicher Speicher (stationäre Batterien, Wärmespeicher, Pumpspeicher) und Elektrolyse
- den Ausbau von Stromnetzen
- den Umstieg von Kohle- auf Gaskraftwerke

Diese Kosten werden nicht durch den PV-Ausbau verursacht, sie gehen – ebenso wie der PV-Ausbau selbst - auf das Konto der Energiewende. Verursacher der Kosten für die

Energiewende ist die Gesamtheit der Energieverbraucher, für die eine nachhaltige Energieversorgung geschaffen werden muss. Ohne die Kosten einer unterlassenen Energiewende zu kennen, fällt es schwer, die Kosten der Wende zu bewerten.

4.1 Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten eines PV-Kraftwerks bezeichnen das Verhältnis aus Gesamtkosten (€) und elektrischer Energieproduktion (kWh), beides bezogen auf seine wirtschaftliche Nutzungsdauer. Die Höhe der Gesamtkosten für PV-Kraftwerke wird v.a. bestimmt durch:

1. Anschaffungsinvestitionen für Bau und Installation der Anlagen
2. Finanzierungsbedingungen (Eigenkapitalrendite, Zinsen, Laufzeiten)
3. Betriebskosten während der Nutzungszeit (Versicherung, Wartung, Reparatur)
4. Rückbaukosten

Die Investitionskosten sind der dominierende Kostenanteil von PV-Kraftwerken. Der Preis der PV-Module ist nur noch für ca. ein Drittel der Investitionskosten verantwortlich, bei großen PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) liegt der Anteil höher als bei kleinen Dachanlagen. Die Historie zeigt, dass die Preisentwicklung für PV-Module einer sogenannten „Preis-Erfahrungskurve“ folgt, d.h. bei Verdopplung der kumulierten Produktion sinken die Preise um einen konstanten Prozentsatz. Abbildung 4 stellt die inflationsbereinigten Weltmarkt-Preise. Zwischen den Jahren 2010 und 2020 sind die Preise für PV-Module um 90 % gesunken. Auf lange Sicht wird erwartet, dass die Modulpreise [€/W_P] entsprechend dieser Gesetzmäßigkeit weiter sinken, sofern weiterhin große Anstrengungen bei der Weiterentwicklung der Produkte und Herstellprozesse geleistet werden.

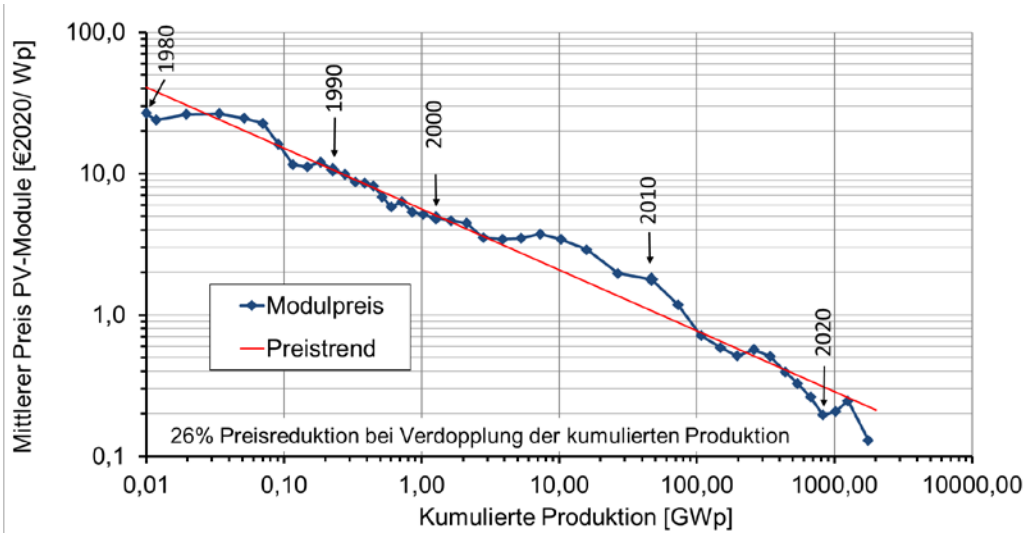


Abbildung 4: Historische Entwicklung der Preise für PV-Module (PSE Projects GmbH/Fraunhofer ISE, Datenquelle: Strategies Unlimited/Navigant Consulting/EuPD). Die Gerade zeigt den Trend der Preisentwicklung.

Preise für PV-Kraftwerke fielen seit 2006 dank technologischen Fortschritts, Skalen- und Lerneffekten um 70 %. Abbildung 5 zeigt die Preisentwicklung für Aufdachanlagen von 10 bis 100 kW_P Nennleistung in Deutschland. Die jährlichen Betriebskosten eines PV-Kraftwerks liegen mit ca. 1-2 % der Investitionskosten vergleichsweise niedrig, die Finanzierungskosten steigen mit dem Zinsniveau.

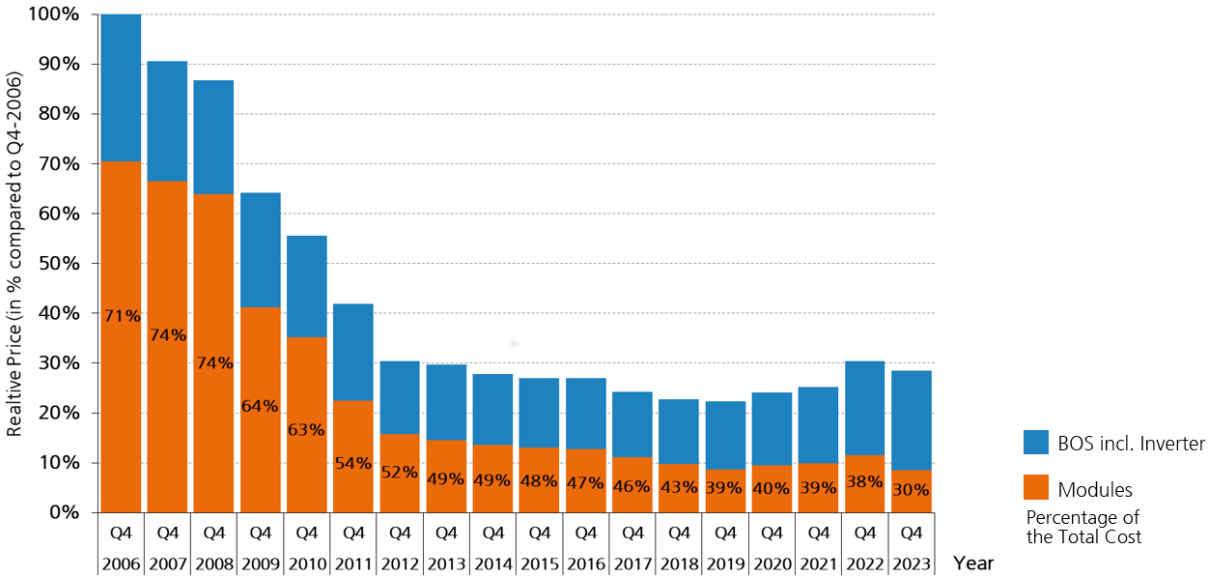


Abbildung 5: Entwicklung des durchschnittlichen Endkundenpreises (Systempreis, netto) für fertig installierte Aufdachanlagen von 10 – 100 kW_P, Daten: BSW [ISE5].

Neue MW-Kraftwerke produzieren PV-Strom zu Kosten von ca. 4 – 7 ct/kWh, bei kleinen Dachanlagen liegt die Spanne im Bereich von 6 – 14 ct/kWh [ISE1]. Diese Kostenschätzungen gehen immer davon aus, dass der volatile Strom auch vollständig abgenommen wird. Langfristig ist mit weiter sinkenden Stromgestehungskosten zu rechnen. Ältere PV-Kraftwerke produzieren aufgrund der früher sehr hohen Investitionskosten deutlich teurer. Einen Orientierungswert für die Entwicklung der Stromgestehungskosten aus neuen PV-Freiflächenanlagen liefern die Ausschreibungen der Bundesnetzagentur (folgender Abschnitt).

4.2 Einspeisevergütung

Die Energiewende erfordert massive Investitionen u.a. in regenerative Erzeugungskapazitäten für Solarstrom. In Anbetracht der bisherigen Kostensenkungsdynamik (Abschnitt 4.1) besteht jedoch die Gefahr, dass Investitionen in Erwartung eines fortgesetzten Trends aufgeschoben werden (Deflationseffekt). Da zudem PV-Kraftwerke weitgehend zeitgleich Strom produzieren, wäre der teurere Strom aus dem heute errichteten Kraftwerk in Zukunft nicht mehr konkurrenzfähig (Verdrängungseffekt). Um trotzdem Akteure jenseits der klassischen Energieversorger zu mobilisieren, insbesondere auch Hauseigentümer,

Gewerbe und Mittelstand, ist eine Abnahmegarantie für nicht selbst nutzbaren Strom über die wirtschaftliche Nutzungsdauer des Kraftwerks zu einer festen Vergütung bzw. einer Mindestvergütung nötig.
Grundlage für den Ausbau der PV bildeten die verschiedenen Fassungen des EEG seit dem Jahr 2000. Die verschiedenen Novellen versuchten zunehmend, den PV-Ausbau gleichzeitig zu fördern und zu behindern. Der „atmende Deckel" (bspw. 1,5 GW_P laut EEG 2017) begrenzte den jährlichen Zubau, geringe Ausschreibungsmengen bremsten im Freiflächensegment. Dazu kamen eine Reihe von Einschränkungen bspw. bezüglich Flächenkulisse, Anlagengrößen und Eigenverbrauch.
Aktuell erfolgt die EEG-Vergütung nach drei Basismodellen, abhängig von Größe und Typ des PV-Kraftwerks: die Festvergütung [BNA3], die Marktprämie bei Direktvermarktung und für große Kraftwerke die Vergütung gemäß Ausschreibungszuschlag der Bundesnetzagentur [BNA4]. Die Marktprämie soll eine negative Differenz zwischen dem Marktwert Solar (Monatsmittel Day-ahead-Börsenstrompreis) und dem gesetzlich bestimmten „anzulegendem Wert" [BNA3] ausgleichen. Zuschläge sind in bestimmten Fällen bspw. bei Volleinspeisung oder für Mieterstrom vorgesehen.
Die Einspeisevergütung für kleine Dachanlagen mit Eigenverbrauch, die bis zum 31.7.2025 in Betrieb gehen, beträgt abhängig von der Anlagengröße bis zu **7,94 ct/kWh** für 20 Jahre. Die Ausschreibungsrunde der Bundesnetzagentur zum Gebotstermin 1. Februar 2018 hat den bisher niedrigsten mittleren Zuschlagswert von 4,33 ct/kWh ermittelt, der niedrigste Einzelzuschlag mit 3,55 ct/kWh stammt aus dem Februar 2020.

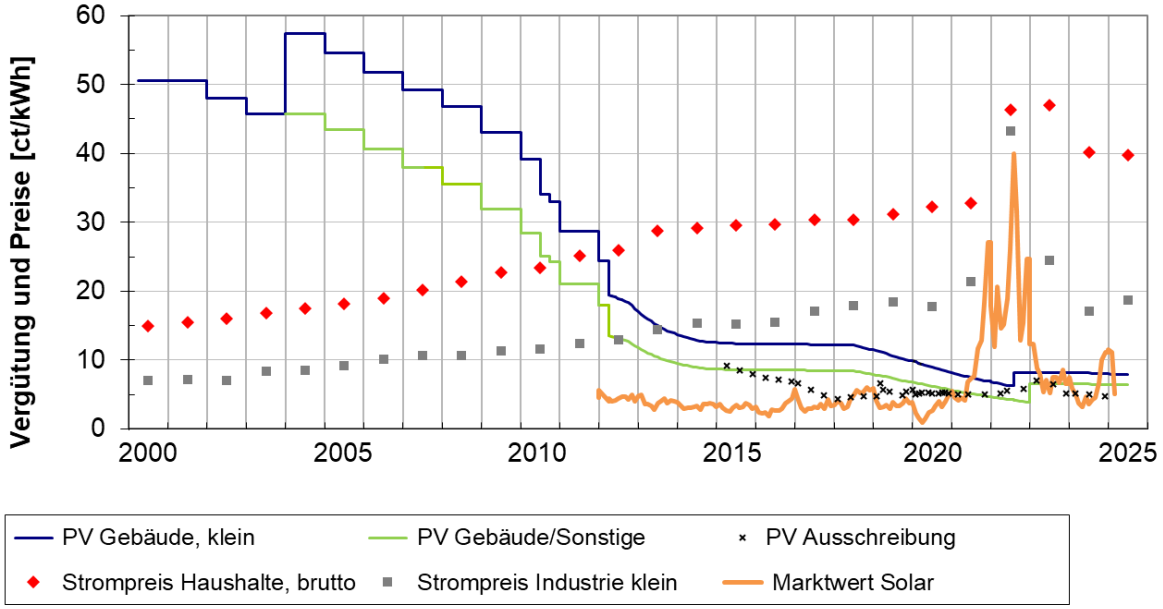


Abbildung 6: Feste EEG-Einspeisevergütung für PV-Strom nach dem Datum der Inbetriebnahme des Kraftwerks in aktuellen Anlagenklassen „Gebäudeanlagen mit Überschusseinspeisung bis 10 kW_P" und „Sonstige Anlagen bis 100 kW" aus [Netz2] und [BNA3], mittlere Vergütung in den Ausschreibungen der Bundesnetzagentur [BNA3], Strompreise [BMWK1], [BDEW1], Marktwert Solarstrom [NETZ1], BDEW Strompreisanalyse.

Seit Einführung des EEG im Jahr 2000 ist die nominale Vergütung für PV-Strom (ohne Inflationsbereinigung) aus neuen Kraftwerken um ca. 80 – 90 % gesunken (Abbildung 6). Die durchschnittliche Festvergütung für PV-Strom ist bis zum Jahr 2022 auf ca. 21,3 ct/kWh gesunken (Quelle: statista) und geht weiter zurück.
International wurde PV-Strom an Standorten mit hoher Solarstrahlung bereits zu Tiefstpreisen bis 1,12 €ct/kWh (Portugal) und 0,87 €ct/kWh (Saudi-Arabien) angeboten. Zum Vergleich: für das geplante Atomkraftwerk „Hinkley C", das im Jahr 2025 in Großbritannien in Betrieb gehen soll, wurde eine Einspeisevergütung von umgerechnet 12 ct/kWh zuzüglich Inflationsausgleich über die Dauer von 35 Jahren garantiert.

4.3 Preisbildung an der Strombörse und der Merit Order Effekt

PV-Strom, der über das EEG abgenommen wird, muss am Day-Ahead Markt der Börse gehandelt werden. Damit wird er zu „Graustrom", der Anbieter kann die nachhaltige Qualität „Grünstrom" nicht bepreisen. Für die Abschätzung der Erlöse aus dem Verkauf von PV-Strom wird ein mittlerer Strompreis ermittelt („Marktwert Solar" in Abbildung 6), auf Basis der an der Leipziger Strombörse (European Energy Exchange AG, EEX) erzielten Preise (Abbildung 7).

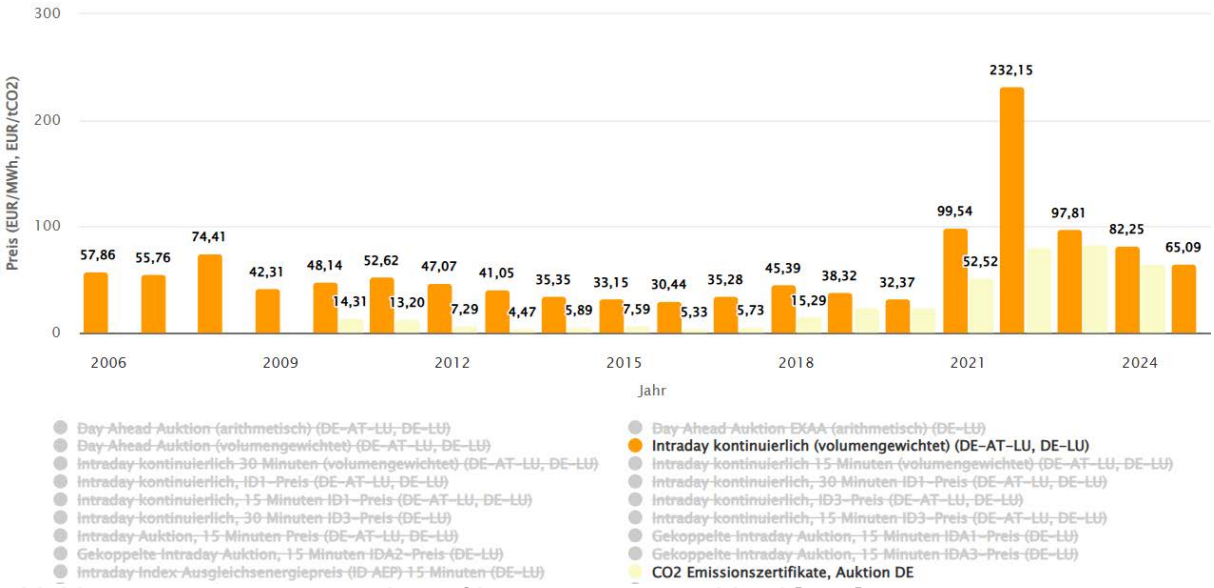


Abbildung 7: Börsenstrom- und Zertifikatpreise in Deutschland [ISE4].

Die laufende Preisfindung an der Börse erfolgt nach dem Prinzip des „Merit Order". Die Verkaufsangebote der Stromerzeuger für bestimmte Strommengen, in der Regel durch die jeweiligen Grenzkosten definiert, werden nach Preisen aufsteigend sortiert. Die Kaufangebote der Stromabnehmer werden absteigend sortiert. Der Schnittpunkt der Kurven ergibt den Börsenpreis für die gesamte gehandelte Menge. Das teuerste Angebot, das zum Zuge kommt, bestimmt somit die Gewinnmargen aller günstigeren Anbieter.

Die Einspeisung von Solarstrom hat gesetzlichen Vorrang, somit steht sie am Anfang der Angebotspreisskala. Mit fiktiven Grenzkosten gleich Null kommt Solarstrom immer zum Zug. Wenn aber Solarstrom kommt, kommt er massiv in der Tageskernzeit, wenn die Last – und mit ihr früher auch der Strompreis - die Mittagsspitze erreicht. Dort verdrängt er überwiegend teure Spitzenlastkraftwerke (besonders Gaskraftwerke und Pumpspeicher). Diese Verdrängung senkt den gesamten resultierenden Börsenstrompreis und führt zum Merit-Order-Effekt der PV-Einspeisung. Mit den Preisen sinken die Einnahmen aller fossiler Stromerzeuger (Gas, Kohle, Öl), aber auch die Einnahmen für Strom aus EE (Solarstrom, Wind-, Wasserkraft). Weiterhin verringert Solarstrom die Auslastung insbesondere der klassischen Spitzenlastkraftwerke (Gas, Wasser).
Mit weiterem Zubau volatiler EE wird deren Marktwertfaktor mittelfristig sinken, weil das Stromangebot zu Zeiten hoher Einspeisung wächst und sowohl PV-, als auch Windstrom für sich genommen eine hohe Gleichzeitigkeit aufweisen. Für PV wird ein Absinken des Marktwertfaktors auf knapp 0,8 bis 2026 erwartet [ÜNB1].
Mit zunehmender Einspeisung von EE-Strom wurde die Leipziger Strombörse zu einer Residualstrombörse. Sie generiert einen Preis für die bedarfsgerechte Ergänzung der erneuerbaren Stromerzeugung und bildet nicht mehr den Wert des Stroms ab.

4.4 Ermittlung der Differenzkosten

Die Vergütung für PV-Stromeinspeisung nach EEG wird jährlich von den Übertragungsnetzbetreibern ermittelt. Die Differenzkosten sollen die zu deckende Lücke zwischen Vergütung und Erlösen für PV-Strom erfassen. Die zunehmende Einspeisung von PV-Strom und Windstrom senkt die Börsenpreise über den Merit-Order-Effekt und erhöht damit paradoxerweise die rechnerischen Differenzkosten; je mehr PV installiert wird, umso teurer erscheint nach dieser Methode die kWh PV-Strom in der Förderung.
Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der Differenzkosten für die jährliche Vergütung des erzeugten PV-Stroms. Nach einem starken Anstieg bis zum Jahr 2014 hat sich der Betrag zwischen 9 und 11 Mrd. € stabilisiert.

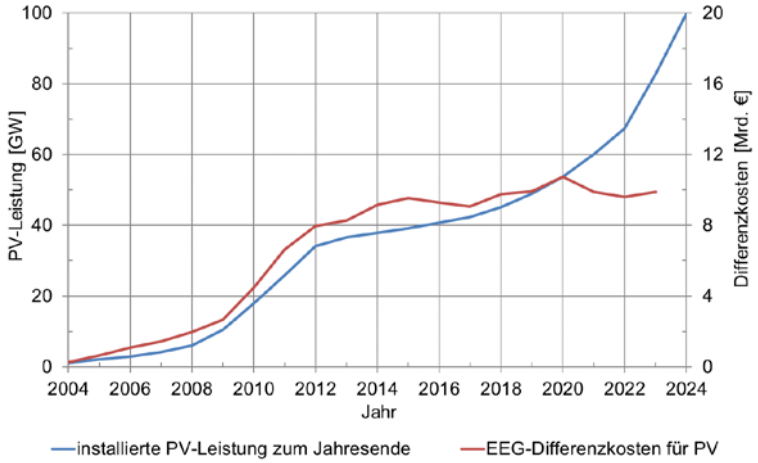


Abbildung 8: PV-Ausbau und Differenzkosten, Daten aus [BMWK1], [BMWK3], Mittelfristprognosen der ÜNB.

Der Wert von PV-Strom wird über den Börsenstrompreis bemessen. Nach dieser Methode wurde sein Wert systematisch unterschätzt: zum einen beeinflusst der PV-Strom den Börsenpreis längst in die gewollte Richtung, nämlich nach unten. Zum anderen blendet der Börsenpreis wichtige externe Kosten der fossilen und nuklearen Stromerzeugung noch weitgehend aus (Abschnitt 5.2).
Eine Untersuchung der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg hat gezeigt, dass in den Jahren 2011 bis 2018 insgesamt 157 Mrd. € an EEG-Differenzkosten angefallen sind, während in der gleichen Zeit Kosteneinsparungen von 227 Mrd. € durch die Einspeisung von PV- und Windstrom realisiert wurden [FAU]. Unter dem Strich sparten die Verbraucher somit Kosten in Höhe von 71 Mrd. €.

4.5 EEG-Umlage

Die Differenz zwischen Vergütungszahlungen und Verkaufserlösen für EE-Strom, ergänzt um weitere Positionen, wurde bis zum Juni 2022 über die EEG-Umlage ausgeglichen. Die Umlage trugen jene Stromverbraucher, die sich nicht befreien lassen konnten. Die Politik hatte definiert, wer den Umstieg auf erneuerbare Energien finanzieren musste [BAFA]. Sie hatte entschieden, energieintensive Industriebetriebe mit einem hohen Stromkostenanteil weitgehend von der EEG-Umlage zu befreien. Im Jahr 2021 wurde damit 44 % des Industrieverbrauchs privilegiert. Diese umfassende Befreiung erhöhte die Belastung für andere Stromkunden, insbesondere für Privathaushalte. Letztverbraucher mussten auf die Umlage zusätzlich 19 % Umsatzsteuer entrichten.
Im Jahr 2021 gab es erstmalig einen Zuschuss aus dem Bundeshaushalt (Energie- und Klimafond, EKF) in Höhe von 10,8 Mrd. € für das Umlagekonto. Ab Juli 2022 wurde die EEG-Umlage abgeschafft und die Differenzkosten werden aus dem EKF und dem Bundeshaushalt gedeckt.

5. Subventionen und Strompreise

5.1 Wird PV-Strom subventioniert?

Ja, seit dem Jahr 2021.
Eine Subvention ist definiert als eine Leistung aus öffentlichen Mitteln. Bis einschließlich 2020 kam die Förderung zur PV-Stromerzeugung jedoch nicht aus öffentlichen Mitteln, sondern aus einer selektiven Verbrauchsumlage (Abschnitt 4.5), die zum Teil auch für selbst hergestellten und verbrauchten PV-Strom erhoben wurde. Ein Teil der Energieverbraucher zahlten eine Zwangsabgabe für die notwendige Transformation unseres Energiesystems. Diese Sichtweise wurde auch von der EU-Kommission bestätigt. Die Höhe der Umlage entsprach nicht der gesamten Vergütung, sondern den Differenzkosten. Auf der Kostenseite betragen die kumulierten Differenzkosten der Einspeisevergütung für PV-Strom bis einschließlich 2020 ca. 100 Mrd. € [BMWK3]. Im Jahr 2021 gab es erstmalig einen Beitrag aus dem EKF für das EEG-Konto (Abschnitt 4.5). Die Einnahmen des EKF

stammen aus dem Emissionshandel und aus Bundeszuschüssen, damit greift ab 2021 eine Subvention. Im Jahr 2020 errichtete EnBW mit dem Solarpark „Weesow-Willmersdorf" das erste große PV-Kraftwerk in Deutschland ohne Stromabnahme über das EEG. Es handelt sich um ein 187 MW_P Projekt in Brandenburg [EnBW1].

5.2 Wird die fossile Stromerzeugung subventioniert?

Ja, dabei sind die zukünftigen Kosten der Subvention schwer abzusehen.
Die Politik beeinflusst die Strompreise aus fossilen und nuklearen Kraftwerken. Politische Entscheidungen definieren den Preis von CO_2-Zertifikaten, die Auflagen zur Filterung von Rauch oder zur Endlagerung von CO_2, die Besteuerung von Atomstrom oder die Versicherungs- und Sicherheitsauflagen für Kernkraftwerke. Die Politik legt damit fest, inwieweit Stromverbraucher die schwer fassbaren Risiken und Lasten fossiler und nuklearer Stromerzeugung tragen. Sie entstehen größtenteils in der Zukunft, durch die CO_2-induzierte Klimakatastrophe, die Endlagerung von Atommüll und Ewigkeitslasten aus dem Steinkohlebergbau.
Im Jahr 2005 wurde ein EU-weiter Emissionshandel (European Union Emissions Trading System, EU ETS) eingeführt, um den CO_2-Ausstoß zu verteuern und die Kosten ansatzweise zu internalisieren. Wegen eines Überangebots an Zertifikaten war der Preis jedoch bis Ende 2017 zusammengebrochen und damit praktisch wirkungslos (Abbildung 7). Europaweit deckt der Zertifikatehandel zudem nur 45 % der Treibhausgasemissionen ab, weil wichtige Sektoren jenseits der Industrie und der Energiewirtschaft ausgenommen sind [UBA5]. Eine Ausweitung auf ca. 85 % der Emissionen ist mittlerweile beschlossen.
In Deutschland startete im Januar 2021 mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) ein nationales Emissionshandelssystem für die Sektoren Wärme und Verkehr. Betrachtet werden initial nur Heizöl, Erdgas, Benzin und Diesel, ab 2023 auch Kohle- und Abfallbrennstoffe. Seit 01.01.2024 gilt ein Festpreis pro Emissionszertifikat von 45 Euro im Jahr 2024 und 55 Euro im Jahr 2025.
Diesen Preisen stehen erheblich höhere Kosten gegenüber, verursacht durch Klimaschäden und die notwendige Rückführung des CO_2 aus der Atmosphäre:

1) Die direkten und indirekten Folgekosten des globalen Klimawandels, die auch auf Deutschland zukommen, sind schwer abschätzbar. Nach Berechnungen des Umweltbundesamtes verursacht die Emission einer Tonne CO_2 Schäden von rund 195 – 680 €/t, je nach Höher- oder Gleichgewichtung der Wohlfahrt heutiger gegenüber zukünftigen Generationen [UBA3]. In Deutschland wurden im Jahr 2019 knapp 810 Mio. t Kohlendioxid und CO_2-Äquivalente emittiert, mit entsprechenden Schäden von 157 Mrd. € bzw. 551 Mrd. €, je nach Wohlstandsgewichtung. Für die Braunkohle-Stromgewinnung mit einem Emissionsfaktor von 1075 g CO_2/kWh (Abbildung 37) liegen die abgeleiteten CO_2-Preisaufschläge bei 21 bzw. 73 ct/kWh. Unter Berücksichtigung der externen Effekte lagen die gesamtgesellschaftlichen Kosten für Braunkohlestrom damit um ein Vielfaches höher als die reinen Stromgestehungskosten von 3,4 – 4,7 ct/kWh [FÖS2].

2) Alle Klimaschutzszenarien gehen davon aus, dass zur Eindämmung der Klimakrise eine Rückführung von CO_2 aus der Atmosphäre (Direct Carbon Capture, DCC) notwendig sein wird. Potenziale für eine permanente Rückführung ohne weitere Eingriffe in die Biosphäre bietet das Direct Air Carbon Capture and Sequestration (DACCS) mit Luftfilter-Anlagen (Abbildung 9). In Pilotanlagen kostet die Rückführung über DACCS aktuell ca. 550 €/t, das Kostenpotenzial bei erfolgreicher Skalierung wird auf 90 – 260 €/t [MCC] geschätzt. Einige Fragen zur Endlagerung des rückgeführten CO_2 sind noch offen.

Eine Studie des Internationalen Währungsfonds schätzt die weltweiten Subventionen für Kohle, Erdöl und Erdgas inkl. externer Kosten im Jahr 2020 auf 5,9 Billionen US$ [IMF].

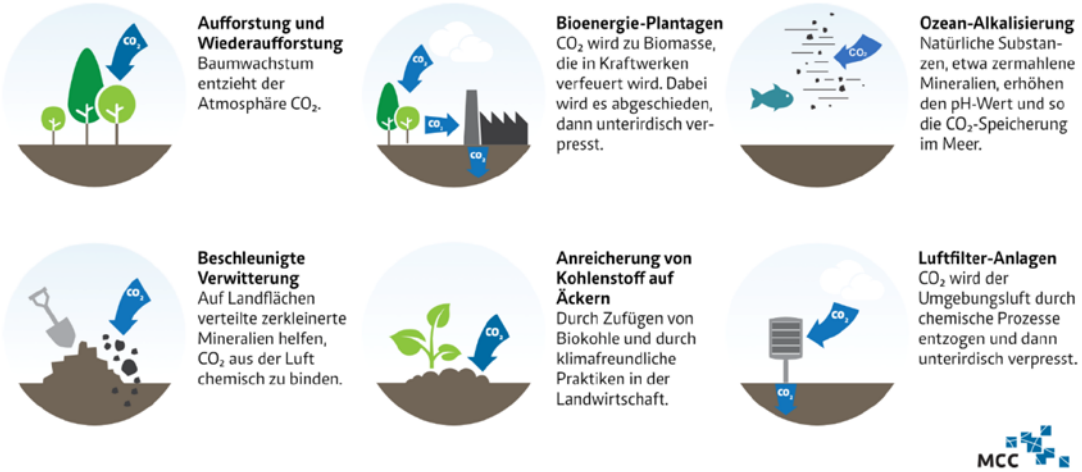


Abbildung 9: Verfahren zur Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre und Einlagerung von Kohlenstoff [MCC].

5.3 Verteuert der PV-Ausbau den Strombezug?

Nicht direkt, seit Abschaffung der EEG-Umlage Mitte 2022 enthält der Strompreis keine Bestandteile zur Vergütung von PV-Strom.
Ein Musterhaushalt mit einem Jahresverbrauch von 3.500 Kilowattstunden zahlt im Jahr 2025 einen durchschnittlichen Strompreis von **39,8 ct/kWh** brutto inkl. Grundpreis [BDEW1], Abbildung 10 zeigt eine beispielhafte Preisstruktur.
Die Stromsteuer wurde 1999 eingeführt, um Energie durch höhere Besteuerung zu verteuern, die Einnahmen fließen überwiegend in die Rentenkasse. Auf die Stromsteuer entrichten Privathaushalte Mehrwertsteuer. Die Konzessionsabgabe wird als Entgelt für die Nutzung öffentlicher Wege erhoben. Die Stromnetzentgeltverordnung (Strom-NEV, §19) dient der Entlastung stromintensiver Industriebetriebe zu Lasten der übrigen Letztverbraucher. Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) fördert den Betrieb von KWK-Anlagen zur Stromerzeugung. Die Netzentgelte sind in den letzten Jahren stark angestiegen, darin

sind auch Kosten für die lokale Ertüchtigung von Stromnetzen enthalten, die dem PV-Ausbau dienen.
Der Strompreis für Privathaushalte liegt in Deutschland um ca. 50 % höher als im europäischen Durchschnitt (Quelle: stromreport.de, Betrachtungsjahr 2020), allerdings liegt hier auch die Kaufkraft pro Einwohner um 60 % höher (Quelle: statista.de, Betrachtungsjahr 2019). Berücksichtigt man Strompreis und Kaufkraft, so liegt Deutschland im europäischen Mittelfeld. Hinzu kommt hier die hohe Versorgungssicherheit, in Niedrigpreisländern sind Stromausfälle an der Tagesordnung.

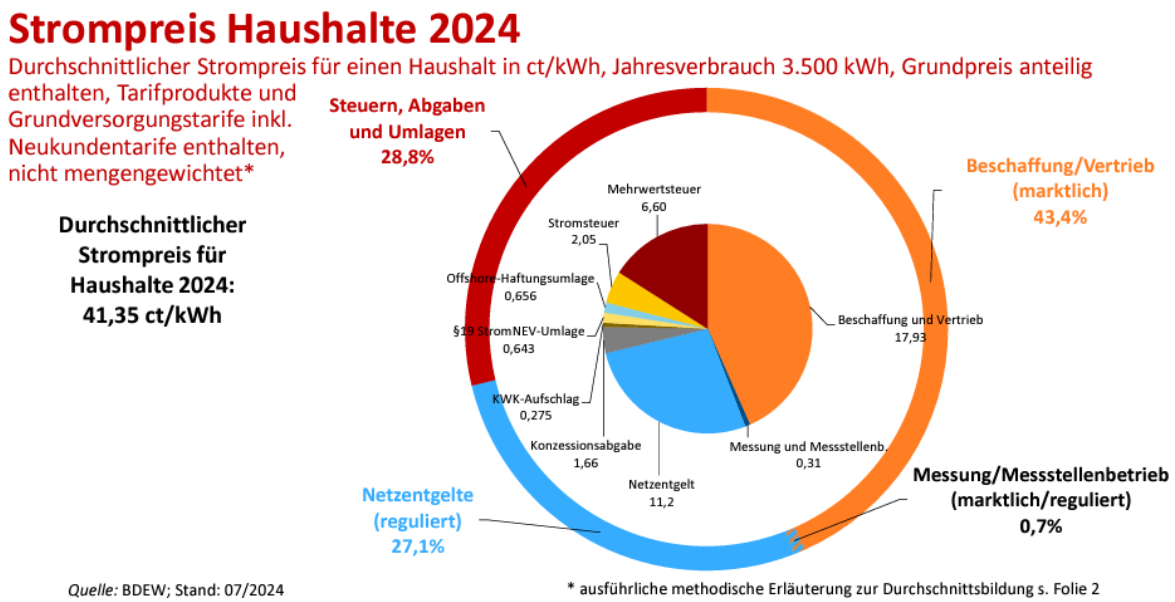


Abbildung 10: Zusammensetzung des durchschnittlichen Haushaltsstrompreises im Jahr 2024 [BDEW1].

6. Exportieren wir massiv PV-Strom ins europäische Ausland?

Nein.
Die Monatswerte der Energy Charts (www.energy-charts.de) zeigen, dass der Stromimportsaldo im Sommer auffällig hoch liegt, also in Monaten mit einer besonders hohen PV-Stromproduktion (Abbildung 11).

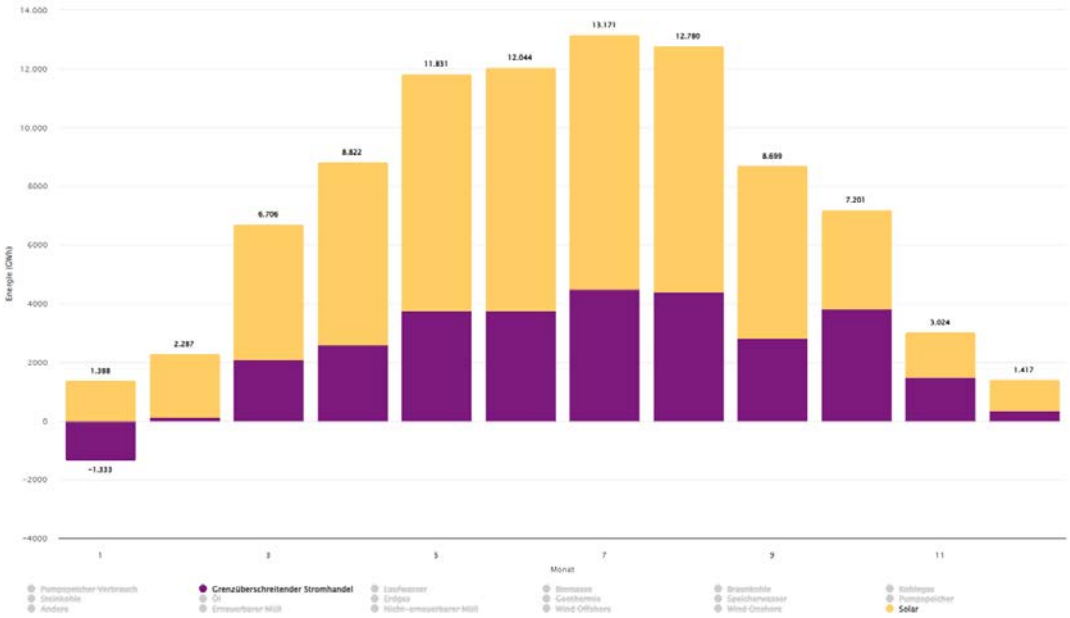


Abbildung 11: Nettostromimport (violett) und Solarstromproduktion (gelb) im Jahr 2024 für Deutschland [ISE4].

7. Können kleine PV-Anlagen attraktive Renditen bringen?

Ja.
Grundsätzlich können kleine PV-Anlagen Erträge über die EEG-Vergütung für Einspeisung in das Stromnetz und über die Verringerung des Strombezugs dank Eigenverbrauch bringen. Anlagen ohne Eigenverbrauch („Volleinspeiser") erhalten eine höhere Vergütung als Anlagen mit Eigenverbrauch („Teilleinspeiser", Abbildung 12). Aufgrund der stark gesunkenen Preise für PV-Module, der gestiegenen Strombezugskosten bzw. der angehobenen Vergütung für Volleinspeiser sind attraktive Renditen möglich.
Eigenverbrauch lohnt umso mehr, je größer die Differenz zwischen den Bezugskosten für Strom und den Stromgestehungskosten der PV-Anlage ausfällt. Bei Systemen ohne Speicher hängt das Eigenverbrauchspotenzial von der Koinzidenz zwischen Erzeugungs- und Verbrauchsprofil ab. Haushalte erreichen abhängig von der Anlagengrößen 20 – 40 % Eigenverbrauch bezogen auf den erzeugten Strom [HTW]. Größere Anlagen erhöhen den Deckungsgrad des gesamten Strombedarfs mit PV-Strom, verringern jedoch den Eigenverbrauchsanteil. Gewerbliche oder industrielle Verbraucher erreichen besonders dann hohe Eigenverbrauchswerte, wenn ihr Verbrauchsprofil am Wochenende nicht wesentlich einbricht (bspw. Kühlhäuser, Hotels und Gaststätten, Krankenhäuser, Serverzentren, Einzelhandel). Energiespeicher- und Transformationstechnologien bieten erhebliche Potenziale zur Steigerung des Eigenverbrauchs (vgl. Abschnitt 22.3).
Der Ertrag einer Anlage fällt in sonnenreichen Regionen höher aus. Tatsächlich überträgt sich der regionale Unterschied in der Jahressumme der Einstrahlung nicht 1:1 auf den spezifischen Ertrag (kWh/kW$_P$, Abschnitt 28.5), weil bspw. auch die Betriebstemperatur der Module, Verschmutzungseffekte oder die Dauer der Schneeauflage eine Rolle spielen.

Zur groben Abschätzung der abgezinsten (diskontierten) Stromgestehungskosten (Abbildung 12) wurden folgende Annahmen getroffen:

- optimale Ausrichtung der Fläche bezüglich Jahresertrag (ca. Süd 30°)
- mittlere Jahressumme der horizontalen Globalstrahlung 1100 kWh/m²/a
- Performance Ratio 85 % (Abschnitt 28.7)
- jährliche Anlagendegradation bezüglich Ertrag 0,5 %
- Nutzungsdauer 20 Jahre
- lfd. jährliche Kosten 1 % des Anlagenpreises
- Inflationsrate 2 %
- nominaler kalkulatorischer Zinssatz 4 % (Mittelwert aus Eigen- und Fremdkapital)

Die Abschätzung der Stromgestehungskosten (LCOE – Levelized Costs of Electricity) erfolgt auf Basis der Kapitalwertmethode. Dabei werden die laufenden Ausgaben und die LCOE über den angegebenen Zinssatz auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme abgezinst (diskontiert). Bei vollständiger Finanzierung durch Eigenkapital entspricht der kalkulatorische Zinssatz der erzielbaren Rendite. Zum Vergleich: die Bundesnetzagentur hat die Eigenkapitalrenditen für Investitionen in die Strom- und Gasnetze für Neuanlagen auf 6,91 Prozent vor Körperschaftsteuer festgelegt [BNA1].

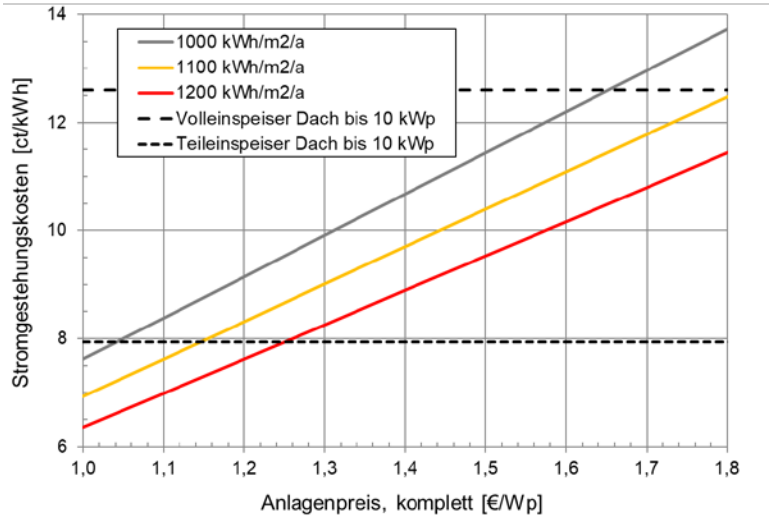


Abbildung 12: Abschätzung der Stromgestehungskosten für kleine PV-Anlagen unter verschiedenen Einstrahlungsbedingungen, dazu Festvergütungen gemäß EEG.

Die Rendite einer PV-Anlage ist während der EEG-Vergütungsdauer nicht risikofrei. Weder Herstellergarantien noch Anlagen-Versicherungen senken das Investorenrisiko auf Null. Die Verwertung des Stroms ab dem 21. Betriebsjahr wird erstmals durch das [EEG2021] geregelt. Für die Kalkulation des Weiterbetriebs „ausgeförderter" Anlagen spielt die Eigenverbrauchsfähigkeit eine große Rolle [SCBW].

8. Ist die Versorgung mit Solarkomponenten gesichert?

Nein, China hat eine kritische Monopolstellung aufgebaut.
Der komplette PV-Wertschöpfungszyklus auf Basis der Silizium-Wafertechnologie (Abbildung 13) beginnt mit der Produktion von hochreinem Polysilizium und setzt sich fort mit der Kristallisation von Siliziumblocks (Ingots) und dem Sägen von Silizium-Wafer. Es folgen die Zellproduktion und die Modulproduktion. Soll die Abdeckung von mehr als einer Stufe betont werden, so spricht man von einer (vertikal) integrierten PV-Produktion.

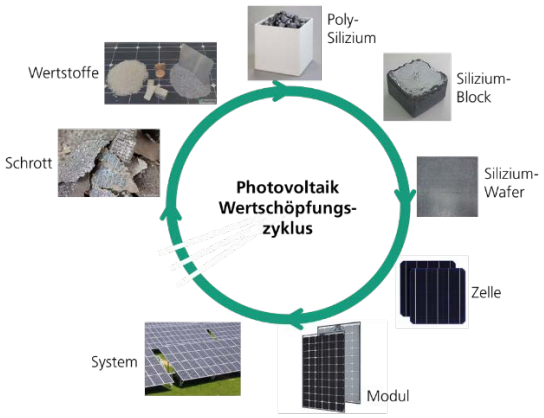


Abbildung 13: Wertschöpfungszyklus für die Silizium-Photovoltaik.

Eine Vielzahl von Material- und Komponentenherstellern sind Teil des erweiterten PV-Wertschöpfungszyklus, sie liefern bspw. Silberpasten für Solarzellen sowie spezielle Folien, Drähte, Solarglas und Anschlussdosen für Solarmodule. Weitere Akteure vervollständigen den Zyklus über zusätzliche Kraftwerkskomponenten bis zum Recycling:

1. Materialherstellung: Solarsilizium, Metallpasten, Verbinderdrähte, Kunststofffolien, Solarglas, Glasbeschichtung
2. Herstellung von Zwischen- und Endprodukten: Module, Kabel, Wechselrichter, Montagegestelle, Nachführsysteme
3. Maschinenbau für die Zell- und Modulproduktion
4. Installation (v. a. Handwerk)
5. Kraftwerksbetrieb und -wartung
6. Recycling

Im Jahr 2023 beherrschte China mit Marktanteilen jenseits 80% alle Wertschöpfungsstufen (Abbildung 14).

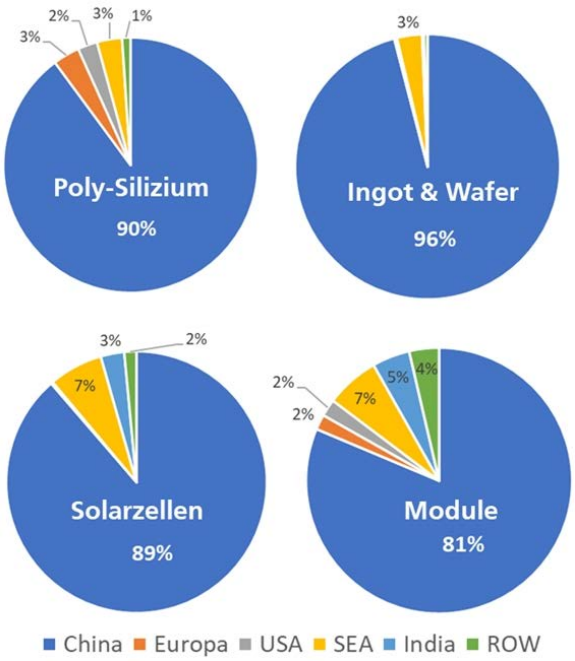


Abbildung 14: Produktionskapazität nach Wertschöpfungsstufen und Ländern, Daten: Wood Mackenzie, 2023

Während es um das Jahr 2010 noch eine vollständige PV-Lieferkette in Deutschland und Europa gab, wurde die Produktion einiger Vorprodukte aufgrund der zwischenzeitlich gesunkenen regionalen Nachfrage eingestellt. Nennenswerte Anteile am Weltmarkt halten noch Wechselrichterhersteller und der Siliziumhersteller Wacker.
Abbildung 15 zeigt die aktuelle Produktionslandschaft in Deutschland und anderen europäischen Staaten für die wichtigsten Komponenten und Zwischenprodukte. In Europa gibt es kleine Modulfertigungen und kaum Zell- oder Waferproduktion. Ein Einbruch im Handel mit China würde den PV-Ausbau in Deutschland ernsthaft gefährden und zusätzlich die hiesige Modulproduktion wegen fehlender Vorprodukte stark beeinträchtigen.

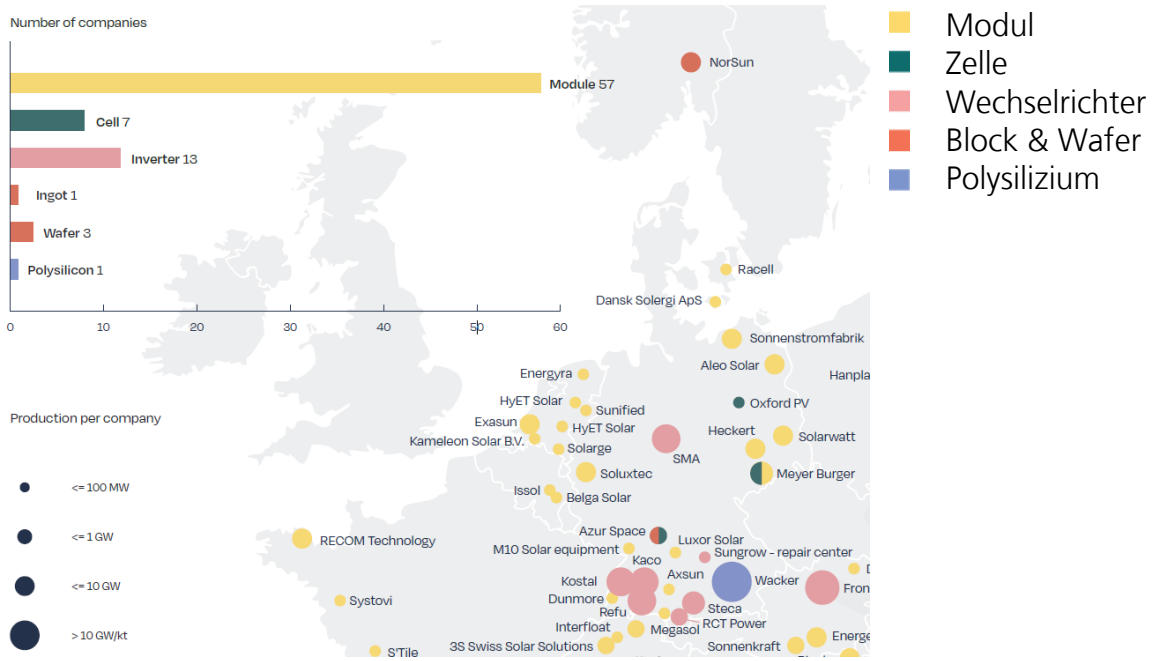


Abbildung 15: PV Produktionsstandorte in Deutschland und anderen europäischen Staaten [SPE].

9. Erzeugt die PV-Branche nur Arbeitsplätze in Asien?

Nein, aber Deutschland hat in den Zehnerjahren viele Arbeitsplätze in der PV-Produktion verloren.

Im Jahr 2023 lag die Bruttobeschäftigung im PV-Sektor bei 98.600 [GWS]. In den Zehnerjahren sind in Deutschland viele Arbeitsplätze durch Firmenschließungen und Insolvenzen verloren gegangen, betroffen waren erst Zell- und Modulproduzenten, dann folgte der Maschinenbau.

Eine vertikal integrierte 10-GW-Produktion vom Silizium-Block über Wafer und Zelle bis zum Modul würde nach Berechnungen des Fraunhofer ISE ca. 7500 Vollzeitarbeitsplätze schaffen [ISE8]. Für die Installation von 10 GW PV werden nach einer Studie der EuPD Research auf Basis von Zahlen aus dem Jahr 2018 ca. 46.500 Beschäftigte in Vollzeit benötigt [EuPD]. Im Jahr 2022 beschäftigte die Solarbranche (PV und Thermie) 84.100 Menschen [Pressemeldung BMWK vom 24.1.2024].

Die Hoffnung, dass die Kombination aus EEG, Investitionsbeihilfen in den neuen Bundesländern und Forschungsförderung ausreichen, um Deutschland als einen weltweit führenden Produktionsstandort für PV-Zellen und Module zu etablieren, schien sich noch im Jahr 2007 zu erfüllen, als eine deutsche Firma die internationale Rangliste nach Produktionsvolumen anführte. Seither haben deutsche Hersteller dramatisch an Marktanteilen verloren, als Folge der entschiedenen Industriepolitik im asiatischen Raum und der dort generierten massiven Investitionen in Produktionskapazitäten. Die Lohnkosten spielen in dieser Entwicklung eine untergeordnete Rolle, da die PV-Produktion einen sehr hohen Automatisierungsgrad erreicht hat. Schlüsselfertige Produktionslinien, die sehr gute PV-Module

liefern, kann man seit einigen Jahren „von der Stange“ kaufen, was einen schnellen Technologietransfer ermöglicht hat.
Effektive Gesetze zur Einspeisevergütung haben in Deutschland und Europa massive Investitionen in PV-Kraftwerke ausgelöst. Hier fehlte aber die wirtschaftspolitische Flankierung, um auch bei Produktionskapazitäten wettbewerbsfähig zu bleiben. Dafür ist es China und anderen asiatischen Staaten durch Schaffung attraktiver Investitions- und Kreditbedingungen gelungen, viele Milliarden inländisches und ausländisches Kapital für den Aufbau von großskaligen Produktionslinien zu mobilisieren.
Trotz der hohen Importquote bei PV-Modulen bleibt ein großer Teil der mit einem PV-Kraftwerk verbundenen Wertschöpfung im Land. Langfristig werden sinkende Herstellkosten von PV-Modulen auf der einen, steigende Frachtkosten und lange Frachtzeiten auf der anderen Seite die Wettbewerbsposition für die Modulherstellung in Deutschland verbessern.

10. Welche Fördermittel fließen in die PV-Forschung?

Im Jahr 2023 hat die Bundesregierung 73 Mio. Euro in die Förderung der Photovoltaikforschung investiert (Abbildung 16), den größten Anteil hatten die Produktionstechnologien.

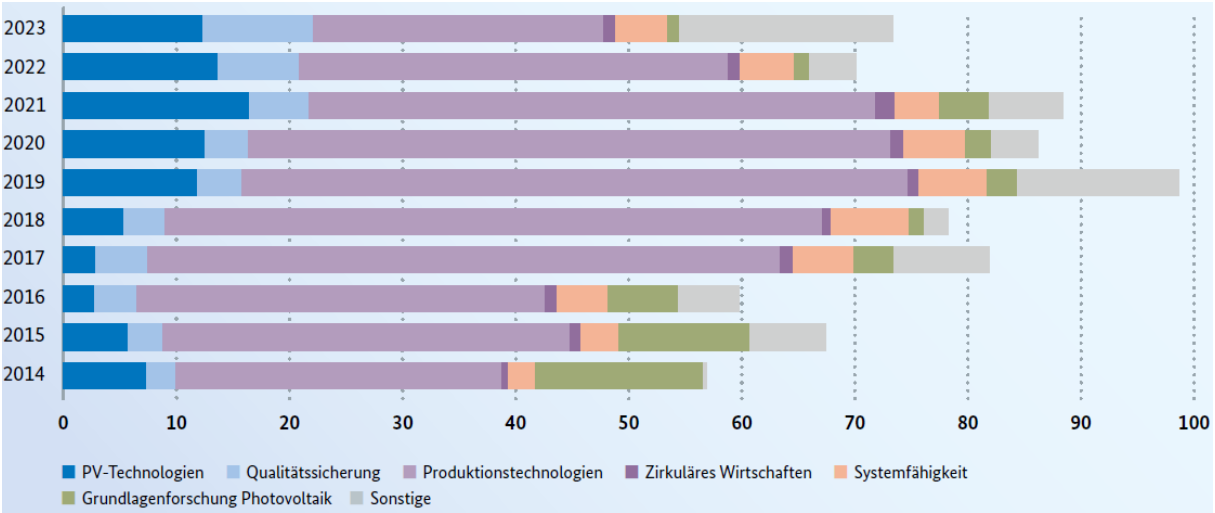


Abbildung 16: Fördermittel für Photovoltaikforschung in Mio. Euro [BMWK2].

11. Überlastet PV-Strom unser Energiesystem?

An den zahlreichen Baustellen der Energiewende wird mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten gearbeitet. Der Ausbau der Photovoltaik ist auf Kurs, der Umbau des Energiesystems und die Anpassung des Strommarktdesigns halten nicht Schritt. Dadurch kommt es in den sonnenreichen Monaten um die Mittagszeit immer häufiger zu negativen Strompreisen an der Leipziger Börse, zu Stromertragsverlusten durch Abregelung und zu Verzögerung beim Bau von PV-Kraftwerken mangels Anschlusskapazitäten.
An vielen Stellen fehlen Preissignale oder technische Voraussetzungen für eine bedarfsgerechtere Solarstromproduktion (zur Glättung der Mittagsspitze), für eine netzdienliche Lastflexibilisierung und einen netzdienlichen Betrieb der bereits in großer Zahl vorhandenen stationären und mobilen Batteriespeicher. Notwendige Maßnahmen werden im Abschnitt „22.3 Transformationsschritte“ besprochen.

11.1 Übertragung und Verteilung

Die meisten Solarstromanlagen in Deutschland sind an das Niederspannungsnetz angeschlossen, Abbildung 17 zeigt ihre Größenverteilung. Viele Anlagen erzeugen Solarstrom dezentral und verbrauchsnah, sie stellen kaum Anforderungen an einen Ausbau des Übertragungs- oder Mittelspannungsnetzes und benötigen keine langen Anschlussleitungen.
Eine hohe PV-Anlagendichte in einem Niederspannungsnetz kann an sonnigen Tagen wegen des hohen Gleichzeitigkeitsfaktors dazu führen, dass die Stromproduktion den Stromverbrauch lokal übersteigt. Transformatoren speisen dann Leistung zurück in das Mittelspannungsnetz. Große PV-Kraftwerke oder lokale Häufungen von Anlagen in dünn besiedelten Gebieten erfordern stellenweise eine Verstärkung des Netzes, der Trafostationen oder alternativ den Einsatz von stationären Batteriespeichern. Mit Batteriespeichern lassen sich Erzeugungsspitzen am Einspeisepunkt glätten oder die Einspeisemengen durch verstärkten Eigenverbrauch reduzieren.
Eine gleichmäßige Verteilung der PV-Installationen über die Netzabschnitte verringert den Bedarf für Kapazitätsausbau. Der PV-Ausbau sollte geografisch verbrauchsgerechter erfolgen, um die Verteilung des Solarstroms zu erleichtern. Pro Einwohner haben Brandenburg oder Mecklenburg-Vorpommern beispielsweise vier- bis fünfmal mehr PV-Leistung installiert als Nordrhein-Westfalen oder Hessen [ISE4].
Weil Sonneneinstrahlung und Windaufkommen lokal oft komplementär auftreten (11.2.2), ist es vorteilhaft, Solar- und Windstrom über den gleichen Einspeisepunkt zu führen. Hybride Kraftwerke, d.h. eine benachbarte Installation von PV- und Windkraftwerken, idealerweise in Verbindung mit einem Batteriespeicher, können die Anforderungen an Netzausbau und Transformatorkapazität deutlich reduzieren. Die Kombination sorgt für eine bessere Auslastung der Infrastruktur zur Einspeisung.

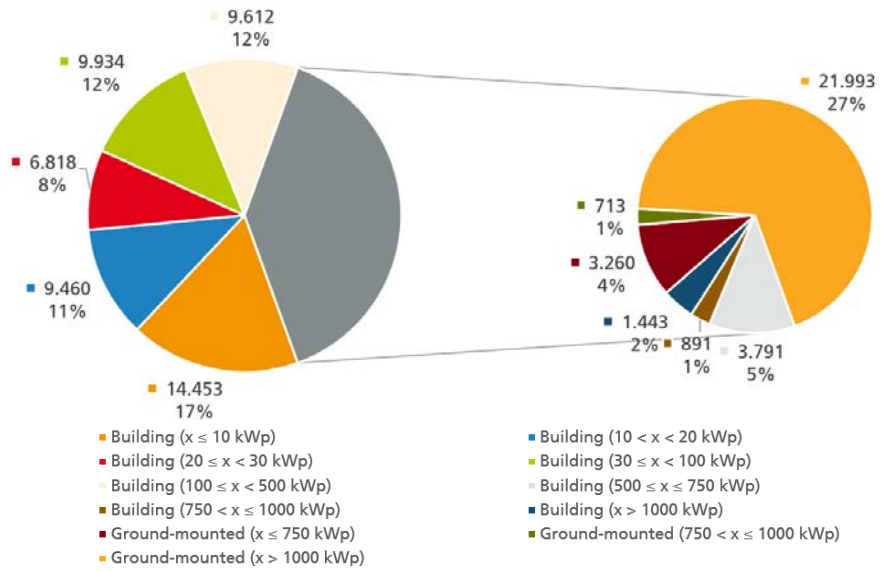


Abbildung 17: Verteilung der installierten PV-Leistung Ende 2023 nach Anlagengröße [ISE5].

11.2 Volatilität

11.2.1 Ist Solarstrom-Produktion planbar?

Ja.
Für einzelne Kraftwerke oder regionale Cluster können zuverlässige Leistungsprognosen auf Basis von Satellitendaten erstellt werden, bei Bedarf ergänzt durch lokale Wolkenkameras und Monitoringstationen. Auch auf nationaler Ebene ist die Erzeugung von Solarstrom dank verlässlicher Wettervoraussagen und Ertragsmodelle sehr gut planbar (Abbildung 18).

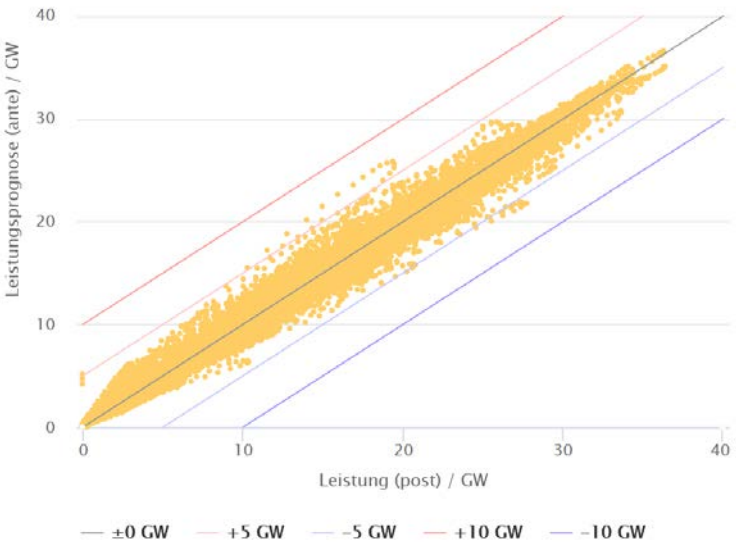


Abbildung 18: Stündliche Stromproduktion im Jahr 2021 [ISE4].

Aufgrund der dezentralen Erzeugung können regionale Änderungen in der Bewölkung nicht zu gravierenden Schwankungen der deutschlandweiten PV-Stromproduktion führen. Auch die Auswirkungen einer Sonnenfinsternis mit ihrem hohen, überregionalen Gleichzeitigkeitsfaktor lassen sich zuverlässig prognostizieren und kompensieren.

11.2.2 Ergänzen sich Sonnen- und Windstrom?

Ja.
Klimabedingt korrelieren in Deutschland Sonneneinstrahlung und Windstärke negativ auf Zeitskalen von Stunden bis Monaten.
Auf **Viertelstundenbasis** gelangten im Jahr 2021 bei einer mittleren installierten Leistung von ca. 57 GW_P PV und 63 GW_P Windkraft am Jahresende in der Summe praktisch nie mehr als 60 GW Leistung (d.h. 50% der Nennleistung PV + Wind) in das Stromnetz (Abbildung 19). Auf **Stundenbasis** betrachtet wären bei einer Begrenzung auf maximal 40 GW gemeinsame Leistung PV + Wind (d.h. 33% der Nennleistung PV + Wind) weniger als 1 % des erzeugten Stroms verloren gegangen.

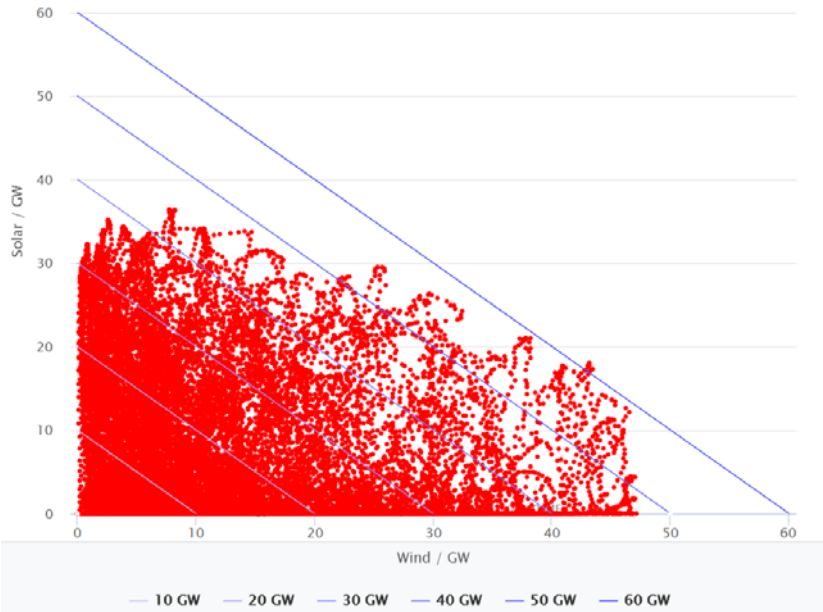


Abbildung 19: Mittlere Leistung für die Einspeisung von Sonnen- und Windstrom im Jahr 2021, 15-Minuten-Werte [ISE4].

Auch auf **Tagesbasis** führt die Kombination von PV- und Windstrom zu einer Stabilisierung des Ertrags. Während die relative mittlere absolute Abweichung der Tagesstromproduktion vom arithmetischen Mittel im Jahr 2021 bei PV 55 % und bei Wind 56 % betrug, lag der Wert für PV + Wind nur bei 37 %.
Abbildung 20 zeigt die **Monatssummen** der Stromproduktion aus PV und Windkraft, sowie die gleitenden Jahresmittelwerte. Die mittlere relative Abweichung der

Monatswerte vom gleitenden Jahreswert liegt für PV bei 53% und für Wind bei 30%. Die Summe aus PV- und Windstrom ist mit einem Wert von 14% deutlich stabiler als die einzelnen Sektoren.

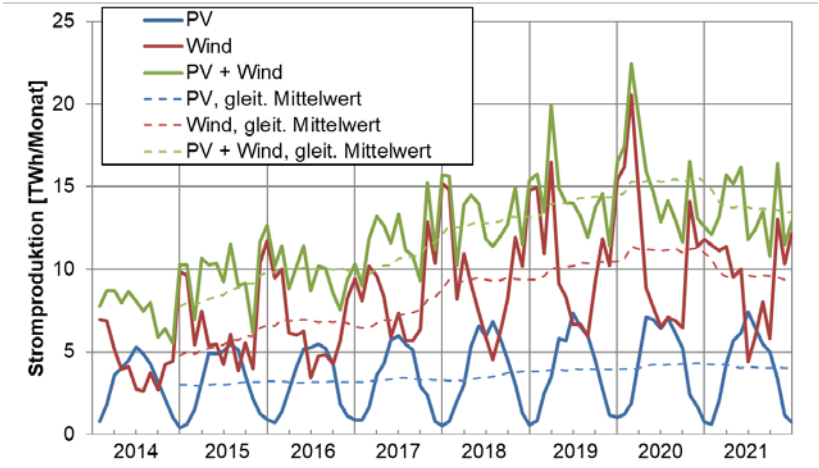


Abbildung 20: Monatssummen PV- und Windstromproduktion, Daten aus [ISE4].

11.3 Erreicht die Netzeinspeisung die installierte Leistung?

Nein, zumindest nicht deutschlandweit.
Angaben zur installierten PV-Leistung eines einzelnen Kraftwerks oder einer Region beziehen sich auf die DC-Seite der PV-Anlage, also auf die nominelle Leistung der Module (https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/haeufige-rechtsfrage/221). Wechselrichter werden jedoch zur besseren Auslastung häufig unterdimensioniert, so dass ihre nominelle AC-Leistung deutlich unter der nominellen DC-Leistung der angeschlossenen PV-Module liegt. Bei großen PV-Kraftwerken in Südausrichtung liegt das AC/DC-Verhältnis typischerweise um 85 %, sobald Batterien auf der DC-Seite dazukommen, kann das Verhältnis auf 50 % sinken. Kleine Hausdachanlagen mussten zeitweise auf 70 % abgeregelt werden bzw. müssen teilweise auf 60 % abgeregelt werden. Diese systematische Unterdimensionierung von Wechselrichtern bzw. Abregelung sorgt bereits für eine erhebliche Lücke zwischen installierter Leistung (DC) und maximaler Einspeisung.
Diese Lücke wird vergrößert durch technisch bedingte Verluste mit Performance Ratio Werten unter 90 %, (vgl. Abschnitt 28.7) und deutschlandweit oft uneinheitlicher Wetterlage. Eigenverbrauch reduziert die Einspeisung ebenfalls, auch wenn seine Potenziale zur Lastflexibilisierung noch nicht ausgeschöpft sind. Gleiches gilt für das Laden von DC-gekoppelten Batterien. Abbildung 21 zeigt den Trend der letzten Jahre für das Verhältnis der maximalen Einspeisung in das öffentliche Netz zur installierten PV-Leistung. Im Jahr 2024 lag die PV-Einspeisungsspitze mit 53 % deutschlandweit somit nur noch knapp über der halben installierten PV-Nennleistung. Auch mit dem Zubau von PV-Kraftwerken abseits der dominanten, flachgeneigten Süd-Ausrichtung wird das Verhältnis weiter sinken.

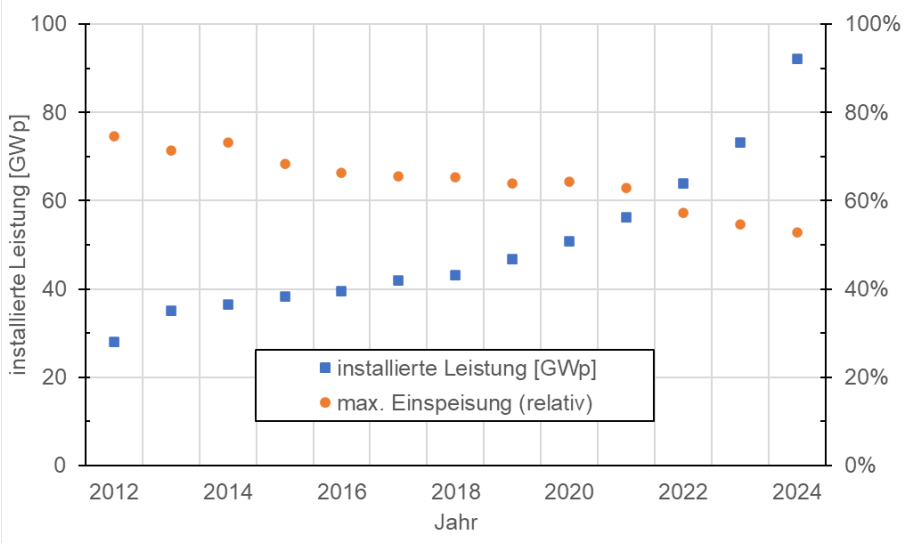


Abbildung 21: Jahresmaximum der Netzeinspeisung im Verhältnis zur installierten PV-Nennleistung am entsprechenden Monatsende, Daten aus [ISE4].

11.4 Geht viel PV-Strom durch Redispatch verloren?

Nein, aber die Mengen sind im Jahr 2024 deutlich gestiegen.
Bei Engpässen im Übertragungs- oder Verteilnetz müssen Erzeugungsanlagen auf der einen Seite der Engstelle gedrosselt, auf der anderen hochgefahren werden, um die Last zu bedienen („Redispatch"). Im Jahr 2024 wurde eine PV-Strommenge von 1,4 TWh im Redispatch abgeregelt [SMARD], das sind 1,9 % der PV-Netzeinspeisung im gleichen Jahr [ISE4]. Redispatch traf mit 7,9 TWh vor allem Windstrom, der überwiegend im Norden produziert wird und für den es noch keine ausreichenden Leitungskapazitäten nach Süddeutschland gibt. Bei hohem Windaufkommen entstehen erhebliche Kosten durch die Vergütung von abgeregeltem Strom im Norden sowie die Beschaffung des fehlenden Stroms im Süden (Redispatch-Maßnahmen).

11.5 Konflikte mit trägen Kraftwerken

Das Erzeugungsprofil von PV-Strom mit Höchstwerten um die Mittagszeit passt sehr gut in das Lastprofil des Stromnetzes. Allerdings nehmen die Konflikte mit trägen Kraftwerken zu, die einer schwankenden Residuallast aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nur sehr eingeschränkt folgen können. Ältere Kohlekraftwerke, insbesondere Braunkohlekraftwerke, können keine Regelenergie in einer wirtschaftlich vertretbaren Weise beisteuern. Auch Laufwasser- und die meisten Biomassekraftwerke bieten wenig Flexibilität. Grundsätzlich müssen jedoch die volatilen Erzeuger mit ihren vernachlässigbaren Grenzkosten Vorfahrt erhalten.
Diese ungelösten Konflikte können kurzzeitig zu deutlicher Überproduktion und negativen Börsenstrompreise führen (Abbildung 22).

Während Hitzeperioden war es in der Vergangenheit durch fossile und nukleare Kraftwerke zu einer kritischen Erwärmung der als Kühlreservoir genutzten Flüsse gekommen. Die in Deutschland installierte Photovoltaik hat dieses Problem beseitigt und kann solche Situationen auch in Nachbarländern wie Frankreich entspannen, weil sie die Auslastung der fossilen und nuklearen Kraftwerke besonders an Sommertagen grundsätzlich reduziert.

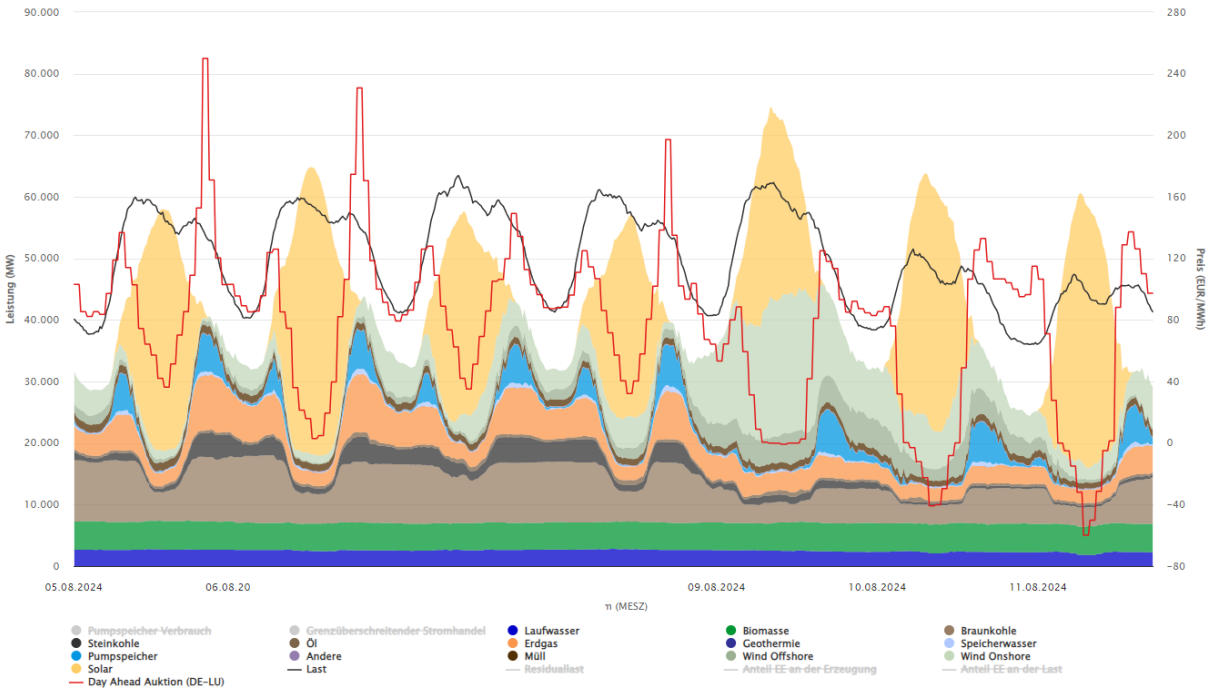


Abbildung 22: Beispiel für den Verlauf von Börsenstrompreisen, konventioneller und regenerativer Stromerzeugung der 32. Kalenderwoche 2024 [ISE4].

11.6 Muss der PV-Ausbau auf Speicher warten?

Nein, aber elektrische Energiespeicher erleichtern die Systemintegration von PV-Strom deutlich.

Investitionen in Maßnahmen zu Lastmanagement, in stationäre Batteriespeicher oder Pumpspeicherkraftwerke lohnen sich, wenn ausreichend häufige und große Preisdifferenzen beim Strombezug auftreten. In den Zehnerjahren wurden Investitionen in neue Pumpspeicher sogar zurückgestellt, weil kein wirtschaftlicher Betrieb möglich war.

Weiterer Ausbau von PV und Windkraft wird die Preise an der Strombörse häufiger und massiver senken. Auf der anderen Seite wird eine Verteuerung des fossil erzeugten Stroms durch CO_2-Zertifikate oder -Steuern die EEX-Preise zu Zeiten hoher Residuallast anheben. Preisspreizung schafft Anreize für Lastverschiebungen, Speicherbetrieb und für die temporäre Produktion von grünem Wasserstoff. Wird die Spreizung über Tarifgestaltung an den Endabnehmer weitergereicht, werden Lastverschiebung und Speicherbetrieb auch für

ihn interessant. Im Ergebnis steigt die Aufnahmefähigkeit für volatilen Solar- und Windstrom.

11.7 Gefährdet volatiler Solarstrom die Versorgungssicherheit?

Bisher nicht, es wird jedoch immer wichtiger, die mittägliche Erzeugungsspitze durch Lastverschiebung, Speicherung oder Abregelung zu dämpfen.
Mit steigender Leistung wird PV zunehmend als stabilisierende Regelgröße in die Pflicht genommen. Die Versorgungssicherheit für Letztverbraucher konnte parallel zum Ausbau der Photovoltaik sogar verbessert werden (Abbildung 23).

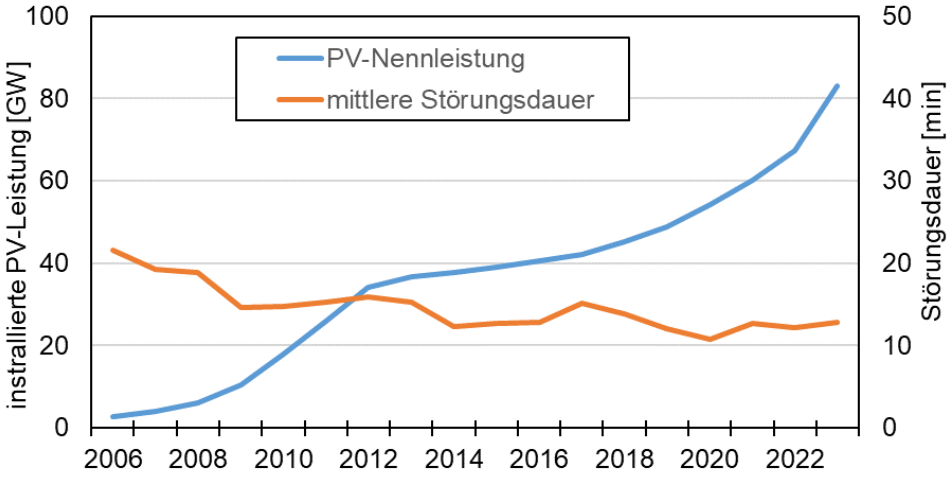


Abbildung 23: System Average Interruption Duration Index (SAIDI) für die Nieder- und Mittelspannung, Daten aus [BNA2].

12. Gibt es in Deutschland genügend Flächen für PV?

Ja, und zwar ohne nennenswerte Konflikte mit der Landwirtschaft oder dem Naturschutz. Ein wichtiges Konzept für die Erschließung bedeutender Flächenpotenziale ist die Integration. Integrierte Photovoltaik (www.integrierte-pv.de) ermöglicht eine doppelte Flächennutzung, zusätzlicher Flächenverbrauch für neue PV-Kraftwerke wird deutlich gesenkt oder gänzlich vermieden. Speziell auf die Anwendung zugeschnittene PV-Anlagen werden dazu mit Landwirtschaft kombiniert, auf künstlichen Seen errichtet, als Hülle von Gebäuden, Parkplätzen, Verkehrswegen und Fahrzeugen genutzt oder sie erbringen Ökosystemdienstleistungen auf renaturierten Biotop- und Moorflächen (Abbildung 24).

Abbildung 24: Anwendungen für die Integration von Photovoltaik.

Heute ausschließlich auf eine oder einige wenige dieser möglichen Anwendung zu setzen, wird der Dringlichkeit der Energiewende nicht gerecht. Wir haben nicht mehr die Zeit, Optionen nacheinander auszuprobieren. Alle technisch und sozio-ökonomisch vielversprechenden Anwendungsmöglichkeiten müssen zügig erprobt und über eine Anlaufphase dediziert gefördert werden, um Optimierungs- und Kostensenkungspotenziale durch Skalierungs- und Lerneffekte auszuloten. Erst nach dieser breiten Anlaufphase können fundierte Entscheidungen zugunsten bestimmter Anwendungen und Technologien getroffen werden.

Bei der folgenden Analyse von Potenzialen wird zwischen einem theoretischen, einem technischen und einem wirtschaftlich-praktischen bzw. umsetzbaren oder erschließbaren Potenzial unterschieden. Das **theoretische Potenzial** betrachtet die maximal mögliche

Umsetzung einer Technologie auf Basis des gesamten Angebots (physikalische Überschlagsrechnung). Das **technische Potenzial** fällt geringer aus, weil es bereits grundlegende technische Randbedingungen berücksichtigt (technische Überschlagsrechnung). Das **regulative Potenzial** betrachtet zusätzliche, nicht-monetäre rechtliche Einschränkungen und Ausschlusskriterien. Das **wirtschaftlich-praktische Potenzial** berücksichtigt schließlich alle relevanten Randbedingungen, insbesondere auch ökonomische (inkl. Infrastruktur), soziologische (inkl. Akzeptanz) und konkurrierende Nutzung (bspw. Solarthermie und PV auf Dächern). Verschiedene Quellen ziehen etwas unterschiedliche Grenzen zwischen den Kategorien.
Die landwirtschaftlich genutzte Fläche in Deutschland beträgt knapp 17 Millionen Hektar (Abbildung 25). **Agri-Photovoltaik** (Agri-PV) nutzt Flächen gleichzeitig für landwirtschaftliche Pflanzenproduktion (Photosynthese) und PV-Stromproduktion (Photovoltaik). Agri-PV deckt ein breites Spektrum in der Intensität der Landwirtschaft und im Mehraufwand für den PV-Anlagenbau ab. Es reicht von intensiven Kulturen mit speziellen PV-Montagesystemen bis zu extensiv genutztem Grünland mit marginalen Anpassungen auf der PV-Seite und hohem Potenzial für Ökosystemdienstleistungen. Agri-PV steigert die Flächeneffizienz und ermöglicht einen massiven Zubau an PV-Leistung, bei gleichzeitigem Erhalt fruchtbarer Böden für die Landwirtschaft oder in Verbindung mit der Schaffung artenreicher Biotope. Weltweit wird Agri-PV bereits im GW-Maßstab genutzt, in Deutschland gibt es erst wenige Systeme.

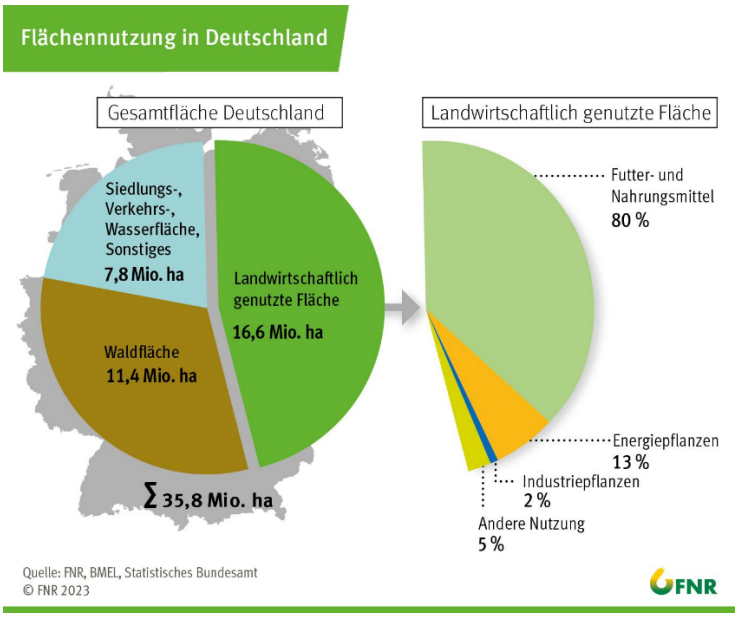


Abbildung 25: Flächennutzung in Deutschland [FNR].

Agri-PV mit hoch aufgeständerten Modulen ermöglicht den Anbau teilverschattet unter den Modulen. Eine Reihe von Nutzpflanzen zeigen kaum Ertragseinbußen bei reduzierter Einstrahlung, einige profitieren sogar. Betrachtet man Dauerkulturen (z.B. Obst- und Weinbau) komplett und Ackerbauflächen (ohne Maisanbau) zu einem Drittel als

technisches Potenzial, so ergibt eine Belegungsdichte von 0,6 MW_P/ha ein technisches Potenzial von **1,7 TW_P**. Bodennah montierte Module mit weitem Reihenabstand ermöglichen einen Anbau zwischen den Reihen. Bei einer Belegungsdichte von 0,25 MW_P/ha mit vertikalen Modulen eröffnet der Anbau von Futterpflanzen allein auf Dauergrünland ein technisches Potenziale von weiteren **1,2 TW_P**.
Auf 13 % der landwirtschaftlichen Fläche werden Energiepflanzen angebaut, insbesondere für die Herstellung von Biogas, Biodiesel, Pflanzenöl und Bioethanol [FNR]. Die Flächeneffizienz liegt deutlich unter dem, was mit Agri-PV-Anlagen möglich wäre (Abschnitt 16). Allein Energiemais wird auf 1 Mio. ha angebaut, diese Fläche entspricht bei einer Umwidmung in APV mit geeigneten Kulturen (oder in **Biodiv-PV**, s. Abschnitt 14) **600 GW_P** Nennleistung.
Der Braunkohletagebau hat in Deutschland eine Fläche von 1773 km^2 [UBA4] zerstört, mehr als die dreifache Fläche des Bodensees. Teile dieser Abbaufläche wurden bereits oder werden noch geflutet, hinzu kommen viele weitere künstliche Seen. In Summe eröffnet sich ein technisches Potenzial von **45 GW_P** für **Schwimmende PV** (FPV, von „Floating PV“, [ISE9]). Im Fall aktiver Baggerseen kann die PV zur Eigenversorgung der Förderanlagen beitragen und ggf. bestehende Netzanschlusspunkte nutzen. Weltweit sind bereits schwimmende PV-Anlagen im GW-Maßstab installiert.
In Deutschland stehen ca. 40 Mio. Gebäude (Abbildung 26). Gebäudehüllen, d.h. Dächer und Fassaden, bieten ein technisches Potenzial in der Größenordnung von **1000 GW_P** [Eggers]. Die Analyse berücksichtigt nur solche Flächen, die mindestens 500 kWh/(m^2a) Einstrahlung empfangen und eine zusammenhängende Mindestgröße aufweisen. Bisher genutzt werden weniger als 10% des Dachpotenzials und weniger als 1 ‰ des Fassadenpotenzials.

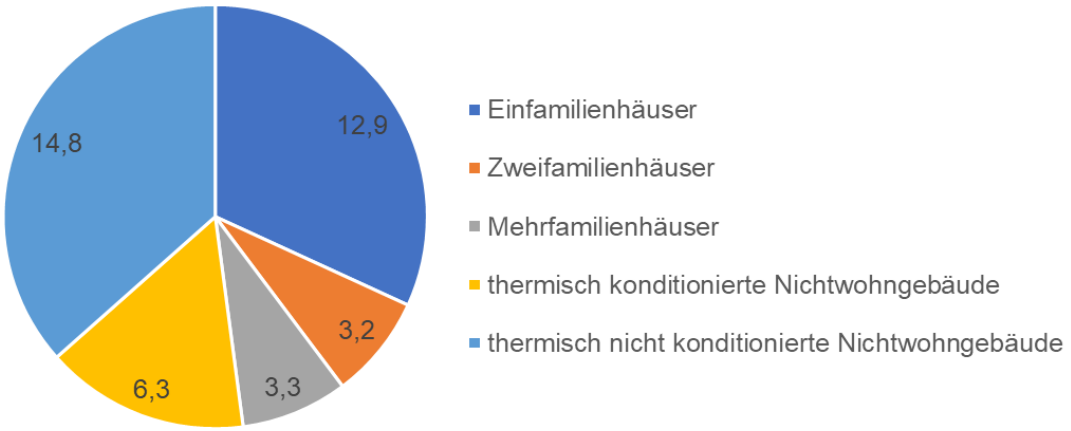


Abbildung 26: Gebäudebestand in Mio., Daten aus [DENA], [IWU].

Die bisherige Nutzung beschränkt sich ganz überwiegend auf sogenannte Aufdachanlagen, obwohl zahlreiche Produkte für die Gebäudeintegration (BIPV, **Bauwerkintegrierte PV**) kommerziell verfügbar und zugelassen sind. Dazu zählen PV-Platten und PV-Ziegel für Steildächer, PV-Leichtbausysteme für Dächer mit geringer Tragfähigkeit, PV-Systeme für Gründächer (**Gründach-PV**), PV-Module für Kaltfassaden (vorgehängte, hinterlüftete Fassaden), Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) mit PV, opake und semitransparente PV-

Isoliergläser sowie PV-Sonnenschutzlamellen (Abbildung 27). BIPV bietet materialeffiziente Lösungen und ermöglicht im Steildach-Segment eine Erschließung von Flächen, die aus ästhetischen Gründen nicht für eine Aufdachmontage in Frage kommen. Aufdachmontage hat den Vorteil, dass sie weniger eng an Bau- und Sanierungszyklen gebunden ist.

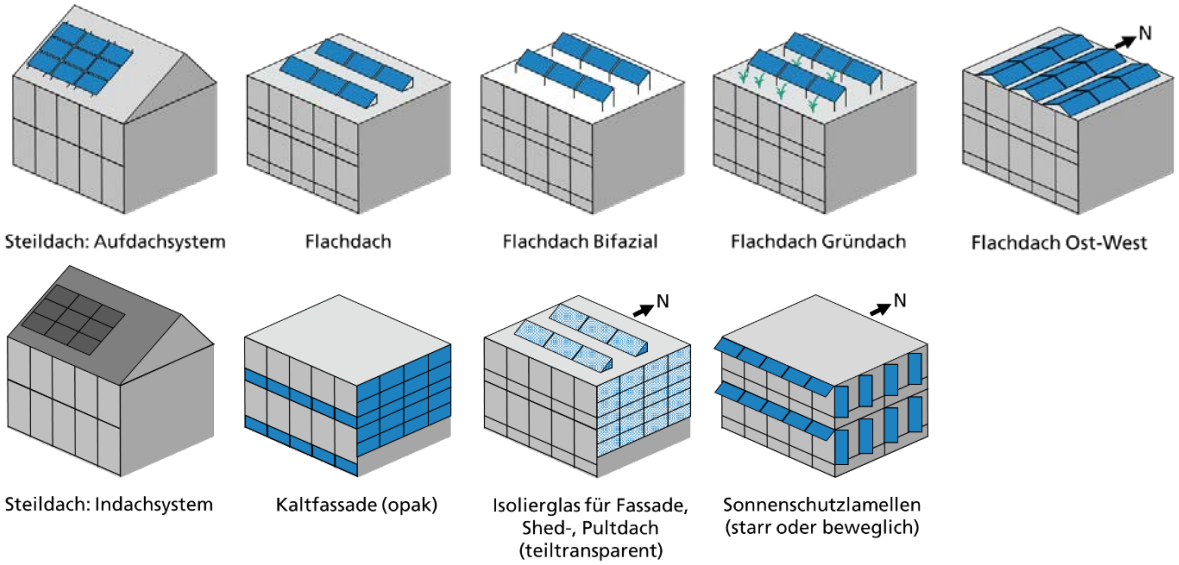


Abbildung 27: PV-Lösungen für Dach und Fassade (oben: Aufdachsysteme, unten: Integrierte PV).

Eine Studie des Umweltbundesamtes geht von 670 km² versiegelten Siedlungsflächen aus [UBA10]. Hierzu zählen baulich geprägte Siedlungsflächen, jedoch keine Gebäudeflächen oder Verkehrsflächen wie Straße oder Schiene. Ein Teil dieser Fläche lässt sich mit PV-Modulen als Schattenspender überdachen oder mit betretbaren PV-Modulen belegen (UPV, „**Urbane PV**"). Allein die über 300.000 größeren Parkplätze in Deutschland würden bei einer Überdachung mit PV-Modulen ein technisches Potenzial von **59 GW_P** eröffnen.

Weiteres Potenzial im GW-Maßstab bietet die Integration von **PV in Verkehrswegen** (RIPV, von „Road Integrated PV"), dazu zählen PV-Lärmschutzwände, horizontale Flächen (als PV-Überdachung oder -Fahrbahnbelag) und Gleiskörper. PV-Überdachungen bieten sich insbesondere für Tunneleinfahrten und für stark emittierende Kraftfahrstraße im urbanen Raum an. Mit dem Umstieg auf Elektromobilität kommen die Hüllflächen von Elektrofahrzeugen als **Fahrzeugintegrierte PV** dazu (VIPV, von „Vehicle Integrated PV").

Welcher Teil des genannten technischen Potenzials auch praktisch nutzbar ist, hängt von komplexen ökonomischen, regulativen und technischen Randbedingungen ab, hinzu kommen Fragen der Akzeptanz. Grundsätzlich wird integrierte PV, die mit der Hülle von Gebäuden, Verkehrswegen und Fahrzeugen verschmilzt, Flächen gemeinsam mit der Landwirtschaft nutzt oder Wasserflächen in gefluteten Tagebauen belegt, etwas höhere Stromgestehungskosten aufweisen als einfache Freiflächen-Kraftwerke. Dafür meidet integrierte PV Nutzungskonflikte und schafft Synergien, indem sie bspw. eine

Gebäudefassade ersetzt, die Unterkonstruktion einer Lärmschutzwand nutzt oder die Reichweite von E-Fahrzeugen erhöht.
Aus aktueller, energierechtlicher Sicht umfasst das verfügbare Potenzial für Freiflächen-PV Seitenrandstreifen entlang von Autobahnen und Schienenstrecken, Konversionsflächen und, sofern ein Bundesland die Länderöffnungsklausel des EEG nutzt, auch benachteiligte landwirtschaftliche Gebiete. In Baden-Württemberg allein beträgt die für PV-FFA geeignete, restriktionsfreie Fläche nach diesen Kriterien 3850 km² (https://www.energie-atlas-bw.de/sonne/freiflachen/potenzialanalyse). Es handelt sich überwiegend um Dauergrünland und Ackerland gemäß der landesspezifischen "Freiflächenöffnungsverordnung" (FFÖ-VO). Bei einer Belegungsdichte von 0,6 MW_P/ha nimmt diese Fläche **230 GW_P** PV auf, zum Beispiel als Agri-Photovoltaik oder als **Biodiv-PV** (Abschnitt 14). Aktuelle Zahlen für ganz Deutschland liegen noch nicht vor. Eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur mit Zahlenbasis aus dem Jahr 2014 hatte das Ausbaupotenzial an restriktionsfreien Freiflächen für PV noch auf 3164 km² geschätzt [BMVI].
In seinem Flyer aus dem Jahr 2020 beziffert der Deutsche Golf Verband e.V. die Fläche der Golfplätze in Deutschland auf 48.000 ha. Ein Bericht des Umweltbundesamts veranschlagte die Ende 2021 durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen beanspruchte Fläche auf rund 32.000 Hektar.

13. Ist PV-Strom ein Privileg von Eigenheimbesitzern?

Nein.
Bei Mehrfamilienhäusern sind auf dem gemeinsamen Dach verschiedene Betreibermodelle für PV-Anlagen seitens Wohnungseigentümergemeinschaften (WEG), Einzeleigentümern oder Baugesellschaften realisierbar [EAFR]. Für die Bereitstellung von Mieterstrom wurden regulatorische Hürden beseitigt und Förderanreize über das EEG gesetzt. Zusätzlich können Mieter Stecker-Solargeräte, auch bekannt als „Balkonmodule", an Balkonbrüstungen, an Wänden oder auf Terrassen einzelner Wohnungen betreiben. Über eine Steckerverbindung speisen sie Strom in das eigene Haushaltsnetz ein, wo der Eigenverbrauch die Stromrechnung senkt (https://www.pvplug.de/). Abhängig vom Aufstellort kann die Zustimmung des Vermieters notwendig sein. Ende 2024 waren in Deutschland mehr als 780,000 Stecker-Solargeräte gemeldet und geschätzt die doppelte oder dreifache Anzahl tatsächlich in Betrieb.
Wenn sich das Gebäude nicht für eine PV-Installation eignet, bieten Bürgerenergiegenossenschaft die Möglichkeit, sich am Bau von PV-Kraftwerken zu beteiligen. Wer nicht investiert, kann sich als Stromkunde einen Versorger mit einem nennenswerten Portfolio an eigenen PV-Kraftwerken aussuchen, bspw. die Elektrizitätswerke Schönau (EWS) oder die Energie Baden-Württemberg (EnBW).

14. Zerstören PV-Anlagen ökologisch wertvolle Flächen?

Nein, ganz im Gegenteil, gewöhnlich fördern sie die Renaturierung.
Wird eine Fläche aus der intensiven Landwirtschaft, bspw. aus dem Energiepflanzenanbau, herausgenommen, in Grünfläche umgewandelt und darauf eine PV-Freiflächenanlage (PV-FFA) errichtet, dann nimmt die Biodiversität grundsätzlich zu [BNE]. In PV-FFA wird nicht gedüngt, so dass weniger anspruchsvolle Pflanzen eine Chance erhalten. Die Einzäunung der PV-FFA schützt die Fläche gegen unbefugten Zutritt und freilaufende Hunde, was u.a. Bodenbrütern entgegenkommt.
Weitere Verbesserungen können durch kleine Anpassungen der PV-Anlage erreicht werden (**Biodiv-PV**). Vergrößerte Reihenabstände der Modultische, leicht erhöhte Aufständerung der Module, Einsaat von Wildpflanzenmischungen an Stelle von Grasmonokultur und behutsame Grünpflege lassen ein Solar-Biotop entstehen. Die größeren Reihenabstände erlauben zudem eine größere Modulneigung, mit höheren Stromerträgen im Winterhalbjahr bei höheren Marktwertfaktoren Solarstrom und geringeren Ertragsverlusten durch Verschmutzung und Schneeabdeckung.
Moorböden erstrecken sich in Deutschland nach Angaben des Bundesamts für Naturschutz auf 1,4 Mio. ha, davon werden etwa 50 % als Grünland und 25-30 % als Acker genutzt. Die Trockenlegung von Moorflächen für die intensive landwirtschaftliche Nutzung führt zu einem dramatischen Anstieg ihrer CO_2-Emissionen. Knapp 7 % der Treibhausgasemissionen Deutschlands stammen derzeit von entwässerten Moorböden (Quelle: Umweltbundesamt 2022).
Degradierte Moorböden können im Kontext der Wiedervernässung mit angepassten PV-Kraftwerke bebaut werden (**Moor-PV**). Die teilweise Beschattung durch PV wirkt einer Austrocknung entgegen und kann den Aufbau von Torf unterstützen. Auf Basis der landwirtschaftlich genutzten Moorfläche von 1,1 Mio. ha und einer Belegungsdichte von 0,25 – 0,6 MW_P/ha ergeben sich technische Potenziale von 270 – 660 GW_P.

15. Finden PV-Kraftwerke Akzeptanz in der Bevölkerung?

Ja.
Die freie Skalierbarkeit von PV-Kraftwerken ermöglicht den dezentralen Ausbau, bis hinab zu sogenannten „Balkon-Modulen“ („Plug-in-PV“) mit wenigen Hundert Watt Nennleistung. Die hohe Zahl von 4,8 Mio. PV-Anlagen in Deutschland zum Jahresende 2024, davon 66 % Kleinanlagen mit Leistungen unterhalb 10 kW_P [ISE5] zeigt, dass von diesen technischen Möglichkeiten ausgiebig Gebrauch gemacht wird. Photovoltaik eignet sich ideal, um das Konzept der Bürgerenergie umzusetzen und über Partizipation die Akzeptanz für die Energiewende zu stärken. Solaranlagen zählen nach einer repräsentativen Umfrage von Lichtblick zu den beliebtesten Kraftwerken. Abbildung 28 zeigt die Verteilung der Antworten auf die Frage “Wenn Sie an den Neubau von Anlagen zur

Energiegewinnung in Deutschland denken: Auf welchen Arten von Anlagen sollte hier der Schwerpunkt liegen?“.

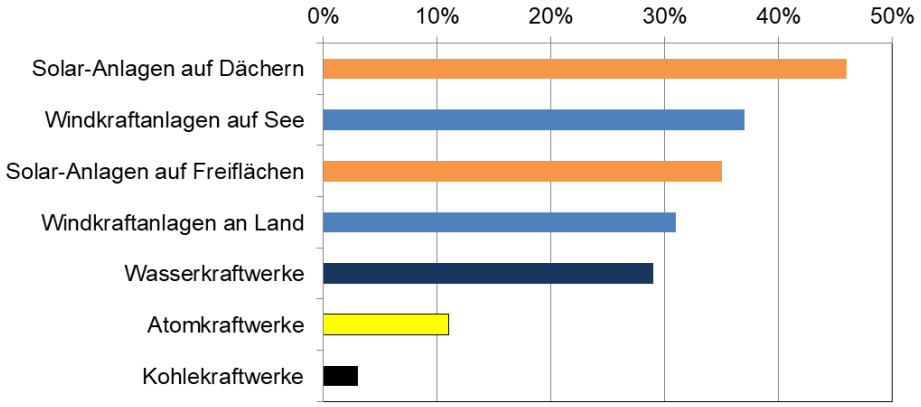


Abbildung 28: Umfrageergebnisse zum Neubau von Kraftwerken, Daten aus [Licht2].

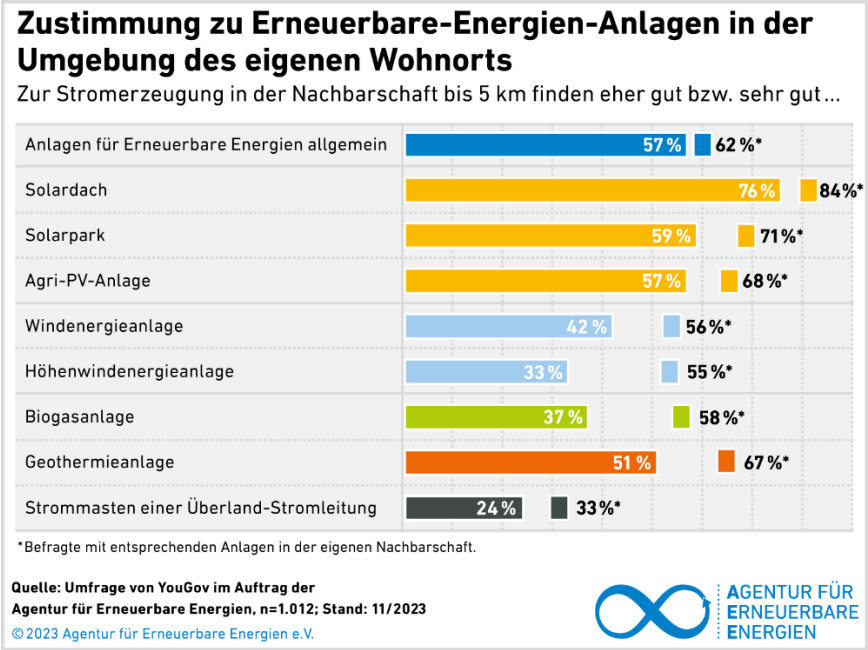


Abbildung 29: Umfrageergebnisse zur Akzeptanz verschiedener Kraftwerkstypen [AEE2].

Auch aus Anwohnersicht sind PV-Kraftwerke die mit Abstand beliebtesten Kraftwerke, wie eine Umfrage der Agentur für Erneuerbare Energien zeigt (Abbildung 29). Die Beliebtheit steigt, wenn solche Kraftwerke in der eigenen Nachbarschaft praktisch erfahrbar sind.

16. Arbeiten PV-Anlagen in Deutschland effizient?

Das hängt von der Bezugsgröße ab.
Bezogen auf die eingestrahlte Sonnenenergie liegt der effektive Wirkungsgrad der Energiewandlung bei Werten um 18 – 19 % für neuere Anlagen, dafür scheint die Sonne kostenlos. Relevant sind die Auswirkungen des Wirkungsgrades auf Stromgestehungskosten, Flächenbedarf, Ressourceneinsatz und CO_2-Einsparung.
Der nominelle Wirkungsgrad (s. Abschnitt 28.1) von kommerziellen waferbasierten PV-Modulen (d.h. Module mit Solarzellen auf Basis von Siliziumscheiben) aus neuer Produktion stieg in den letzten Jahren im Mittel um ca. 0,4 – 0,6 %-Punkte pro Jahr auf 21,6 % in 2023 [ISE5] und geschätzt **22 %** in 2024. Pro Quadratmeter Modul erbringen sie damit eine Nennleistung von 220 W, Spitzenmodule liegen ca. 10 % höher.
PV-Anlagen arbeiten nicht mit dem nominellen Modulwirkungsgrad, weil im Betrieb Verluste auftreten und weil der initiale Wirkungsgrad der Module degradiert (Abschnitt 16.2). Diese Effekte werden in der sog. Performance Ratio (PR) zusammengefasst. Eine heute installierte PV-Anlage erreicht PR-Werte von **80 – 90 %** im Jahresmittel (typischer Wert), inkl. aller Verluste durch erhöhte Betriebstemperatur, ungünstige Einstrahlungsbedingungen bezüglich Intensität, Spektrum und Einfallswinkel, Verschmutzung, Verschattung und Schneeauflage, Leitungswiderstände, Wandlungsverluste im Wechselrichter, Spitzenkappung des Wechselrichters (DC/AC-Verhältnis typ. > 1) und ggf. Ausfallzeiten aufgrund von Störungen. Bei bifazialen Modulen steigern Mehrerträge über rückseitige Einstrahlung die PR, weil als Bezugsgröße für die PR nur die frontseitige Einstrahlung zählt. **Ertragsgutachten** liefern Aussagen über die zu erwartende Performance und Erträge von PV-Kraftwerken für konkrete Standorte, Komponenten und Systemdesigns auf Basis historischer Einstrahlungsdaten.
Der von den Modulen gelieferte Gleichstrom wird von Wechselrichtern für die Netzeinspeisung angepasst. Der Wirkungsgrad neuer PV-Wechselrichter liegt um 98 %. PV-Anlagen in der Freifläche zeigen üblicherweise etwas höhere PR als Anlagen auf Steildächern, dank besserer konvektiver Kühlung, optimaler Ausrichtung, besserer Wartung, seltener Verschattung, effizienterer Wechselrichter und ggf. bifazialer Mehrerträge. Auf die Einstrahlung bezogen arbeiten neu installierte PV-Kraftwerke demnach mit mittleren Wirkungsgraden um **19 %** im Betrieb.
Der mittlere Stromverbrauch eines 2-Personen-Haushalts für Elektrogeräte, Beleuchtung, Warmwasser (Hygienezwecke) und Raumwärme lag im Jahr 2021 bei 3,5 MWh [DESTATIS]. Pro-Kopf-Werte liegen für 1-Personen-Haushalte höher, für Mehr-Personen-Haushalte niedriger. Im Durchschnitt erzielen PV-Dachanlagen 2021 im Trendszenarion **922 Vollbenutzungsstunden** [ÜNB1], vgl. Abschnitt 16.4. Von einer ungefähr nach Süden orientierten und mäßig geneigten Dachfläche eines Hauses reichen somit 18 m^2 aus, um mit 10 Stück 400-W_P-Modulen eine Strommenge zu erzeugen, die dem durchschnittlichen Jahresstrombedarf eines 2-Personen-Haushalts (3,5 MWh) entspricht.
Auf flachen Dächern und im Freiland werden Module aufgeständert, um ihren Ertrag zu steigern. Wegen der dafür notwendigen Beabstandung belegen sie bei Südorientierung

ein Mehrfaches ihrer eigenen Fläche, abhängig vom Aufstellwinkel. Heute werden PV-FFA meist mit reduzierten Neigungswinkeln (ca. 20° – 25°) und Reihenabständen gebaut, so dass bei Modulwirkungsgraden von 22 % eine Belegungsdichte um 1 MW/ha resultiert. Im Jahr 2010 lag dieser Wert noch bei 0,35 MW/ha [ZSW]. Mit Blick auf eine optimale Entwicklung der Biodiversität sind größere Reihenabstände vorteilhaft (Abschnitt 14).
Zum Vergleich: Bei Verstromung von Energiepflanzen liegt der auf die Einstrahlung bezogene Wirkungsgrad deutlich unter 1 %, für Stromerzeugung über Energiemais sind es bspw. 0,2 %. In einer ähnlichen Größenordnung dürfte der auf die Einstrahlung bezogene Wirkungsgrad bei der Verstromung fossiler organischer Materie wie Kohle, Öl oder Erdgas liegen. Entsprechende Verbrennungs-Kraftwerke beziehen ihre Wirkungsgradangabe aber normalerweise nur auf die Konversion der bereits vorhandenen chemischen Energie im fossilen Energieträger. Für Kohlekraftwerke in Deutschland wird dann bspw. ein mittlerer Wirkungsgrad um 38 % angegeben.
Bei der Verbrennung von Biokraftstoffen in Fahrzeugen erreicht man bescheidene Effizienzen bezogen auf die eingestrahlte Energie und die Flächennutzung. Ein PKW mit einem Diesel-Verbrennungsmotor, der 5,5 l Biodiesel pro 100 km verbraucht, kommt mit dem Jahresertrag eines 1 Hektar großen Rapsfeldes von 1775 l/(ha*a) [FNR] ca. 32000 km weit. Mit dem Jahresertrag einer neuen PV-Anlage (1 MW_P/ha, 980 MWh/MW_P) auf der gleichen Fläche fährt ein batterieelektrisches Fahrzeug (E-Auto, Verbrauch 16 kWh pro 100 km) ca. 6,1 Mio. km, die Reichweite liegt um den **Faktor 190** höher (Abbildung 30). Selbst eine Agri-PV-Anlage (Abschnitt 12), die eine gleichzeitige landwirtschaftliche Nutzung der Fläche zulässt, würde ein E-Auto um **Faktor 116** weiterbringen. Dieser Vergleich berücksichtigt keine Ladeverluste für E-Autos sowie keine Energieverbräuche für den Rapsanbau und keine Energiebereitstellung aus Nebenprodukten der Rapsnutzung.
Vergleicht man die Effizienz der Flächennutzung zur Stromproduktion, dann schneidet Agri-PV bspw. um **Faktor 32** besser ab als Mais. Silomais, der in Deutschland auf einer Fläche von ca. 0,9 Mio. ha angebaut wird, bringt 18,7 MWh_{el}/ha Stromertrag [FNR], während es bei hochaufgeständerter APV (Abschnitt 12) ca. 600 MWh_{el}/ha sind. Dieser Vergleich berücksichtigt keine Abwärmenutzung (KWK) aus der Methanverbrennung.

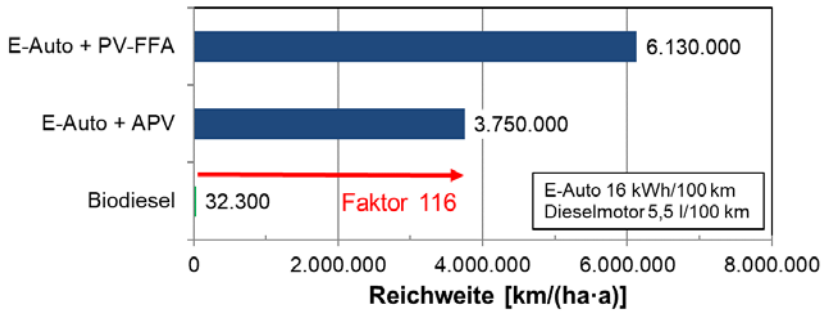


Abbildung 30: Reichweiten von Elektro- und Biodiesel-Fahrzeugen pro Hektar eingesetzter Fläche.

In Südspanien oder Nordafrika lassen sich spezifische Erträge bis 1600 kWh/kW_P erzielen, allerdings würden lange Leitungswege nach Deutschland zu Energieverlusten und Kostenaufschlägen führen. Mit 800-kV-Höchstspannungsleitungen lassen sich

Leitungsverluste auf etwa 0,5 % je 100 km reduzieren. Leitungen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) verringern Transportverluste auf knapp 0,3 % pro 100 km reduzieren, dazu kommen Konversionsverluste. Eine 5000 km lange HGÜ-Leitung würde somit ca. 14 % reine Leitungsverluste aufweisen.

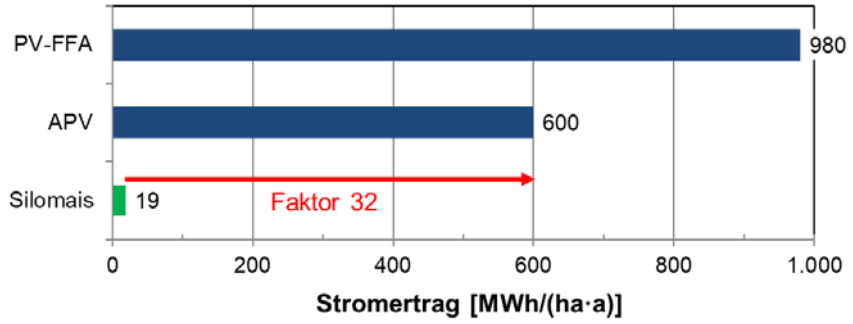


Abbildung 31: Stromerträge von PV-Kraftwerken und Silomais pro Hektar eingesetzter Fläche.

16.1 Sind PV-Anlage nur auf optimal ausgerichteten Dächern wirtschaftlich?

Nein, es lohnt eine Gesamtbetrachtung der Wirtschaftlichkeit.
Abbildung 32 zeigt das relative Jahresertragspotenzial am Standort Freiburg, abhängig von der Ausrichtung der Dach- bzw. Fassadenfläche. Das Ertragsmaximum um die Ausrichtung Süd bei 40° Neigung ist flach ausgebildet, geringe Abweichungen haben kaum Einfluss auf den Ertrag. Für weiter nördlich gelegene Standorte verschiebt sich das Maximum zu größeren Neigungen.

		Orientierung																		
		Ost			Südost			Süd			Südwest			West			Nordwest			Nord
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
Horiz.	0°	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%
	10°	83%	85%	87%	89%	90%	91%	91%	91%	90%	89%	87%	85%	83%	81%	79%	77%	76%	75%	75%
	20°	82%	86%	90%	92%	95%	96%	96%	96%	94%	92%	89%	85%	81%	77%	73%	70%	67%	66%	65%
Neigung	30°	81%	86%	90%	94%	97%	99%	99%	98%	96%	93%	89%	84%	79%	74%	68%	63%	59%	57%	56%
	40°	78%	84%	90%	94%	97%	100%	100%	99%	97%	93%	88%	82%	76%	69%	63%	56%	51%	48%	47%
	50°	74%	81%	87%	92%	96%	98%	99%	97%	95%	91%	85%	79%	72%	65%	57%	50%	44%	40%	39%
	60°	70%	77%	83%	88%	92%	94%	95%	94%	91%	87%	81%	75%	68%	60%	52%	45%	38%	33%	31%
	70°	64%	71%	77%	83%	86%	89%	89%	88%	85%	81%	75%	69%	62%	54%	46%	39%	32%	27%	26%
	80°	57%	64%	70%	75%	79%	81%	81%	80%	77%	73%	68%	62%	55%	48%	40%	33%	27%	23%	21%
Vert.	90°	50%	56%	62%	66%	69%	70%	71%	70%	68%	64%	60%	54%	48%	41%	34%	28%	23%	19%	17%

Abbildung 32: Relatives Ertragspotenzial, unverschattet, Standort Freiburg, berechnet online mit https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.

16.1.1 Steildach Ost-/West

Im direkten Vergleich bringt PV bspw. auf einem Westdach mit 45° Neigung ca. 26 % weniger Jahresstromertrag als auf einem Süddach gleicher Neigung (Abbildung 32), mit entsprechend höheren Stromgestehungskosten. Insbesondere bei hohen Strombezugspreisen in Verbindung mit Eigenverbrauch kann sich die PV-Anlage auf einem Ost- oder

Westdach trotzdem lohnen. Bei der Frage, ob ein Ost- bzw. Westdach zusätzlich zu einem Süddach belegt werden sollte, empfiehlt sich die Grenzkostenbetrachtung. Zusätzliche PV-Module dürften vergleichsweise geringe Installationskosten verursachen, und mit einem dank der Westausrichtung in den späteren Nachmittag verschobenen Erzeugungsprofil das Eigenverbrauchspotenzial steigern (Abbildung 48).

16.1.2 Vertikale Südfassade

An einer vertikalen Südfassade bringt PV ca. 29 % weniger Jahresstromertrag als auf einem Süddach mit 45° Neigung (Abbildung 32). Gleiches gilt für senkrecht montierte Stecker-Solargeräte, die nach Süden ausgerichtet sind. Die saisonale Fluktuation zwischen Sommer- und Winterertrag fällt aber bei der vertikalen Anlage deutlich geringer aus (Abbildung 49), was den Eigenverbrauch bzw. die systemische Integration des PV-Stroms erleichtert. Der Minderertrag der vertikalen Anlage trifft das sonnenreiche Halbjahr, wenn der Eigenverbrauchsanteil beim Süddach in vielen Fällen wegen „Überproduktion" zurückgeht bzw. der Marktwertfaktor Solar (Abschnitt 4.3) abnimmt. Die Minderung des Jahresstromertrags wird sich damit nur in abgeschwächter Form auf die Wirtschaftlichkeit der Fassaden-PV übertragen.

16.2 Degradieren PV-Module?

Ja, aber im Normalfall sehr langsam.
Waferbasierte PV-Module altern so langsam, dass es eine Herausforderung für die Wissenschaftler darstellen kann, Leistungsverluste überhaupt nachzuweisen. Eine Studie des Fraunhofer ISE an 44 größeren, qualitätsgeprüften Aufdach-Anlagen in Deutschland hat eine durchschnittliche jährliche Degradation der Nennleistung bei Modulen von ca. 0,15 % ergeben [ISE2]. Üblich sind Garantien der Hersteller für einen maximalen Leistungsverlust ihrer PV-Module von 10 – 15 % über 25 – 30 Jahre Betrieb.
Die genannten Werte berücksichtigen keine Ausfälle aufgrund von Produktionsmängeln. Fehler in der Materialzusammensetzung, der Herstellung, bei Transport und Montage können zu einer beschleunigten Degradation bis zum kompletten Ausfall von Modulen führen. Die Degradation kann das Erscheinungsbild betreffen (etwa bei Delamination), den Ertrag und/oder die elektrische Sicherheit. Mit einer **Schadensanalyse** lässt sich die Abweichung quantifizieren, die Ursachen ermitteln und Prognosen für die weitere Degradationsdynamik aufstellen.
Die deklarierte Nennleistung von Modulen bezieht sich meistens auf den Betrieb nach der Anfangsdegradation. Abhängig vom Material der Solarzellen kommt eine lichtinduzierte Degradation (LID) von 1-2 % in den ersten Betriebstagen dazu, wie umfangreiche Messungen am Fraunhofer ISE ergeben haben.
Für Anlagen mit **Qualitätssicherung** bei Komponentenauswahl, Design, Installation und im Betrieb erscheint die häufig getroffene Annahme von 0,5 % mittlerem Ertragsverlust pro Jahr eher konservativ.

16.3 Verschmutzen PV-Module?

Ja.
In vielen Fällen bleiben die dadurch verursachten Ertragseinbußen während der Betriebsdauer überschaubar. Problematische Ablagerungen können entstehen durch lokale Effekte wie Laubabwurf, Vogelkot, Staub von Baustellen oder aus der Landwirtschaft, Ruß aus nahen Schornsteinen, durch regionale Effekte wie Pollenflug oder überregionale Effekte wie Saharastaub-Ereignisse. Intensiver Regen wird die Module größtenteils wieder reinigen, über die Jahre nehmen allerdings Verschmutzung und damit Ertragsverluste zu. Dies gilt besonders in Regionen, die aufgrund der Klimakrise zunehmend unter langen, regenarmen Phasen leiden.
Besonders betroffen sind Module mit sehr flacher Neigung (unter 15°). Oft sind die untere Kante und insbesondere die unteren Ecken der Module besonders stark verschmutzt. Wegen der Serienverbindung der Solarzellen können stark verschmutzte Teilflächen erheblich stärkere Ertragseinbußen verursachen als es ihrem Flächenanteil entspricht. Ob, wann und wie oft sich eine Reinigung der Module lohnt, muss wegen der Vielzahl der Einflussfaktoren im Einzelfall bewertet werden.

16.4 Arbeiten PV-Anlagen selten unter Volllast?

Ja.
Aufgrund der Einstrahlungsbedingungen arbeiten PV-Anlagen nur etwas weniger als die Hälfte der insgesamt 8760 Jahresstunden, und dann auch meistens in Teillast. Die Kennzahl „Volllaststunden“, auch „Vollbenutzungsstunden“ (VBh) oder spezifischer Ertrag wird als Quotient aus der im Lauf eines Jahres tatsächlich erzeugten Strommenge und der Nennleistung des Kraftwerks ermittelt (kWh/kW_P). Die Übertragungsnetzbetreiber gehen in ihrem Trendszenario 2021 von **987 VBh** für PV-Freiflächen-Anlagen in Deutschland aus, bei Dachanlagen von **922 VBh** [ÜNB1]. Die Werte entsprechen Jahresnutzungsgraden („Kapazitätsfaktoren“) von **11,1 %** bzw. **10,3 %**, berechnet als Verhältnis der VBh zur Anzahl Jahresstunden. Der spezifische Jahresertrag fällt an sonnigen Standorten, bei Südausrichtung und leichter Neigung höher aus, er hängt aber nicht vom nominellen Modulwirkungsgrad ab. Die Übersicht der Prognosen zur Stromerzeugung aus EE, bereinigt um Verlustmengen durch das Einspeisemanagement (Abschnitt 11.1), zeigt Abbildung 33. Aufgrund der geringen VBh erfordern steigende Anteile von Solarstrom im Netz zunehmend flankierende Maßnahmen (Kapitel 22).
Die mittlere Jahressumme der horizontalen Globalstrahlung in Deutschland für die Jahre 2001 - 2020 (Abbildung 34) liegt gemäß Zahlen des Deutschen Wetterdienstes bei **1102 kWh/(m²·a)** mit einem linearen Trend von +0,3 %/a zwischen 1991 und 2020. Im Zeitraum von 1981 – 2010 lag der Mittelwert noch bei 1055 kWh/m²/a. PV-Module werden zur Maximierung des Jahresstromertrags häufig mit einer Neigung von ca. 25° zur Horizontalen montiert und nach Süden ausgerichtet. Damit erhöht sich die

Einstrahlungssumme bezogen auf die Modulebene um ca. 15 %, bezogen auf die horizontale Einstrahlungssumme und ergibt im geografischen Mittel für Deutschland ca. 1270 kWh/m²/a.

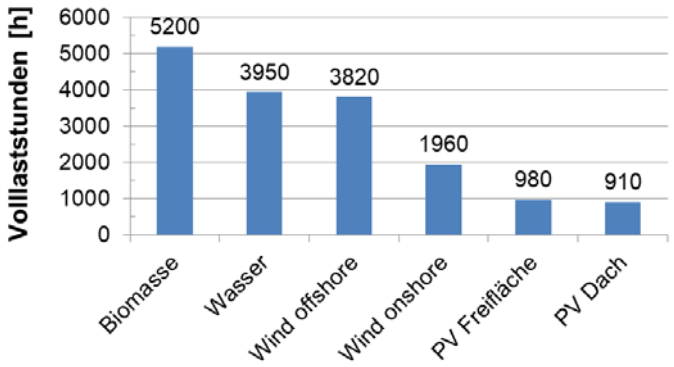


Abbildung 33: Prognostizierte Vollbenutzungsstunden für Stromerzeugung aus EE, Daten aus [ÜNB1].

Bei einer Performance Ratio (PR, siehe Abschnitt 28.7) von 85 % für eine neue, unverschattete Anlage mit ertragsoptimierter Ausrichtung wären damit im geografischen Mittel über Deutschland 1077 Volllaststunden zu erreichen. Weil nicht alle Dachanlagen ertragsoptimiert ausgerichtet sind, Teilverschattung auftreten und die PR mit dem Alter leicht abnimmt, liegt die tatsächliche mittlere Volllaststundenzahl etwas niedriger.
Technische Verbesserungen der Module und der Installation können die nutzbare Einstrahlung, die PR, den Ertrag und damit die Zahl der Volllaststunden einer PV-Anlage anheben. Dazu zählen

- Nachführung (Abschnitt 22.3.1)
- bifaziale PV-Technologie
- Verringerung von Verlusten durch Verschattung
- Verringerung des Temperaturkoeffizienten der Solarzellen
- Verringerung der Betriebstemperatur der Module durch gute Hinterlüftung
- Verbesserung des Schwachlicht- und des Schräglichtverhaltens der Module
- Verringerung von Verlusten durch Schneeabdeckung und Verschmutzung
- frühzeitige Erkennung und Behebung von Minderleistung
- Verringerung von Degradation über die Lebensdauer

Die Größe eines PV-Kraftwerks hat keinen direkten Einfluss auf die Volllaststundenzahl, anders als bei Windkraftwerken, wo die Nabenhöhe entscheidend ist. Nuklear-, Kohle- und Gaskraftwerke können im Bedarfsfall fast durchgängig mit ihrer Nennleistung produzieren, soweit ausreichend Brennstoff und Kühlwasser zur Verfügung stehen.

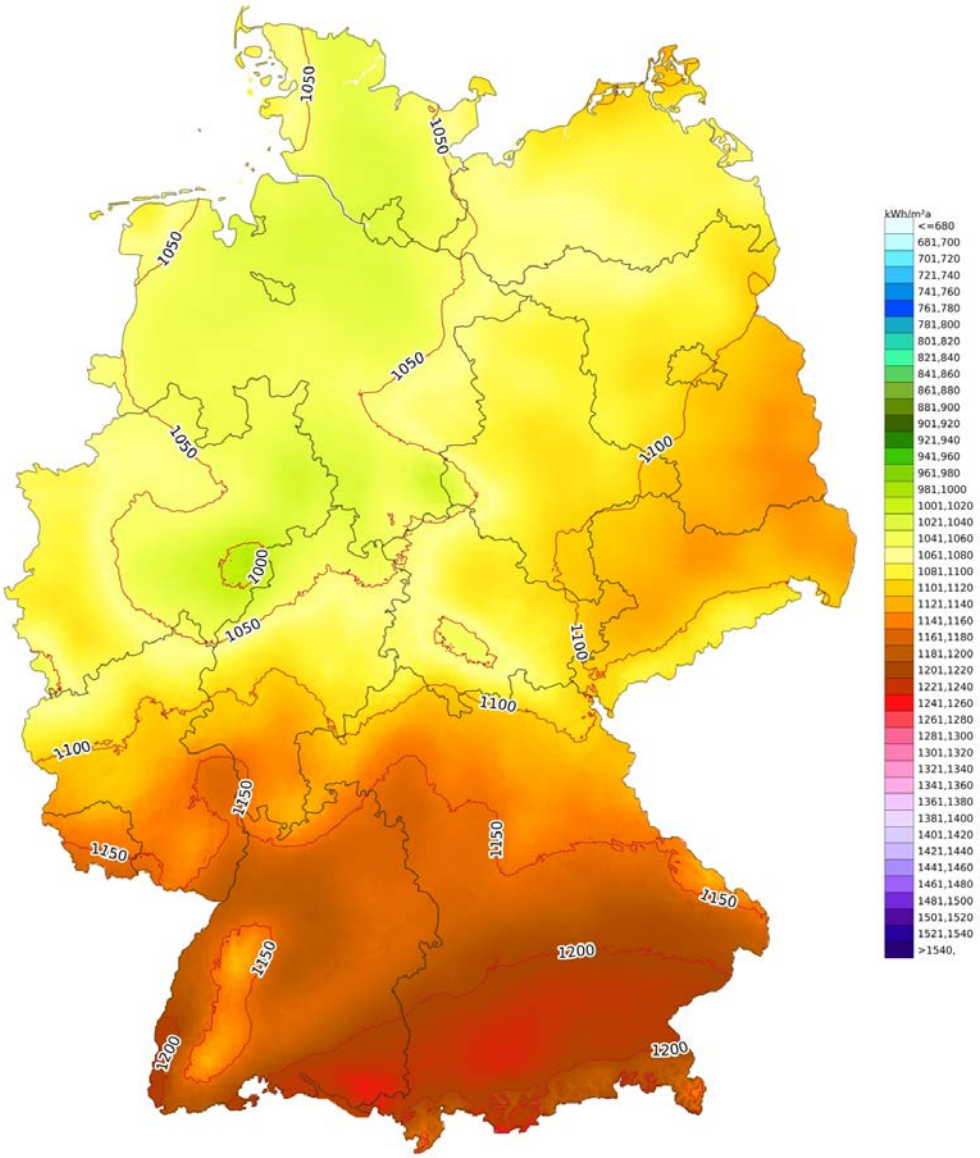


Abbildung 34: Horizontale jährliche Globalstrahlungssumme in Deutschland, gemittelt über den Zeitraum 2001 – 2020, Daten [DWD].

17. Liefert PV relevante Beiträge zum Klimaschutz?

17.1 Gefährdet der anthropogene CO_2-Ausstoß das globale Klima?

Ja.

Die zunehmende globale Erwärmung ist zweifelsfrei erwiesen [IPCC]. Im Vergleich zum präindustriellen Zeitalter ist die mittlere globale Temperatur um 1,1 °C angestiegen, über der Landfläche sogar um 1,6 °C. Die überwältigende Mehrheit der Wissenschaftler ist überzeugt, dass anthropogene Emissionen von CO_2 und anderen Treibhausgasen den

Anstieg der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentration und damit den globalen Temperaturanstieg verursachen.

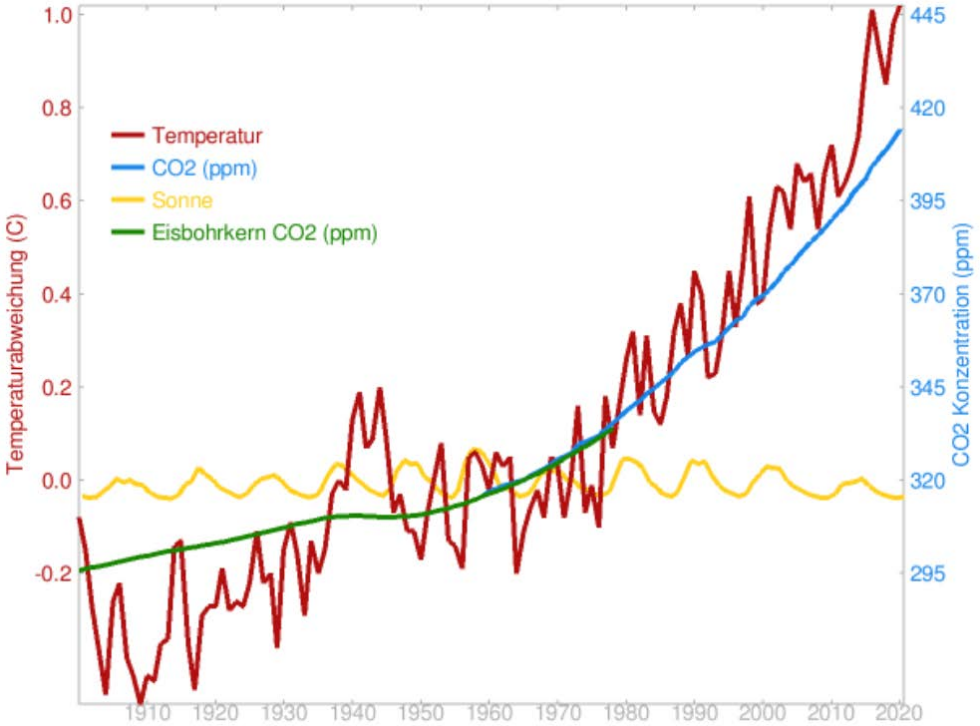


Abbildung 35: Entwicklung der atmosphärischen CO_2-Konzentration, der mittleren globalen Temperaturveränderung und der Sonnenaktivität (http://herdsoft.com/climate/widget/).

Im Mai 2013 hat die atmosphärische CO_2-Konzentration erstmals seit mindestens 800.000 Jahren den Wert von 400 ppm erreicht. Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen die bisherige Entwicklung der atmosphärischen CO_2-Konzentration und der globalen bzw. antarktischen Temperatur.
Ein schneller globaler Temperaturanstieg gefährdet in einem noch wenig verstandenen Ausmaß die Stabilität des globalen Klimasystems, das Leben der von Extremwetterlagen direkt bedrohten Menschen, die Ernährungsgrundlage der Weltbevölkerung, Infrastrukturen, küstennahe Siedlungsgebiete sowie die ohnehin unter hohem Druck stehende Diversität an Arten und Biotopen.

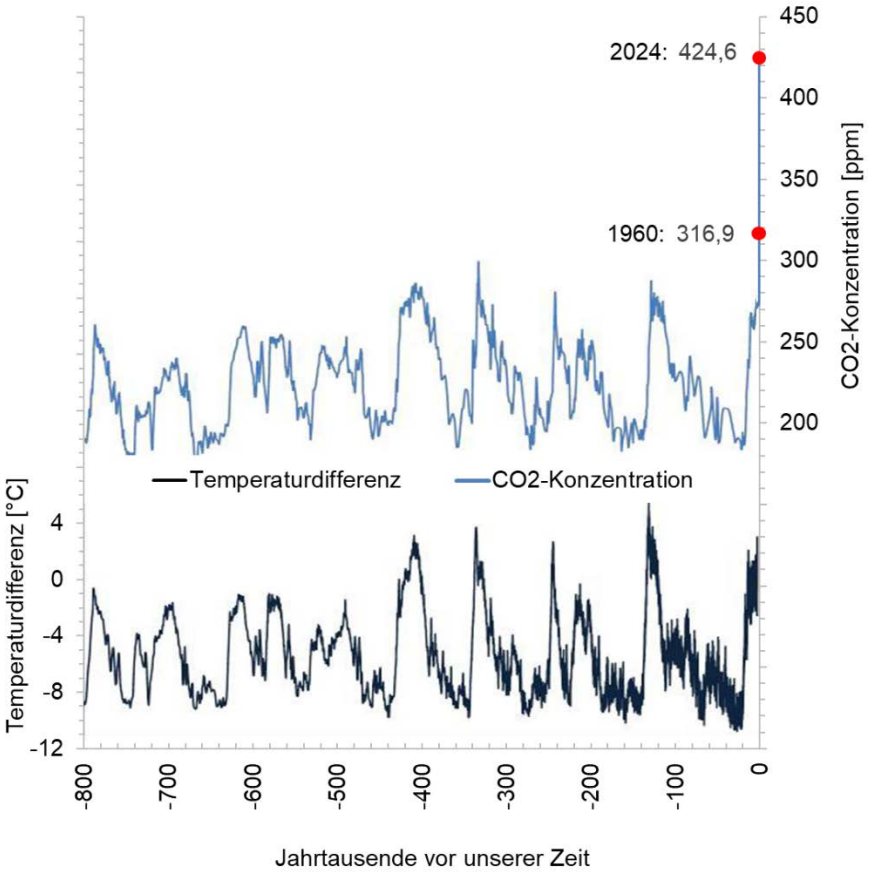


Abbildung 36: Schätzungen der atmosphärischen CO_2-Konzentration und der Temperaturdifferenz in der Antarktis auf Basis von Eisbohrkernen [EPA]; Rot: CO_2-Messwerte des Mauna Loa Observatory [https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html].

17.2 Liefert PV relevante Beiträge zur Senkung des CO_2-Ausstoßes?

Ja.
Der CO_2-Äquivalente (THG) Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland (Verbrauch), mit Berücksichtigung der Vorketten, ist von 860 g CO_2-Äq/kWh im Jahr 1990 auf geschätzt **427 g CO_2-Äq/kWh** im Jahr 2024 gefallen [UBA6]. Einen wichtigen Beitrag zu dieser Reduktion leistete der Ausbau der EE.
Für die Abschätzung der gesamtheitlichen Emissionsfaktoren einzelner Brennstoffe zur Stromgewinnung sind Differenzierungen notwendig u.a. hinsichtlich des Ursprungslandes, der Fördertechnik, des Primärenergiegehalts von Rohstoffvorkommen, der Methanleckage bei der Erdgasgewinnung, der effektiven elektrischen und gesamten (bei Kraft-Wärme-Kopplung) Wirkungsgrade von Kraftwerken.
Während PV-Kraftwerke im Betrieb kein CO_2 freisetzen, muss eine gesamtheitliche Betrachtung auch Herstellung und Entsorgung der Anlage berücksichtigen. Bei PV-Kraftwerken spielen der spezifische Ertrag [kWh/(kW$_P$·a)] und damit die jährliche Einstrahlungssumme am Betriebsort eine große Rolle, ebenfalls die Lebensdauer der Anlage. Die

Treibhausgasbilanz von PV-Strom konnte durch Fortschritte bei Produktion und Wirkungsgraden in den letzten Jahrzehnten deutlich gesenkt werden. Es ist deshalb wichtig, bei der Beurteilung neuer Anlagen auch Lebenszyklusanalysen (LCA) aktueller Technologien zu betrachten.
Für eine große PV-FFA von 85 MW_P am Standort Piacenza in Norditalien (GHI 1.368 kWh/(m^2·a) mit aktueller PERC-Technologie und 21,2% Modulwirkungsgrad hat die IEA PVPS Task 12 einen Emissionsfaktor von 25,7 g CO_2-Äq/kWh ermittelt [IEA5]. Für Deutschland wären aufgrund etwas geringerer Solarstrahlung (im Schnitt ca. 20 % weniger) etwa **30 – 35 g CO_2-Äq/kWh** zu erwarten.
Das Umweltbundesamt hat das Treibhausgaspotenzial von PV-Strom aus Freiflächen- und Schrägdachanlagen auf Basis älterer Daten verglichen und nur geringe Unterschiede ermittelt ([UBA9], s. Abbildung 37). Besonders günstig schneiden PV-Module ab, die zusammen mit ihren Vorprodukten in Europa produziert werden, weil hier der Strommix höhere EE-Anteile enthält und die Transportwege deutlich kürzer ausfallen. Günstig sind Glas-Glas-Module aufgrund ihrer geringeren Degradation und des Verzichts auf Alu-Rahmen [LCA]. Mit der fortgesetzten Steigerung der Wirkungsgrade und des Anteils von EE in der Produktion werden die Treibhausgasemissionen pro kWh PV-Strom weiter sinken.

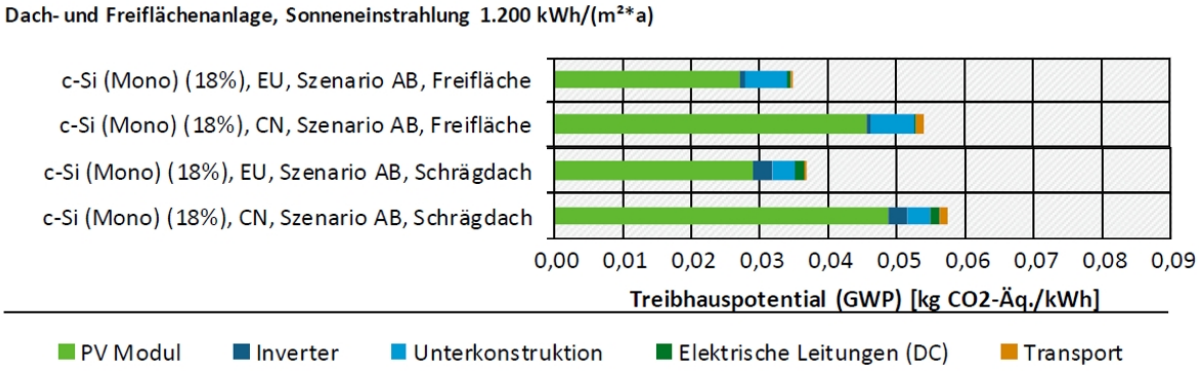


Abbildung 37: Treibhauspotenzial der Stromerzeugung mit mono c-Si PV für Dach- und Freiflächenanlagen [UBA7].

Abbildung 38 zeigt die THG-Potenziale von PV im Vergleich mit Kohle-, Erdgas- und Atomstrom. Die Emissionsfaktoren der Stromerzeugung über Biogas aus Energiepflanzen liegen im Bereich von 160 – 184 g CO_2-Äq./kWh [UBA9].
Im Jahr 2022 wurden durch die Nutzung der PV in Deutschland netto 41,7 Mio. Tonnen Treibhausgasemissionen vermieden (Abbildung 39). Bei den Berechnungen wurden die Emissionen aus der Produktion der PV-Systemkomponenten näherungsweise berücksichtigt.

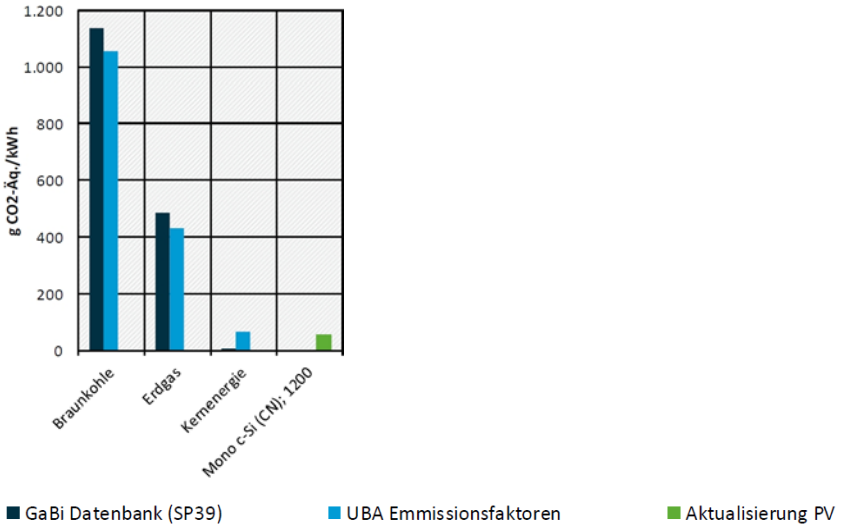
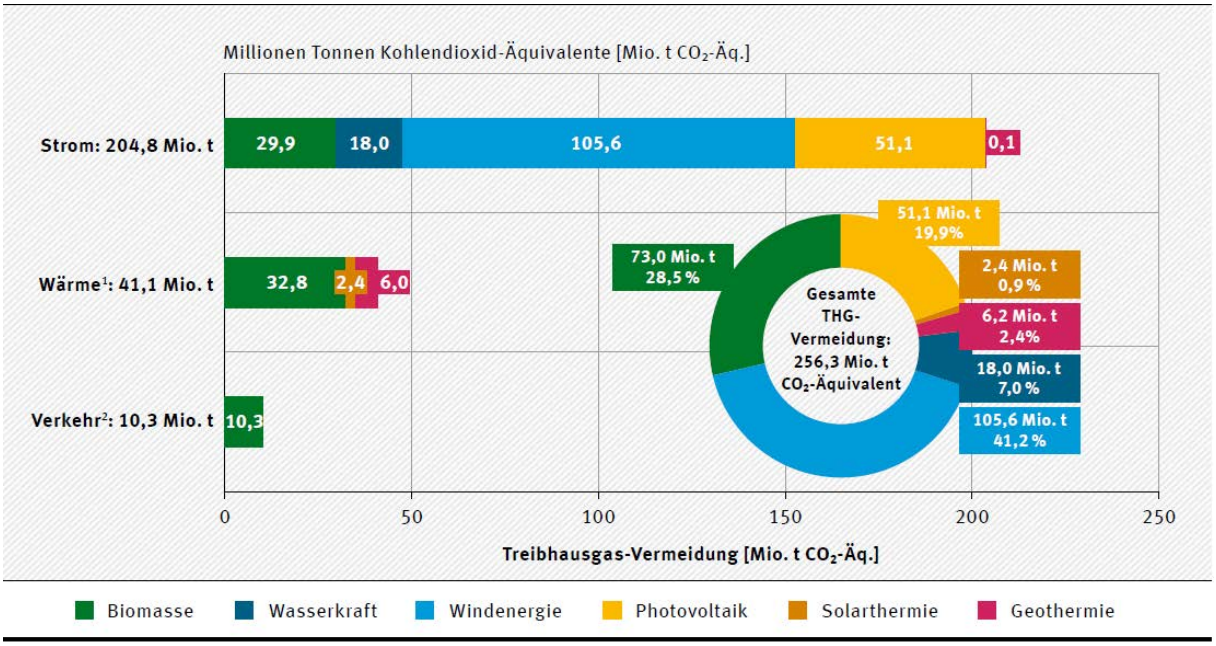


Abbildung 38: Treibhauspotenzial verschiedener Stromerzeugungstechnologien [UBA7].



¹ ohne Berücksichtigung des Holzkohleverbrauchs
² ausschließlich biogene Kraftstoffe im Verkehrssektor (ohne Land und Forstwirtschaft, Baugewerbe sowie Militär und ohne Stromverbrauch des Verkehrssektors), basierend auf vorläufigen Daten der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) für das Jahr 2023 sowie den fossilen Basiswerten gemäß § 3 und § 10 der 38. BImSchV

Quelle: Umweltbundesamt (UBA)

Abbildung 39: Vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2024 [AGEE].

Die deutsche Energiepolitik hat zudem eine hohe internationale Relevanz. Mit einer Fördermenge von 171 Mt im Jahr 2016 war Deutschland beim Abbau von Braunkohle international die Nummer 1, noch vor China. Zwar entfallen weniger als 3 % des weltweiten Stromverbrauchs auf Deutschland, bei weiter sinkender Tendenz. Die deutsche Politik hat jedoch eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung von Instrumenten zur Förderung von EE gespielt, allen voran dem EEG. Das EEG-Instrumentarium wurde international stark

beachtet und diente Dutzenden von Ländern als Vorlage für ähnliche Regelungen. China ist mittlerweile zum Vorreiter in Sachen PV-Ausbau geworden und hat Deutschland bei der jährlich installierten Leistung um ein Vielfaches überholt. Die Internationale Energieagentur (IEA) lobte in ihrem Länderbericht „Deutschland 2013" das EEG als ein sehr effektives Ausbauinstrument, das die Kosten für die Gewinnung regenerativer Energien in den letzten Jahren erheblich gesenkt habe [IEA1]. Auch die Abkehr der Deutschen von der Atomenergie hat international aufhorchen lassen. Weitere europäische Länder haben den Ausstieg beschlossen (z.B. Belgien, Schweiz, Spanien) oder sind bereits aus der Kernkraft ausgestiegen (Italien, Litauen).
Die höchste Durchschlagskraft bezüglich CO_2-Vermeidung erzielte das EEG jedoch in seinen Anfangsjahren über eine „Nebenwirkung": durch Schaffung des international größten und sichersten Absatzmarktes für PV über mehrere Jahre hat es die globale Skalierung, Technologieentwicklung und Preissenkung wesentlich beschleunigt (Abbildung 40). PV senkt weltweit den Verbrauch fossiler Rohstoffe für die Stromerzeugung.

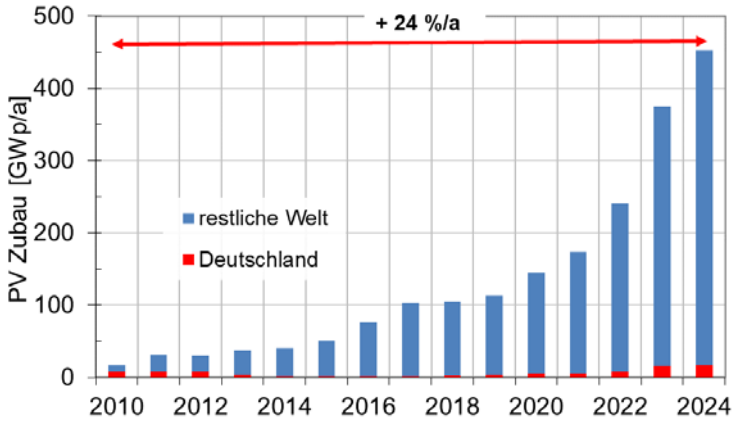


Abbildung 40: Entwicklung des jährlichen PV-Zubaus [IEA3] und mittlere jährliche Wachstumsrate.

Das deutsche EEG hat damit PV-Strom für viele Menschen in Entwicklungsländern schneller erschwinglich gemacht. Aus dieser Perspektive ist das EEG nebenbei „das vermutlich erfolgreichste Entwicklungshilfeprogramm aller Zeiten in diesem Bereich" (Bodo Hombach im Handelsblatt 11.1.2013), das auch in den Entwicklungsländern erhebliche Mengen an CO_2 einspart.

17.3 Verschlingt die Produktion von PV-Modulen mehr Energie als diese liefern können?

Nein.
Die Energierücklaufzeit oder energetische Amortisationszeit (Energy Payback Time, EPBT) gibt die Zeitspanne an, die ein Kraftwerk betrieben werden muss, um die investierte Primärenergie zu ersetzen. Der Erntefaktor (Energy Returned on Energy Invested, ERoEI oder

EROI) beschreibt das Verhältnis der von einem Kraftwerk bereitgestellten Energie und der für seinen Lebenszyklus aufgewendeten Energie.
Energierücklaufzeit und Erntefaktor von PV-Anlagen variieren mit Technologie und Anlagenstandort. Eine Analyse im Auftrag des Umweltbundesamtes hat EPBT für PV-Kraftwerke bei einem Anlagenbetrieb in Deutschland (angenommene mittlere jährliche Einstrahlungssumme in der Modulebene 1200 kWh/(m^2·a)) von 1,6 Jahren für multi- bzw. 2,1 Jahren monokristalline Si-Module ermittelt [UBA7]. Bei einer Lebensdauer von 25 – 30 Jahren und einer jährlichen Ertragsdegradation von 0,35% folgen daraus Erntefaktoren von 11 – 18. Berechnungen des Fraunhofer ISE auf Basis neuester Produktionsdaten weisen eine EPBT von unter **1,3 Jahren** für Anlagen mit marktüblichen monokristallinen Si-Module in Deutschland aus [ISE5]. Eine Komponentenproduktion in Europa senkt die EPBT noch weiter, aufgrund des höheren Grünstromanteils im Vergleich mit Importkomponenten aus China.

17.4 Entstehen bei der Produktion von PV weitere klimaschädliche Gase?

Ja, bei manchen Dünnschicht-Technologien, deren Marktanteil liegt jedoch unter 5 %.
Bei der Produktion von Dünnschicht-PV wird teilweise noch Stickstofftrifluorid (NF_3) zur Reinigung von Beschichtungsanlagen eingesetzt. Restmengen dieses Gases können dabei in die Atmosphäre entweichen. NF_3 ist über 17.000-mal klimaschädlicher als Kohlendioxid. Aktuelle Emissionsmengen sind nicht bekannt, der NF_3-Ausstoß wird jedoch ab 2013 in 37 Staaten gemäß des ergänzten Kyoto-Protokolls ermittelt.

18. Heizen PV-Module die Erde auf?

Helle Oberflächen reflektieren einen großen Teil der auftreffenden Solarstrahlung, während dunkle Oberflächen mehr absorbieren. Diese heizen sich dadurch stärker auf und geben mehr Wärme an die umgebende Luft ab. Die **solare Albedo** (der solare Reflexionsgrad) einer Oberfläche gibt an, welcher Prozentsatz der eintreffenden Solarstrahlung reflektiert wird – der Rest wird absorbiert oder transmittiert. Die solare Albedo erfasst neben dem sichtbaren Teil des Spektrums auch UV- und IR-Anteile. Literaturwerte zur Albedo von Oberflächen variieren stark. Das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz nennt für Ackerboden 7 – 17 % auf, für Grünland 12 – 30 % und für Wald 5 – 20 %. Das Umweltministerium Thüringen gibt für Dachziegel 10 – 35 % an, für ein Dach mit hellem Anstrich 60 – 70 %.

18.1 Lokale Effekte

18.1.1 Heizen PV-Module ihre Umgebung auf?

Das kommt auf die Referenz an.
Wie die meisten Materialien absorbieren PV-Module einen großen Teil der auftreffenden Solarstrahlung. Da sie aber absorbierte Strahlung teilweise als elektrische Energie abgeben und nicht als Wärme, liegt ihre effektive Albedo und damit die lokale Wärmeentwicklung in einer ähnlichen Größenordnung wie bei üblichen Umgebungsmaterialien oder bei Vegetation.
Wenn neuere PV-Module die Sonneneinstrahlung mit einem effektiven Wirkungsgrad von bspw. 18 % in elektrische Energie umwandeln und zusätzlich einen Teil der Einstrahlung von ca. 5 – 10 % reflektieren, erzeugen sie lokal so viel Wärme wie eine Vergleichsfläche mit 23 – 28 % Albedo. Wir sprechen deshalb bei PV-Modulen im Betrieb von einer **effektiven Albedo**, im genannten Beispiel von 23 – 28 %. Nur wenn PV-Module keinen Strom liefern, sinkt ihre effektive Albedo auf den Wert ihres solaren Reflexionsgrads von 5 – 10 %. Der Vergleich der effektiven Albedo von PV-Modulen mit der Albedo der überbauten Fläche ist ein wichtiger Indikator, ob durch die Installation mehr oder weniger Abwärme entsteht. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Verdunstungskühlung, mit der Pflanzen sich und ihre Umgebung abkühlen. Dies gilt zumindest so lange, wie die Pflanzen genügend Wasser aus dem Boden ziehen können. Danach setzt die Verdunstungskühlung aus und die Pflanzen vertrocknen. Im Umkehrschluss kann eine Teilbeschattung von Pflanzen durch PV-Module den Wasserbedarf der Pflanzen senken und der Boden bleibt länger feucht. Dieser Effekt spricht für eine Kombination von PV bspw. mit Landwirtschaft, Gründächern und mit wieder zu vernässenden, degradierten Moorböden (Abschnitte 12 und 14).

18.1.2 Reflektieren PV-Module Solarstrahlung in die Umgebung?

Kaum.
Der solare Reflexionsgrad gewöhnlicher PV-Module neuerer Bauart liegt in einer Größenordnung von 5 – 10 %, abhängig von Materialauswahl und Moduldesign. Helle Rahmen und Rückseitenfolien erhöhen die Reflexion. PV-Module sind darauf optimiert, möglichst viel Solarstrahlung in der aktiven Schicht zu absorbieren. Eine Wärmeschutzverglasung, mehr noch eine Sonnenschutzverglasung reflektiert ein Vielfaches (Größenordnung von 10 – 30 %). Vergleicht man eine gläserne Gebäudefassade mit einer PV-Fassade, dann reflektiert die PV-Fassade deutlich weniger Solarstrahlung nach unten in die Straßenebene. PV-Module können zwar blenden (Abschnitt 19), sie reflektieren jedoch sehr wenig Solarstrahlung.

18.1.3 Speichern PV-Module die Sonnenwärme?

Kaum.
Die Wärmespeicherkapazität gewöhnlicher PV-Module ist gering, bspw. im Vergleich mit einer massiven Betonwand. In Folge erwärmt sich das PV-Modul unter Sonneneinstrahlung deutlich schneller als eine Betonwand, kühlt jedoch am Abend auch schneller ab. Die tatsächliche Auswirkung von PV-Modulen auf das Stadtklima, im Vergleich mit anderen Baumaterialien, hängt von zahlreichen Faktoren ab und muss ggf. im Einzelfall analysiert werden.

18.2 Globale Effekte

18.2.1 Verstärkt die Solarstromproduktion den Treibhauseffekt?

Ja, aber sehr viel weniger als Stromproduktion über fossile Kraftwerke, und nur solange, bis die Produktion der PV-Komponenten vollständig mit grünem Strom erfolgt.
PV-Strom ersetzt insbesondere Strom aus fossilen Kraftwerken, die je nach Brennstoff bis zu 1,1 kg CO_2/kWh_{el} freisetzen. Das CO_2 gelangt in die Atmosphäre und wirkt dort mit unbegrenzter Dauer als Treibhausgas (Abschnitt 17.1). Im Vergleich mit fossilen Kraftwerken reduziert eine Stromerzeugung über PV die Freisetzung von CO_2 massiv und bremst damit den Treibhauseffekt wirksam (Abschnitt 17).

18.2.2 Heizen PV-Module die Erdatmosphäre auf?

Das hängt von der Albedo der überbauten Fläche ab.
Wenn PV-Module installiert werden, verändern sie die lokale Erwärmung nach Maßgabe der vorgenommenen Albedo-Änderung. Dunkle PV-Module mit einem effektiven Wirkungsgrad von 18 % und einer Albedo von 5 %, die ein helles Ziegeldach mit 30 % Albedo abdecken (ungünstige Kombination), erzeugen pro kWh Strom 400 Wh zusätzliche Abwärme, d.h. 40 % der produzierten elektrischen Energie. Im Vergleich erzeugen thermische Kraftwerke (Kohle, Kernkraft) pro kWh Strom etwa 2 kWh an Abwärme, also 200 % der produzierten elektrischen Energie. Die Produktion von Solarstrom lässt – selbst bei Überbauung relativ heller Flächen – weniger Abwärme entstehen als Stromproduktion aus thermischen Kraftwerken.

19. Können PV-Module blenden?

Ja.
Ähnlich wie Fensterglas kann auch das Deckglas von PV-Modulen blenden, abhängig von Sonnenstand, Ausrichtung der Module, Glastextur und Blickfeld des Beobachters. Der Effekt ist auf bestimmte Tageszeiten und Tage im Jahr begrenzt, Details lassen sich über ein

Blendgutachten ermitteln. Meistens geht es bei PV-Modulen nicht um eine messbare Herabsetzung des Sehvermögens (physiologische Blendung), sondern um eine Störempfindung durch hohe Leuchtdichten (psychologische Blendung). Weil die Deckgläser von PV-Module nur eine einzige blendungswirksame Grenzfläche aufweisen, in aller Regel mit einer leichten Oberflächentextur und einer zusätzlichen Antireflexschicht, sind die maximalen Leuchtdichten in Reflexion deutlich kleiner als bei Fenstern mit ihren bis zu 6 glatten, nicht entspiegelten Grenzflächen. In besonders kritischen Anwendungen, etwa in der Nähe von Flughäfen, kommen im Fall von Blendungsrisiken PV-Module mit speziellen, stärker texturierten Deckgläsern zum Einsatz.

20. Geben PV-Module gesundheitsschädliche Strahlung ab?

Nein, solange zugelassene Komponenten fachgerecht montiert werden.
Der umgangssprachliche Ausdruck „Elektrosmog“ umfasst technisch erzeugte, statische elektrische und magnetische Felder sowie elektromagnetische (EM) Felder.
Statische elektrische Felder liegen zwischen Objekten an, die sich auf verschiedenen elektrischen Spannungsniveaus (Potenzialen) befinden, bspw. zwischen Kabeln eines Modulstrings oder zwischen spannungsführenden und geerdeten Komponenten. Die Feldstärke hängt von der Spannung und der Entfernung zwischen den spannungsführenden Objekten ab. Ein Modulstring liefert üblicherweise Spannungen zwischen 400 – 1000 V, abhängig von der Anzahl der in Serie verbundenen Module. Im Zusammenhang mit PV-Anlagen sind keine Gesundheitsschäden durch statische elektrische Felder bekannt.
Statische magnetische Felder umgeben elektrische Ströme, bspw. in bestromten Kabeln. Ein PV-Modul für die Dachanwendung produziert üblicherweise Ströme im Bereich von 10 – 15 A. Magnetische Felder können bestimmte Werkstoffe magnetisieren. Die magnetische Feldstärke fällt allerdings mit der Entfernung zur Leitung sehr schnell ab und wird durch die übliche paarweise Leitungsführung mit gegenläufigem Strom zusätzlich geschwächt. Die stromführenden Leitungen einer PV-Anlage sollen nicht im unmittelbaren Wohn- und Schlafbereich verlegt werden. Im Zusammenhang mit PV-Anlagen sind keine Gesundheitsschäden durch statische magnetische Felder bekannt.
Elektromagnetische Felder („Wellen“, „Strahlung“) entstehen durch elektrische Ladungen, die beschleunigt bzw. abgebremst werden. Solarzellen erzeugen im Betrieb Gleichstrom (DC), der weder in den PV-Modulen, noch in den DC-Stromleitungen EM-Felder entstehen lässt. Wechselrichter wandeln den Gleichstrom aus dem Modulstring bzw. dem Einzelmodul in 50-Hertz-Wechselstrom (AC) zur Netzeinspeisung um. Die meisten kleinen PV-Anlagen nutzen einen zentralen Wechselrichter, gelegentlich werden auch modulintegrierte Wechselrichter auf der Rückseite der Module eingesetzt.
In Wechselrichtern (WR) fließen Ströme mit Frequenzanteilen bis in den Kilohertz-Bereich, und diese Wechselströme erzeugen EM-Felder. Wechselrichter sind aufgrund von gesetzlichen Bestimmungen herstellerseitig so abzuschirmen, dass vorgegebene Grenzwerte in Gerätenähe eingehalten werden. Wechselrichter sollen außerhalb des Wohn- und Schlafbereich montiert werden, entscheidend ist die Entfernung und die Abschirmwirkung des dazwischenliegenden Materials. Im Betrieb können Wechselrichter hochfrequente

Stromanteile in den DC-Kreis rückkoppeln, damit auch in die PV-Module. Transformatorlose WR übertragen niederfrequente (bspw. 50 Hz oder 150 Hz) Spannungen auf die DC-Seite. Im Zusammenhang mit PV-Anlagen sind keine Gesundheitsschäden durch elektromagnetische Felder bekannt. Zahlenwerte und Vergleiche mit haushaltsüblichen Elektrogeräten bietet eine Studie im Auftrag der EnergieSchweiz [BFE]. Nieder- und höherfrequente Ströme erzeugen in den Wechselrichtern während des Betriebs oft auch hörbaren Schall. Dieser kann bei ungünstigem Montageort stören, es handelt sich dabei jedoch nicht um EM-Strahlung.

21. Ersetzen PV-Anlagen thermische Kraftwerke?

Nein.
PV-Kraftwerke reduzieren zwar den Verbrauch an fossilen Brennstoffen, die Energieimporte und den CO_2-Ausstoß, sie ersetzen aber keine steuerbaren Erzeugungskapazitäten, auch nicht in Kombination mit Windkraft, Batteriespeichern und den in Deutschland nur wenig ausbaufähigen Pumpspeichern. Kritisch sind windstille Nächte und insbesondere windstille, trübe Winterwochen ohne nennenswerte PV- oder Windstromproduktion. Erst durch Hinzunahme von flexiblen thermischen Kraftwerken, befeuert durch Erdgas, Biogas und perspektivisch Wasserstoff, können ganzjährig Erzeugungslücken gedeckt werden.

22. Können wir einen wesentlichen Teil unseres Energiebedarfs durch PV-Strom decken?

Ja, in dem Maße, wie wir unser Energiesystem und die energiewirtschaftlichen Strukturen an die Anforderungen der Energiewende anpassen.

22.1 Ausgangspunkt: Energiebedarf und Energieangebot

Die traditionelle Energiewirtschaft fördert fossile und nukleare Energieträger (Primärenergie), wandelt sie und bereitet sie für die Endverbraucher auf (Abbildung 41).

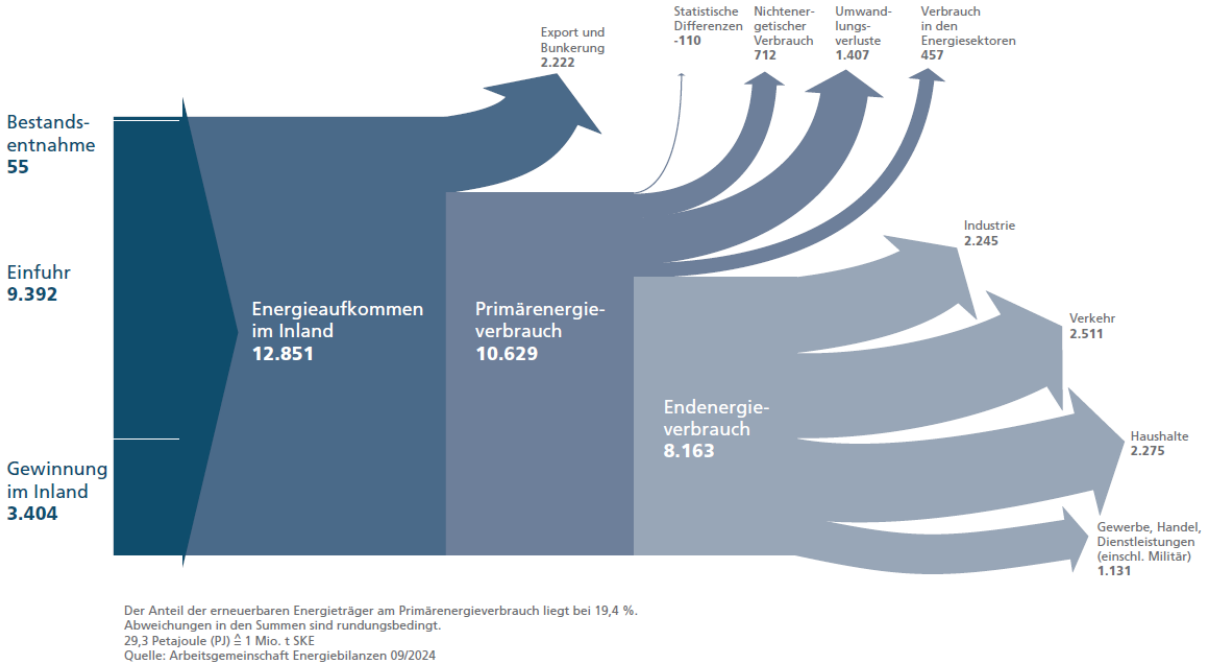


Abbildung 41: Energieflussbild 2023 für Deutschland, Angaben in Petajoule [AGEB2].

In der Wandlung und im Endenergieverbrauch herrschen dramatische Effizienzdefizite (vgl. Abschnitt 22.3.3). Unser zukünftiger Energiebedarf ist keinesfalls mit dem heutigen Primärenergieverbrauch gleichzusetzen, weder nach Mengen, noch nach Energieträgern. Deutschland war bisher hochgradig abhängig von Energieimporten, verbunden mit dem Risiko volatiler Preise, politischer Einflussnahme durch Förder- und Transitländer und dem Risiko von Störungen der Rohstofflogistik, bspw. bei Sperrungen von Pipelines oder Niedrigwasser in den Flüssen. Die Kosten der fossilen Energieimporte liegen in der Größenordnung von jährlich 80 Mrd. Euro (Abbildung 42), ein großer Teil des Geldes stützt bzw. stützte autokratische Regimes.

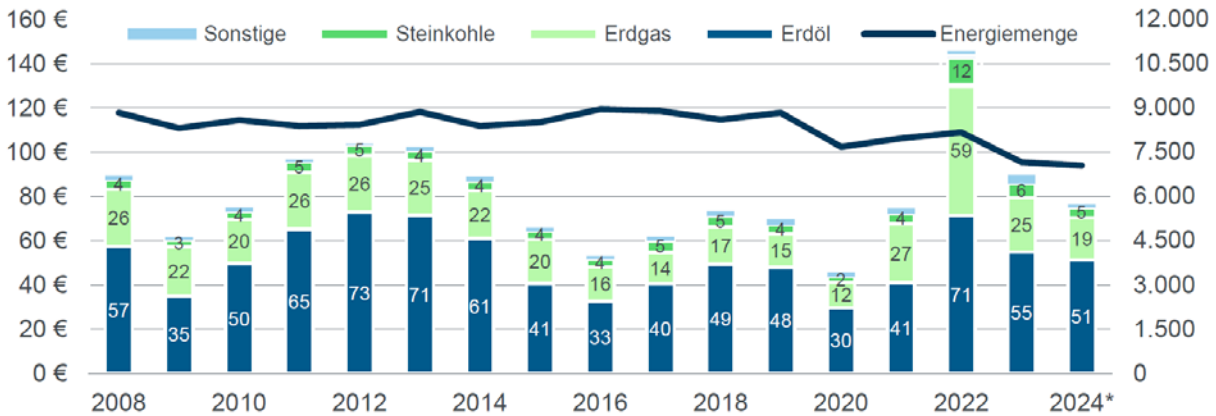


Abbildung 42: Wert und Energiemenge der Nettoimporte fossiler Brennstoffe (linke Achse: Wert in Mrd. EUR, nominal; rechte Achse Energiemenge in PJ) [KFW].

Die meiste Endenergie (53 %) dient der Wärmebereitstellung, gefolgt von mechanischer Energie („Kraft") mit 38% für den Verkehr und in stationären Motoren (Abbildung 43). Für Raumwärme und Warmwasser werden jährlich ca. 800 TWh Endenergie aufgewendet [BMWK1].

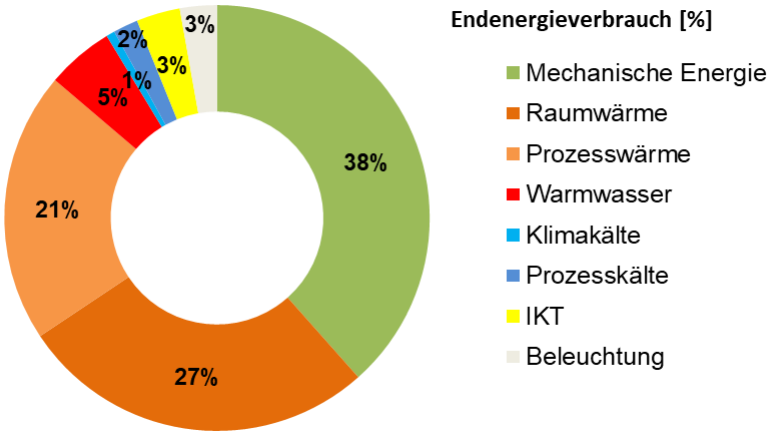


Abbildung 43: Struktur des Endenergieverbrauchs nach Anwendungsbereichen für Deutschland im Jahr 2020, Zahlen aus [AGEB3].

Die Stromlast schwankt periodisch: nachts, an Wochenenden und Feiertagen wird regelmäßig weniger Strom benötigt. Stromversorger unterscheiden im Lastprofil zwischen Grund-, Mittel- und Spitzenlast, vgl. Abschnitt 28.8. Die Grundlast ist der Lastanteil um 30 – 40 GW, der sich über 24 h kaum ändert. Die Mittellast schwankt langsam, die Spitzenlast umfasst den schnell veränderlichen Lastanteil oberhalb der Grund- und Mittellast. Der Stromverbrauch der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung liegen im Sommer geringfügig tiefer als im Winter. Der Mineralölabsatz (Otto- und Dieselkraftstoff) zeigt sehr geringe saisonale Schwankungen [MWV]. Der Heizwärmebedarf korreliert negativ mit der Globalstrahlung, bei höchster Koinzidenz im Frühjahr.

22.2 Energieszenarien

Unser heutiges, auf fossiler und nuklearer Erzeugung basierendes Energiesystem in Deutschland ist ein Auslaufmodell. Es gibt eine Fülle von Energieszenarien für die kommenden Jahrzehnte, und sie rechnen zunehmend mit EE [UBA, ACA, ISE3]. Forscher des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE haben in Simulationen auf Basis von Stundenzeitreihen mit Berücksichtigung der Sektorkopplung (Abbildung 44) verschiedene Transformationswege zu einem klimaneutralen Energiesystem für Deutschland untersucht. In einem technologieoffenen Szenario trägt die PV mit einer installierten Leistung von 471 GW bei [ISE3].

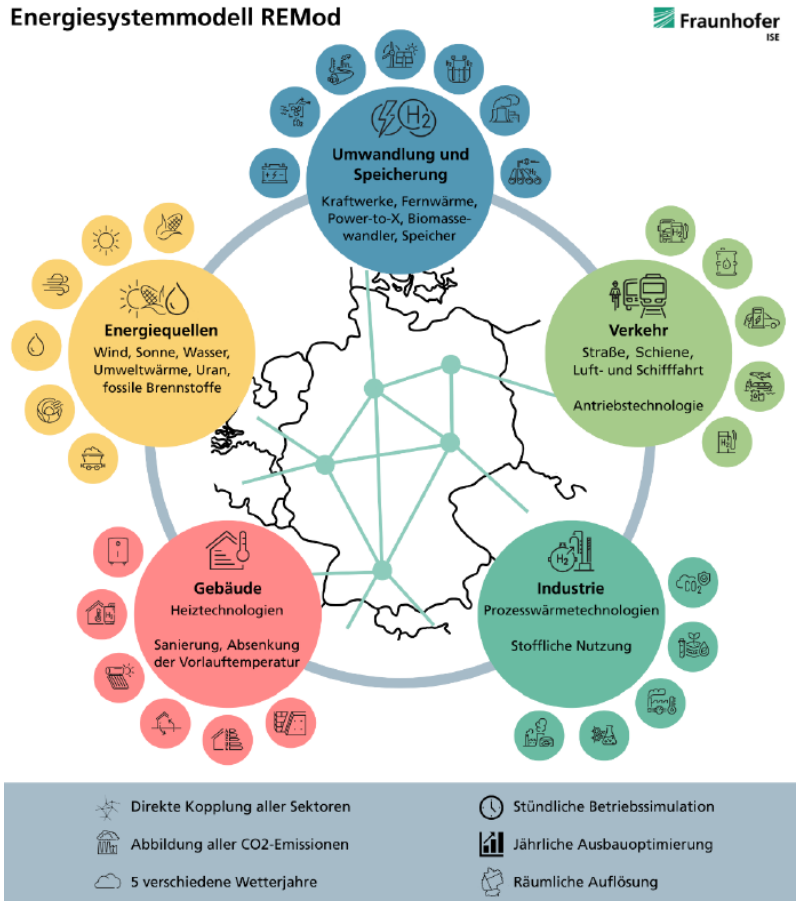


Abbildung 44: Schematische Darstellung des Modells REMod [ISE3].

Abbildung 45 zeigt eine schematische Residuallastkurve für Deutschland mit einer 100 %ig erneuerbaren Stromversorgung. Dargestellt sind die absteigend geordneten Stundenwerte der Residuallast (Abschnitt 11.5) für ein Jahr. Volatile Stromproduktion lässt sich zwar technisch jederzeit abregeln, jedoch zum Preis eines wirtschaftlichen Totalverlusts der entsprechenden Strommenge. Ein Strompreis mit sinnvoller Steuerfunktion würde entlang der Residuallastkurve der Abbildung 45 von links nach rechts fallen.

Auf der **Bedarfsseite** werden i.A. flexible Lasten reduziert, Batterien und Pumpspeicher entladen, Gas-und-Dampf-Generatoren (GuD) und Gasturbinen aktiviert, um die Residuallast zu decken. Die thermischen Kraftwerke nutzen grünen Wasserstoff, bei lokaler Wärmenachfrage sind sie mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ausgeführt.

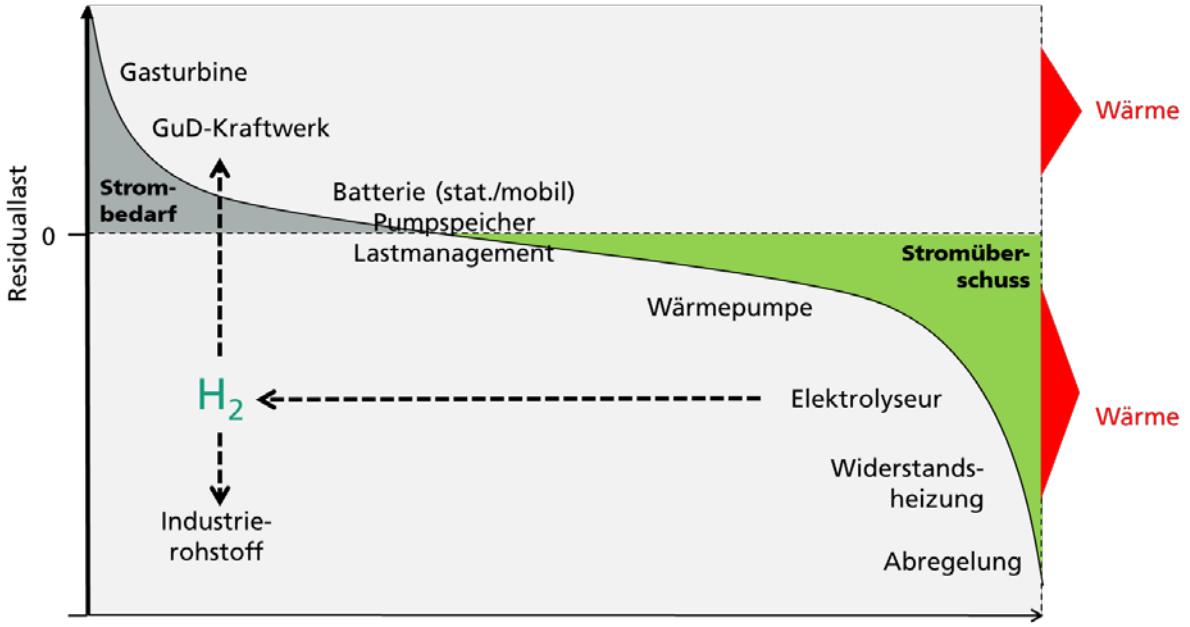


Abbildung 45: Schematische Darstellung einer Residuallastkurve für Deutschland bei Stromversorgung mit 100 % EE.

Auf der **Überschussseite** werden i.A. flexible Lasten erhöht, Batterien und Pumpspeicher beladen, Wärmepumpen, Elektrolyseure und Widerstandsheizungen (Heizstäbe, Elektrodenkessel) bei zunehmend sinkenden Strompreisen aktiviert, um den momentan nicht benötigten Strom abzunehmen. Auch Elektrolyseure können als KWK-Anlagen betrieben werden und nutzbare Abwärme produzieren. Widerstandsheizungen und Hochtemperatur-Wärmepumpen können Wärme für Industrieprozesse liefern. Ultima Ratio ist das Abregeln der Stromproduktion, wenn die installierte Abnahmeleistung oder die Netzkapazitäten an wenigen Stunden des Jahres nicht ausreichen.
Vor absehbaren, besonders hohen Residuallastspitzen werden Speicher und flexible Lasten auch atypisch betrieben, um die vorzuhaltende Kapazität an thermischen Kraftwerken auf der einen bzw. die Abregelung auf der anderen Seite zu verringern.
Damit wärmeerzeugende Wandler auf beiden Seiten der Kurve stromgeführt betrieben werden können, benötigen sie ortsnah thermische Speicher und Wärmeverbraucher bzw. Anschluss an Wärmenetze (Abschnitt 22.3.6). Für die beidseitigen Ausläufer der Residuallastkurve werden Generatoren (bspw. einfache Gasturbinen) und Abnehmer (bspw. Widerstandsheizungen) mit besonders geringen leistungsbezogenen Investitions- und Vorhaltekosten (€/W) benötigt. Da selten in Betrieb, müssen sie keine hohe Effizienz aufweisen.
Der elektrolytisch erzeugte Wasserstoff dient als Industrierohstoff (Direktreduktion, organische Chemie, Ammoniaksynthese); Wasserstoff und seine Derivate können in Gaskraftwerken rückverstromt werden und sie können Fahrzeuge mit höchsten Energiedichten

antreiben, z.B. Flugzeuge. Ein Wasserstoff-Kernnetz für Deutschland ist geplant, Beimischung von Wasserstoff im bestehenden Erdgasnetz ist möglich.
Die **Speicherkapazität** des Systems muss für den Worst Case eines mehrwöchigen Primärenergieausfalls (Sonne und Wind) ausgelegt werden, d.h. eine längere Flaute im Winter, möglicherweise verschärft durch eine geschlossene Schneedecke. Dazu müssen ausreichende Mengen an Wasserstoff und daraus abgeleitete synthetische Energieträger und Rohstoffe vorgehalten werden. Gäbe es für die PV keine Unterstützung durch Windkraft, dann würde der Worst Case im Winter Monate, nicht Wochen dauern, und es wäre ein Vielfaches an Speicherkapazität notwendig.
Wegen ihrer begrenzten Kapazität fallen stationäre Batterien und Pumpspeicher im Dauerbetrieb als Erzeuger relativ schnell aus (Minuten bis wenige Stunden). Gleiches gilt für Fahrzeugbatterien, die am Netz bidirektional betrieben werden können, aber primär den Mobilitätsbedarf decken müssen. Ihren Nutzen entfalten diese Speicher im häufigen Betriebswechsel zwischen Laden und Entladen, den sie schneller und vor allem energieeffizienter umsetzen, verglichen mit dem Strom-zu-Strom-Pfad über Wasserstoff. Auch viele Optionen für das Lastmanagement entfalten nur eine kurze Wirkung im Stundenbereich.
Die **Stromerzeugungsleistung** des Systems auf der linken Seite der Abbildung 45 muss ausreichen, um die komplette Versorgung in einer Größenordnung von 100 – 150 GW zu übernehmen, wenn die Stundenreserven (Lastmanagement, Pumpspeicher, Batterie) erschöpft sind. Diese Situation tritt häufig auf, bspw. in windarmen Nächten, und kann in einem Worst-Case-Szenaro über mehrere Wochen anhalten.
Die **Stromabnahmeleistung** des Systems auf der rechten Seite der Abbildung 45 in einer Größenordnung von mehreren 100 GW muss ausreichen, um die Stromproduktion aus volatilen EE abzüglich des momentanen Stromverbrauchs weitestgehend aufzunehmen, sobald die Stundenreserven (Lastmanagement, Pumpspeicher, Batterie) ausgeschöpft sind. Reicht die Stromabnahmeleistung bei seltenen Produktionsspitzen nicht, so muss abgeregelt werden. Dies kann bspw. in stürmischen Nächten oder an sonnigen und gleichzeitig sehr windigen Wochenendtagen vorkommen, wenn geringer Bedarf und sehr hohe Stromproduktion zusammentreffen. Für diese wenigen Betriebsstunden lohnt kein weiterer Ausbau der Abnahmeleistung.
Wandler, die einen reversiblen Betrieb zulassen, arbeiten auf beiden Seiten der Kurve in Abbildung 47 und erreichen damit eine höhere Auslastung. Dazu zählen neben Batterien und Pumpspeichern perspektivisch auch reversible Brennstoffzellen, die bei Stromüberschuss Elektrolyse betreiben und sich derzeit in der Entwicklung befinden.
Ein kurzer Seitenblick auf globale Energieszenarien: die International Energy Agency (IEA) prognostiziert eine tragende Rolle der Photovoltaik in der weltweiten Stromversorgung über alle 3 betrachteten Szenarien der globalen Energiewende hinweg (Abbildung 46).

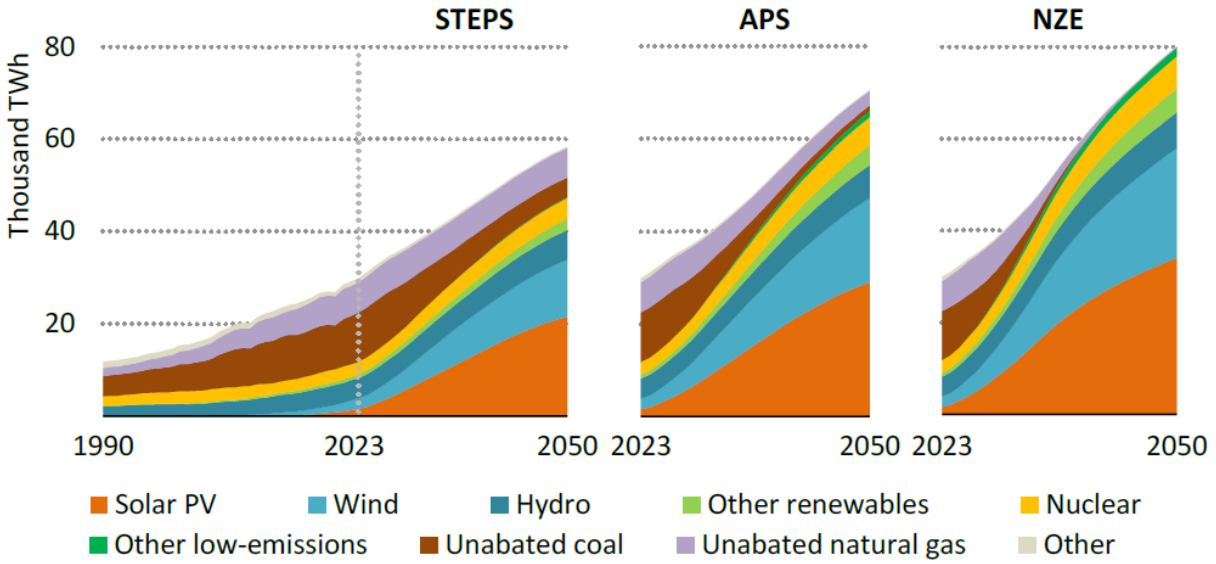


Abbildung 46: Entwicklung der globalen Stromerzeugung nach Technologien und Szenarien [IEA2].

22.3 Transformationsschritte

Für eine massive, technologisch und ökonomisch beherrschbare Integration von volatilem PV-Strom in unser Energiesystem gibt es keine singuläre Patentlösung, dafür aber eine Vielzahl von sich ergänzenden Maßnahmen. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Schritte angesprochen.

22.3.1 Verstetigung der PV-Stromerzeugung

Im Freiland und auf Flachdächern aufgeständerte Module wurden überwiegend nach Süden ausgerichtet und ca. 25° aus der Horizontalen geneigt, um den spezifischen Jahresstromertrag (Wh/W_P) zu maximieren. Aus gleichem Grund wurden überwiegend Steildächer in Südausrichtung mit PV belegt. Diese einseitige Ausrichtung der Module verstärkt die stündliche Spreizung der Solarstromerzeugung zugunsten der Mittagszeit, insbesondere an klaren Tagen, sowie die saisonale Spreizung zugunsten des Sommerhalbjahrs.
In Folge werden landesweit maximale PV-Stromerträge meist um die Mittagszeit erreicht, während es in den Morgen- und Abendstunden wegen flacherer Einfallswinkel zu Ertragseinbußen kommt. Diese Situation erhöht den Ausgleichsbedarf bspw. durch Abregelung, Lastmanagement und Speicher, außerdem verliert der Strom um die Mittagszeit zunehmend an Marktwert. Durch alternative Montagearten lässt sich die PV-Stromerzeugung etwas verstetigen.
Senkrecht montierte, bifaziale Module mit Ost-West-Ausrichtung liefern bei direkter Sonneneinstrahlung vormittags und nachmittags deutlich mehr Strom als am Mittag. Sie ergänzen mit ihrem Erzeugungsprofil den großen, überwiegend nach Süden ausgerichteten

Bestand an PV-Kraftwerken optimal (Abbildung 47). Ein- oder zweiachsig nachgeführte Anlagen verstetigen die Stromproduktion über den Tageslauf und heben den spezifischen Jahresertrag um ca. 15 – 30 % an. Senkrechte und bewegliche Module haben den zusätzlichen Vorteil, dass sie eine landwirtschaftliche Nutzung der Flächen wenig einschränken (Abschnitt 12).

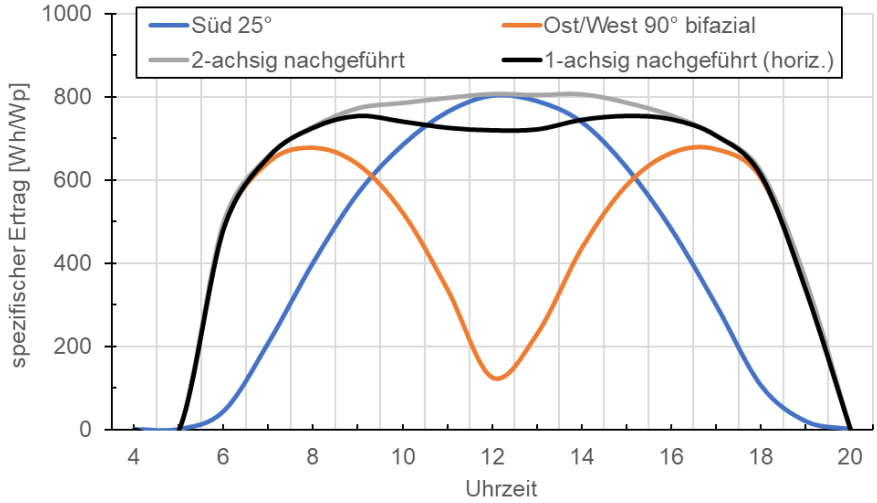


Abbildung 47: Stromertragsprofile von PV-Kraftwerken in verschiedenen Montagevarianten, berechnet online mit https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools für einen überwiegend klaren Maitag am Standort Freiburg, ohne Verschattungseffekte, Bifazialitätsfaktor 100%.

Montage von PV auf **Steildächern abseits der Südausrichtung** verlagert den Schwerpunkt der Stromproduktion ebenfalls in Richtung Morgen- oder Abendstunden, während Ost-West-orientierte Module auf Flachdächern das Tagesprofil verbreitern (Abbildung 48).

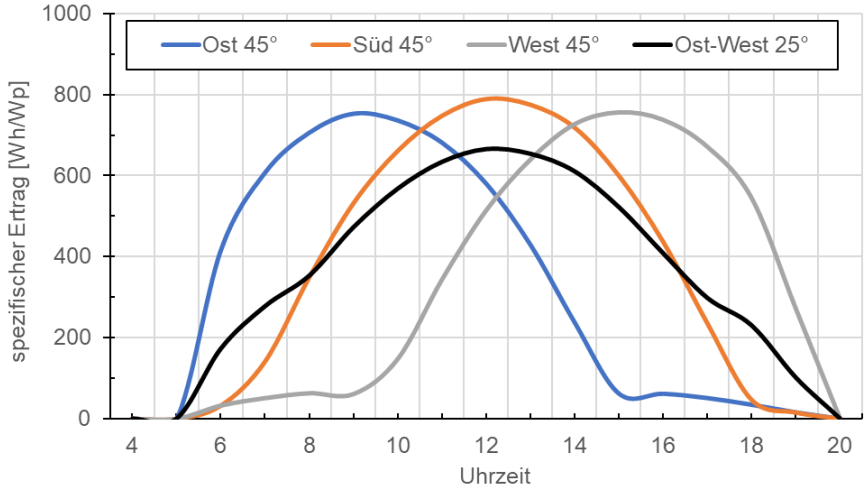


Abbildung 48: Stromertragsprofile von PV-Kraftwerken in verschiedenen Montagevarianten, berechnet online mit https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools für einen überwiegend klaren Maitag am Standort Freiburg, unverschattet.

Die sehr ausgeprägte saisonale Fluktuation der PV-Stromerzeugung lässt sich durch südorientierte, senkrechte Module dämpfen, insbesondere an **senkrechten Südfassaden** (Abbildung 49). In den Vergleichsberechnungen wurde keine Ertragsverluste durch eingeschränkte Hinterlüftung berücksichtigt.

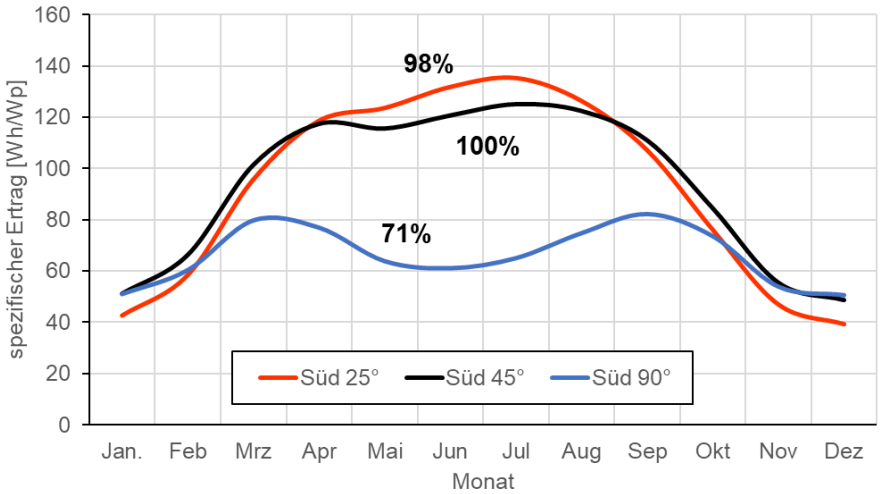


Abbildung 49: Stromertragsprofile von PV-Kraftwerken in verschiedenen Montagevarianten, berechnet online mit https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools, Standort Freiburg, unverschattet; die Prozentzahlen geben den relativen Jahresertrag bezogen auf 45° Neigung an.

Die etwas höheren Stromgestehungskosten der alternativen Montagevarianten können sich im Kontext eines erhöhten Eigenverbrauchpotenzials oder erhöhter Marktwerte im Stromverkauf amortisieren. Einspeisevergütungen, die einen höheren Wert von Strom in den Morgen- und Abendstunden bzw. im Winterhalbjahr honorieren, fördern den Bau systemisch vorteilhafter PV-Kraftwerke, die nicht nur auf maximalen Jahresstromertrag optimiert sind. Auch die in Abschnitt 16.4 genannten Maßnahmen zur Erhöhung der Volllaststundenzahl tragen zur Verstetigung der PV-Stromerzeugung bei.

22.3.2 Ausbau von flexiblen Erzeugungskapazitäten

Für die Energiewende ist es erforderlich, die Erzeugungskapazität von wasserstoffkompatiblen Gaskraftwerken und von Biomassekraftwerken massiv auszubauen, bei sinkenden Volllaststunden und steigenden Marktwerten des produzierten Stroms.
Gaskraftwerke eignen sich besonders gut zur Deckung fluktuierender Last. In Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) werden hohe Gesamtwirkungsgrade bis 95 % erzielt [UBA2]. Einfache Gaskraftwerke auf Basis von Gasmotoren liegen mit ihren Investitionskosten (€/kW) bei einem Bruchteil der Kosten für Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerke (GuD). Gaskraftwerke verbrennen heute Erdgas und Biogas. Gaskraftwerke werden von Erdgas auf Mischgase mit steigenden Anteilen elektrolytisch erzeugten Wasserstoffs („H_2-ready“) umsteigen. Der Kohleausstieg ist beschlossen, in einigen Kohlekraftwerken

lässt sich die Dampferzeugung von Kohle- auf Gasbrenner umrüsten („Fuel Switch"), so dass Dampfturbine und Generator weiterverwendet werden können [EnBW2].
Biomasse-Kraftwerke können je nach Typ feste Biomasse (Restholz, Altholz), flüssige Biomasse (Pflanzenöl) oder Biogas aus Landwirtschaft oder Kläranlagen verbrennen. Ende 2024 waren deutschlandweit Biomasse-Kraftwerke mit über 9 GW_P Leistung installiert [ISE4]. Kraftwerke, die feste oder flüssige Biomasse verbrennen, lassen sich aufgrund der einfachen Lagerung des Brennmaterials sehr einfach stromgeführt betreiben. Einschränkungen gibt es bei Biogas-Kraftwerken, deren Vergärungsdurchsatz nur bedingt gesteuert werden kann. Bei großen Anlagen in der Nähe eines Gasnetzes lohnen sich oft die Investitionen für die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und für den Netzanschluss. Kleinere Anlagen benötigen lokale Biogasspeicher und höhere Generatorleistungen, um ihre Stromproduktion auf die Zeiten des größten Strombedarfs zu konzentrieren.
Der Anbau von Biomasse zum Zweck der energetischen Nutzung wird aufgrund der geringen Flächeneffizienz (Abschnitt 16) abnehmen, die Nutzung wird sich auf Rückstände der Landwirtschaft (biogene Abfälle) konzentrieren.

22.3.3 Erhöhung der Energieeffizienz

22.3.3.1 Verkehr

Die im Verkehr verbrauchte Endenergie wird über Verbrennungsmotoren größtenteils in Abwärme umgesetzt, nur ein kleiner Teil erreicht den Antriebsstrang als mechanische Energie. PKW-Dieselmotoren erreichen im Bestpunkt bis ca. 42 % Wirkungsgrad, im Stadtverkehr sind es wegen des Teillastbetriebs im Mittel nur ca. 20 % [Sprin]. Bei PKW-Ottomotoren liegen die Werte mit bis 37 % im Bestpunkt bzw. ca. 10 – 15 % im Stadtverkehr noch niedriger. Selbst von der gewonnenen Antriebsenergie wird insbesondere im Stadtverkehr ein beträchtlicher Teil beim Bremsen irreversibel verheizt, weil Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren über ihre Lichtmaschine kaum rekuperieren können. Somit verbrennt der motorisierte Straßenverkehr fossile Treibstoffe mit einem sehr geringen Wirkungsgrad, bezogen auf die Transportleistung.
Elektrische Fahrzeugantriebe nutzen hocheffiziente Motoren mit einem effektiven Wirkungsgrad um 90 %. Die Verluste beim Laden der Fahrzeugbatterie liegen in der Größenordnung von 15 %, sie schlagen besonders beim schnellen (DC) Laden zu. Elektrische Fahrzeugantriebe können kinetische Energie zu einem großen Teil zurückgewinnen, der Wirkungsgrad der Rekuperation liegt laut Herstellerangabe bspw. für den BMW i3 bei ca. 63 %. Allein aus Gründen der Energieeffizienz ist der Umstieg auf Elektroantriebe sinnvoll, hinzu kommt das erhebliche Speicherpotenzial (Abschnitt 22.3.7.2).
Abbildung 50 zeigt die kumulierten Treibhausgasemissionen eines durchschnittlichen PKWs der Kompaktklasse (Golfklasse) mit unterschiedlichen Antrieben im Jahr 2022, in Abhängigkeit von der Gesamtfahrleistung [ADAC]. Bevorzugtes Laden mit Solar- oder Windstrom (vgl. Abschnitt 22.3.7.2) führt zu einem besonders flachen Verlauf der Emissionslinie (Elektro3). Wenn das BEV zusammen mit einer kleinen PV-Anlage von 3 kW_P Nennleistung verkauft wird, fährt das Fahrzeug bilanziell mit 100 % Solarstrom, bei einer

mittleren jährlichen Fahrleistung von über 15000 km, einem spezifischen Jahresertrag von 950 kWh/kW$_P$ und 15 % Ladeverlusten. Insbesondere im Stadtverkehr mit seinem typischen Stop-and-go-Betrieb sinken für BEV Verbrauch und THG-Emissionen pro km dank Rekuperation, während sie für Verbrenner wegen Bremsverlusten und ineffizientem Teillastbetrieb ansteigen.

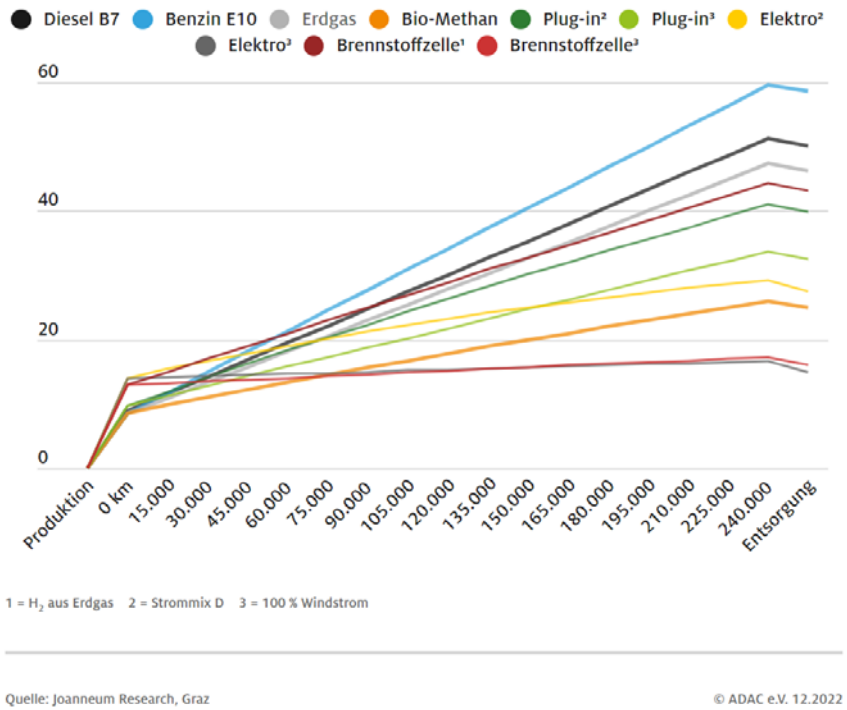


Abbildung 50: Treibhausgasemissionen (CO_2-Äqu. in Tonnen) eines durchschnittlichen PKWs der Kompaktklasse mit unterschiedlichen Antrieben im Jahr 2022, in Abhängigkeit von der Gesamtfahrleistung [ADAC].

Für Stadtbetrieb genügen meistens auch kleinere Batterien, wodurch THG-Emissionen für Herstellung und Betrieb nochmals sinken. Perspektivisch werden bei der Herstellung von BEV steigende Anteile von EE mit entsprechend sinkenden Treibhausgasemissionen verwendet.
Pointiert lässt sich die CO_2-Bilanz wie folgt bewerten: ein Elektroauto mit kleiner Batterie, das meist innerorts fährt, bevorzugt EE-Strom lädt und viele (notwendige) km pro Jahr zurücklegt, liegt bei der THG-Bilanz besonders klar im Vorteil. Für Sonntagsfahrer mit großer Batterie, hohem Anteil an Autobahnstrecke und grauem Ladestrom schrumpft der Vorteil.

22.3.3.2 Privathaushalte

Privathaushalte setzen ca. 75 % der verbrauchten Endenergie für Heizung ein. Dieser Verbrauch kann im Schnitt durch einfache Wärmeschutzmaßnahmen halbiert werden.

Die Stiftung Warentest hat ermittelt, dass ein komplett mit Altgeräten ausgestatteter Haushalt doppelt so viel Strom verbraucht wie einer, der nur effiziente Geräte setzt [Test]. Besonders effektiv sind Maßnahmen, die den nächtlichen Stromverbrauch senken, wenn Solarstrom (und bei nächtlicher Flaute auch Windstrom) nur über vergleichsweise aufwändige Speicherung bereitgestellt werden kann.

22.3.4 Lastmanagement

Netzdienliches Lastmanagement („Demand Side Management") zielt auf eine angebotsorientierte, zeitliche Verschiebung des Stromverbrauchs. Bei hoher Residuallast (Abschnitt 11.5) wird der Verbrauch reduziert oder eingestellt, dafür bei geringer Residuallast nachgeholt. Wenn der CO_2-Preis ausreichend hoch liegt, um den Merit Order (Abschnitt 4.3) zu bestimmen, können durch Lastmanagement CO_2-Emissionen eingespart werden, weil die klimaschädlichsten Kraftwerke dann seltener gebraucht werden.
Voraussetzungen für Lastmanagement sind Flexibilitätsoptionen durch Energie- oder Materialspeicher auf der Nachfrageseite. Eine Waschmaschine kann häufig ein paar Stunden oder auch mal einen Tag warten, ein Personenzug muss hingegen pünktlich abfahren. Bei elektrischen Anlagen im Dauerbetrieb sind Leistungsreserven notwendig, die nach einer Absenkung unter Normalleistung eine ausgleichende Anhebung über Normalleistung ermöglichen. Ein netzdienlicher Betrieb reduziert hier die Volllaststunden.
Eine Studie hat für private Haushalte im Betrachtungsjahr 2024 theoretische Lastmanagementpotenziale von 15,6 TWh ermittelt [EON], unter Berücksichtigung aller Wärmepumpen, E-Autos, Heimspeicher, Waschmaschinen, Trockner und Spülmaschinen. Diese Strommenge entspricht rund einem Drittel der öffentlichen Stromerzeugung aus Gas-Kraftwerken und dürfte sich bis zum Jahr 2030 verdoppeln.
Die technischen Voraussetzungen und ökonomischen Anreize für die Erschließung dieser Potenziale müssen größtenteils noch geschaffen werden. Haushaltsgeräte, deren Betrieb in einem nutzerdefinierten Zeitintervall erfolgen darf, müssen technisch in die Lage versetzt werden, optimale Betriebszeiten zu wählen, im Hinblick auf Strom- und Netzknappheit. Von entscheidender Bedeutung sind dynamische Stromtarife und Stromzähler, die eine zeitabhängige Abrechnung ermöglichen („Smart Meter"). Die aktuelle Zusammensetzung der Strompreise für Haushalte (Abbildung 10) mit sehr hohen Fixkosten pro kWh würde bei den üblichen Preisschwankungen an der Strombörse kaum Anreize für Lastmanagement schaffen. Gemäß der EU-Strommarktrichtlinie 2019/944 sollten Endkunden mit Smart-Meter ab dem 1.1.2021 dynamische Stromtarife wählen können, nach Plänen der Bundesregierung sollen diese Tarife bis spätestens 2025 verpflichtend angeboten werden.
In der stromintensiven Industrie, bspw. der elektrolytischen Aluminiumproduktion, gibt es ebenfalls Potenziale zur Anpassung von Verbrauchsprofilen. Unternehmen, die kurzfristig angekündigte, temporäre Leistungskürzung bei der Stromlieferung akzeptieren, können bereits heute eine vertraglich vereinbarte Ausgleichszahlung von ihrem Übertragungsnetzbetreiber erhalten (Verordnung über abschaltbare Lasten – AbLaV).
Sobald besonders preiswerter Tagesstrom häufiger zur Verfügung steht, weil die installierte PV-Leistung wächst und variable Stromtarife angeboten werden, wird auch die

Flexibilität aufseiten der Industrie und der Verbraucher zunehmen. Der Eigenverbrauch von Solarstrom wirkt analog zu dynamischen Stromtarifen, weil er den Strompreis bei direktem Bezug vom eigenen Dach deutlich reduziert. Die Förderung von PV-Eigenverbrauch für Haushalte und Unternehmen ist ein hochwirksames Mittel zur Anreizung von Lastmanagement.
Mit der zunehmenden Elektrifizierung der Sektoren Verkehr und Wärme steigt das Potenzial für Lastmanagement erheblich. Elektrofahrzeuge, elektrisch angetriebene Wärmepumpen, Heizstäbe und Elektrodenkessel verbrauchen große Strommengen und bieten über integrierte Strom-, Wärme- oder Kältespeicher hohe Flexibilitätspotenziale.

22.3.4.1 Elektrofahrzeuge

In Deutschland zugelassene PKW legten im Jahr 2023 im Schnitt 12.320 km zurück. Rechnerisch entspricht die Gesamtfahrleistung der PKW in Deutschland von 591 Mrd. km im Jahr 2023 [KBA] bei einem Verbrauch von 180 Wh/km und bei vollständigem Umstieg auf E-Autos einem Jahresstromverbrauch von 106 TWh, zuzüglich ca. 15 % Ladeverluste. Die große On-Board-Batteriekapazität von E-PKW (30 – 100 kWh) und von E-Fahrzeugen allgemein eröffnet zukünftig erhebliche Potenziale für Lastmanagement durch Vorziehen, Drosseln oder Verschieben von Ladevorgängen im Zeitfenster von Stunden bis zu mehreren Tagen. Ende 2024 waren in Deutschland ca. 1,6 Mio. reine Elektro-Autos (BEV, ohne Plug-in-Hybrid) zugelassenen, von insgesamt ca. 49 Mio. PKW (de.statista.com, www.kba.de). E-Busse für den Stadtverkehr sind kommerziell verfügbar, ebenso E-Transporter für die Verteillogistik und zunehmend auch 40-Tonner E-LKW für den Fernverkehr. Angebotsabhängige Strompreise motivieren Privat- und Geschäftskunden, preisgünstige Ladezeiten mit hohem Anteil von EE im Strommix zu wählen. Variable Spritpreise sind nicht neu, auch Tankstellen ändern laufend ihre Preise. Um PV-Strom im Direktverbrauch abgeben zu können, müssen Ladesäulen an typischen Tagesstellplätzen stehen, bspw. am Arbeitsplatz, in Parkhäusern oder an öffentlichen Parkplätzen. Fernsteuerbarkeit der Ladeleistung, unter Berücksichtigung des Mobilitätsbedarfs im Einzelfall, erlaubt es Netzbetreibern, das Netz zu stabilisieren.
Der momentane Anteil von EE-Strom an der Last in Deutschland schwankte im Jahr 2024 zwischen 11 und 137 % [ISE4]. Wer sein E-Auto schon heute mit besonders grünem Strom aus dem Netz versorgen möchte, lädt bevorzugt an sonnigen Tagen um die Mittagszeit, sonst in windigen Nächten. Das Wochenende und Feiertage sind meistens vorteilhaft, weil der geringere Stromverbrauch die CO_2-Bilanz tendenziell verbessert. Leider werden viele E-Autos am Abend zu Hause geladen, so dass sie die abendliche Lastspitze erhöhen und keinen PV-Strom direkt nutzen können. Präzise Informationen zum aktuellen und geplanten Anteil der EE am deutschen Strommix zeigen die Energy Charts [ISE4].

22.3.4.2 Wärmepumpen

Elektrische Wärmepumpen verbrauchen Strom, um Nutzwärme aus Umgebungswärme bereitzustellen (Heizen) bzw. um Wärme in die Umgebung abzuführen (Kühlen).
Im Gebäudesektor wird die Effizienz einer Wärmepumpe als Jahresarbeitszahl (JAZ) angegeben und liegt im Heizbetrieb abhängig von Technologie und Last um 300 %. Für die Abschätzung der maximal zuschaltbaren elektrischen Last (Peak-Last) über fernsteuerbare Wärmepumpen, teilweise kombiniert mit Heizstäben, wird eine durchschnittliche thermischen Nennleistung von 15 $kW_{P,th}$ pro Gerät angenommen. Bei einem COP („Coefficient of Performance") von 3 entspricht dies einer elektrischen Nennleistung von 5 $kW_{P,el}$. Im normalen Betrieb arbeiten WP üblicherweise mit COP von 3 – 5. Ende 2024 waren ca. 2 Mio. WP im Einsatz [BWP], was bei gleichen Annahmen einer elektrischen Nennleistung von 9 GW_P entspricht.
Einen effizienten Betrieb erzielen Wärmepumpen mit Flächenheizungen, meist Fußbodenheizungen, die mit niedrigen Vorlauftemperaturen auskommen. Widerstandsheizungen (Heizstäbe) wandeln Strom mit 100 % Wirkungsgrad in Wärme um, bei Erzeugung von Niedertemperatur-Wärme allerdings mit einem geringen exergetischen Wirkungsgrad.
Thermische Speicherkapazität kann viel günstiger bereitgestellt werden als Strom-zu-Strom-Speicherkapazität. Bei ausreichender Dimensionierung der thermischen Speicherkapazität und der Wärmepumpen- bzw. Heizstableistung kann die Speicherbeladung angebotsorientiert erfolgen, abhängig von der aktuellen Residuallast. Dazu werden Wärmespeicher und Kältespeicher bspw. von Klimaanlagen, Kühlhäusern und Lebensmittelmärkten bevorzugt in der Tageskernzeit oder nach Strompreissignalen aufgeladen. Fehlen allerdings großzügig dimensionierte thermische Wärmespeicher, dann steigt die Thermosensibilität der Stromlast und es müssen größere Leistungsreserven bei Kraftwerken vorgehalten werden.
Niedertemperatur-Wärmespeicher, vor allem Heißwasser-Wärmespeicher, ermöglichen den stromgeführten, hocheffizienten Betrieb von KWK-Anlagen auf beiden Seiten der Residuallastkurve (Abbildung 45), sowie von Wärmepumpen und Heizstäben auf der Stromabnehmerseite. Derselbe Speicher kann bspw. bei hohen Stromüberschüssen gleichzeitig über Wärmepumpe und Heizstab, bei Strombedarf durch ein KWK beladen werden. Wärmespeicher sind skalierbar vom Einfamilienhaus über Mehrfamilienhäuser und Gewerbebetriebe bis zur Quartiersversorgung. Die relativen Speicherverluste und die spezifischen Kosten nehmen mit der Größe des Speichers ab. Große Speicher ab mehrere Tausend m^3, bspw. Quartiersspeicher, lassen sich als saisonale Wärmespeicher betreiben (http://www.saisonalspeicher.de). Sie ermöglichen den Übertrag von Nutzwärme aus dem Sommer- in das Winterhalbjahr mit seinem sehr viel höheren Wärmebedarf.
Wärmespeicher erhöhen den Eigenverbrauch von PV-Anlagen, wenn sie v.a. im Sommerhalbjahr über Wärmepumpe und Heizstab beladen werden. Die PV-Anlage kann saisonal die Brauchwassererwärmung übernehmen, umso mehr, wenn die PV-Module mit hoher Neigung auf steilen Süddächern oder an Südfassaden montiert sind. Sobald Preissignale

verfügbar werden, können dezentrale Wärmespeicher auch gezielt mit überschüssigem Windstrom aus dem Netz beladen werden.
Am Ort der Kälteerzeugung und -nutzung, bspw. in der Gebäudeklimatisierung oder in Kühllagern, kann Kälte mit vergleichsweise einfachen Mitteln gespeichert werden. Weitere Voraussetzung für einen netzdienlichen Betrieb ist eine ausreichend dimensionierte Leistung des Kälteerzeugers.

22.3.4.3 Heizstäbe und Elektrodenkessel

Überschüssiger Strom lässt sich über Widerstandsheizungen in Niedertemperaturwärme für Gebäudeheizung und Warmwasser und in Hochtemperatur-Wärme für Industrieprozesse umwandeln. Im Betrieb mit Nieder- und Hochtemperatur-Wärmespeichern bieten Heizstäbe Flexibilitätspotenziale in der Stromlast zu vergleichsweise niedrigen Investitionskosten.

22.3.4.4 Elektrolyse

Mit der Transformation des Stromsektors und der Industrie wird der Bedarf an grünem Wasserstoff und seinen Derivaten massiv ansteigen, von 55 TWh im Jahr 2023 auf 290 - 440 TWh in 2025 [NWS]. Ein Teil des Wasserstoffs wird für die Rückverstromung gespeichert (Abschnitt 22.3.7.5). In Deutschland betriebene Elektrolysekapazitäten für die Wasserstoffversorgung der Industrie schaffen bedeutende Kapazitäten für Lastmanagement, im Verbund mit Wasserstoffspeichern.

22.3.5 Ausgewogener Zubau von PV- und Windkraftkapazitäten

Witterungsbedingt zeigt sich in Deutschland eine hohe Komplementarität der stündlichen bis hin zur monatlichen Erzeugung von PV- und Windstrom (Abschnitt 11.2.2). Wenn es gelingt, die installierten Leistungen für PV und Windstrom in ähnliche Größenordnung auszubauen, reduziert ihre Kombination den Ausgleichsbedarf.

22.3.6 Kraft-Wärme-Kopplung

Niedertemperaturwärme für Raumheizung und Warmwasser, sowie industrielle Prozesswärme auf hohem Temperaturniveau werden heute noch überwiegend durch die Verbrennung fossiler Ressourcen und in Verbindung mit kleinen Wärmespeicherkapazitäten gewonnen. In einem erneuerbaren Energiesystem werden große Mengen an Nutzwärme bei der Transformation von elektrischer Energie erzeugt, aus der Abwärme von Wandlern. Große Wärmespeicherkapazitäten für Niedertemperaturwärme ermöglichen den stromgeführten Betrieb der Wandler. Die Ausdehnung von Wärmeverteilnetzen wird durch

entfernungsabhängige Transportverluste ungleich stärker begrenzt als im Stromsektor. Deshalb müssen Anlagen mit Strom-Wärme-Kopplung (Abbildung 45) in ihrer Leistung und Platzierung auf den lokalen Wärmeverbrauch und nutzbare Wärmenetze zugeschnitten werden. Das können Nahwärmenetzen sein mit einem Wärmetransport zwischen benachbarten Gebäuden oder Fernwärmenetze, die Stadtteile oder ganze Städte versorgen. Hochtemperaturwärme für Industrieprozesse kann bei Strombedarf aus der Abwärme von KWK-Gasturbinen (bis ca. 550°C) gewonnen werden.
In Deutschland waren Ende 2020 ca. 39 GW an elektrischer KWK-Leistung am Netz ([ÖKO2], statista.com), die vor allem Erdgas, Biomasse und Kohle einsetzen. KWK-Anlagen erreichen Gesamtwirkungsgrade bis 90 %, als Gas-BHKW sogar bis 95 % [UBA2]. Selbst Mikro-BHKW für das Einfamilienhaus können elektrische Wirkungsgrade bis 25 % und Gesamtwirkungsgrade bis 90 % erreichen [Licht1]. Sie nutzen Verbrennungs- oder Stirlingmotoren zur Erzeugung mechanischer Leistung. Mit fortschreitender Energiewende werden KWK-Anlagen von fossilen Brennstoffen auf Wasserstoff umgestellt, ein Teil verbrennt weiterhin Biomethan/-masse aus biogenen Abfällen.

22.3.7 Elektrische Energiespeicherung

Elektrische Energiespeicher (EES) sind Speichersysteme, die Energie über elektrischen Strom aufnehmen und zeitlich versetzt als elektrischen Strom wieder abgeben können. Zu den EES zählen insbesondere stationäre Batterien, Fahrzeugbatterien im stationären Betrieb, Pumpspeicherkraftwerke sowie zukünftig vermehrt H_2-basierte Systeme mit Elektrolyse, H2-Speicher und Rückverstromung über thermische Kraftwerke oder Brennstoffzellen. Experimentiert wird auch mit Systemen bestehend aus Heizelement, Hochtemperatur-Wärmespeicher und thermischem Kraftwerk.

22.3.7.1 Stationäre Batterien

Die installierte Kapazität an stationären Batterien (Groß-, Gewerbe- und Heimspeicher) betrug Ende 2024 **18 GWh**, die Leistung **12 GW_P** (ISE4, https://battery-charts.rwth-aachen.de/). Stationäre Batterien können sehr vielseitig eingesetzt werden:

- lokales Erzeugungsprofil eines PV-Kraftwerks anpassen, um
    - Kosten für externen Strombezug durch höheren Eigenverbrauch zu senken
    - Erträge im Stromverkauf zu erhöhen
    - Engpässe in der Anschluss-/Netzkapazität zu beheben
- lokales Lastprofil anpassen, um
    - Kosten für externen Strombezug zu senken (bei flexiblen oder leistungsbegrenzten Tarifen)
    - Engpässe in der Anschluss-/Netzkapazität zu beheben (Bsp. Schnellladestationen)
- netzweiten Störungen entgegenwirken, durch Bereithaltung von
    - Regelleistung, Momentanreserve

- o Notstromversorgung
- netzweit Erzeugung und Last ausgleichen durch Stromhandel

Mit stationären Batterien können Haushalte ihren Eigenverbrauch von PV-Strom in die Abendstunden ausdehnen und damit massiv erhöhen (typischerweise verdoppeln, s. Abbildung 51). Eine netzdienliche Systemführung der Batterien entlastet das Netz durch gezielte Reduktion der mittäglichen Einspeisespitze (Abbildung 52). Speicher würden damit einen erhöhten PV-Zubau ermöglichen [ISE7].

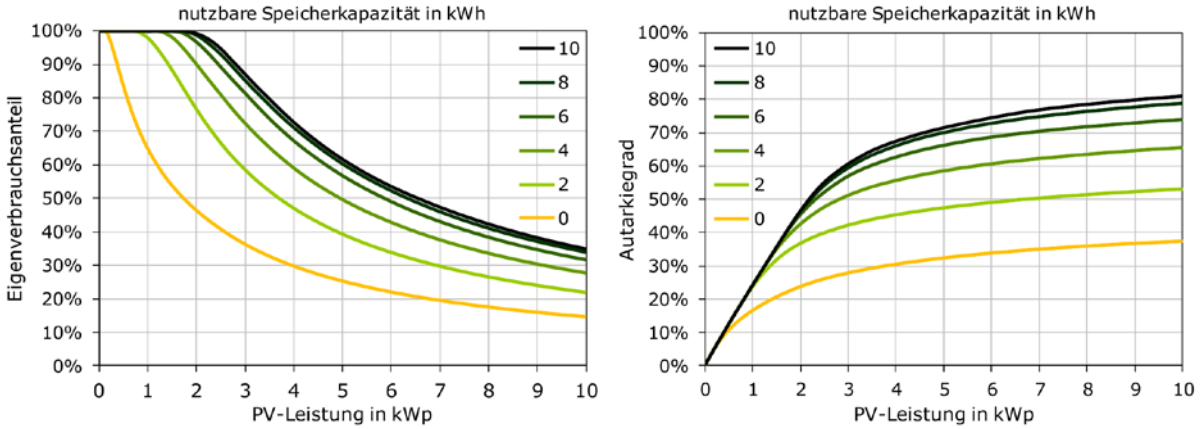


Abbildung 51: Einfluss der Photovoltaikleistung und Speicherkapazität auf den Eigenverbrauchsanteil (links) und Autarkiegrad (rechts) bei einem Jahresstrombedarf von 4000 kWh [HTW].

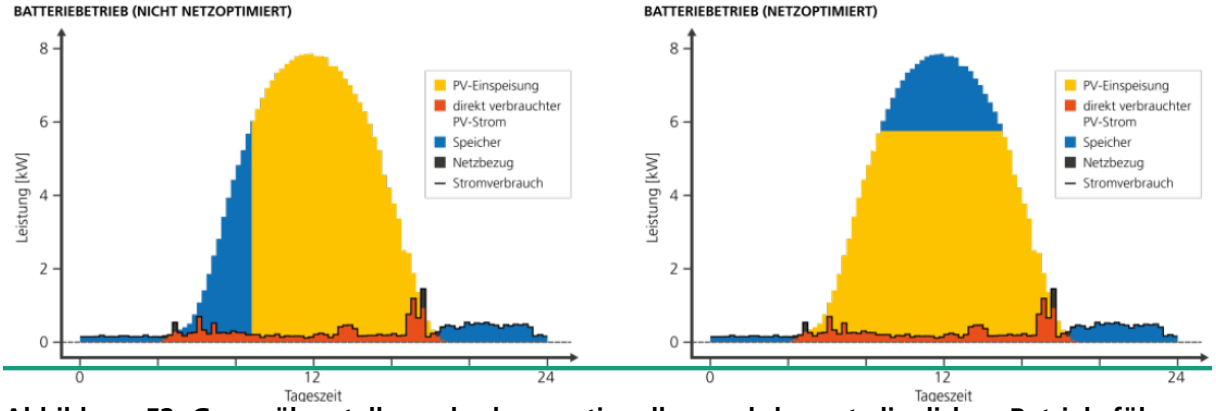


Abbildung 52: Gegenüberstellung der konventionellen und der netzdienlichen Betriebsführung [ISE7].

22.3.7.2 Fahrzeugbatterien im stationären Betrieb

Mit netzdienlichem Laden bieten Elektrofahrzeuge aufgrund ihres hohen Verbrauchs und ihrer hohen Speicherkapazitäten bereits große Potenziale an flexiblen Lasten (Abschnitt 22.3.4). Darüber hinaus ermöglicht bidirektionales Energiemanagement einen zusätzlichen Betrieb als Strom-Strom-Speicher, wenn die Fahrzeuge mit dem Netz verbunden sind und die volle Reichweite nicht durchgängig als Fahrbereitschaft vorhalten müssen. Private

KFZ parken im Schnitt 23 h pro Tag, allein schon die begrenzte Kapazität von Verkehrswegen zwingt die meisten Autos über die meiste Zeit in den Stand. Mit dem Netz verbundene E-Fahrzeuge können über ihre Batterien auch im Stand einen wirtschaftlichen Nutzen entfalten, anders als ihre Vorgänger mit Verbrennungsmotor. In den Ausbauszenarien [ISE3] wird angenommen, dass jederzeit mindestens 10% der mobilen Batterien bidirektional fernsteuerbar mit dem Netz verbunden sind. Bei einem Bestand von 40 Mio. E-Autos (Referenzszenario) wären demnach mindestens 4 Mio. netzdienlich verfügbar, sofern auch ausreichend Schnellladepunkte zur Verfügung stehen. Bei Annahme einer mittleren Spitzenleistung von 20 kW pro Ladepunkt kämen so 80 GW_P bidirektional steuerbare Leistung zusammen. Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, einen Bestand von mindestens 15 Mio. E-Autos bis 2030 zu erreichen.
Wird für E-PKW eine mittlere Batteriekapazität von 40 kWh angenommen, dann fahren bzw. parken in Deutschland Ende 2024 ca. 64 GWh an Speicherkapazität, verteilt auf 1,6 Mio. Fahrzeuge.

22.3.7.3 Mechanische Speicher

Die aktuell installierte Pumpspeicher-Kapazität im deutschen Stromnetz liegt bei knapp 38 GWh, die Nennleistung bei 10 GW_P, der durchschnittliche Wirkungsgrad um 70 %, ohne elektrische Zu- und Ableitungsverluste. Zum Größenvergleich: die genannte Speicherkapazität entspricht rechnerisch dem Ertrag des deutschen PV-Kraftwerkparks aus weniger als einer Betriebsstunde unter Nennleistung.
Laufwasserkraftwerke können mangels Staukapazitäten kaum Regelbeiträge im Komplementärbetrieb leisten. Ihr Beitrag von ca. 3,8 GW_P Nennleistung [ISE4] ist nur noch wenig ausbaufähig, ihre Stromproduktion (Jahresvolllaststunden) wegen der zunehmenden Trockenheit tendenziell rückläufig. Die mechanische Speicherung von elektrischer Energie in Druckluft-Speichern (Compressed Air Energy Storage, CAES) befindet sich in der Erprobung.

22.3.7.4 Hochtemperatur-Wärmespeicher mit Rückverstromung

Hochtemperatur-Wärme kann als latente Wärme in Flüssigsalz-Speichern oder als sensible Wärme in Gesteinsschüttungen [Siem] oder Stahlkörpern [Vatt] gespeichert werden. Bei Bedarf wird die Wärme für den Antrieb einer konventionellen Dampfturbine genutzt, ggf. mit weiterer Nutzung der Niedertemperaturwärme. Erste Pilotanlagen befinden sich in der Erprobung, der Hersteller Lumenion gibt einen Strom-zu-Strom-Wirkungsgrad von 25 % an.

22.3.7.5 Wasserstoffspeicher mit Rückverstromung

Für längere Phasen mit geringer PV- und Windstromerzeugung wird unser zukünftiges Energiesystem zusätzliche Kapazitäten zur Wasserstofferzeugung, Speicherung und Rückverstromung benötigen. Ein Teil der Erzeugung wird im Ausland stattfinden, abhängig von Gestehungskosten und geostrategischen Erwägungen.
In deutschen Salzkavernen an Land lassen sich theoretisch 9,4 PWh Energie in Form von Wasserstoff speichern [Hydro], dies entspricht dem 3,2-fachen Primärenergieverbrauch des Jahres 2024. Bereits heute ist es technisch möglich, den Wasserstoffanteil im Gasnetz auf bis zu 20 % zu erhöhen.
Wasserstoff kann über thermische Kraftwerke oder über stationäre Brennstoffzellen (Wirkungsgrad bis ca. 65 %) rückverstromt werden. Reversible Hochtemperatur-Brennstoffzellen (rSOC, englisch „reversible Solid Oxide Cell"), die auch als Elektrolyseure betrieben werden können, befinden sich in der Entwicklung und erreichen aktuell einen Strom-zu-Strom-Wirkungsgrad von 43 % [FZJ]. Verglichen mit dem kombinierten Einsatz von Elektrolyseuren mit Brennstoffzellen versprechen diese bidirektionalen Wandler eine höhere Volllaststundenzahl.

22.3.7.6 Übersicht

Abbildung 53 zeigt wichtige Pfade für die Speicherung von PV- und Windstrom. Für die praktische Relevanz dieser Pfade sind neben dem technischen Wirkungsgrad u.a. die Kosten der Nennleistung von Wandlern (€/W) und der Kapazität von Speichern (€/Wh) zu betrachten. Als mechanische Speicher dienen Wasserreservoirs von Pumpspeicher-kraftwerken; Batteriespeicher umfassen stationäre und bidirektional betreibbare, mobile Speicher.

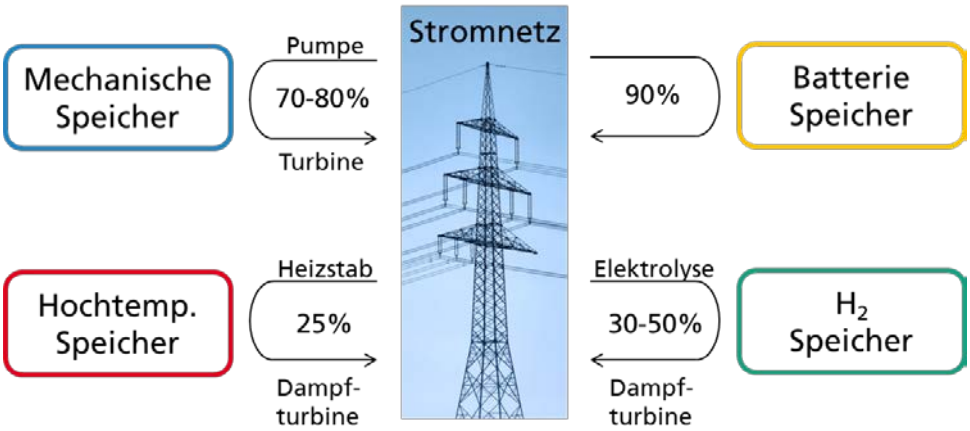


Abbildung 53: Technologien für die elektrische Energiespeicherung mit heute erzielbaren Wirkungsgraden.

22.3.8 Netzausbau

Der netzgebundene, überregionale Energietransport erfolgt über das Höchstspannungsnetz und das Gas-Fernleitungsnetz. Im Zug der Energiewende wird das Gas-Fernleitungsnetz zunehmend EE-Gase (Wasserstoff oder Methan) transportieren. Gastransport mit Rückverstromung in der Zielregion senkt den Ausbaubedarf auf Seiten des Stromnetzes.

22.3.8.1 Nationaler Netzausbau

Die Energieflüsse in einem Energiesystem mit 100 % Erneuerbaren unterscheiden sich fundamental von dem Stand um die Jahrtausendwende. PV eignet sich hervorragend für einen verbrauchsnahen, dezentralen Ausbau. Mit einem ebenfalls verbrauchsnahen, räumlich verteilten Aufbau von Batterien und Wandlern (bspw. Elektrolyse, Gaskraftwerke, Wärmepumpe) lässt sich der Ausbaubedarf von Strom- und Gasfernleitungen minimieren. Eine starke Konzentration der Windstromerzeugung im Norden bzw. Offshore führt hingegen zu einem hohen Bedarf an Fernleitungskapazität (Strom oder Gas).
Die Produktion von PV-Strom ist durch einen hohen Gleichzeitigkeitsfaktor gekennzeichnet. Um lokale Netzüberlastungen durch Erzeugungsspitzen zu vermeiden, werden Batteriespeicher stellenweise als wirtschaftlich interessante Alternative zum Netzausbau betrachtet.

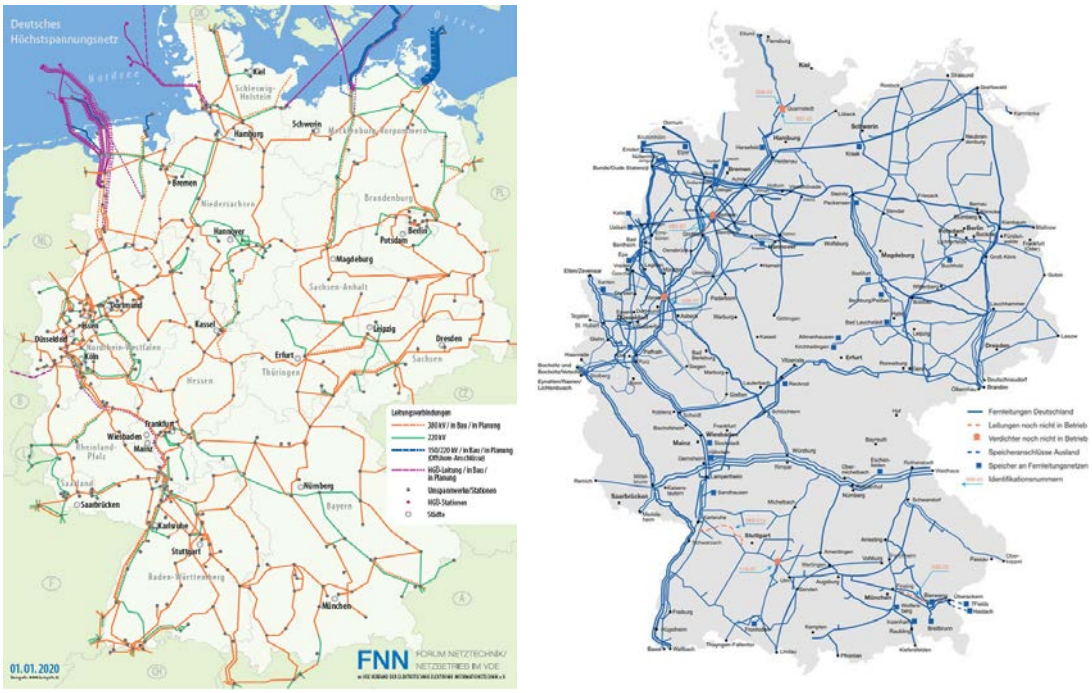


Abbildung 54: Höchstspannungsnetz [VDE] und Gas-Fernleitungsnetz [Fern].

22.3.8.2 Stärkung des europäischen Verbundnetzes

Das deutsche Stromnetz ist Teil des europäischen Verbundnetzes. Eine Verstärkung der grenzüberschreitenden Kuppelkapazität von derzeit ca. 20 GW ermöglicht einen besseren Ausgleich volatiler PV-Stromproduktion über den europäischen Stromhandel.

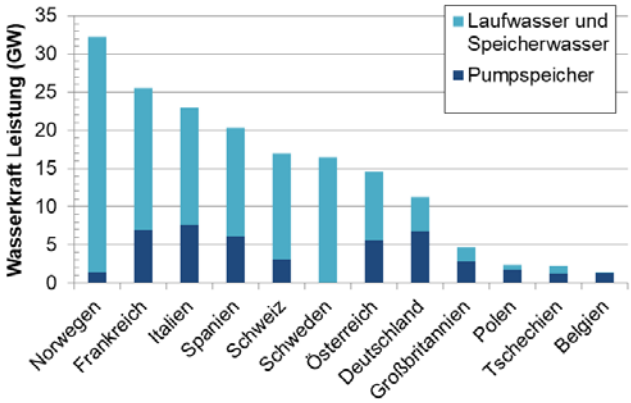


Abbildung 55: Installierte Leistung von Wasserkraftwerken in benachbarten Ländern, Zahlen aus [IHA].

Abbildung 55 zeigt die installierte Leistung an Laufwasser- und Speicherwasserkraftwerken sowie an Pumpspeicherkraftwerken. Speicherkraftwerke können komplementär zur PV-Erzeugung betrieben werden, Pumpspeicher als effiziente Strom-zu-Strom-Speicher agieren.

22.3.9 Energieträgerimport

Für einige Anwendungen wie den Flug- und Schiffsverkehr gibt es auf längere Sicht keine Alternativen zu flüssigen Kraftstoffen. Die Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus PV-Strom erfordert sehr viel Energie. Flüssige Kraftstoffe können in sonnenreichen Ländern besonders günstig hergestellt und über den Seeweg importiert werden, die dafür notwendige Logistikkette ist im Prinzip vorhanden.

22.3.10 Übersicht

Aus heutiger Sicht ist ein Energiesystem auf Basis von 100 % EE technisch und wirtschaftlich darstellbar. Abbildung 56 zeigt die wichtigsten, mit dem Stromnetz verbundenen Elemente von der Gewinnung über die Wandlung und Speicherung bis zum Verbrauch. Um den Speicherbedarf zu reduzieren wird der Stromverbrauch in Haushalten und Industrie teilweise flexibilisiert.
Im Sektor „**Wärme**" (rot) beladen Blockheizkraftwerke, Wärmepumpen und – bei Angebotsspitzen auf der Stromseite – Heizstäbe die Wärmespeicher stromgeführt. Wo es die

Abnahmedichte zulässt, bspw. in Quartieren, erfolgt die effiziente Speicherung zentral in großen Wärmespeichern.
Im Sektor „**Gas**“ (grün) produzieren Biomasse-Fermenter Methan aus biogenen Abfällen und Elektrolyseure Wasserstoff, der auch methanisiert oder zu synthetischen Kraftstoffen weiterverarbeitet werden kann. Teilweise wird Biomasse direkt im BHKW verbrannt. Bei Strombedarf kommen kombinierte Gas- und Dampfturbinen und reine Gasturbinen zum Einsatz.
Im Sektor „**Batterie**“ (gelb) werden stationäre, zentrale oder dezentrale elektrochemische Speicher je nach Residuallast be- oder entladen. Mobile Batterien in Elektrofahrzeugen bedienen primär den Mobilitätsbedarf, können aber bei bestehender Verbindung zusätzlich das Netz bidirektional stützen. Bei den meisten elektrochemischen Speichern sind Wandler und Speicher baulich verschmolzen, nur sogenannte Redox-Flow-Batterien verfügen über externe, unabhängig skalierbare Speichertanks.
Im **mechanischen Sektor** (blau) werden Wasserspeicher-Kraftwerke über Pumpen und Turbinen bidirektional betrieben, analog Druckluftspeicher-Kraftwerke über Kompressoren und Turbinen.
Die wichtigsten Ausbaumaßnahmen für eine Energiewende im Stromsektor mit Kopplung in den Verkehrs- und Wärmesektor fasst Abbildung 57 zusammen.

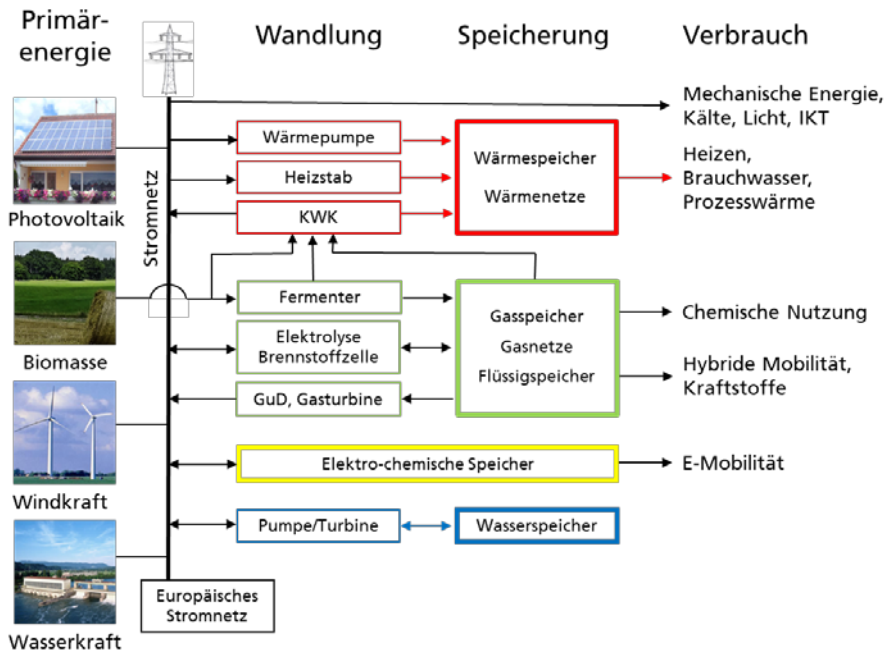


Abbildung 56: Vereinfachte schematische Darstellung eines Erneuerbaren Energiesystems mit den wichtigsten stromnetzgebundenen Bausteinen der Gewinnung, Wandlung, Speicherung und des Verbrauchs; IKT: Informations- und Kommunikationstechnik, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, GuD: Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk.

Nennleistung	2024		2045 Szenario „Technologieoffen“	
1. Primärerzeugung	100 GW_P	→	471 GW_P	PV, im Netz max. 329 GW (70%)
	73 GW_P	→	308 GW_P	Wind, Land + See
2. Gaskraftwerke	37 GW_P	→	146 GW_P	H_2-ready, auch GuD, KWK
3. Batterien	12 GW_P	→	[397 GW_P]	[Nennleistung ≈ Kapazität / 1 h]
4. Wärmepumpen	[10 $GW_{P,el}$]	→	[75 $GW_{P,el}$]	[im Mittel 5 kWh_{el} für 15 kW_{th}, COP = 3)]
5. Elektrolyse	0,25 GW_P	→	68 GW_P	Kapazität 9400 TWh H_2 in Salzkavernen

Abbildung 57: Wichtige Stromerzeuger, -wandler und Speicher, zusätzliche Schätzungen und Annahmen in eckigen Klammern ([ISE3], s. auch Abschnitt 22.3.7).

22.4 Muss die Energiewende auf die Bundespolitik warten?

Nein, auch wenn die Bundespolitik es allen leichter machen kann.
Der Bundestag bestimmt als Gesetzgeber den Rahmen für die Energiewende. Daneben gibt es eine Reihe wichtiger Akteure, die in ihren Handlungsfeldern viel bewegen können, auch unabhängig vom regulativen Rahmen. Ein Handeln dieser Akteure sendet zudem deutliche Signale in die Politik.
So können Verbraucher beim Bezug von Strom und Wärme, bei der Wahl ihres Transportmittels und in ihrem gesamten Konsum erneuerbare Energien und Energieeffizienz nachfragen. Geldanleger sind gefordert, in die Energiewende zu investieren, sei es auf dem eigenen Dach, in Beteiligungsgesellschaften oder Fonds. Entscheider in Gewerbe- und Industriebetrieben oder in Stadtwerken können prüfen, welche Maßnahmen sich nachhaltig rechnen und gleichzeitig die Energiewende voranbringen.
Schließlich können Bundesländer, Städte und Gemeinden die Energiewende durch eine Fülle von Maßnahmen fördern, von der Beratung der Akteure, über Investitionszuschüsse und andere Arten der Förderung von Projekten, die Bereitstellung von Flächen, die Steuerung eigener Investitionsentscheidungen bis hin zur verpflichtenden Solarinstallation. Viele Bundesländer haben sogenannte Solarpflichten für den Wohnungs- und Gewerbebau, für öffentliche Bauten und größere Parkplätze eingeführt. Die Solarpflicht setzt ein Zeichen für die Verantwortung, bereits bebaute Flächen maximal zu nutzen, um den Energiebedarf ihrer Nutzer mitzudecken, und reduziert damit die Inanspruchnahme von Freiflächen. Die Solarpflicht erinnert Bauherren zu einem wirtschaftlich optimalen Zeitpunkt (Dach wird neu gemacht, Handwerker sind in der Nähe, Leitungen können eingeplant werden) an die Errichtung einer Solaranlage. Die Solarpflicht definiert schließlich eine neue Normalität: Solaranlagen gehören so selbstverständlich zum Dach wie eine Dachrinne.

23. Brauchen wir eine PV-Produktion in Deutschland?

Ja, wenn wir neue Abhängigkeit in der Energieversorgung vermeiden wollen.
Mit fortschreitender Energiewende wird Deutschland das „fossile" Jahrhundert hinter sich lassen, ein Jahrhundert, in dem wir jährlich bis zu 90 Mrd. Euro für Öl- und Gasimporte ausgegeben haben. Die Preise dieser Importe werden von Kartellen beeinflusst, die Erträge finanzieren zu einem großen Teil autoritäre Regimes und häufig fallen neben monetären auch politische Kosten an.
Die Energiewende bietet eine historische Chance, aus dieser ökonomischen und politischen Abhängigkeit auszusteigen: die Sonne scheint auch in Deutschland, Rohstoffe für die PV-Produktion sind verfügbar und Technologien zur solaren Stromerzeugung wurden in Deutschland maßgeblich mitentwickelt. Ein auf Erneuerbare umgestelltes Energiesystem basiert u.a. auf 400 – 500 GW installierte PV-Leistung. Für den Aufbau und zunehmend für die laufende Erneuerung dieses Anlagenparks sind jährliche Installationen von 15 – 20 GW erforderlich, entsprechend ca. 40 Mio. PV-Module zu Kosten von mehreren Mrd. Euro. Eine PV-Produktion in Deutschland bietet langfristige Versorgungssicherheit bei hohen Umwelt-, Sozial- und Qualitätsstandards.

24. Braucht es ein Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)?

Ja, wobei die Energiewende-Gesetzgebung als Ganzes in den Fokus rücken muss.
Die aktuellen Marktmechanismen würden ohne Flankierung durch ein EEG zu wenig Anreize für langfristige Investitionen in die Energiewende liefern. Wesentlicher Grund ist die viel zu geringe Bepreisung von CO_2-Emissionen über alle Sektoren hinweg, gemessen an den tatsächlichen Rückholkosten bzw. den heute absehbaren Folgekosten der Klimakrise. Diese de-facto-Subvention für fossile Energiebereitstellung muss abgebaut werden, auch um den Marktwert des Solarstroms bei zunehmendem PV-Ausbau zu sichern. Notwendig sind eine schnelle Reduktion der EU-ETS Zertifikate und eine schnelle Anhebung der nationalen CO_2-Abgabe, verbunden mit Kompensationsmaßnahmen.
Für die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende ist eine breite Partizipation und Akteursvielfalt förderlich, die sich insbesondere bei der dezentralen Erzeugung von PV-Strom realisieren lässt. Deshalb müssen die **regulativen Hürden** gerade für kleine Anlagen gesenkt oder durch ein Gesetz wie das EEG geglättet werden. PV-Kraftwerke jeder Größenordnung benötigen in aller Regel einen **Netzanschluss**, um Strom abzugeben, der vor Ort weder verbraucht noch gespeichert werden kann. Ein gesetzlicher Rahmen muss den Netzbetreiber zum unkomplizierten Anschluss auch kleinerer Anlagen bewegen.
Weiterhin benötigen PV-Kraftwerke zur Stromproduktion jenseits des Eigenverbrauchs eine langfristige **Abnahmevereinbarung**. Besonders private Kleininvestoren können weder die Kursrisiken an der Strombörse beherrschen, noch bei Stromgestehungskosten großer PV-Kraftwerke mithalten. Sie müssen überschüssigen Strom zu gesicherten Bedingungen abgeben können. Ein PV-Kraftwerk, das heute gebaut wird, konkurriert bald mit PV-Kraftwerken späterer Baujahre, die Solarstrom zur gleichen Zeit bei voraussichtlich weiter

sinkenden Stromgestehungskosten liefern werden. Zum Deflationseffekt kommt der langfristig sinkende Marktwertfaktor für Solarstrom.
Um die Tagesprofile von PV-Stromproduktion und Stromverbrauch besser in Deckung zu bringen, sind **Transformationsanreize** für die in Abschnitt 22.3 beschriebenen Schritte notwendig. Sie zielen u.a. auf angebotsorientierten Stromverbrauch, nachfrageorientierte Stromeinspeisung, insgesamt auf Netzdienlichkeit bei der Elektrifizierung des Wärme- und Verkehrssektors.
Innovative Technologien wie bspw. integrierte PV (Abschnitt 12) weisen im direkten Vergleich mit einfachen PV-Freiflächenanlagen etwas höhere Stromgestehungskosten auf. Sie beanspruchen jedoch keine zusätzlichen Flächen und schaffen Synergien. Um ihren Markteintritt zu beschleunigen und damit Flächenkonflikte frühzeitig zu entschärfen, benötigen sie eine gezielte **Anschubförderung**., bspw. in Form dedizierter Einspeisetarife oder Ausschreibungssegmente.

25. Enthalten PV-Module giftige Substanzen?

Häufig ja, deshalb gehören PV-Module nicht in den Restmüll.
Giftige Substanzen können über längere Zeiträume aus Modulen ausgewaschen werden (englisch „leaching"), wenn das Deckglas gebrochen, die Randversiegelung beschädigt oder das Modul fragmentiert ist [IPV]. Die Auswaschrate hängt insbesondere ab von pH-Wert und Temperatur. Wegen der genannten Risiken gehören ausgediente PV-Module nicht in den Restmüll und nicht auf Deponien, ebenfalls sollten beschädigte Module nicht über längere Zeit der Witterung ausgesetzt bleiben.

25.1 Waferbasierte Module

Module auf Basis von Siliziumwafern (über 90 % Marktanteil) enthalten häufig noch Blei in der Zellmetallisierung (ca. 2 g Blei pro 60-Zellen-Modul) und in den eingesetzten Loten (ca. 10 g Blei). Blei, ein giftiges Schwermetall, ist in bestimmten, stark sauren oder basischen Umgebungen löslich, und die Lamination im Modul unterbindet Stofftransport nicht dauerhaft [IPV]. In waferbasierten Modulen lässt sich Blei durch unbedenkliche Materialien bei geringen Mehrkosten vollständig substituieren. Einige Modulhersteller setzen Rückseitenfolien ein, die Fluorpolymere enthalten, bspw. Polyvinylfluorid.

25.2 Dünnschicht-Module

Dünnschicht-Module auf CdTe-Basis (ca. 5 % Marktanteil) enthalten Cadmium in Salzform, es lässt sich bei dieser Technologie nicht substituieren. Das metallische Cadmium sowie Cadmiumoxid werden als sehr giftig eingestuft, CdTe als gesundheitsschädlich. Es gibt alternative Dünnschicht-Technologien auf Basis von amorphem Silizium oder Kupfer-Indium-Selenid (CIS), die kein oder sehr wenig Cd enthalten.

CIS-Solarzellen enthalten Selen, welches v.a. als Oxid (z.B. nach Bränden) toxisch wirken kann, abhängig von der aufgenommenen Menge. Manche Hersteller erklären die Konformität ihrer CIS-Solarmodule mit der RoHS-Richtlinie (Restriction of certain Hazardous Substances) sowie der EU-Chemikalienverordnung REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals). Für eine differenzierte Bewertung wird auf unabhängige Untersuchungen des jeweiligen Modultyps verwiesen.

25.3 Solarglas

Gängige Solarmodule benötigen als Frontscheibe ein Glas mit einer sehr geringen Absorption (Solarglasqualität). Manche Glashersteller läutern die Glasschmelze und erhöhen die Lichttransmission durch Beigabe von Antimon (Sb). Wenn dieses Glas auf Deponien entsorgt wird, kann Antimon ins Grundwasser gelangen. Alternative Läuterungsverfahren ohne Antimon-Beigabe sind verfügbar.

25.4 Rücknahme und Recycling

PV-Produzenten haben im Juni 2010 ein herstellerübergreifendes Recyclingsystem eingerichtet (PV Cycle). Die am 13. August 2012 in Kraft getretene Fassung der europäischen WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) musste bis Ende Februar 2014 in allen EU-Staaten umgesetzt sein. Sie verpflichtet Produzenten, PV Module kostenlos zurückzunehmen und in den Wertstoffkreislauf zurückzuführen. Im Oktober 2015 trat in Deutschland das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG) in Kraft. Es klassifiziert PV-Module als Großgerät und regelt Rücknahmepflichten sowie Finanzierung. Der Anteil der Verwertung (Sammelquote) muss mindestens 85 Prozent betragen und der Anteil der Vorbereitung zur Wiederverwendung und des Recyclings mindestens 80 Prozent (Recyclingquote).
Wertstoffhöfe nehmen alte Solarmodule in kleinen Stückzahlen kostenlos entgegen, es gibt industrielle Verfahren zur Stofftrennung und Wiederverwertung. Der Aluminiumrahmen, die Kabel und Anschlussboxen werden einfach abgenommen und die Metalle verwertet. Mit mechanischen Trennverfahren werden dann Glas, Verbinder, Silizium und Kunststoff separiert.
Die Glasfraktion wird für die Herstellung von Glaswolle verwendet. Aktuell laufen Versuche, das Glas im industriellen Maßstab für höherwertige Schmelzanwendungen bis hin zu neuem Solarglas zu verarbeiten. Aus den lotummantelten Verbindern wird das Kupfer in der Schmelze zurückgewonnen. Die Siliziumfraktion wird als metallurgischer Rohstoff weiterverwendet. Auch hier wird versucht, höherwertige Anwendungen zu bedienen, bis hin zu neuen Solarzellen. Silber liegt gewichtsmäßig bei unter einem Promille, macht aber fast die Hälfte des Materialwerts aus. Es gibt Verfahren, um das Silber sortenrein zurückzugewinnen (Fa. Solar Materials). Die Kunststofffraktion wird oft thermisch verwertet.

Abbildung 58 zeigt die Massenanteile der wichtigsten Materialien in PV-Modulen sowie den relativen Materialwert der recycelten Stoffe. Die Deutsche Umwelthilfe zeigt in ihrem Weißbuch Verbesserungspotenziale für die Wiederverwendung und das Recycling von PV-Modulen auf [DUH].

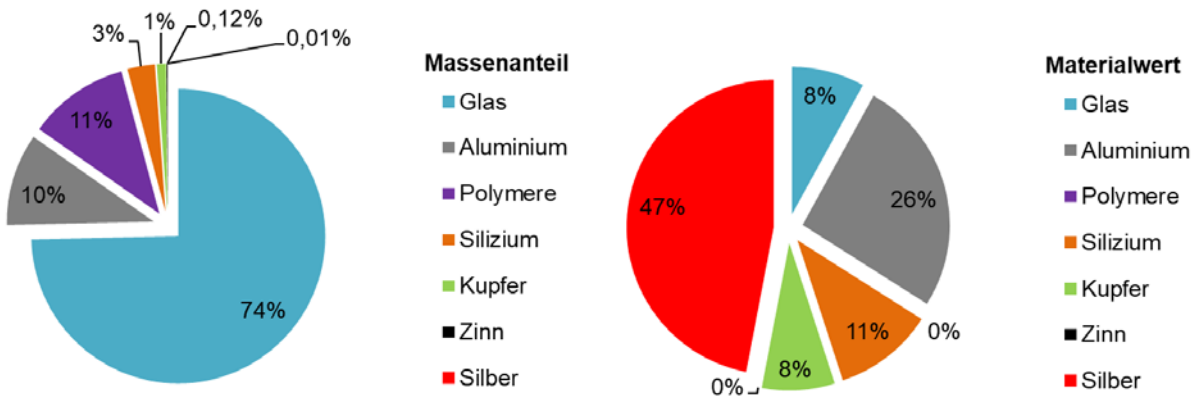


Abbildung 58: PV-Module: Massen- und Wertanteile der zurückgewonnenen Materialien [Peters]

26. Sind Rohstoffe zur Produktion von PV-Modulen ausreichend verfügbar?

Module auf Basis von Si-Wafern dominieren den PV-Weltmarkt mit ca. 95 % Anteil. Sie benötigen keine Rohstoffe, für die eine beschränkte Verfügbarkeit absehbar wäre. Die Hauptanteile nach Gewicht sind Glas, Aluminium, Polymere und Silizium, dabei zählen Silizium und Aluminium zu den wichtigsten Bestandteilen der Erdkruste nach Gewicht. Am kritischsten ist der Silberverbrauch für die Produktion der Solarzellen zu sehen. Die PV-Industrie verbrauchte im Jahr 2023 weltweit ca. 5500 t Silber, entsprechend ca. 16 % der gesamten Nachfrage. Das Silber für die Solarzellenmetallisierung lässt sich technisch weitgehend durch Kupfer substituieren, manche Hersteller nutzen diese Technologie bereits. Eine Rückgewinnung des Silbers ist durch Modulrecycling möglich (Abschnitt 25.4).

27. Erhöhen PV-Anlagen das Brandrisiko?

27.1 Können defekte PV-Anlagen einen Brand auslösen?

Ja, wie alle elektrischen Anlagen.
Bestimmte Defekte in stromleitenden Komponenten einer PV-Anlage können zur Ausbildung von Lichtbögen führen. Befindet sich brennbares Material in unmittelbarer Nähe, beispielsweise Dachpappe oder Holz, kann es zu einem Brand kommen. Die Stromquellencharakteristik der Solarzellen kann einen Fehlerstrom im Vergleich zu Wechselstrom-Installationen sogar stabilisieren. Der Strom kann nur durch eine Unterbrechung des Stromkreises oder der Bestrahlung aller Module gestoppt werden. Deswegen müssen PV-

Anlagen mit besonderer Sorgfalt errichtet werden. In einigen Fällen hat das Zusammentreffen dieser Faktoren nachweislich zu einem Brand geführt. Ausgangspunkt der Brände waren meistens Fehler bei Verkabelung und Anschlüssen.
Hier ein Zitat aus einer Pressemitteilung des Fraunhofer ISE aus dem Jahr 2013: „Die Einhaltung der bestehenden Regeln durch qualifizierte Fachkräfte ist der beste Brandschutz. 0,006 Prozent der Photovoltaikanlagen verursachten bisher einen Brand mit größerem Schaden. In den letzten 20 Jahren gab es 350 Brände, an denen die Solaranlage beteiligt war, bei 120 war sie Auslöser des Brandes. In 75 Fällen war der Schaden größer, in 10 dieser Fälle brannte ein Gebäude ab.
Die wichtigsten Besonderheiten von Photovoltaikanlagen: sie arbeiten mit Gleichstrom und man kann sie nicht einfach abschalten, denn solange Licht auf die Module fällt, produzieren sie Strom. Wenn sich zum Beispiel eine minderwertige oder schlecht installierte Steckverbindung löst, dann unterbricht das den Stromfluss nicht immer. Es kann ein Lichtbogen entstehen, der im schlimmsten Fall direkt brandauslösend sein kann. Entsprechend wird untersucht, wie man die Entstehung von Lichtbögen vermeiden kann. Zusätzlich wird an Detektoren gearbeitet, die frühzeitig Alarm geben, wenn auch nur ein kleiner Lichtbogen entsteht.
Photovoltaikanlagen stellen im Vergleich mit anderen technischen Anlagen kein besonders erhöhtes Brandrisiko dar. Auch für die elektrische Sicherheit gibt es ausreichend vorhandene Regeln – wichtig ist, dass sie auch eingehalten werden. Werden die Solarstecker mit der Kombizange statt mit Spezialwerkzeug angebracht oder nicht kompatible Stecker verwendet, dann ist die Schwachstelle vorprogrammiert. Hier dürfen Anlagenbetreiber nicht an der falschen Stelle sparen.
Neben technischen Verbesserungen sind deshalb auch Vorschriften zur Kontrolle wichtig. Eine Empfehlung der Experten ist daher, die Abnahme durch einen unabhängigen Dritten vorzuschreiben. In der Diskussion ist auch, für private Photovoltaikanlagen eine wiederkehrende Sicherheitsprüfung vorzuschreiben, wie sie für gewerbliche Anlagen alle vier Jahre Pflicht ist.“ [ISE6]

27.2 Gefährden PV-Anlagen die Feuerwehrleute?

Ja, aber das trifft für viele spannungsführende Leitungen zu.
Bei Brandbekämpfung von außen schützt ein Mindestabstand von wenigen Metern die Feuerwehrleute vor Stromschlägen; dieser Sicherheitsabstand ist bei Dachanlagen i.A. gegeben. Das größte Risiko für Löschkräfte entsteht bei Brandbekämpfung von innen, wenn sie Räume betreten, wo spannungsführende, angeschmorte Kabel der PV-Anlage mit Wasser bzw. der Löschkraft selbst in Kontakt kommen. Um dieses Risiko zu reduzieren, arbeitet die Industrie an Notschaltern, die die Module noch in Dachnähe von der herabführenden DC-Leitung über Sicherheitsrelais trennen.
Bisher ist in Deutschland noch kein Feuerwehrmann bei der Brandbekämpfung durch PV-Strom verletzt worden. Ein Fallbericht, der durch die Presse ging, hatte Solarthermie-Kollektoren mit PV-Modulen verwechselt. Auf dem entsprechenden Haus war gar keine PV-Anlage installiert. „Durch flächendeckende Schulungsmaßnahmen bei den Feuerwehren

konnten anfängliche Unsicherheiten behoben werden. Wie bei jeder Elektroinstallation kann man je nach Strahlart auch bei Photovoltaikanlagen mit Wasser aus ein bis fünf Meter Abstand sicher löschen. Alle Behauptungen, die Feuerwehr habe ein brennendes Wohnhaus wegen der Photovoltaik nicht gelöscht, stellten sich bei bisherigen Recherchen als falsch heraus." [ISE6]

27.3 Behindern PV-Module den direkten Löschangriff über das Dach?

Ja. Die durch die PV-Module hergestellte zweite „Dachhaut" behindert den Löscherfolg, weil das Wasser schlicht abläuft. Aus Feuerwehrsicht ist ein derartig durch Feuer beaufschlagtes Objekt jedoch meistens nicht mehr zu retten, d.h. der Schaden ist bereits weitgehend vorhanden und irreversibel, noch bevor die PV-Anlage die Löschtätigkeit behindert.

27.4 Entstehen beim Brand von PV-Modulen giftige Immissionen?

In Bezug auf CdTe-Module stellt eine Ausbreitungsberechnung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt fest, dass bei einem Brand eine ernste Gefahr für die umliegende Nachbarschaft und Allgemeinheit sicher ausgeschlossen werden kann [LFU1]. Für CIS-Module wird auf unabhängige Untersuchungen des jeweiligen Produkts verwiesen.
Bei waferbasierten Modulen können die Rückseitenfolien Fluorpolymere enthalten, die selbst nicht giftig sind, sich jedoch im Brandfall bei hohen Temperaturen zersetzen können. Das Bayerische Landesamt für Umwelt kommt in einer Ausarbeitung zu dem Schluss, dass beim Abbrand fluorhaltiger Kunststoffe das Gefahrenpotenzial nicht maßgeblich von Fluorwasserstoff, sondern von den anderen Brandgasen bestimmt wird [LFU2].

28. Anhang: Fachbegriffe

28.1 Modulwirkungsgrad

Wenn nicht anders angegeben, bezeichnet der Modulwirkungsgrad einen Nennwirkungsgrad. Er wird unter genormten Bedingungen („STC", standard test conditions) bestimmt als Verhältnis von abgegebener elektrischer Leistung zur eingestrahlten Leistung auf die Modulfläche. Die Normbedingungen sehen eine Modultemperatur von 25° C, senkrechte Einstrahlung mit 1000 W/m^2 und ein bestimmtes Einstrahlungsspektrum vor. Im realen Betrieb weichen die Bedingungen davon meistens deutlich ab, so dass der STC-Wirkungsgrad häufig unterschritten wird.

28.2 Nennleistung eines PV-Kraftwerks

Die Nennleistung eines Kraftwerks [kW_P, MW_P] ist die idealisierte DC-Leistung des Modulfeldes unter STC-Bedingungen, d.h. das Produkt aus Generatorfläche, Normeinstrahlung (1000 W/m^2) und Nennwirkungsgrad der Module. Im Betrieb bleibt die Erzeugungsleistung eines PV-Kraftwerks über die meiste Zeit unterhalb von 70% seiner Nennleistung.

28.3 Jahresvolllaststunden (Jahresvollbetriebsstunden)

Anzahl an Stunden, die ein PV-Kraftwerk mit seiner Nennleistung produzieren müsste, um den gleichen Jahresertrag zu erwirtschaften, den es im realen Betrieb mit häufiger Teillast und nächtlichem Stillstand erreicht (vgl. Abschnitt 16.4).

28.4 Jahresnutzungsgrad (Kapazitätsfaktor)

Verhältnis aus Jahresvolllaststunden und den 8760 Stunden eines Jahres mit 365 Tagen.

28.5 Spezifischer Ertrag

Der spezifische Ertrag [kWh/kW_P] eines PV-Kraftwerks bezeichnet das Verhältnis von Nutzertrag (Wechselstromertrag) über einen bestimmten Zeitraum, häufig ein Jahr, und Nennleistung. Der spezifische Jahresertrag entspricht der Anzahl Volllaststunden.

28.6 Systemwirkungsgrad

Der Systemwirkungsgrad einer PV-Anlage ist das Verhältnis von Nutzertrag (Wechselstromertrag) und Einstrahlungssumme auf die Generatorfläche. Der nominelle Modulwirkungsgrad geht in den Systemwirkungsgrad ein.

28.7 Performance Ratio

Unter der Performance Ratio (PR) versteht man das Verhältnis von Nutzertrag (Wechselstromertrag) und idealisiertem Ertrag (Produkt aus Einstrahlungssumme auf die Generatorfläche und nominellem Modulwirkungsgrad) einer Anlage über einen bestimmten Zeitraum, meistens ein Jahr. Die PR wird häufig für den Effizienzvergleich netzgekoppelter PV-Anlagen an verschiedenen Standorten und mit verschiedenen PV-Technologien im

Betrieb verwendet. Neue, sorgfältig geplante Anlagen erreichen PR-Jahreswerte zwischen 80 und 90 %.

28.8 Grundlast, Mittellast, Spitzenlast, Netzlast und Residuallast

„Der Leistungsbedarf schwankt je nach Tageszeit. In der Regel treten Maxima am Tage auf und das Minimum nachts zwischen 0 und 6 Uhr. Der Verlauf des Leistungsbedarfes wird als Lastkurve bzw. Lastverlauf beschrieben. In der klassischen Energietechnik wird die Lastkurve in drei Bereiche unterteilt:
(i) die Grundlast
(ii) die Mittellast
(iii) die Spitzenlast
Die Grundlast beschreibt das Lastband, das über 24 Stunden nahezu konstant ist. Sie wird von sog. Grundlastkraftwerke wie Kernkraftwerke, Braunkohlekraftwerke und z.Zt. auch Laufwasserkraftwerke abgedeckt.
Die Mittellast beschreibt prognostizierbare, geschlossene Leistungsblöcke, die den größten Teil des zur Grundlast zusätzlichen Tagesbedarfs abdecken. Die Mittellast wird von sog. Mittellastkraftwerken wie Steinkohlekraftwerken und mit Methan betriebenen Gas- und Dampf (GuD) Kraftwerken abgedeckt. Selten kommen auch Ölkraftwerke zum Einsatz. Die Spitzenlast deckt den verbleibenden Leistungsbedarf ab, wobei es sich in der Regel um die Tagesmaxima handelt. Die Spitzenlast wird von sog. Spitzenlastkraftwerken wie Gasturbinenkraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke abgedeckt. Diese können innerhalb kürzester Zeit auf Nennleistung gefahren werden und so Lastschwankungen ausgleichen und Lastspitzen abdecken“ [ISET].
Die residuale Last ergibt sich aus der Nettolast abzüglich der Einspeisung aus erneuerbaren Energien

28.9 Stromerzeugung und -verbrauch

Abbildung 59 zeigt den Energiepfad vom Primärenergieträger, bspw. Solarstrahlung (Bestrahlungsstärke [W/m^2]), Wind oder Erdgas (Energiedichte bei Verbrennung [J/kg]), bis zur Nutzenergie, auf die es dem Endanwender ankommt.
Die **Bruttostromerzeugung** ist die insgesamt produzierte Strommenge, entsprechend der Differenz aus Primärenergieeinsatz und Wandlungsverlusten in der Stromproduktion. Große Gasturbinen zeigen Wandlungsverluste von 60 – 65 %. PV-Kraftwerke weisen Wandlungsverluste von 80 – 85 % auf, bei praktisch kostenlos und unbegrenzt verfügbarer Primärenergie.
Ein Teil der erzeugten Bruttostrommenge geht durch Verluste beim Ein- und Ausspeichern von Strom verloren, beispielsweise in Pumpspeicherkraftwerken oder in Batterien. Speicherverluste von Li-Ionen-Batterien betragen 5 – 10 % der eingespeicherten Strommenge, zuzüglich der Verluste im Batteriemanagementsystem, bei Pumpspeicherkraftwerken sind

es ca. 25 %. Wird Wasserstoff als Stromspeicher über stationäre Elektrolyseure und bspw. Brennstoffzellen eingesetzt, dann liegen die Verluste in der Größenordnung von 50 %.
Die **Nettostromerzeugung** (nicht abgebildet) ist die Differenz aus Bruttostromerzeugung und Eigenverbrauch.
Der **Bruttostromverbrauch** ergibt sich durch Bereinigung der inländischen Bruttostromerzeugung um den Importsaldo und um Speicherverluste. Das UBA umfasst er „den von Letztverbrauchern wie Industrie oder privaten Haushalten verwendeten Nettostromverbrauch sowie den Eigenverbrauch der Kraftwerke und die Netzverluste. Da der Indikator damit das Stromsystem vollständig abbildet, wird er bevorzugt als politischer Zielindikator, z.B. im Erneuerbaren Energien-Gesetz, verwendet."
Der Eigenverbrauch von fossilen und nuklearen Kraftwerken liegt bei ca. 7 % ihrer Bruttoerzeugung, bei reinen PV-Kraftwerken ist er marginal. Netzverluste, insbesondere Leitungs- und Transformatorverluste, belaufen sich im deutschen Stromnetz auf knapp 6 %. Der dezentrale Charakter der PV-Installationen reduziert die Netzverluste für PV-Strom.
Die Strommenge, die beim Endanwender abgenommen wird, ist der Nettoverbrauch (Endenergie). Die Effizienz seiner Geräte bestimmt die Wandlungsverluste bis zur finalen Nutzenergie, bspw. Kraft oder Licht.

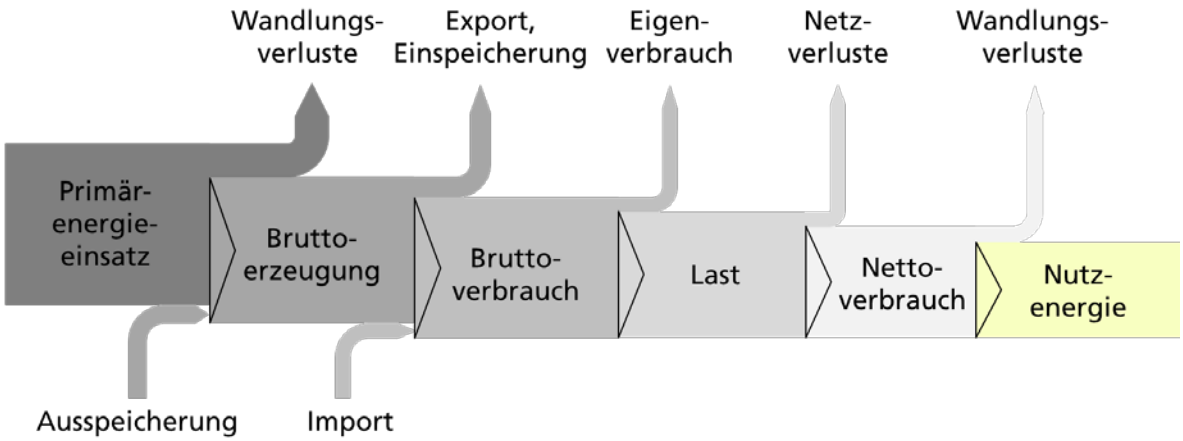


Abbildung 59: Begriffe der Stromerzeugung und des –verbrauchs.

29. Anhang: Abkürzungen

BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (englisch Battery Electric Vehicle)
BHKW	Blockheizkraftwerk, Anlage zur Gewinnung elektrischer Energie und Wärme über Verbrennungsmotor oder Gasturbine
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
COP	Coefficient of Performance (Wärmepumpen)
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien, (Erneuerbare-Energien-Gesetz)
EVU	Energieversorgungsunternehmen
PV-FFA	PV-Freiflächenanlage

GuD	Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk
IEA	Internationale Energie Agentur
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung, das Prinzip der simultanen Gewinnung von mechanischer (schlussendlich elektrischer) Energie und nutzbarer Wärme
PHEV	Plug-in-Hybrid Elektrisches Fahrzeug
PV	Photovoltaik
THG	Treibhausgase (englisch GHG, Green House Gases)
W_P	Watt „peak“, Einheit für Nennleistung eines PV-Moduls oder PV-Kraftwerks

30. Anhang: Umrechnungstabellen [EEBW]

Vorsätze und Vorzeichen

k	Kilo	10^3	Tausend
M	Mega	10^6	Million (Mio.)
G	Giga	10^9	Milliarde (Mrd.)
T	Tera	10^{12}	Billion (Bill.)
P	Peta	10^{15}	Billiarde (Brd.)

Umrechnungen

		PJ	GWh	Mio. t SKE	Mio. t RÖE
1 PJ	Petajoule	1	277,78	0,034	0,024
1 GWh	Gigawattstunde	0,0036	1	0,00012	0,000086
1 Mio. t SKE	Mio. Tonnen Steinkohleeinheit	29,31	8.141	1	0,70
1 Mio. t RÖE	Mio. Tonnen Rohöleinheit	41,87	11.630	1,43	1

Typische Eigenschaften von Kraftstoffen

	Dichte [kg/l]	Heizwert [kWh/kg]	Heizwert [kWh/l]	Heizwert [MJ/kg]	Heizwert [MJ/l]
Biodiesel	0,88	10,3	9,1	37,1	32,6
Bioethanol	0,79	7,4	5,9	26,7	21,1
Rapsöl	0,92	10,4	9,6	37,6	34,6
Diesel	0,84	12,0	10,0	43,1	35,9
Benzin	0,76	12,2	9,0	43,9	32,5

Typische Eigenschaften von festen und gasförmigen Energieträgern

	Dichte [kg/l] bzw. [kg/m³]	Heizwert [kWh/kg]	Heizwert [kWh/l] bzw. [kWh/m³]	Heizwert [MJ/kg]	Heizwert [MJ/l] bzw. [MJ/m³]
Steinkohle	-	8,3 - 10,6	-	30,0 - 38,1	-
Braunkohle	-	2,6 - 6,2	-	9,2 - 22,2	-
Erdgas H (in m³)	0,76	11,6	8,8	41,7	31,7
Heizöl EL	0,86	11,9	10,2	42,8	36,8
Biogas (in m³)	1,20	4,2 - 6,3	5,0 - 7,5	15,0 - 22, 5	18,0 - 27,0
Holzpellets	0,65	4,9 - 5,4	3,2 - 3,5	17,5 - 19,5	11,4 - 12,7

31. Anhang: Quellen

ADAC	Treibhausgas-Bilanz: „Welcher Antrieb kann das Klima retten?“, Studie des ADAC, Dezember 2022
AEE2	https://www.unendlich-viel-energie.de/presse/pressemitteilungen/erneuerbare-energien-in-deutschland-zwischen-akzeptanz-und-unsicherheit, Download im Dezember 2023
AGEB1	Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., März 2024
AGEB2	Energieflussbild 2022 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule, September 2023
AGEB3	Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland, Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken, AGEB, März 2025
AGEE	Erneuerbare Energien in Deutschland, Daten zur Entwicklung im Jahr 2024, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), März 2025
AGORA2	Klimaneutrales Stromsystem 2035. Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann; Agora Energiewende, Prognos, Consentec (2022)
ARIA1	Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich, Kopernikus-Projekt Ariadne, Oktober 2021
ARIA2	Wasserstoff und die Energiekrise: fünf Knackpunkte, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), September 2022
ATW	Weis M, van Bevern K, Linnemann T. Forschungsförderung Kernenergie 1956 bis 2010: Anschubfinanzierung oder Subvention? - ATW 56. Jg. (2011) Heft 8/9
Aurora	Systemkostenreduzierter Pfad zur Klimaneutralität im Stromsektor 2040, Aurora Energy Research im Auftrag der EnBW, 2025
BAFA	Hintergrundinformationen zur Besonderen Ausgleichsregelung, Antragsverfahren 2013 auf Begrenzung der EEG-Umlage 2014, Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), 15. Oktober 2013
BCG	Klimapfade für Deutschland, Studie, The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos, im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI), Januar 2018
BDEW1	BDEW-Strompreisanalyse, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Juli 2024
BDEW3	Stromerzeugung und -verbrauch in Deutschland, Mitteilung des BDEW (www.bdew.de/presse/presseinformationen/erneuerbare-energien-deckten-im-jahr-2021-rund-42-prozent-des-stromverbrauchs), Dezember 2021

BDEW4	Redispatch in Deutschland - Auswertung der Transparenzdaten, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 9. August 2016
BDI	Handlungsempfehlungen zur Studie Klimapfade 2.0 - Wie wir unser Industrieland klimaneutral gestalten, Bundesverband der Deutschen Industrie, Oktober 2021
BFE	Grundlagen zu Vorurteilen gegenüber der Solarenergie, Schlussbericht, Studie im Auftrag der EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie, 2021
BMEL	Daten und Fakten, Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Dezember 2017
BMVI	Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. BMVI (Hrsg.), BMVI-Online-Publikation 08/2015.
BMWK1	Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWK, letzte Aktualisierung: Januar 2022
BMWK2	Bundesbericht Energieforschung 2024, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Juli 2024
BNA1	Bundesnetzagentur legt Eigenkapitalrenditen für Strom- und Gasnetze fest, Pressemeldung der Bundesnetzagentur vom Oktober 2016
BNA2	Monitoringbericht 2024, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt, Februar 2025
BNA3	https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/start.html, Stand September 2022
BNA4	https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/start.html
BNE	Solarparks – Gewinne für die Biodiversität, Studie des Bundesverbands Neue Energiewirtschaft (bne) e.V., November 2019
BNEF	Interview mit Bloomberg NEF Analyst Jenny Chase, Dezember 2022 https://www.pv-magazine.com/2022/12/23/global-solar-capacity-additions-hit-268-gw-in-2022-says-bnef/
BSW	Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), Bundesverband Solarwirtschaft e. V., Dezember 2024
Bundestag	EEG-Umlage 2010, Deutscher Bundestag, Wissenschaftliche Dienste, Nr. 21/10, 25.03.2010
Bub	Buberger J, Kersten A, Kuder M, Eckerle R, Weyh T, Thiringer T. Total CO2-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 159, 2022
BVES	BVES Branchenanalyse 2022, Bundesverband Energiespeicher Systeme e.V., April 2022
BWP	Starkes Wachstum im Wärmepumpenmarkt, Pressemitteilung des Bundesverband Wärmepumpe (BWP), Januar 2022

DENA	DENA-Gebäudereport 2022 - Zahlen, Daten, Fakten; Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.), Oktober 2021
DESTA-TIS	Umweltökonomische Gesamtrechnungen, Private Haushalte und Umwelt, DESTATIS, Statistisches Bundesamt, September 2020
DIW	Göke L, Kemfert C, Kendziorski M, von Hirschhausen C. 100 Prozent erneuerbare Energien für Deutschland: Koordinierte Ausbauplanung notwendig, DIW Wochenbericht Nr. 29+30, Juli 2021
DUH	Kreislaufwirtschaft in der Solarbranche stärken - Alte Photovoltaik-Module für den Klima- und Ressourcenschutz nutzen, Deutsche Umwelthilfe e.V., März 2021
DWD	Rasterdaten der Jahressumme für die Globalstrahlung auf die horizontale Ebene für Deutschland basierend auf Boden- und Satellitenmessungen, Version V003, Climate Data Center (CDC), Deutscher Wetterdienst, 2022
EAFR	Betriebskonzepte für Photovoltaik auf Mehrfamilienhäusern, Leitfaden der Energieagentur Regio Freiburg, Juli 2022
EEBW	Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2011, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, November 2012
EEG 2021	Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften (EEG 2021), Bundesrat Drucksache 763/20, Dezember 2020
EEG 2023	Gesetz zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor, Bundesrat Drucksache 315/22, Juli 2022
EGGERS	Eggers J-B, Behnisch M, Eisenlohr J, Poglitsch H, Phung W-F, Münzinger M, Ferrara C, Kuhn T. PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland, 35. PV-Symposium, ISBN 978-3-948176-09-9, September 2020
EnBW1	EnBW verstärkt Engagement im Bereich Solarenergie, Pressemeldung, Energie Baden-Württemberg AG, Februar 2019
ENBW2	EnBW will Kraftwerk Altbach/Deizisau bis 2026 kohlefrei und langfristig klimaneutral machen, Pressemeldung, Energie Baden-Württemberg AG, Oktober 2021
ENER	E-Mobility-Zukunft: ENERVIE an Meilenstein-Projekt beteiligt, Pressemeldung, Südwestfalen Energie und Wasser AG, Oktober 2018
EON	Flexibilitäts-Check, Studie von E.ON und der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) zum Potenzial flexibler Energienutzung in deutschen Haushalten, Juni 2025
ESYS	Wenn nicht jetzt, wann dann – wie die Energiewende gelingt, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, Oktober 2021
EPA	United States Environmental Protection Agency, heruntergeladen am 9.7.2013 von

	http://www.epa.gov/climatechange/science/causes.html#GreenhouseRole
EUPD	Energiewende im Kontext von Atom und Kohleausstieg, Perspektiven im Strommarkt bis 2040, Studie der EUPD Research Sustainable Management GmbH, Update Mai 2020
FAU	Deutschland ohne erneuerbare Energien? – Ein Update für die Jahre 2014 bis 2018, Diskussionspapier im Auftrag der EWS Elektrizitätswerke Schönau, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Oktober 2019
Fern	Download am 13.11.2021 von https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/gas-erdgasversorgung-in-deutschland.html
FNR	Basisdaten Bioenergie Deutschland 2022, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Juli 2022
FÖS1	Gesellschaftliche Kosten der Atomenergie in Deutschland, Eine Zwischenbilanz der staatlichen Förderungen und gesamtgesellschaftlichen Kosten von Atomenergie seit 1955, Studie des FÖS im Auftrag von Greenpeace Energy eG, September 2020
FÖS2	Was Braunkohlestrom wirklich kostet, Studie des Forums Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V. (FÖS) im Auftrag von Greenpeace Energy eG, Juni 2018
FZJ	Reversible Brennstoffzelle bricht Wirkungsgrad-Rekord, Pressemeldung, Forschungszentrum Jülich, Dezember 2018
GWS	Erneuerbar beschäftigt – Entwicklungen im Jahr 2023, GWS-Kurzmitteilung 2025 / 1, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH, Februar 2025
HTW	Weniger J, Bergner J, Tjaden T, Quaschning V: Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende. Berliner Wissenschafts-Verlag, ISBN 978-3-8305-3548-5, 2015.
HTW2	Solarstromausbau für den Klimaschutz, Studie, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, November 2021
Hydro	Caglayan D, Weber N, Heinrichs H, Linßen J, Robinius M, Kukla P, Stolten D. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 11, 2020
IEA1	Energiepolitik der IEA-Länder, Prüfung 2013, Deutschland, Zusammenfassung, International Energy Agency (IEA), April 2013
IEA2	World Energy Outlook 2024, International Energy Agency, Oktober 2024.
IEA3	Snapshot of Global PV Markets 2023, International Energy Agency PVPS, 2023.
IEA4	Special Report on Solar PV Global Supply Chains, International Energy Agency, 2022.
IEA5	Environmental Life Cycle Assessment of Passivated Emitter and Rear Contact (PERC) Photovoltaic Module Technology, IEA Task 12 PV Sustainability, 2024
IEE	Neues Strommarktdesign für die Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik

	IEE, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Becker Büttner Held Rechtsanwälte, November 2021
IHA	Hydropower status report, International Hydropower Association, May 2019
IMF	Parry I, Black S, Vernon N. Still Not Getting Energy Prices Right: A Global and Country Update of Fossil Fuel Subsidies, International Monetary Fund, 2021
IPCC	Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Working Group I report as contribution to the Sixth Assessment Report (AR6), August 2021
IPV	Nover J, Zapf-Gottwick R, Feifel C, Koch M, Werner JH. Leaching via Weak Spots in Photovoltaic Modules. Energies. 14(3):692 2021; https://doi.org/10.3390/en14030692
IRENA	Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects, Studie der International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2019
ISE1	Kost C, Müller P, Schweiger J S, Fluri V, Thomsen J. Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien; Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, Juli 2024
ISE2	Kiefer K, Farnung B, Müller B. Degradation in PV Power Plants: Theory and Practice. 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Marseille, 2019.
ISE3	Thelen C, Nolte H, Kaiser M, Jürgens P, Müller P, Senkpiel C, Kost C: „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Bundesländer im Transformationsprozess“, 2024, Fraunhofer ISE.
ISE4	https://www.energy-charts.de, Verantwortlicher Redakteur: Prof. Dr. Bruno Burger, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
ISE5	Photovoltaics Report, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, PSE PSE Projects GmbH, Juli 2024
ISE6	Photovoltaik-Brandschutz – Fakten statt Phantome, Pressemeldung, Fraunhofer ISE, Februar 2013 (Näheres zum Brandschutz unter www.pv-brandsicherheit.de)
ISE7	Speicherstudie 2013 - Kurzgutachten zur Abschätzung und Einordnung energiewirtschaftlicher, ökonomischer und anderer Effekte bei Förderung von objektgebunden elektrochemischen Speichern, Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, Januar 2013
ISE8	Sustainable PV Manufacturing in Europe – An Initiative for a 10 GW GreenFab, Studie des Fraunhofer ISE, Juli 2020
ISE9	Deutschland hat großes Potenzial für Schwimmende Photovoltaik, Presseinfo des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, Juli 2024
ISET	Saint-Drenan Y-M et al. „Summenganglinien für Energie 2.0“, Studie des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik, ISET e.V., April 2009
ISI	Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Kurzbericht: 3 Hauptszenarien; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec GmbH, Mai 2021

IVL	Lithium-Ion Vehicle Battery Production, Status 2019 on Energy Use, CO_2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling, Studie des Swedish Environmental Research Institute im Auftrag der Swedish Energy Agency, November 2019
IWU	Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Schlussbericht, März 2022
KBA	Zahlen im Überblick – Statistik, Kraftfahrt-Bundesamt, Juni 2018
KFW	KfW Research Volkswirtschaft Kompakt, Nr. 251, April 2025
LCA	Müller A, Friedrich L, Reichel C, Herceg S, Mittag M, Neuhaus H. A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 230, 2021
LFU1	Berechnung von Immissionen beim Brand einer Photovoltaik-Anlage aus Cadmiumtellurid-Modulen, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 11-2011
LFU2	Beurteilung von Kunststoffbränden, Az: 1/7-1515-21294, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 1995
Licht1	Analyse des Beitrags von Mini-BHKW zur Senkung von CO_2-Emissionen und zum Ausgleich von Windenergie, Gutachten zum geplanten »ZuhauseKraftwerk« im Auftrag der LichtBlick AG, LBD-Beratungsgesellschaft mbH, 2009
Licht2	Repräsentative Umfrage zu erneuerbaren Energien, Marktforschungsinstitut YouGov im Auftrag der LichtBlick SE, Februar 2020
Lopez	Martinez Lopez VA, Ziar H, Haverkort JW, Zeman M, Isabella O, Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems integration, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 182, 2023
MCC	Wissensstand zu CO_2-Entnahmen, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH, 2021
MWV	Jahresbericht 2018, Mineralölwirtschaftsverband e.V., Juli 2018
NETZ1	https://www.netztransparenz.de/EEG/Marktpraemie/Marktwerte
NETZ2	Historische Daten: https://www.netztransparenz.de/EEG/Verguetungs-und-Umlagekategorien
NOW	IndWEDe - Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2018
NWS	Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Juli 2023
ÖKO1	Beschäftigungsentwicklung in der Braunkohleindustrie: Status quo und Projektion, Öko-Institut Berlin, Juli 2018
ÖKO2	Aktueller Stand der KWK-Erzeugung (Dezember 2015), Studie des Ökoinstituts e.V. im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Dezember 2015

Peters	Peters I M, Hauch J, Brabec C, Cradle-to-cradle recycling in terawatt photovoltaics: A vision of perpetual utility, Joule, Volume 8, Issue 4, 2024
Prog	Klimaneutrales Deutschland. Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität, Juni 2021
SCBW	Weiterbetrieb von Ü20-Photovoltaikanlagen - Möglichkeiten nach Ende ner EEG-Förderdauer, Faktenpapier, Solar Cluster Baden-Württemberg, Januar 2021
SMARD	„Redispatch je Energieträger“, https://www.smard.de/page/home/topic-article/211816/213384, Abruf am 5.3.2025
SPE	EU Market Outlook For Solar Power 2023 – 2027, SolarPower Europe, Dezember 2023
Sprin	Motorentechnik - Im Fokus, Onlineartikel, Dezember 2010 https://www.springerprofessional.de/motorentechnik/pkw-antriebe-im-ueberblick-vergangenheit-gegenwart-und-zukunft/6561052
RWE	RWE nimmt Batteriespeicher in Herdecke in Betrieb - Sechs Millionen Euro Investition, sieben MWh Kapazität, Pressemeldung, RWE, Februar 2018
Shell	Shell Scenarios Sky - Meeting the goals of the Paris agreement, Shell International B.V., März 2018
Siem	Weit mehr als nur heiße Luft, Pressemeldung, Siemens AG, März 2017
Test	„Immer sparsamer“, test 1/2012, Stiftung Warentest
UBA1	Erneuerbare Energien in Deutschland, Daten zur Entwicklung im Jahr 2022, Umweltbundesamt, Februar 2023
UBA2	Artikel auf https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraft-waerme-kopplung-kwk#textpart-1, Oktober 2018
UBA3	Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze Stand 12/2020, Umweltbundesamt, Dezember 2020
UBA4	Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohlen, Umweltbundesamt, Dezember 2017
UBA5	Der Europäische Emissionshandel, https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#textpart-1, Download im Juni 2019
UBA6	Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2024, Umweltbundesamt, April 2025
UBA7	Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Mai 2021
UBA8	Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE Kurzfassung, Umweltbundesamt, November 2019
UBA9	Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2020, Umweltbundesamt, November 2021
UBA10	Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen, Umweltbundesamt, Juli 2010

UBA11	Anzahl der Beschäftigten im Bereich erneuerbare Energien Quelle: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihe-der-beschaeftigungszahlen-seit-2000.html, Download am 22.3.2023
ÜNB1	Mittelfristprognose zur deutschlandweiten Stromerzeugung aus EEG-geförderten Kraftwerken für die Kalenderjahre 2022 bis 2026, r2b energy consulting GmbH, erstellt im Auftrag der 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, Oktober 2021
ÜNB2	Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023; Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, Januar 2022
Vatt	CO_2-freie Energie fürs Quartier: Sektorenkoppelnder Stahlspeicher bringt Energiewende auf Hochtemperatur, Pressemeldung, Vattenfall, Oktober 2018
VDE	Download am 13.11.2021 von https://www.vde.com/de/fnn/dokumente/karte-deutsches-hoechstspannungsnetz
VFL	Berechnung einer risikoadäquaten Versicherungsprämie zur Deckung der Haftpflichtrisiken, die aus dem Betrieb von Kernkraftwerken resultieren, Studie der Versicherungsforen Leipzig im Auftrag des Bundesverbands Erneuerbare Energie e.V. (BEE), April 2011
VGB	Kraftwerke 2020+, Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats der VGB PowerTech e.V., 2010
ZSW	Untersuchung zur Wirkung veränderter Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen, Studie des ZSW im Auftrag der innogy SE, Januar 2019

32. Anhang: Abbildungen

Abbildung 1: PV-Ausbau zum Erreichen der Klimaneutralität im Sektor Energiewirtschaft, Studien benannt nach ausführender Institution und Szenario. 5
Abbildung 2: Netto-PV-Zubau: Ist-Werte bis 2024, Ausbaupfad zur Erreichung der gesetzlichen Ziele [ISE4], [BSW], [EEG2023]. 6
Abbildung 3: Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland [ISE4] Stand 12.3.2025, [AGEE]. 6
Abbildung 4: Historische Entwicklung der Preise für PV-Module (PSE Projects GmbH/Fraunhofer ISE, Datenquelle: Strategies Unlimited/Navigant Consulting/EuPD). Die Gerade zeigt den Trend der Preisentwicklung. 8
Abbildung 5: Entwicklung des durchschnittlichen Endkundenpreises (Systempreis, netto) für fertig installierte Aufdachanlagen von 10 – 100 kW_P, Daten: BSW [ISE5]. 9
Abbildung 6: Feste EEG-Einspeisevergütung für PV-Strom nach dem Datum der Inbetriebnahme des Kraftwerks in aktuellen Anlagenklassen „Gebäudeanlagen mit Überschusseinspeisung bis 10 kW_P“ und „Sonstige Anlagen bis 100 kW“ aus [Netz2] und [BNA3], mittlere Vergütung in den Ausschreibungen der Bundesnetzagentur [BNA3], Strompreise [BMWK1], [BDEW1], Marktwert Solarstrom [NETZ1], BDEW Strompreisanalyse. 10
Abbildung 7: Börsenstrom- und Zertifikatpreise in Deutschland [ISE4]. 11
Abbildung 8: PV-Ausbau und Differenzkosten, Daten aus [BMWK1], [BMWK3], Mittelfristprognosen der ÜNB. 12
Abbildung 9: Verfahren zur Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre und Einlagerung von Kohlenstoff [MCC]. 15
Abbildung 10: Zusammensetzung des durchschnittlichen Haushaltsstrompreises im Jahr 2024 [BDEW1]. 16
Abbildung 11: Nettostromimport (violett) und Solarstromproduktion (gelb) im Jahr 2024 für Deutschland [ISE4]. 17
Abbildung 12: Abschätzung der Stromgestehungskosten für kleine PV-Anlagen unter verschiedenen Einstrahlungsbedingungen, dazu Festvergütungen gemäß EEG. 18
Abbildung 13: Wertschöpfungszyklus für die Silizium-Photovoltaik. 19
Abbildung 14: Produktionskapazität nach Wertschöpfungsstufen und Ländern, Daten: Wood Mackenzie, 2023 20
Abbildung 15: PV Produktionsstandorte in Deutschland und anderen europäischen Staaten [SPE]. 21
Abbildung 16: Fördermittel für Photovoltaikforschung in Mio. Euro [BMWK2]. 22
Abbildung 17: Verteilung der installierten PV-Leistung Ende 2023 nach Anlagengröße [ISE5]. 24
Abbildung 18: Stündliche Stromproduktion im Jahr 2021 [ISE4]. 24
Abbildung 19: Mittlere Leistung für die Einspeisung von Sonnen- und Windstrom im Jahr 2021, 15-Minuten-Werte [ISE4]. 25
Abbildung 20: Monatssummen PV- und Windstromproduktion, Daten aus [ISE4]. 26

Abbildung 21: Jahresmaximum der Netzeinspeisung im Verhältnis zur installierten PV-Nennleistung am entsprechenden Monatsende, Daten aus [ISE4]. 27
Abbildung 22: Beispiel für den Verlauf von Börsenstrompreisen, konventioneller und regenerativer Stromerzeugung der 32. Kalenderwoche 2024 [ISE4]. 28
Abbildung 23: System Average Interruption Duration Index (SAIDI) für die Nieder- und Mittelspannung, Daten aus [BNA2]. 29
Abbildung 24: Anwendungen für die Integration von Photovoltaik. 30
Abbildung 25: Flächennutzung in Deutschland [FNR]. 31
Abbildung 26: Gebäudebestand in Mio., Daten aus [DENA], [IWU]. 32
Abbildung 27: PV-Lösungen für Dach und Fassade (oben: Aufdachsysteme, unten: Integrierte PV). 33
Abbildung 28: Umfrageergebnisse zum Neubau von Kraftwerken, Daten aus [Licht2]. 36
Abbildung 29: Umfrageergebnisse zur Akzeptanz verschiedener Kraftwerkstypen [AEE2]. 36
Abbildung 30: Reichweiten von Elektro- und Biodiesel-Fahrzeugen pro Hektar eingesetzter Fläche. 38
Abbildung 31: Stromerträge von PV-Kraftwerken und Silomais pro Hektar eingesetzter Fläche. 39
Abbildung 32: Relatives Ertragspotenzial, unverschattet, Standort Freiburg, berechnet online mit https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. 39
Abbildung 33: Prognostizierte Vollbenutzungsstunden für Stromerzeugung aus EE, Daten aus [ÜNB1]. 42
Abbildung 34: Horizontale jährliche Globalstrahlungssumme in Deutschland, gemittelt über den Zeitraum 2001 – 2020, Daten [DWD]. 43
Abbildung 35: Entwicklung der atmosphärischen CO_2-Konzentration, der mittleren globalen Temperaturveränderung und der Sonnenaktivität (http://herdsoft.com/climate/widget/). 44
Abbildung 36: Schätzungen der atmosphärischen CO_2-Konzentration und der Temperaturdifferenz in der Antarktis auf Basis von Eisbohrkernen [EPA]; Rot: CO_2-Messwerte des Mauna Loa Observatory [https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html]. 45
Abbildung 37: Treibhauspotenzial der Stromerzeugung mit mono c-Si PV für Dach- und Freiflächenanlagen [UBA7]. 46
Abbildung 38: Treibhauspotenzial verschiedener Stromerzeugungstechnologien [UBA7]. 47
Abbildung 39: Vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2024 [AGEE]. 47
Abbildung 40: Entwicklung des jährlichen PV-Zubaus [IEA3] und mittlere jährliche Wachstumsrate. 48
Abbildung 41: Energieflussbild 2023 für Deutschland, Angaben in Petajoule [AGEB2]. 54
Abbildung 42: Wert und Energiemenge der Nettoimporte fossiler Brennstoffe (linke Achse: Wert in Mrd. EUR, nominal; rechte Achse Energiemenge in PJ) [KFW]. 55
Abbildung 43: Struktur des Endenergieverbrauchs nach Anwendungsbereichen für Deutschland im Jahr 2020, Zahlen aus [AGEB3]. 55

Abbildung 44: Schematische Darstellung des Modells REMod [ISE3]. 56
Abbildung 45: Schematische Darstellung einer Residuallastkurve für Deutschland bei Stromversorgung mit 100 % EE. 57
Abbildung 46: Entwicklung der globalen Stromerzeugung nach Technologien und Szenarien [IEA2]. 59
Abbildung 47: Stromertragsprofile von PV-Kraftwerken in verschiedenen Montagevarianten, berechnet online mit https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools für einen überwiegend klaren Maitag am Standort Freiburg, ohne Verschattungseffekte, Bifazialitätsfaktor 100%. 60
Abbildung 48: Stromertragsprofile von PV-Kraftwerken in verschiedenen Montagevarianten, berechnet online mit https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools für einen überwiegend klaren Maitag am Standort Freiburg, unverschattet. 60
Abbildung 49: Stromertragsprofile von PV-Kraftwerken in verschiedenen Montagevarianten, berechnet online mit https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools, Standort Freiburg, unverschattet; die Prozentzahlen geben den relativen Jahresertrag bezogen auf 45° Neigung an. 61
Abbildung 50: Treibhausgasemissionen (CO_2-Äqu. in Tonnen) eines durchschnittlichen PKWs der Kompaktklasse mit unterschiedlichen Antrieben im Jahr 2022, in Abhängigkeit von der Gesamtfahrleistung [ADAC]. 63
Abbildung 51: Einfluss der Photovoltaikleistung und Speicherkapazität auf den Eigenverbrauchsanteil (links) und Autarkiegrad (rechts) bei einem Jahresstrombedarf von 4000 kWh [HTW]. 69
Abbildung 52: Gegenüberstellung der konventionellen und der netzdienlichen Betriebsführung [ISE7]. 69
Abbildung 53: Technologien für die elektrische Energiespeicherung mit heute erzielbaren Wirkungsgraden. 71
Abbildung 54: Höchstspannungsnetz [VDE] und Gas-Fernleitungsnetz [Fern]. 72
Abbildung 55: Installierte Leistung von Wasserkraftwerken in benachbarten Ländern, Zahlen aus [IHA]. 73
Abbildung 56: Vereinfachte schematische Darstellung eines Erneuerbaren Energiesystems mit den wichtigsten stromnetzgebundenen Bausteinen der Gewinnung, Wandlung, Speicherung und des Verbrauchs; IKT: Informations- und Kommunikationstechnik, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, GuD: Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk. 74
Abbildung 57: Wichtige Stromerzeuger, -wandler und Speicher, zusätzliche Schätzungen und Annahmen in eckigen Klammern ([ISE3], s. auch Abschnitt 22.3.7). 75
Abbildung 58: PV-Module: Massenanteile und Wert der zurückgewonnenen Materialien [Peters] 79
Abbildung 59: Begriffe der Stromerzeugung und des –verbrauchs. 84