

Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland

Aktuelle Fassung abrufbar unter www.pv-fakten.de

Zusammengestellt von
Dr. Harry Wirth
Bereichsleiter Photovoltaik
Module und Kraftwerke
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 21.9.2022

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	13
4.5 EEG-Umlage	14
5. Subventionen und Strompreise	16
5.1 Wird PV-Strom subventioniert?	16
5.2 Wird die fossile und nukleare Stromerzeugung subventioniert?	17
5.2.1 Fossile Energieträger	17
5.2.2 Kernkraft	18
5.3 Subventionieren Mieter gut situierte Hauseigentümer?	19
5.4 Verteuert PV-Stromerzeugung den Strom für Privathaushalte?	20
5.5 Verteuert PV den Strom für die Industrie?	21
6. Exportieren wir massiv PV-Strom ins europäische Ausland?	22
7. Können kleine PV-Anlagen attraktive Renditen bringen?	22
8. Erzeugt die PV-Branche nur Arbeitsplätze in Asien?	24
9. Welche Fördermittel fließen in die PV-Forschung?	26
10. Überlastet PV-Strom unser Energiesystem?	27
10.1 Übertragung und Verteilung	27
10.2 Volatilität	28
10.2.1 Solarstrom-Produktion ist planbar	28
10.2.2 Spitzenproduktion deutlich kleiner als installierte PV-Leistung	29
10.2.3 Sonnen- und Windstrom ergänzen sich	29
10.3 Abregelbarkeit	31
10.4 Konflikte mit trägen fossilen und nuklearen Kraftwerken	31
10.5 Gefährdet volatiler Solarstrom die Versorgungssicherheit?	33

10.6	Muss der PV-Ausbau auf Speicher warten?	33
11.	Gibt es in Deutschland genügend Flächen für PV?	34
12.	Zerstören PV-Anlagen ökologisch wertvolle Flächen?	38
13.	Finden PV-Kraftwerke Akzeptanz in der Bevölkerung?	39
14.	Arbeiten PV-Anlagen in Deutschland effizient?	40
14.1	Degradieren PV-Module?	42
14.2	Verschmutzen PV-Module?	42
14.3	Arbeiten PV-Anlagen selten unter Volllast?	43
15.	Liefert PV relevante Beiträge zum Klimaschutz?	46
15.1	Gefährdet der anthropogene CO ₂ -Ausstoß das globale Klima?	46
15.2	Liefert PV relevante Beiträge zur Senkung des CO ₂ -Ausstoßes?	47
15.3	Verschlingt die Produktion von PV-Modulen mehr Energie als diese im Betrieb liefern können?	51
15.4	Entstehen bei der Produktion von PV weitere klimaschädliche Gase?	51
16.	Heizen PV-Module ihre Umgebung auf?	51
16.1	Solare Reflexion und Absorption	51
16.2	Verdunstungskühlung	52
16.3	Wärmespeicherung	52
16.4	Treibhauseffekt	53
17.	Ersetzen PV-Anlagen fossile und nukleare Kraftwerke?	53
18.	Können wir einen wesentlichen Teil unseres Energiebedarfs durch PV-Strom decken?	54
18.1	Ausgangspunkt: Energiebedarf und Energieangebot	54
18.2	Energieszenarien	56
18.3	Transformationsschritte	60
18.3.1	Verfestigung der PV-Stromerzeugung	61
18.3.2	Komplementärbetrieb von Kraftwerken	62
18.3.3	Erhöhung der Energieeffizienz	63
18.3.4	Lastmanagement	65
18.3.5	Ausgewogener Zubau von PV- und Windkraftkapazitäten	66
18.3.6	Kraft-Wärme-Kopplung	67
18.3.7	Energiespeicherung	67
18.3.8	Netzausbau	73
18.3.9	Energieträgerimport	75
18.3.10	Übersicht	76
18.4	Muss die Energiewende auf die Bundespolitik warten?	77
19.	Brauchen wir eine PV-Produktion in Deutschland?	78

20. <i>Braucht es ein Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)?</i>	78
21. <i>Enthalten PV-Module giftige Substanzen?</i>	79
21.1 Waferbasierte Module	80
21.2 Dünnschicht-Module	80
21.3 Solarglas	80
21.4 Rücknahme und Recycling	80
22. <i>Sind Rohstoffe zur PV-Produktion ausreichend verfügbar?</i>	81
23. <i>Erhöhen PV-Anlagen das Brandrisiko?</i>	81
23.1 Können defekte PV-Anlagen einen Brand auslösen?	81
23.2 Gefährden PV-Anlagen die Feuerwehrleute?	82
23.3 Behindern PV-Module den direkten Löschangriff über das Dach?	83
23.4 Entstehen beim Brand von PV-Modulen giftige Immissionen?.....	83
24. <i>Anhang: Fachbegriffe</i>	83
24.1 Modulwirkungsgrad.....	83
24.2 Nennleistung eines PV-Kraftwerks.....	84
24.3 Jahresvolllaststunden (Jahresvollbetriebsstunden).....	84
24.4 Jahresnutzungsgrad (Kapazitätsfaktor).....	84
24.5 Spezifischer Ertrag	84
24.6 Systemwirkungsgrad	84
24.7 Performance Ratio	84
24.8 Grundlast, Mittellast, Spitzenlast, Netzlast und Residuallast	85
24.9 Stromerzeugung und -verbrauch	85
25. <i>Anhang: Umrechnungstabellen [EEBW]</i>	87
26. <i>Anhang: Abkürzungen</i>	88
27. <i>Anhang: Quellen</i>	88
28. <i>Anhang: Abbildungen</i>	96

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], [ARIA], [BDI], [ESYS], [Prog], [IEE], [HTW2], [ÜNB2], [AGORA2]).

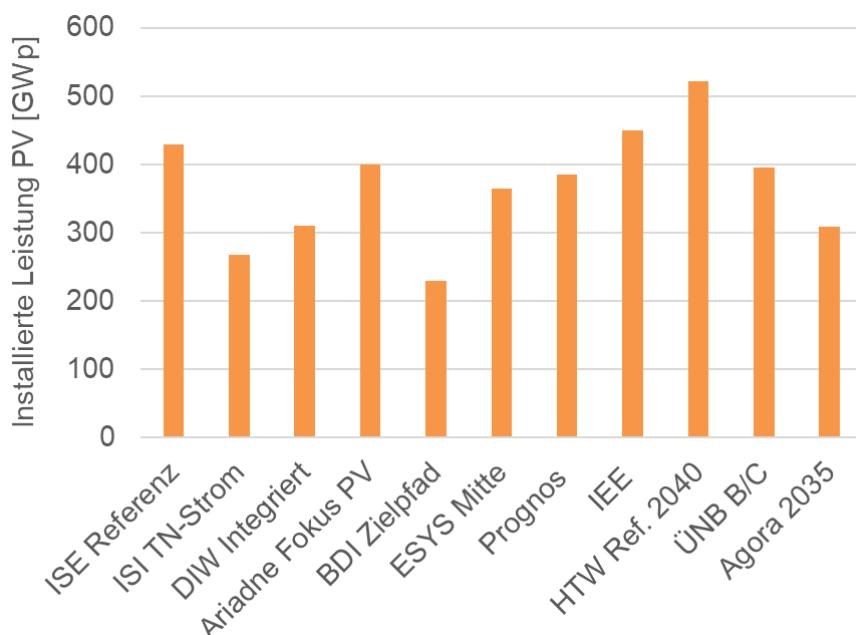


Abbildung 1: PV-Ausbau zum Erreichen der Klimaneutralität im Sektor Energiewirtschaft, Studien benannt nach ausführender Institution und Szenario.

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 innerhalb weniger Jahre 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/a installiert [BMWK1], s. Abbildung 2. Der Zubau von **5,3 GW_P** im Jahr 2021 erhöhte die installierte Leistung auf **59 GW_P** [ISE4].

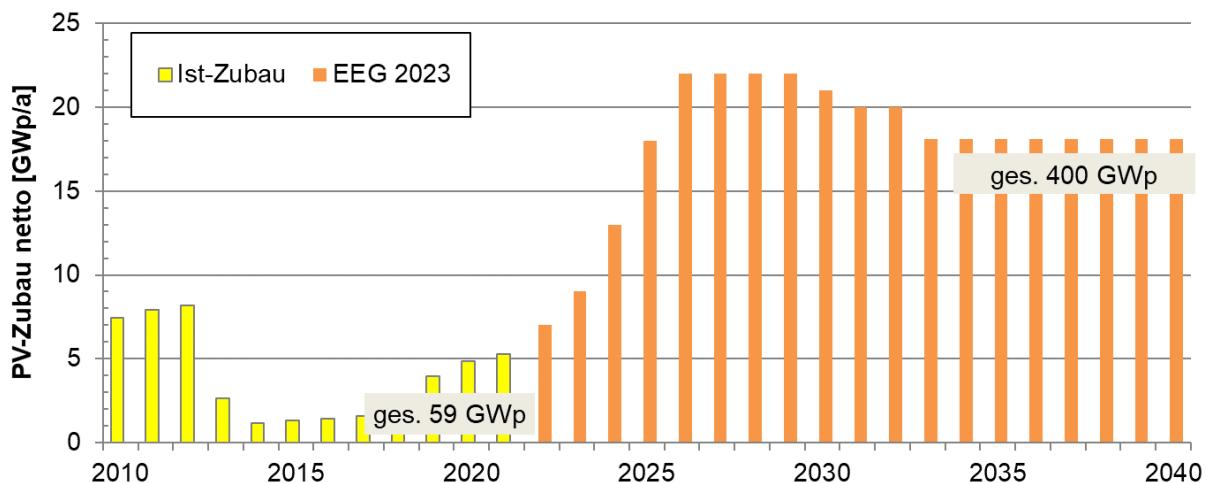


Abbildung 2: Netto-PV-Zubau: Ist-Werte bis 2021, möglicher Ausbaupfad zur Erreichung der gesetzlichen Ziele [EEG2023].

3. Liefert PV relevante Beiträge zur Stromversorgung?

Ja.

Im Jahr 2021 deckte die PV mit einer Stromerzeugung von **50 TWh** [UBA1] **8,9 %** des Bruttostromverbrauchs in Deutschland.

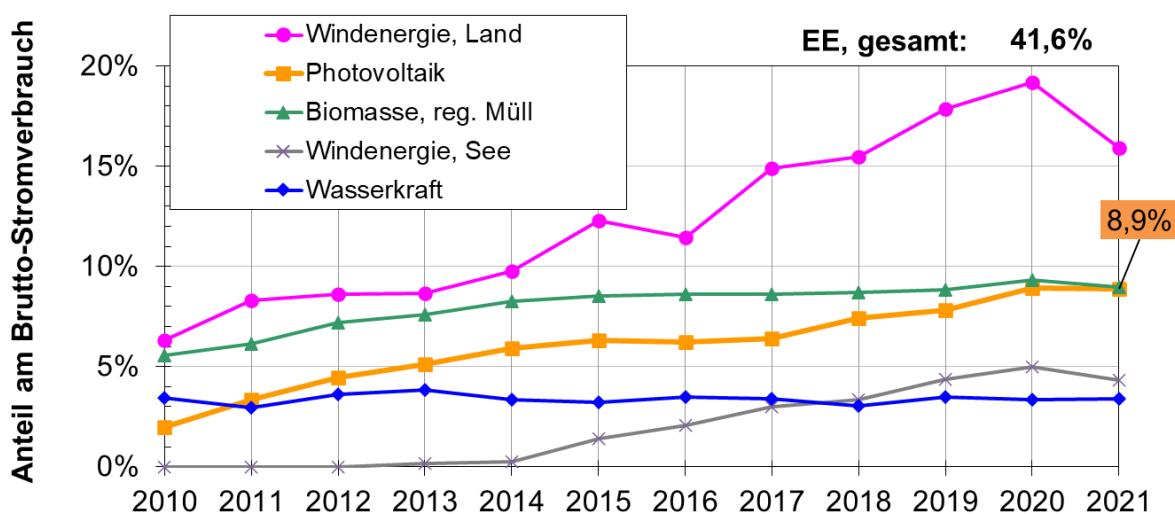


Abbildung 3: Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland, Daten aus [BMWK1], [BDEW3], [UBA1].

Der Bruttostromverbrauch schließt Netz-, Speicher- und Eigenverbrauchsverluste ein (Abschnitt 24.9). 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. Alle Erneuerbaren Energien (EE) kamen zusammen auf knapp **42 %** (Abbildung 3) und sollen bis 2030 laut Koalitionsvertrag 80 % erreichen. An sonnigen Tagen kann PV-Strom zeitweise über zwei Drittel unseres Strombedarfs decken. Ende 2021 waren in Deutschland PV-Module mit einer Nennleistung von installiert [ISE4], verteilt auf über **2,2 Mio. Anlagen** [BSW1].

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 CO₂, 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 (CO₂, 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 den reinen Erzeugungskosten für Strom aus EE geht es um den Aufbau netzdienlicher Speicher- und Wandlerkapazitäten (E-Mobilität und stationäre Batterien, Wärmepumpen und Wärmespeicher, Power-To-X, flexible Gaskraftwerke, Pumpspeicher). 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.

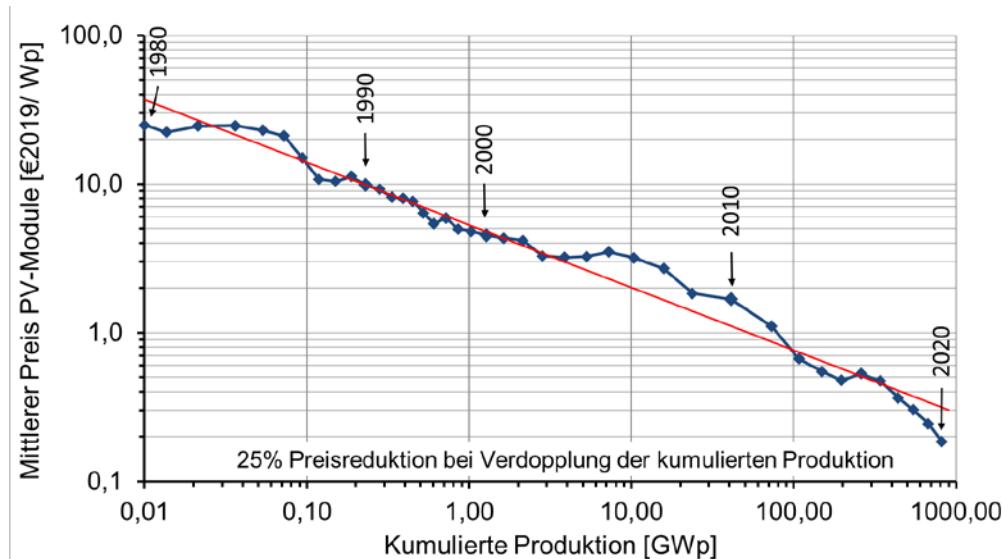


Abbildung 4: Historische Entwicklung der Preise für PV-Module (PSE AG/Fraunhofer ISE, Datenquelle: Strategies Unlimited/Navigant Consulting/EuPD). Die Gerade zeigt den Trend der Preisentwicklung.

Preise für PV-Kraftwerke fielen seit 2006 dank technologischen Fortschritts, Skalen- und Lerneffekten um über 75 %. 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, auch die Finanzierungskosten sind aufgrund des aktuell niedrigen Zinsniveaus günstig.

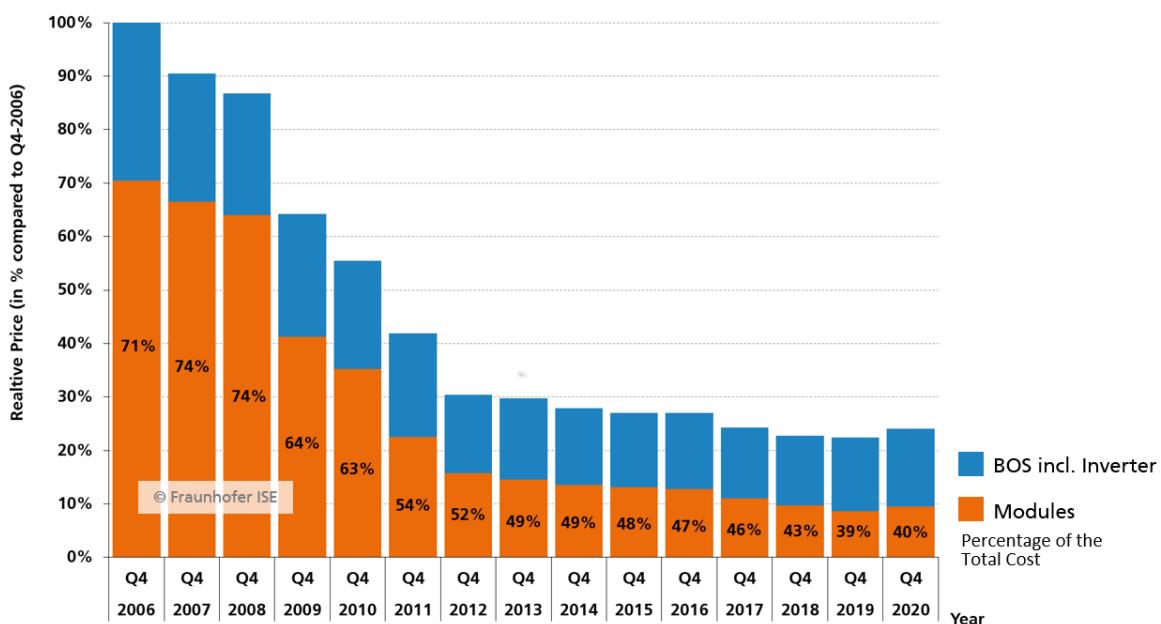


Abbildung 5: Entwicklung des durchschnittlichen Endkundenpreises (Systempreis, netto) für fertig installierte Aufdachanlagen von 10 – 100 kW_P [ISE5], Daten BSW-Solar.

Neue MW-Kraftwerke produzieren PV-Strom zu Kosten von 3 – 5,5 ct/kWh, bei kleinen Dachanlagen liegt die Spanne im Bereich von 6 – 11,5 ct/kWh [ISE1], [EUPD1]. 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 klein- und mittelständische Anleger, ist eine Abnahmegarantie für nicht selbst nutzbaren Strom über die wirtschaftliche Nutzungsdauer des Kraftwerks zu einer festen Vergütung 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 im Festvergütungs- und Marktprämiensegment, geringe Ausschreibungsmengen bremsten im Freiflächensegment. Dazu kamen eine Reihe von Einschränkungen bspw. bezüglich Flächenkulisse, Anlagengrößen und Eigenverbrauch. Die Einspeisevergütung für kleine Dachanlagen mit Eigenverbrauch, die im Oktober 2022 in Betrieb gehen, beträgt abhängig von der Anlagengröße bis zu 8,2 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. Seit Einführung des EEG im Jahr 2000 ist die Vergütung für PV-Strom aus neuen Kraftwerken um ca. 85 – 90 % gesunken (Abbildung 6). Die durchschnittliche Festvergütung für PV-Strom ist bis zum Jahr 2022 auf voraussichtlich 21,3 ct/kWh gesunken (Quelle: statista).

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.

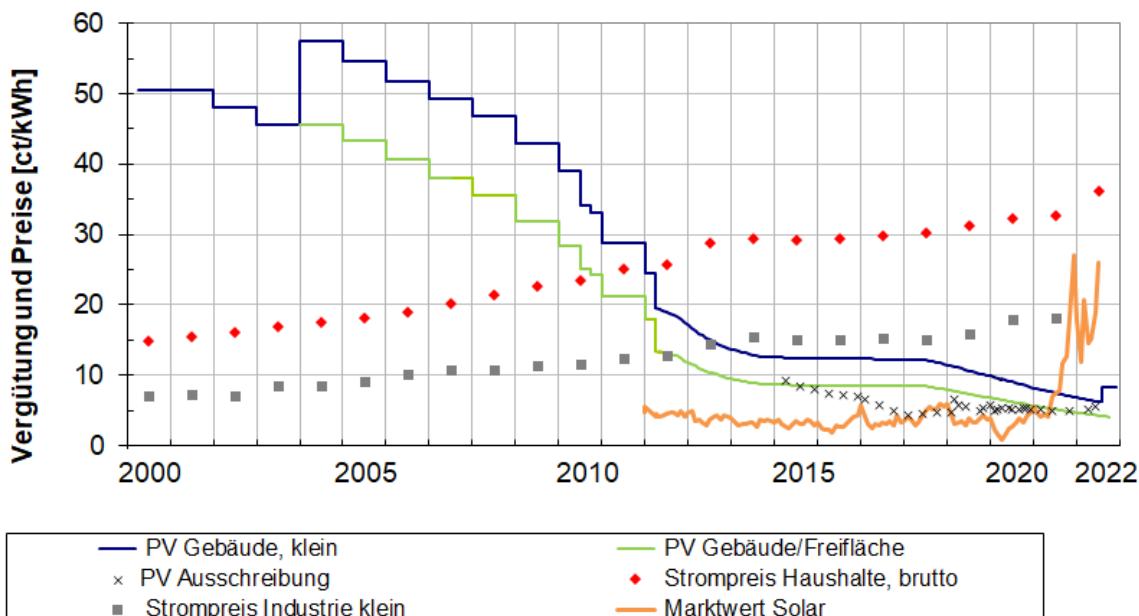


Abbildung 6: Feste EEG-Einspeisevergütung für PV-Strom nach dem Datum der Inbetriebnahme des Kraftwerks in aktuelle Anlagenklassen „Gebäudeanlagen mit Überschusseinspeisung bis 10 kW_P“ und „Sonstige Anlagen bis 100 kW“ aus [Netz2] und [BNA3], mittlere Vergütung in den Ausschreibungen der Bundesnetzagentur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

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).

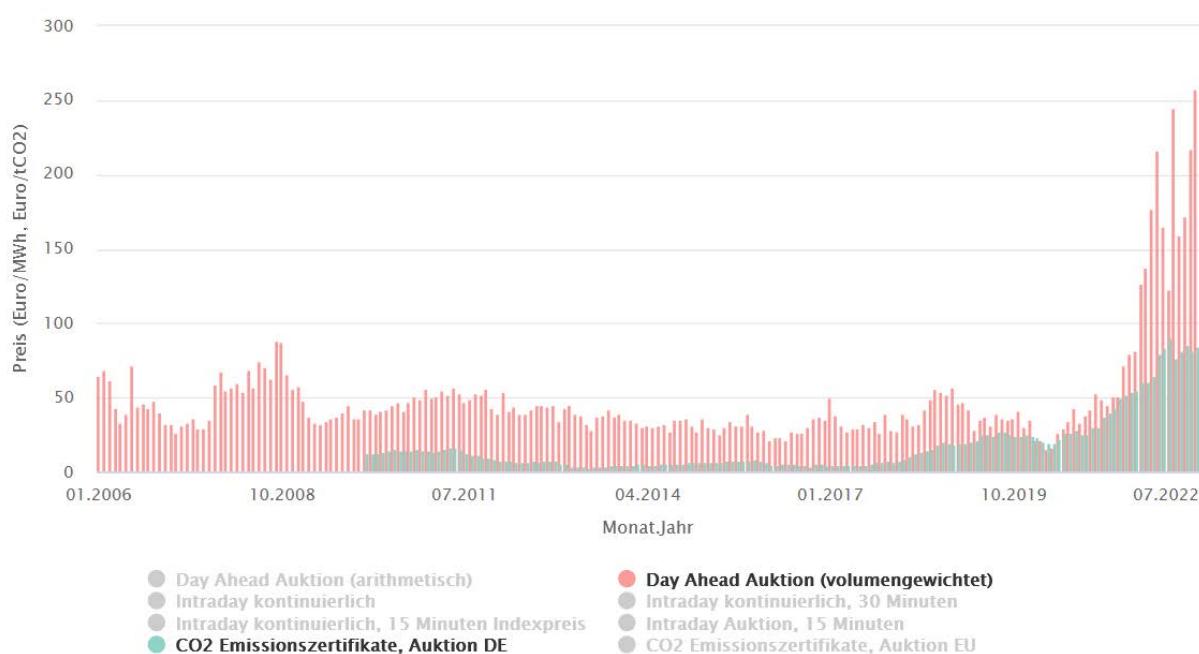


Abbildung 7: Monatliche Börsenstrompreise in Deutschland [ISE4].

Die laufende Preisfindung an der Börse erfolgt nach dem Prinzip des „Merit Order“ (Abbildung 8). 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 (Abbildung 9). Mit den Preisen sinken die

Einnahmen aller konventionellen Stromerzeuger (Kernkraft, Kohle, Gas), aber auch die Einnahmen für Strom aus EE (Solarstrom, Wind-, Wasserkraft). Weiterhin verringert Solarstrom die Auslastung insbesondere der klassischen Spitzenlastkraftwerke (Gas, Wasser). Die zunehmende Einspeisung von EE-Strom, gesunkene Kohlepreise und ein Überangebot an CO₂-Zertifikaten haben die Strompreise an der Börse bis 2021 massiv gesenkt. PV-Strom erzielte 2021 an der Strombörse einen Marktwertfaktor von ca. 0,92 [ÜNB1] im Trendszenario, d.h. dass die erzielten Erlöse pro kWh etwas unter dem durchschnittlichen Börsenstrompreis liegen.

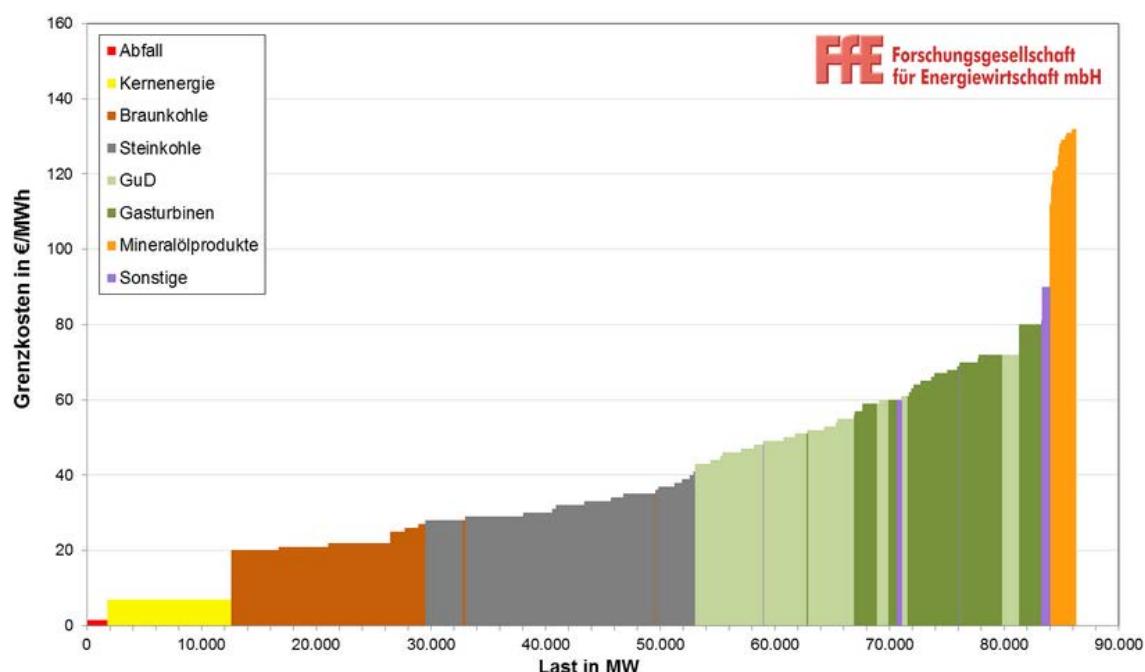


Abbildung 8: Merit Order konventioneller Kraftwerke im Jahr 2018 bei einem mittleren CO₂-Zertifikatspreis von 16 €/t [FFE].

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.

Merit-Order-Effekt Photovoltaik: Spotpreis 2011 und 2016

bdew
Energie. Wasser. Leben.

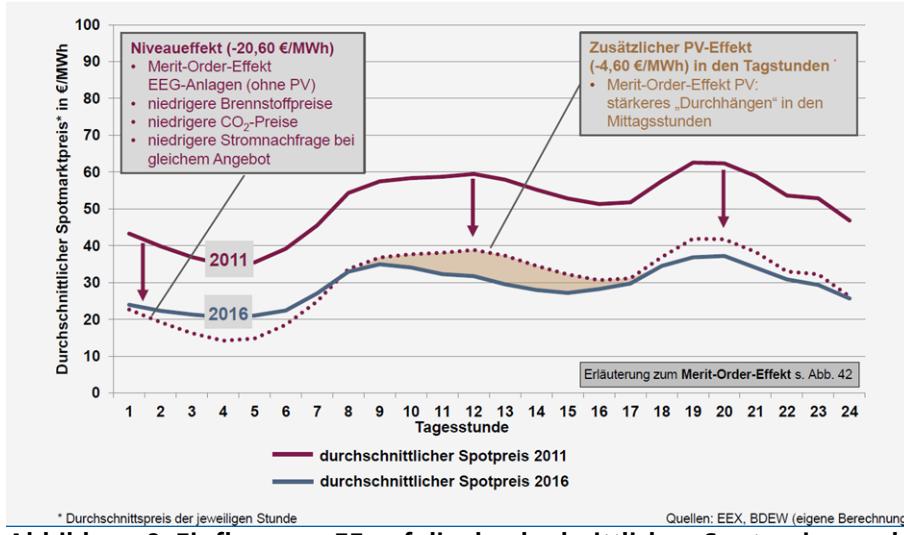


Abbildung 9: Einfluss von EE auf die durchschnittlichen Spotpreise an der Strombörsen [BDEW2].

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. Nach einem Maximum von fast 7 ct/kWh sank der Börsenwert des Stroms zur Differenzkostenermittlung auf 3 ct/kWh im Jahr 2020. 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 10 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 10 Mrd. € stabilisiert.

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. €.

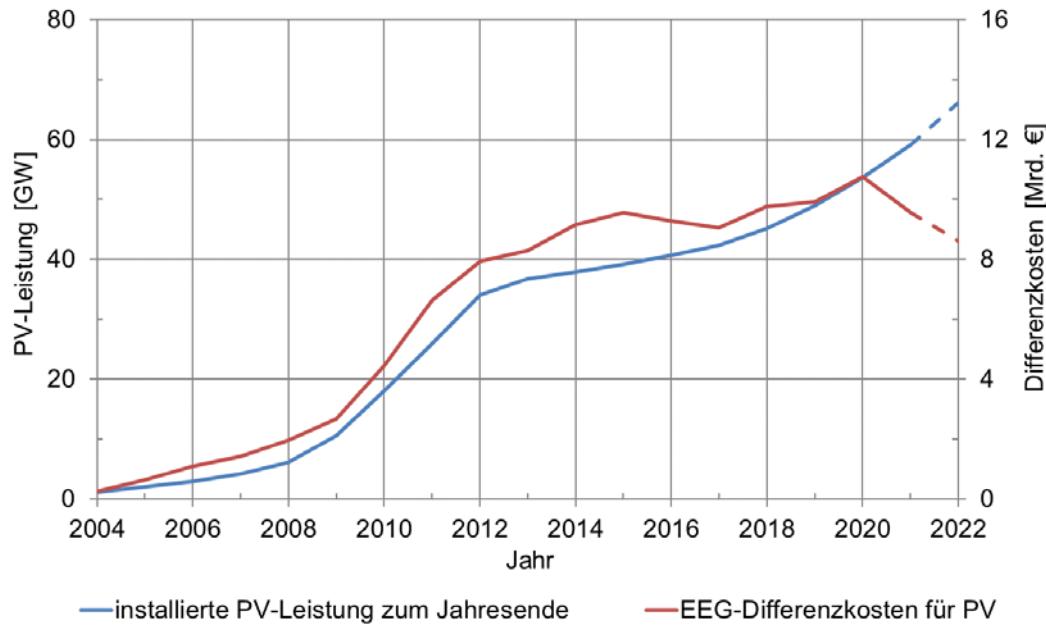


Abbildung 10: PV-Ausbau und Differenzkosten, Daten aus [BMWK1], [BMWK3].

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 (Abbildung 12). 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 (Abbildung 11). Diese umfassende Befreiung erhöhte die Belastung für andere Stromkunden, insbesondere für Privathaushalte.

Die Privilegierung hatte den Anstieg der EEG-Umlage pro kWh verstärkt (Abschnitt 5.5). Dabei profitierte die energieintensive Industrie von der preissenkenden Wirkung des PV-Stroms an der Börse zu Spitzenlastzeiten. Damit floss ein Teil der Umlage indirekt der energieintensiven Industrie zu, die von der EEG-Umlage befreit war oder nur einen ermäßigten Satz von 0,05 ct/kWh zahlte.

Letztverbraucher mussten auf die Umlage noch 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. Für das Jahr 2022 wurde die EEG-Umlage auf **3,72 ct/kWh** festgelegt. Ab Juli 2022 wurde die EEG-Umlage abgeschafft und die Differenzkosten werden aus dem EKF gedeckt.

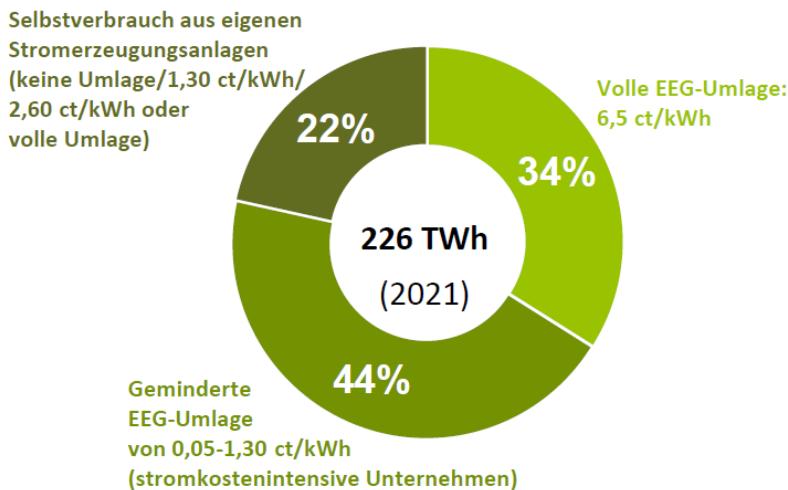


Abbildung 11: Stromverbrauch der Industrie und EEG-Umlage 2021 [BDEW1].

Die EEG-Umlage wurde aufgrund ihrer Festlegung durch folgende Faktoren erhöht:

1. steigende „privilegierte“ Strommengen

Weil die stromintensive Industrie von der Umlage praktisch befreit war, trugen kleinere Verbraucher, also Haushalte sowie industrielle und gewerbliche Verbraucher Mehrkosten in Milliardenhöhe

2. der Merit Order Effekt und die tageszeitliche Einspeisung von PV-Strom

Die Einspeisung von PV-Strom zu Tageszeiten mit ehemals höchsten Börsenstrompreisen senkt diese besonders wirksam (Kapitel 4.3), zum Vorteil großer Verbraucher. Sie erhöht aber gleichzeitig die Differenz zwischen Einspeisevergütung und Börsenpreis, der die Grundlage für die Berechnung der Umlage darstellte, ebenfalls zum Nachteil kleiner, umlagepflichtiger Verbraucher.

3. der Merit Order Effekt und die Überproduktion von Strom

Seit Jahren wird in Deutschland durch fossile und nukleare Kraftwerke mehr Strom produziert als notwendig (Kapitel 6). Dieses Überangebot senkt ebenfalls den Börsenstrompreis über den Merit Order Effekt und verdrängt Spitzenlastkraftwerke aus dem Erzeugungsmix.

4. sinkender Stromverbrauch durch Effizienzmaßnahmen

Maßnahmen zur effizienteren Nutzung von elektrischer Energie senken den Strombezug und erhöhen damit die Umlage pro verbrauchter kWh

5. Mehraufwand durch den Direktvermarktungzwang

Der Zwang zur Direktvermarktung erzeugt einen administrativen Mehraufwand, der durch eine erhöhte Vergütung für die Stromproduzenten ausgeglichen werden muss

6. steigende Produktion von Strom aus EE, soweit kein Eigenverbrauch

Der an sich erwünschte Ausbau der EE-Stromerzeugung erhöhte zumindest kurzfristig die Umlage, sowohl direkt, weil mehr Einspeisevergütung ausgezahlt wurde, als auch indirekt über den Preisverfall von Emissionszertifikaten, der zu einem billigeren Stromangebot fossiler Kraftwerke führte.

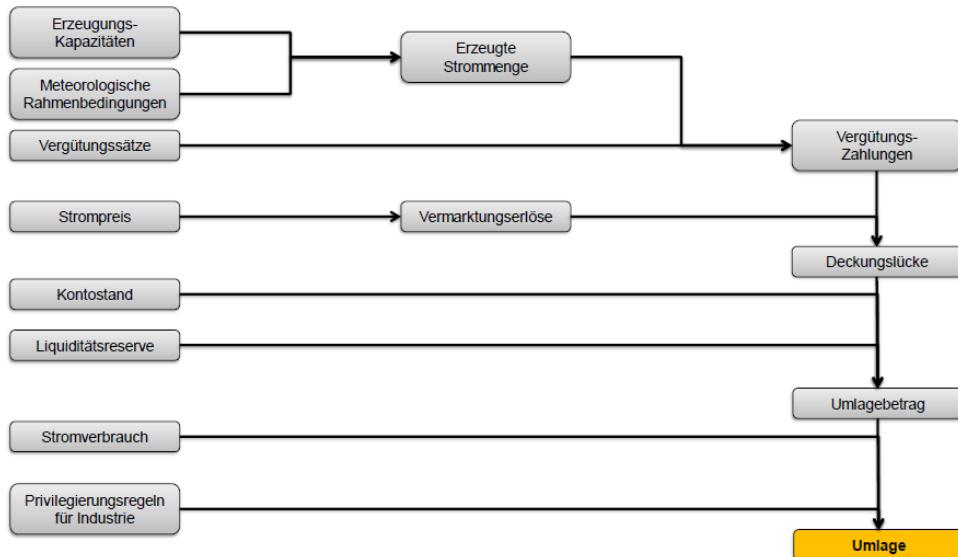


Abbildung 12: Übersicht zu Einflussfaktoren und Berechnung der EEG-Umlage [ÖKO4].

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 und nukleare 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 CO₂-Zertifikaten, die Auflagen zur Filterung von Rauch oder zurendlagerung von CO₂, 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 CO₂-induzierte Klimakatastrophe, dieendlagerung von Atommüll und Ewigkeitslasten aus dem Steinkohlebergbau. Bei einer konsequenteren Einpreisung dieser Kosten wird es dazu kommen, dass die PV-Stromerzeugung den Strommix verbilligt. Bis wir so weit sind, wird fossiler und nuklearer Strom zu Preisen verkauft, die seine externen Kosten verschleiern und als Hypothek in die Zukunft abschieben.

5.2.1 Fossile Energieträger

Im Jahr 2005 wurde ein EU-weiter Emissionshandel (European Union Emissions Trading System, EU ETS) eingeführt, um den CO₂-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].

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. Im Jahr 2022 beträgt der CO₂-Festpreis **30 €/t**, 2023 werden es 35 €/t [NEHS]. Diesen Preisen stehen erheblich höhere Kosten gegenüber, verursacht durch Klimaschäden und die notwendige Rückführung des CO₂ 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 CO₂ Schäden von rund **195 – 680 €/t**, je nach Höher- oder Gleichgewichtung der Wohlfahrt heutiger gegenüber zukünftiger Generationen [UBA3]. In Deutschland wurden im Jahr 2019 knapp 810 Mio. t Kohlendioxid und CO₂-Äquivalente emittiert, mit entsprechenden Schäden von 157 Mrd. € bzw. 551 Mrd. €, je nach Wohlstandsgewichtung. Für die Braunkohle-Stromgewinnung mit einem Emissionsfaktor von 1075 g CO₂/kWh (Abbildung 41) liegen die abgeleiteten CO₂-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 CO₂ 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 (DACC) mit Luftfilter-Anlagen (Abbildung 13). 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 CO₂ sind noch offen.

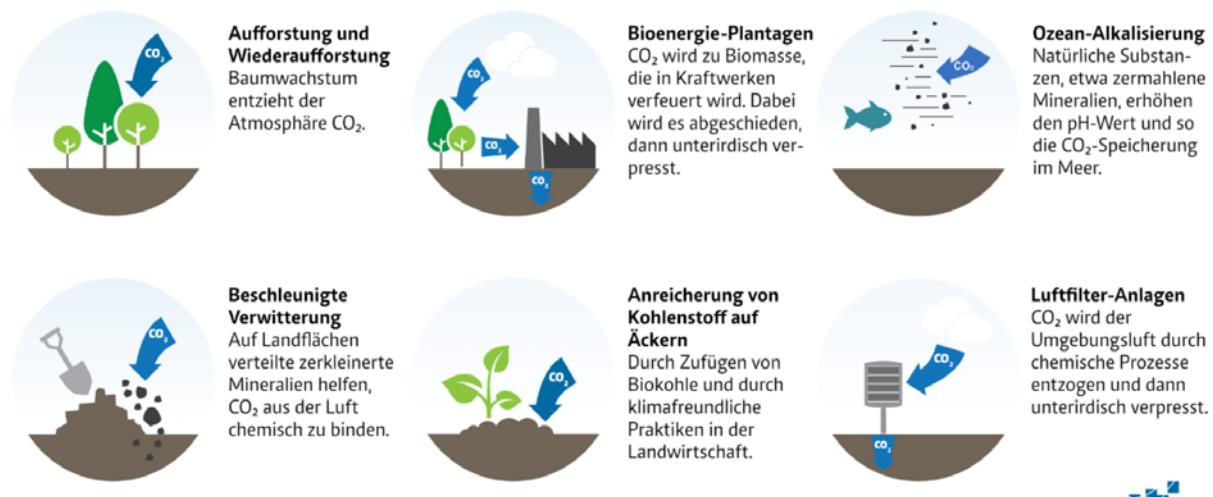


Abbildung 13: Verfahren zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre und Einlagerung von Kohlenstoff [MCC].

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].

5.2.2 Kernkraft

Die Risiken der Kernkraft werden von Fachleuten so hoch eingeschätzt, dass keine Versicherung oder Rückversicherung der Welt sich zutraut, Policien anzubieten. Unfallschäden im Betrieb der Kernkraftwerke sind nur bis 250 Mio. € über den Versicherungsmarkt gedeckt, bis 2,5 Mrd. € über einen Betreiberpool, bei größeren Schäden haften die Betreiber der Kernkraftwerke nur mit ihrem Vermögen [ATW1]. Zum Vergleich: die Nuklearkatastrophe von Fukushima verursachte einen Schaden in Höhe von ca. 100 Mrd. € und liegt damit um ein Vielfaches über dem Unternehmenswert deutscher Kernkraftwerksbetreiber. Eine Studie der Versicherungsforen Leipzig beziffert die Deckungssumme für das Risiko „Super-GAU“ auf 6 Billionen Euro, welche abhängig von der Aufbauperiode dieser Deckungssumme die Kilowattstunde in einer Spanne von rund 0,14 Euro bis 67,30 Euro

verteuern würde [VFL]. In Folge „versichert“ im Wesentlichen der Steuerzahler die Atomindustrie. Dies erfolgt zwangsweise, denn die Deutschen sind seit vielen Jahren mehrheitlich gegen die Kernenergie, und in unbestimmter Höhe, weil es keine Festlegung für eine Schadensregulierung gibt. Unter Berücksichtigung der externen Effekte liegen die gesamtgesellschaftlichen Kosten für Atomstrom im Jahr 2019 bei rund **24 – 28 ct/kWh** [FÖS1]. Studien, die Unfallrisiken aufgrund ihrer hohen Unbestimmtheit außen vor lassen, kommen zu deutlich niedrigeren Werten.

Bis zum Jahresende 2022 wird Deutschland seine verbliebenen 3 Kernkraftwerke abschalten. Damit werden die Kettenreaktionen in den Brennstäben abgebremst und das GAU-Risiko („Größter anzunehmende Unfall“) fällt weg.

Ob die Rückstellungen der Betreiber für den Rückbau der Kernkraftwerke ausreichen werden, ist heute nicht absehbar. Der Staat hat von den Kraftwerksbetreiber für die Übernahme des deutschen Atommülls 24 Mrd. € erhalten, die in einen Fonds geflossen sind. Ob dessen Erträge bis 2050 ausreichen werden, um für Bau und Inbetriebnahme eines Endlagers aufzukommen, ist ebenso ungewiss; nach Berechnungen der Endlagerkommission werden die Gesamtkosten auf 176 Mrd. € veranschlagt.

Der EURATOM-Vertrag aus dem Jahr 1957 erlaubt EU-Mitgliedsstaaten Subventionen für Kernkraftwerke, die in anderen Sektoren aus Wettbewerbsgründen nicht zulässig sind. Diese Ausnahmeregelung hat bei der Finanzierung des britischen Atomkraftwerks Hinkley Point C durch großzügige garantierte Einspeisevergütungen aus Steuergeldern eine wichtige Rolle gespielt [FÖS3]. Das Projekt war auf eine Rendite von 9 % über eine Laufzeit von 60 Jahren kalkuliert.

5.3 Subventionieren Mieter gut situierte Hauseigentümer?

Nein.

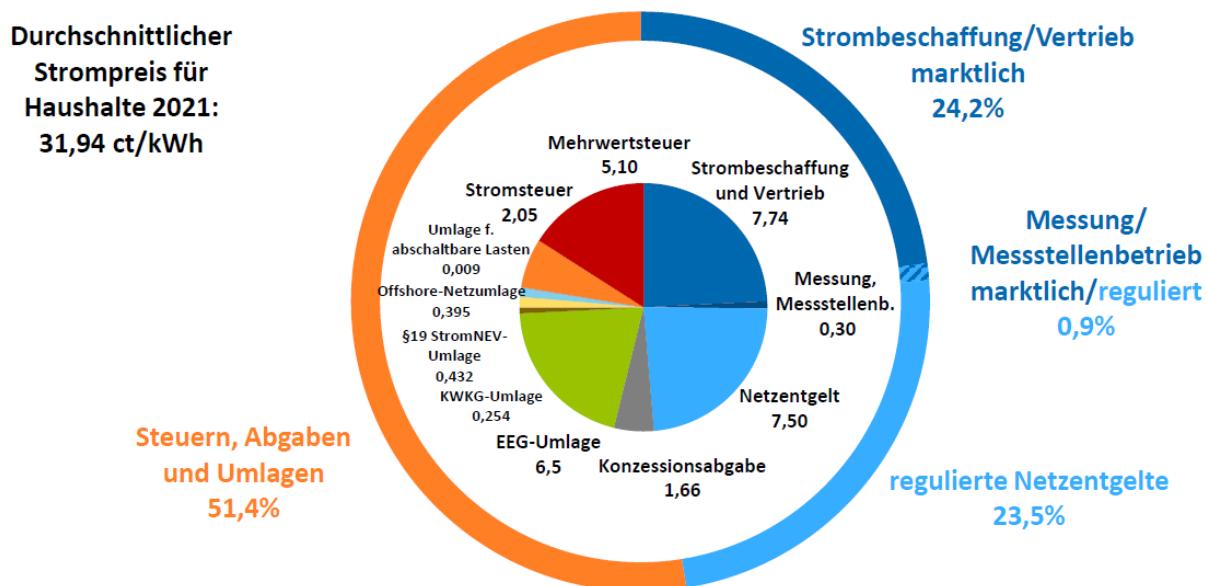
Diese beliebte Schlagzeile, hier zitiert aus der „Zeit“ vom 8.12.2011, ist eine verzerrte Darstellung. Die Kosten der Umstellung unseres Energiesystems auf EE wurden bis zum Jahr 2021 – mit der politisch gewollten Ausnahme der stromintensiven Industrie – nach dem Verursacherprinzip auf alle Stromverbraucher umgelegt, inklusive Haushalte von Eigenheimbesitzern und Mietern. Diese Kosten decken neben der PV auch Windkraft und andere EE ab. Alle Stromkunden können ihren Stromverbrauch durch die Auswahl und Nutzung ihrer Geräte beeinflussen, viele Gemeinden bieten kostenlose Energiesparberatung und Zuschüsse für die Anschaffung effizienter Neugeräte (Beispiele unter <https://www.stromspiegel.de/beratung/foerderung-und-zuschuesse/>).

Anlagen der Leistungsklasse unter 10 kW_P, die häufig von Hauseigentümern erworben werden, machen in der Summe weniger als 15 % der gesamten installierten Leistung aus (Abbildung 22). Größere Anlagen werden häufig über Bürgerbeteiligungen oder Fonds finanziert, an denen sich natürlich auch Mieter beteiligen können.

5.4 Verteuert PV-Stromerzeugung den Strom für Privathaushalte?

Ja, über die EEG-Umlage bis Juni 2022.

Privathaushalte tragen viele zusätzliche Lasten auf ihrer Stromrechnung. Der Gesetzgeber legt die Berechnungsgrundlage und den Verteiler für die EEG-Umlage (bis Mitte 2022) sowie weitere Steuern und Abgaben fest, mit zurzeit nachteiligen Effekten für Privathaushalte.



Quelle: BDEW; Stand: 06/2021

Abbildung 14: Zusammensetzung des durchschnittlichen Haushaltsstrompreises im Jahr 2021 (KWKG: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz; Strom-NEV: Entlastung stromintensiver Industriebetriebe; Konzessionsabgabe: Entgelte für Nutzung öffentlicher Wege [BDEW1]).

Ein Musterhaushalt mit einem Jahresverbrauch von 3.500 Kilowattstunden zahlte im Jahr 2021 einen Strompreis von ca. **31,94 ct/kWh** [BDEW1], Abbildung 14 zeigt eine beispielhafte Preisstruktur. Die Stromsteuer wurde 1999 eingeführt, um laut Gesetzesbegründung Energie durch höhere Besteuerung zu verteuren, die Einnahmen fließen überwiegend in die Rentenkasse. Auf Stromsteuer und EEG-Umlage (bis 2022) entrichten Privathaushalte Mehrwertsteuer.

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 die hohe Versorgungssicherheit: in Niedrigpreisländern wie Rumänien oder Bulgarien sind Stromausfälle an der Tagesordnung.

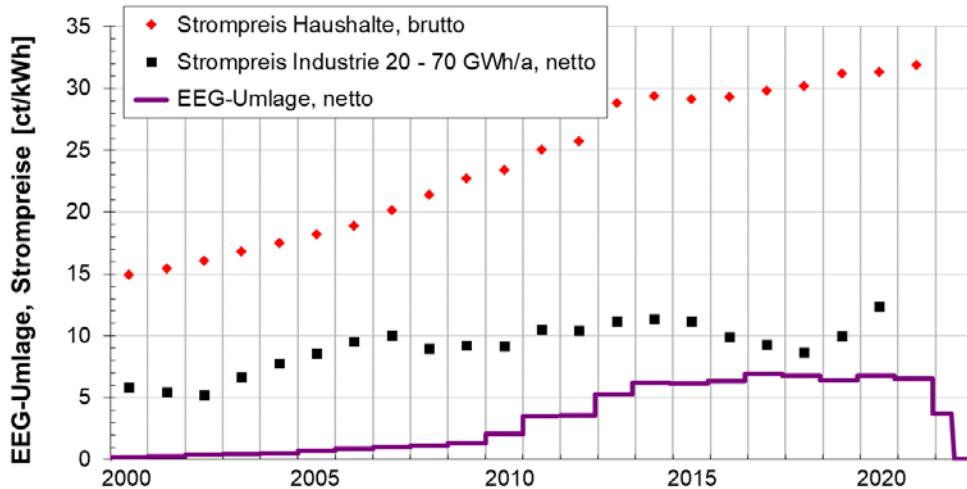


Abbildung 15: Entwicklung von Bruttostrompreisen für Haushalte, von Nettostrompreisen für industrielle Großabnehmer und Entwicklung der EEG-Umlage, Daten aus [BMWK1].

5.5 Verteuert PV den Strom für die Industrie?

Ja und nein, es gibt klare Gewinner und Verlierer.

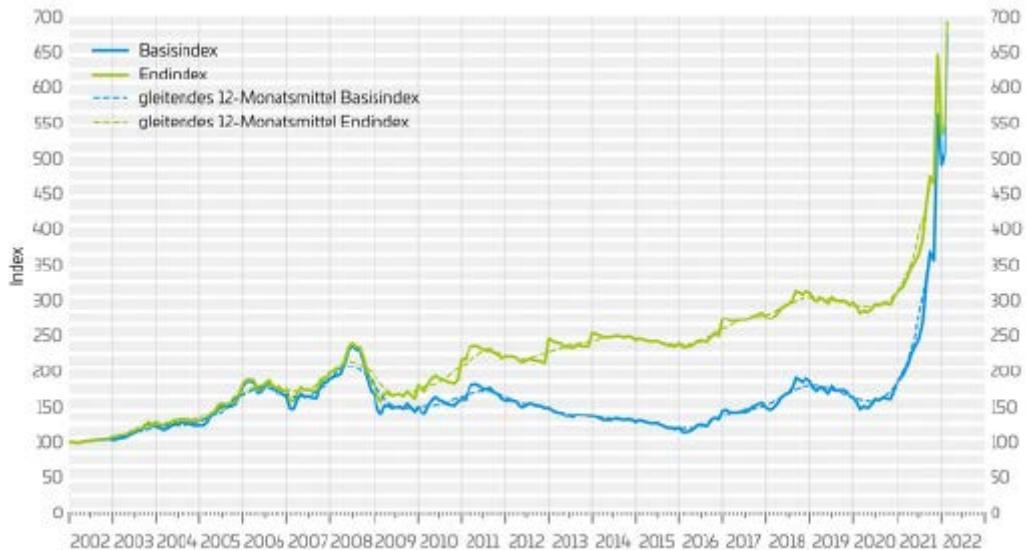


Abbildung 16: VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. Strompreisindex Mittelspannung [VIK].

Nach Erhebungen des Verbandes der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (VIK) hat sich der Strompreis für Mittelspannungskunden seit dem Jahr 2009 auseinanderentwickelt. Gewinner waren die Unternehmen, die sich von der EEG-Umlage befreien lassen konnten (VIK Basisindex, Abbildung 16). Der VIK Endpreisindex für nicht-privilegierte Unternehmen lag, vor allem wegen der darin berücksichtigten EEG-Umlage, deutlich über dem Basis-Index.

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

Nein.

Die Monatswerte der Energy Charts (www.energy-charts.de) zeigen, dass der Exportüberschuss ausgerechnet im Winter auffällig hoch liegt, also in Monaten mit einer besonders niedrigen PV-Stromproduktion (Abbildung 17)

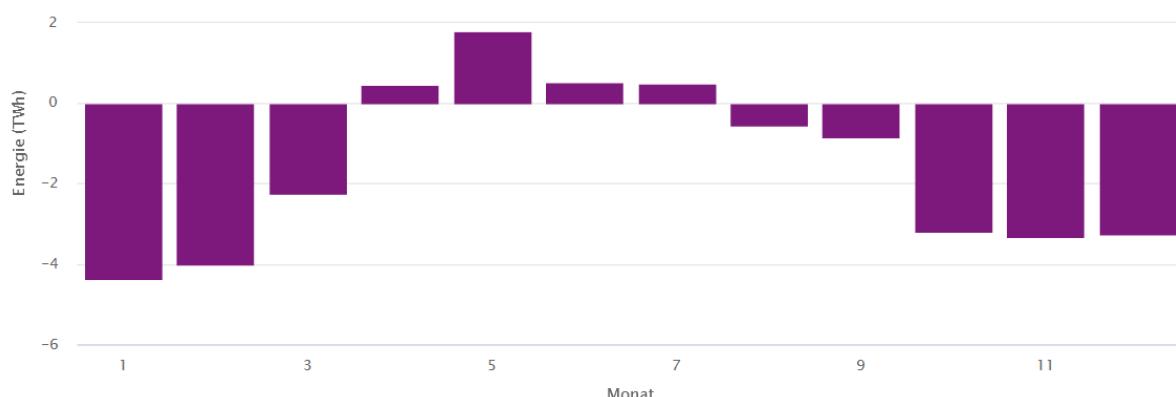


Abbildung 17: Stromexport (als negative Werte) im Jahr 2020 für Deutschland [ISE4].

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 18). Aufgrund der stark gesunkenen Preise für PV-Module 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 Anlagengröße 20 – 40 % Eigenverbrauch bezogen auf den erzeugten Strom [Quasch]. 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 18.3).

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 24.5), weil bspw. auch die Betriebstemperatur der Module, Verschmutzungseffekte oder die Dauer der Schneeauflage eine Rolle spielen.

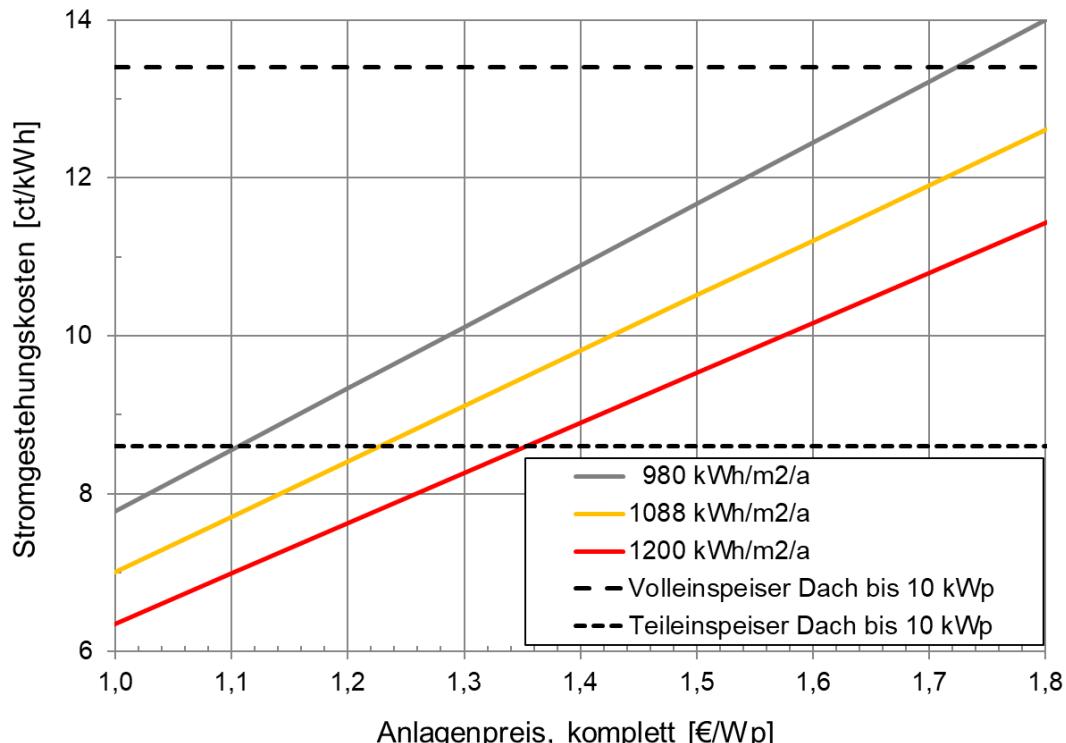


Abbildung 18: Abschätzung der Stromgestehungskosten für kleine PV-Anlagen unter verschiedenen Einstrahlungsbedingungen, dazu Vergütungen gemäß [EEG2023].

Zur groben Abschätzung der abgezinsten (diskontierten) Stromgestehungskosten (Abbildung 18) wurden folgende Annahmen getroffen:

- optimale Ausrichtung der Fläche (ca. Süd 30°)
- mittlere Jahressumme der horizontalen Globalstrahlung 1088 kWh/m²/a
- Performance Ratio 85 % (Abschnitt 24.7)
- 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].

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 „ausgefördert“ Anlagen spielt die Eigenverbrauchsfähigkeit eine große Rolle [SCBW].

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

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

Der komplette PV-Wertschöpfungszyklus auf Basis der Silicium-Wafertechnologie (Abbildung 19) beginnt mit der Produktion von hochreinem Polysilicium und setzt sich fort mit der Kristallisation von Siliciumblocks (Ingots) und dem Sägen von Silicium-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.

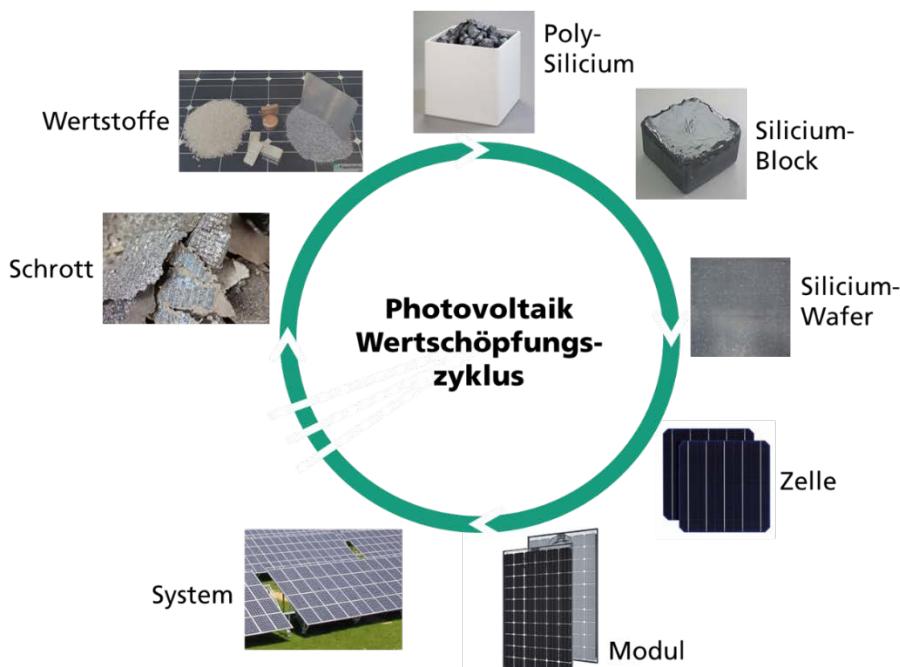


Abbildung 19: Wertschöpfungszyklus für die Silicium-Photovoltaik.

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: Solarsilicium, 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

Eine vertikal integrierte 10-GW-Produktion vom Silicium-Block über Wafer und Zelle bis zum Modul schafft nach Berechnungen des Fraunhofer ISE ca. 7500 Vollzeitarbeitsplätze [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 [EuPD2]. Während es um das Jahr 2010 noch eine vollständige PV-Lieferkette in Deutschland und Europa gab, wurde die Produktion einiger Ausgangsmaterialien aufgrund der zwischenzeitlich gesunkenen regionalen Nachfrage eingestellt. Abbildung 20 zeigt die aktuelle Produktionslandschaft in Deutschland für die wichtigsten Komponenten und Zwischenprodukte. Nennenswerte Anteile am Weltmarkt halten Wechselrichterhersteller, Siliciumhersteller Wacker und mehrere Hersteller von Produktionsanlagen.

Die PV- und Speicherbranche beschäftigte im Jahr 2019 ca. 26.000 Menschen in Deutschland [BSW2]. Zum Vergleich: 2015 arbeiteten noch knapp 21.000 Menschen im Braunkohlebergbau und in den Braunkohlekraftwerken [ÖKO1].



Abbildung 20: PV Produktionsstandorte, Kreisfläche bildet die Produktionskapazität ab [SPE].

In den Zehnerjahren sind in Deutschland viele Arbeitsplätze durch Firmenschließungen und Insolvenzen verloren gegangen, betroffen sind neben den Zell- und Modulproduzenten auch der Maschinenbau und die Installateure. 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. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass ein Teil der asiatischen PV-Produktion auch Anlagen aus Deutschland nutzt. 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.

9. Welche Fördermittel fließen in die PV-Forschung?

Im Jahr 2020 hat die Bundesregierung 1,2 Milliarden Euro in die Energieforschung investiert, davon 86 Mio. Euro in die Förderung der Photovoltaikforschung (Abbildung 21). Zum Vergleich: auch nach dem beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie zwingen europäische Verträge Deutschland, das Programm EURATOM jährlich mit hohen zweistelligen Millionenbeträgen zu finanzieren, im Jahr 2019 mit ca. 80 Mio. € [FÖS3]. Die meisten Gelder von EURATOM fließen in die Fusionsforschung.

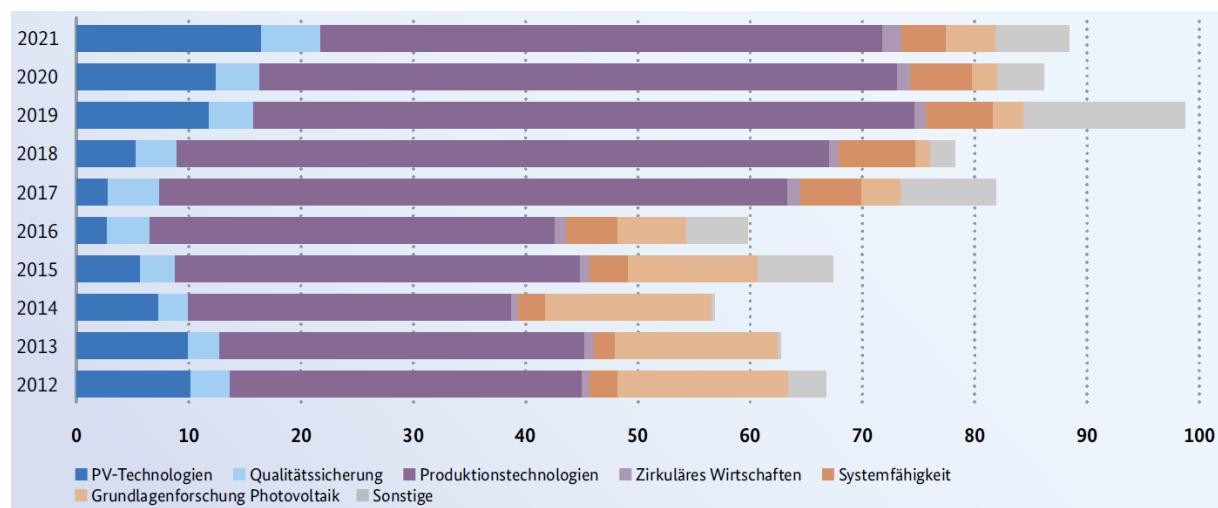


Abbildung 21: Fördermittel für Photovoltaikforschung in Mio. Euro [BMWK2].

10. Überlastet PV-Strom unser Energiesystem?

10.1 Übertragung und Verteilung

Die meisten Solarstromanlagen in Deutschland sind an das dezentrale Niederspannungsnetz angeschlossen (Abbildung 22) und erzeugen Solarstrom verbrauchsnahe.

Solarstrom wird somit überwiegend dezentral eingespeist und stellt kaum Anforderungen an einen Ausbau des innerdeutschen Übertragungsnetzes. Eine hohe PV-Anlagendichte in einem Niederspannungs-Netzabschnitt kann an sonnigen Tagen wegen des hohen Gleichzeitigkeitsfaktors dazu führen, dass die Stromproduktion den Stromverbrauch in diesem Abschnitt übersteigt. Transformatoren speisen dann Leistung zurück in das Mittelspannungsnetz. Bei sehr hohen Anlagendichten kann die Transformatorenstation dabei an ihre Leistungsgrenze stoßen. Eine gleichmäßige Verteilung der PV-Installationen über die Netzabschnitte verringert den Ausbaubedarf.

Der dezentrale, flächige Charakter der Stromerzeugung durch PV kommt einer Aufnahme und Verteilung durch das bestehende Stromnetz entgegen. Große PV-Kraftwerke oder lokale Häufungen kleinerer Anlagen in dünn besiedelten Gebieten erfordern stellenweise eine Verstärkung des Verteilnetzes und der Trafostationen.

Der weitere PV-Ausbau sollte geografisch noch 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 [AEE2].

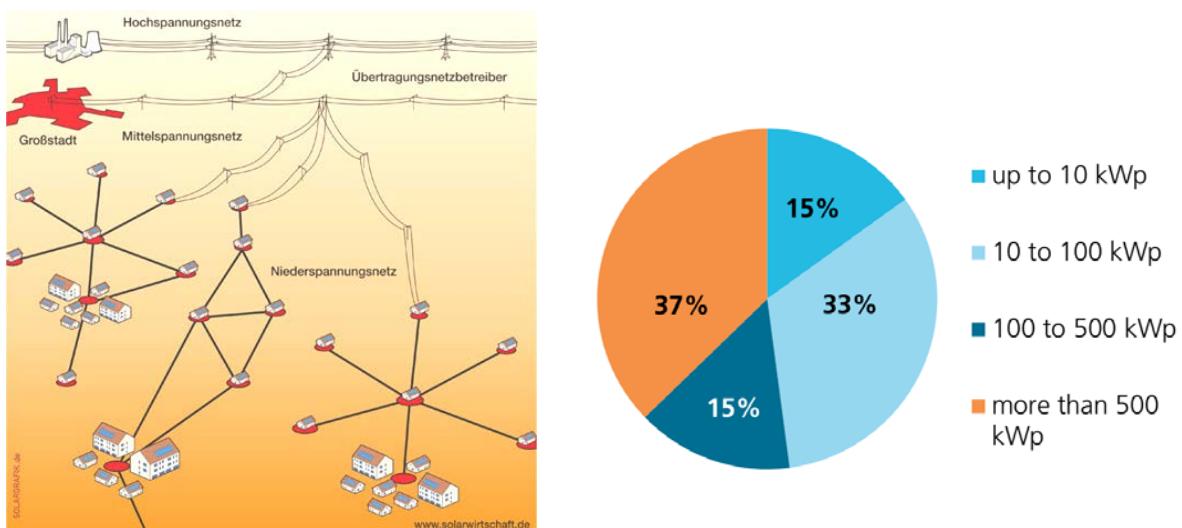


Abbildung 22: Links: Einspeisung von PV-Strom, Rechts: Verteilung der installierten PV-Leistung im Jahr 2020 nach Anlagengröße [ISE5].

Wenn aktuell von Netzengpässen die Rede ist, geht es nur selten um Photovoltaik (Abbildung 23). Im Jahr 2020 wurde eine Strommenge aus EE von 6,1 TWh abgeregelt, davon 2,7 % Solarstrom und 96,7 % Windstrom [BNA2]. Zitat: „Durch den windkraftbedingten Stromüberschuss im Norden, einem Stromdefizit durch Kraftwerkstilllegungen (u. a.

AKW) im Süden und einem schleppenden Netzausbau kommt es im deutschen Übertragungsnetz häufig zu Netzengpässen. Da der zur Behebung der vorhandenen Netzengpässe notwendige Netzausbau jedoch noch eine geraume Zeit in Anspruch nehmen wird, ist der Einsatz von Redispatch-Maßnahmen auch in absehbarer Zeit und ggf. verstärkt nötig. Redispatch bezeichnet den vom Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) angeordneten Eingriff in den marktisierten, ursprünglich geplanten Fahrplan der Kraftwerke (Dispatch) zur Verlagerung der Einspeisung, um Leistungsüberlastungen im Stromnetz vorzubeugen (präventiver Redispatch) bzw. zu beheben (kurativer Redispatch). Dabei wird „vor“ einem Engpass die Einspeisung von Elektrizität verringert (negativer Redispatch) und „hinter“ einem Engpass erhöht (positiver Redispatch).“ [BDEW4]

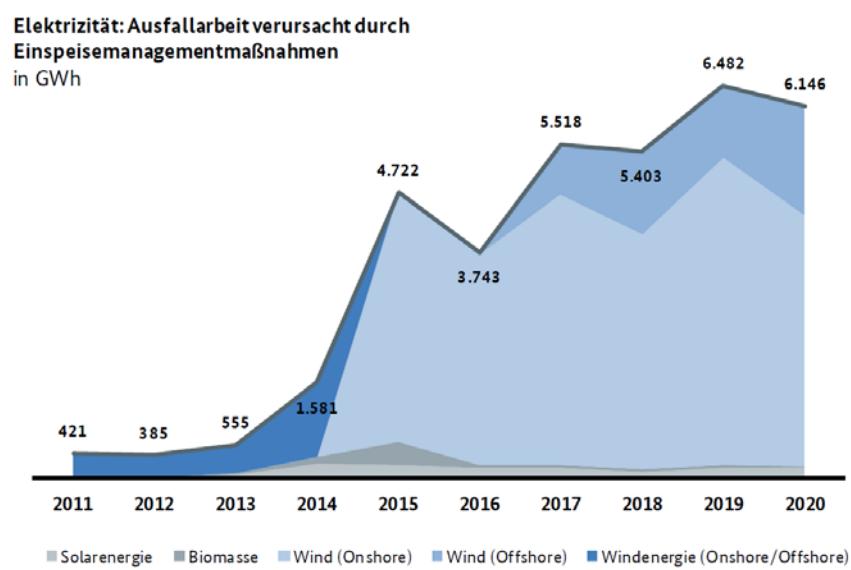


Abbildung 23: Abgeregelte elektrische Energie [BNA2].

10.2 Volatilität

10.2.1 Solarstrom-Produktion ist planbar

Die Erzeugung von Solarstrom ist heute dank verlässlicher nationaler Wettervoraussagen sehr gut planbar (Abbildung 24). Aufgrund der dezentralen Erzeugung können regionale Änderungen in der Bewölkung nicht zu gravierenden Schwankungen der deutschlandweiten PV-Stromproduktion führen.

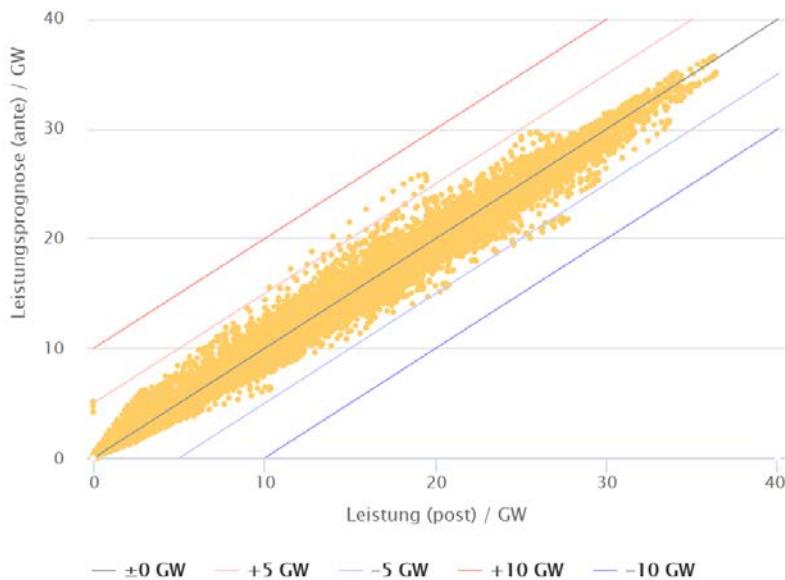


Abbildung 24: Stündliche Stromproduktion im Jahr 2021 [ISE4].

10.2.2 Spitzenproduktion deutlich kleiner als installierte PV-Leistung

Aufgrund von technisch bedingten Verlusten (Performance Ratio $\leq 90\%$, vgl. Abschnitt 24.7) und uneinheitlicher Wetterlage ist deutschlandweit eine reale Stromgeneration oberhalb 65 % der installierten Nennleistung (vgl. Kap. 3) sehr selten, vgl. auch Abbildung 25. Eine pauschale Abregelung auf der Ebene der einzelnen Anlage auf 70 % ihrer Nennleistung führt zu Ertragsverlusten von ca. 2 – 5 %. Eine gesetzliche Regelung, die diese Abregelung oder alternativ eine Fernsteuerbarkeit vorschreibt, trat 2012 in Kraft.

10.2.3 Sonnen- und Windstrom ergänzen sich

Klimabedingt korrelieren in Deutschland hohe Sonneneinstrahlung und hohe Windstärken 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 25). 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.

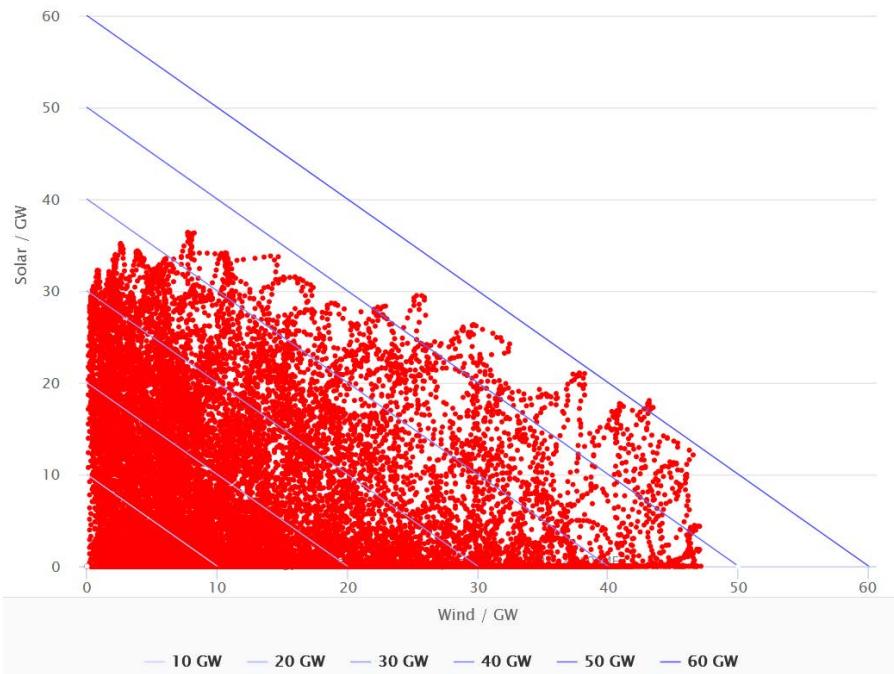


Abbildung 25: Mittlere Leistung für die Einspeisung von Sonnen- und Windstrom im Jahr 2021, 15-Minuten-Werte [ISE4].

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 %.

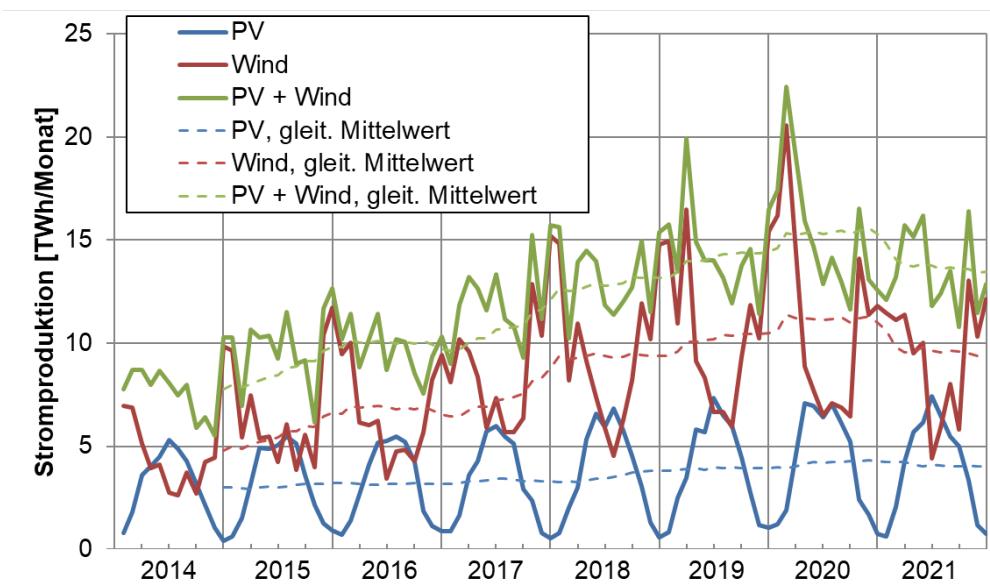


Abbildung 26: Monatssummen PV- und Windstromproduktion, Daten aus [ISE4].

Abbildung 26 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.

10.3 Abregelbarkeit

Mit steigender Leistung wird PV zunehmend als stabilisierende Regelgröße in die Pflicht genommen. Die EEG-Novellierung zum 1.1.2012 fordert auch für Anlagen am Niederspannungsnetz eine Teilnahme am Einspeisemanagement über Fernsteuerung durch den Netzbetreiber oder über automatische Abregelung bei 70 % der Wirkleistung. Gemäß der Niederspannungsrichtlinie VDE AR-N-4105, seit dem 1.1.2012 in Kraft, müssen Wechselrichter netzstützende Funktionen bereitstellen.

10.4 Konflikte mit trägen fossilen und nuklearen Kraftwerken

Das Erzeugungsprofil von PV-Strom passt so gut zu dem Lastprofil des Stromnetzes, dass der gesamte Strombedarf im Band von 40 – 80 GW auch bei weiterem Ausbau der PV in den nächsten Jahren jederzeit über dem PV-Stromangebot liegen wird. Allerdings nehmen die Konflikte mit trägen Kraftwerken zu, die einer schwankenden Residuallast aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nur sehr eingeschränkt folgen können. Die Residuallast entspricht der Differenz aus der Stromlast und der Stromproduktion aus volatilen erneuerbaren Quellen (PV, Wind, Laufwasser). Ältere Kohlekraftwerke, insbesondere Braunkohlekraftwerke, können keine Regelenergie in einer wirtschaftlich vertretbaren Weise beisteuern. Kernkraftwerke sind technisch in der Lage, Leistungsgradienten von bis zu 2 %/min und Leistungshübe von 50 bis 100 % zu fahren [ATW2], bisher werden sie aus wirtschaftlichen Gründen jedoch selten gedrosselt. Grundsätzlich müssen jedoch die volatilen Erzeuger mit ihren vernachlässigbaren Grenzkosten Vorfahrt erhalten. Diese ungelösten Konflikte können kurzzeitig zu deutlicher Überproduktion und hohem Stromexport bei geringen bis negativen Börsenstrompreise führen, wie das Beispiel in Abbildung 27 zeigt.

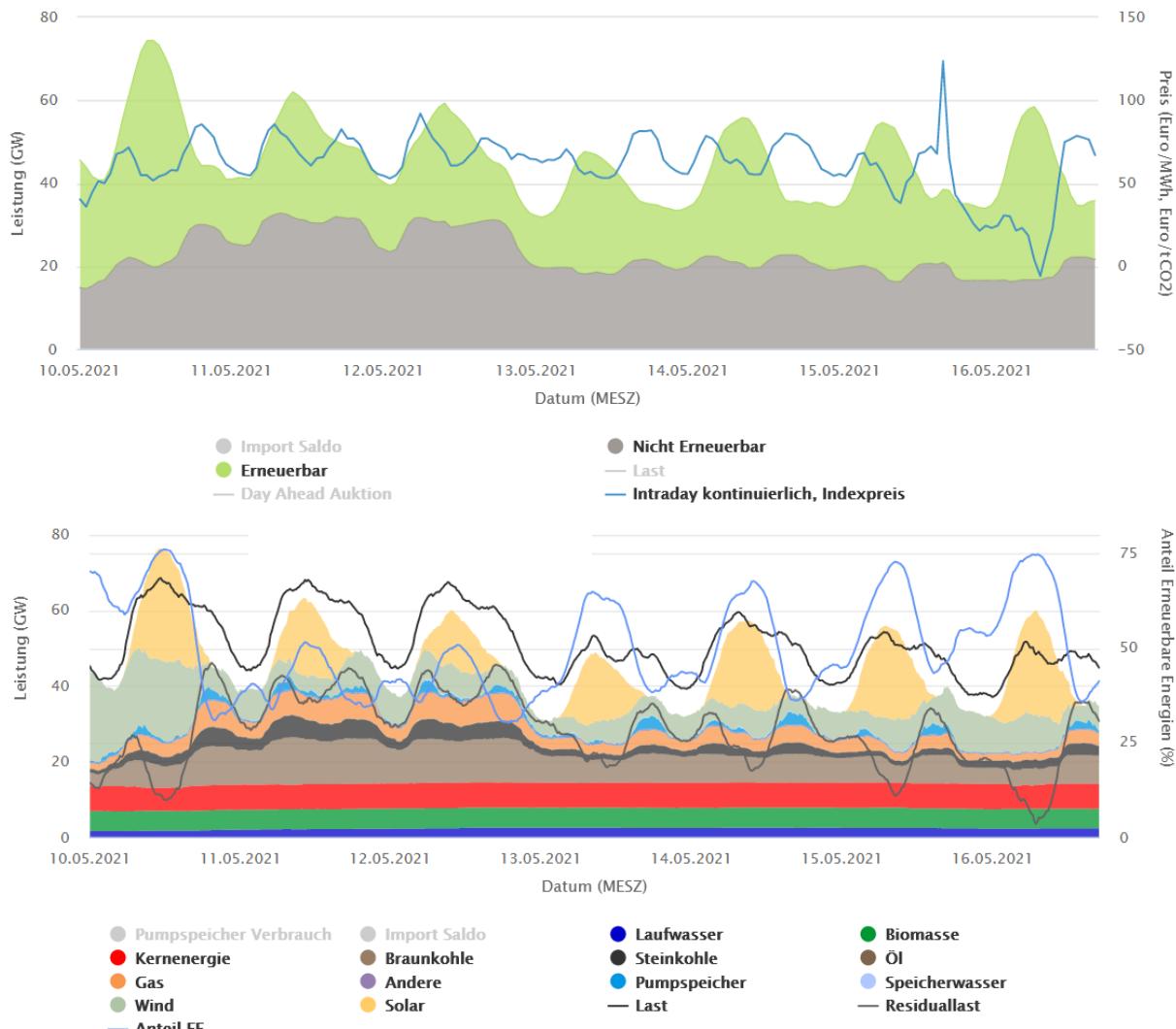


Abbildung 27: Beispiel für den Verlauf von Börsenstrompreisen, konventioneller und regenerativer Stromerzeugung der 19. Kalenderwoche im Mai 2021 [ISE4].

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.

10.5 Gefährdet volatiler Solarstrom die Versorgungssicherheit?

Nein.

Die Versorgungssicherheit für Letztverbraucher konnte parallel zum Ausbau der Photovoltaik sogar verbessert werden (Abbildung 28).

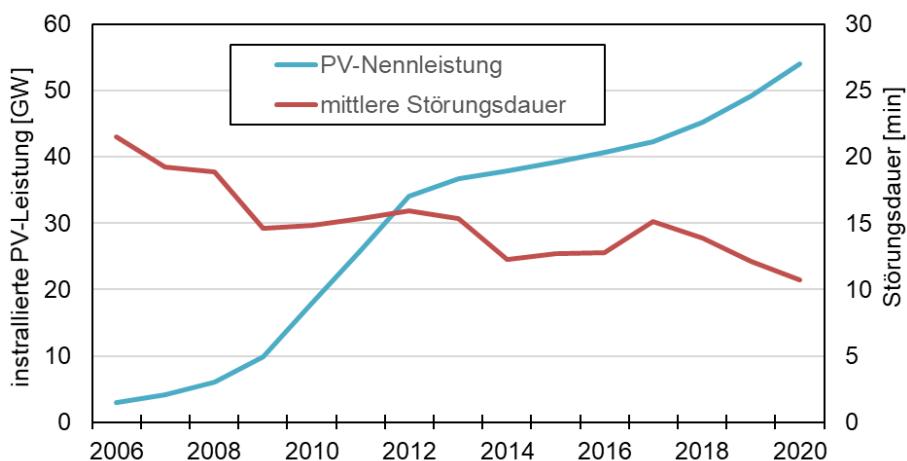


Abbildung 28: System Average Interruption Duration Index (SAIDI) für die Nieder- und Mittelspannung, Daten aus [BNA2].

10.6 Muss der PV-Ausbau auf Speicher warten?

Nein, nicht in den nächsten Jahren.

Investitionen in Speicher lohnen sich erst, wenn häufig große Preisdifferenzen für Strombezug auftreten, sei es an der Strombörse oder bei Endabnehmern. Derzeit werden Investitionen in Speicher, konkret Pumpspeicher, sogar zurückgestellt, weil kein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist.

Erst ein weiterer Ausbau von PV und Windkraft wird die EEX-Preise häufiger und massiver senken. Auf der anderen Seite wird eine ausstiegsbedingte Verknappung des Atomstroms und eine Verteuerung des Kohlestroms durch CO₂-Zertifikate oder -Steuern die EEX-Preise zu anderen Zeiten anheben. Diese Preisspreizung schafft die Grundlage für einen rentablen Speicherbetrieb. Wird die Spreizung über Tarifgestaltung an den Endabnehmer weitergereicht, werden Speicher auch für ihn interessant.

11. 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 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 29).



Abbildung 29: 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 **wirtschaftlich-praktische Potenzial** berücksichtigt alle relevanten Randbedingungen, insbesondere rechtliche (inkl. Naturschutz), ökonomische (inkl. Infrastruktur), soziologische (inkl. Akzeptanz), dazu bspw. 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 (theoretisches Potenzial, Abbildung 30). **Agri-Photovoltaik** (APV, s. www.agri-pv.org) nutzt Flächen gleichzeitig für landwirtschaftliche Pflanzenproduktion (Photosynthese) und PV-Stromproduktion (Photovoltaik). APV 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. APV 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 auf mageren Böden. Weltweit wird APV bereits im GW-Maßstab genutzt, in Deutschland gibt es erst wenige Systeme.

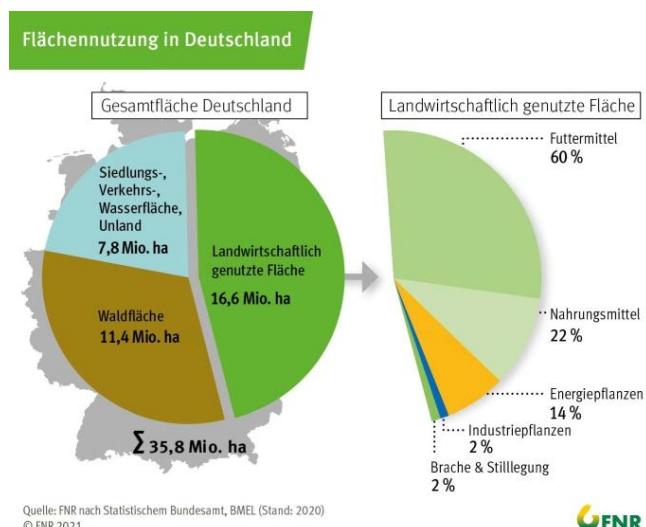


Abbildung 30: Flächennutzung in Deutschland [FNR].

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 eröffnet der

Anbau von Futterpflanzen allein auf Dauergrünland ein technisches Potenziale von weiteren **1,2 TW_P**.

Auf 14 % 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 14). Allein Energiemais wird auf 1 Mio. ha angebaut, diese Fläche entspricht bei einer Umwidmung in APV mit geeigneten Kulturen (oder in Solar-Biotope, s. Abschnitt 12) **600 GW_P** Nennleistung.

Der Braunkohletagebau hat in Deutschland eine Fläche von 1773 km² [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 **44 GW_P** für **schwimmende PV** (FPV, von „Floating PV“). Im Fall aktiver Baggerseen kann die PV zur Eigenversorgung der Förderanlagen beitragen. Weltweit sind bereits über 3 GW_P schwimmende PV-Anlagen installiert.

In Deutschland stehen ca. 40 Mio. Gebäude (Abbildung 31). 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/(m²a) Einstrahlung empfangen und eine zusammenhängende Mindestgröße aufweisen. Bisher genutzt werden weniger als 10% des Dachpotenzials und weniger als 1 % des Fassadenpotenzials.

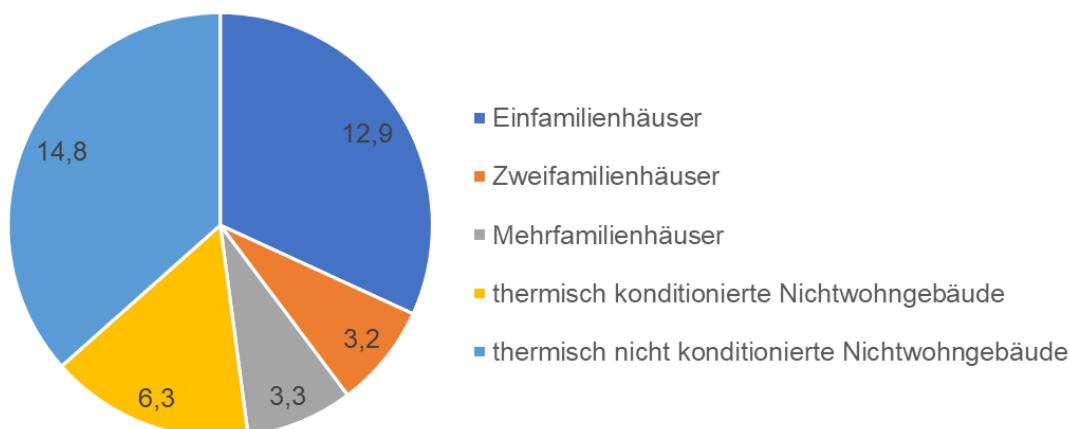


Abbildung 31: Gebäudebestand in Mio., Daten aus [DENA], [IWU].

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, PV-Module für Kaltfassaden (vorgehängte, hinterlüftete Fassaden), Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) mit PV, opake und semitransparente PV-Isoliergläser sowie PV-Sonnenschutzlamellen (Abbildung 32). 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.

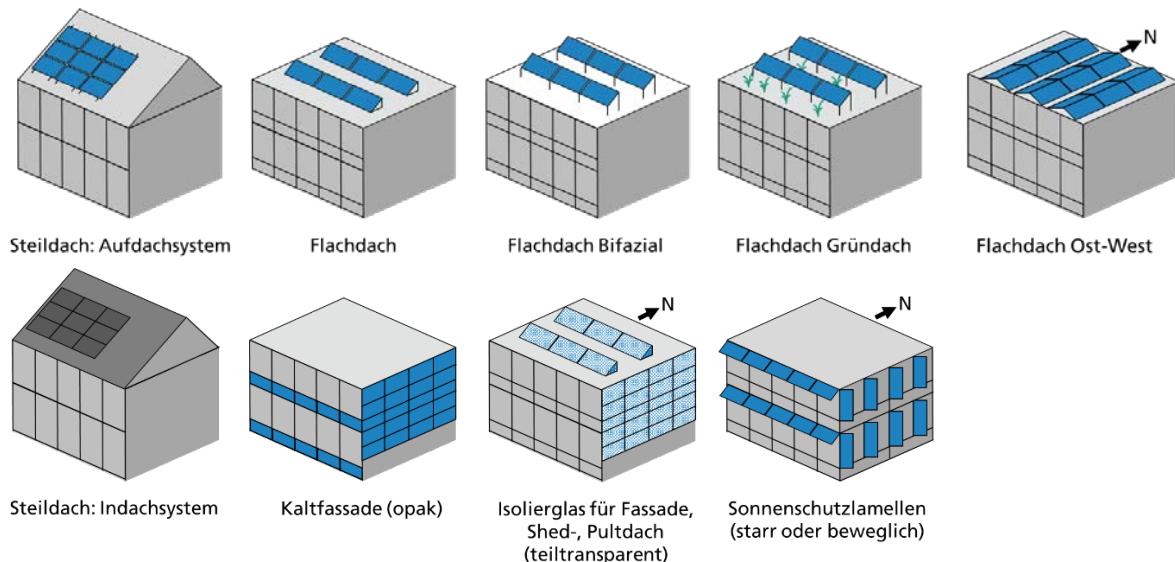


Abbildung 32: PV-Lösungen für Dach und Fassade (oben: Aufdachsysteme, unten: Integrierte PV).

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 Verkehrswege** (RIPV, von „Road Integrated PV“), dazu zählen PV-Lärmschutzwände, horizontale Flächen (als PV-Überdachung oder -Fahrbahnbelag) und Gleiskörper. PV-Überdachungen bieten sich insbesondere für Tunnel einfahrten 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 wirtschaftlich und 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.energieatlas-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 Solar-Biotop (Abschnitt 12). 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].

12. 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 Energiepflanzenbau, herausgenommen, in Grünland 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. 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 Marktwerthaltungen 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 CO₂-Emissionen. Alternativ könnten auf bereits genutzten Moorflächen angepasste PV-Kraftwerke mit reduzierter Belegungsdichte einen Flächenertrag ohne intensive Landwirtschaft erbringen. Die teilweise Beschattung durch PV wirkt der Austrocknung von Moorflächen entgegen bzw. unterstützt die Wiedervernässung. 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 Potentiale von **270 – 660 GW_P**.

13. 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 über 2 Mio. PV-Anlagen in Deutschland, davon ca. 60 % Kleinanlagen mit Leistungen unterhalb 10 kW [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 33 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?“.

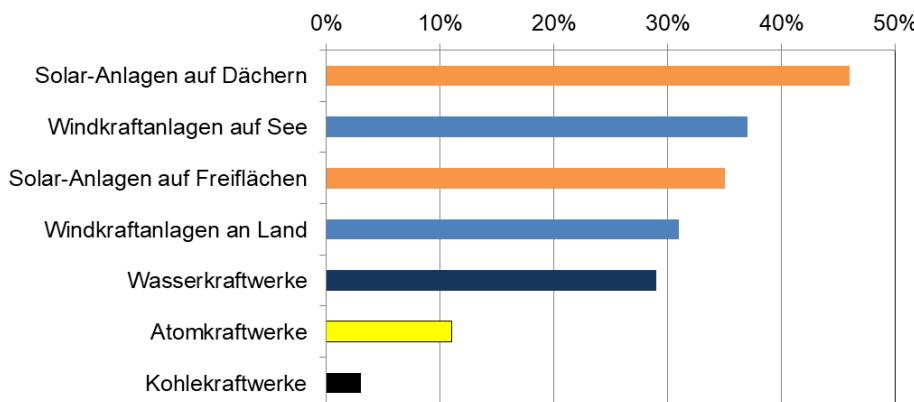
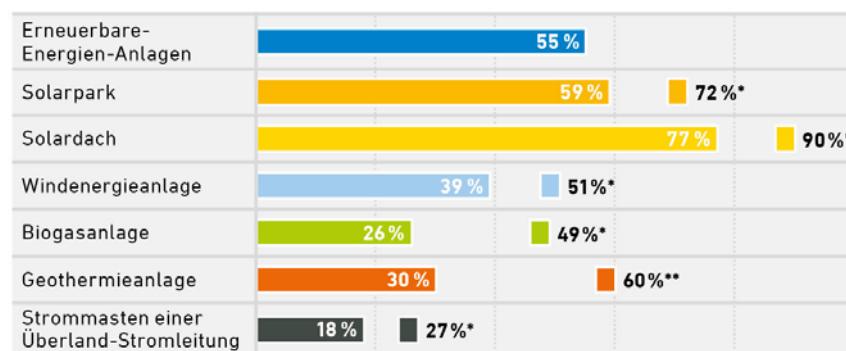


Abbildung 33: Umfrageergebnisse zum Neubau von Kraftwerken, Daten aus [Licht2].

Zustimmung zu Erneuerbare-Energien-Anlagen in der Umgebung des eigenen Wohnorts

Zur Stromerzeugung in der Nachbarschaft (≤ 5 km) finden eher gut bzw. sehr gut



*Befragte mit entsprechenden Anlagen in der eigenen Nachbarschaft; **Da die Anzahl der Befragten mit Geothermie-Vorerfahrung sehr gering ist, handelt es sich bei diesem Wert um eine grobe Tendenz.

Abbildung 34: Umfrageergebnisse zur Akzeptanz verschiedener Kraftwerkstypen [AEE3].

Auch aus Anwohnersicht sind PV-Kraftwerke die mit Abstand beliebtesten Kraftwerke, wie eine Umfrage der Agentur für Erneuerbare Energien zeigt (Abbildung 34). Die Beliebtheit steigt, wenn solche Kraftwerke in der eigenen Nachbarschaft praktisch erfahrbar sind.

14. Arbeiten PV-Anlagen in Deutschland effizient?

Die Effizienz von PV-Anlagen als Wirkungsgrad einer Energiewandlung ist mit Werten von knapp 20% für neuere Anlagen vergleichsweise gering, aber dafür scheint die Sonne kostenlos. Anwendungsrelevant sind vor allem die Auswirkungen des Wirkungsgrades auf Stromgestehungskosten, Flächenbedarf, Ressourceneinsatz, CO₂-Einsparung etc.

Der nominelle Wirkungsgrad (s. Abschnitt 24.1) von kommerziellen waferbasierten PV-Modulen (d.h. Module mit Solarzellen auf Basis von Siliciumscheiben) aus neuer Produktion stieg in den letzten Jahren im Mittel um ca. 0,3 – 0,5 %-Punkte pro Jahr auf Mittelwerte von ca. **20 %** [ITRPV]. Pro Quadratmeter Modul erbringen sie damit eine Nennleistung von 200 W, Spitzenmodule liegen 10 % relativ höher.

PV-Anlagen arbeiten nicht mit dem nominellen Modulwirkungsgrad, weil im Betrieb Verluste auftreten und weil der initiale Wirkungsgrad der Module degradiert (Abschnitt 14.1). 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, Spitzenkapung des Wechselrichters (DC/AC-Verhältnis typ. > 1) und ggf. Ausfallzeiten aufgrund von Störungen. Bei bifazialen Modulen steigern Mehrerträge über rückseitige Einstrahlung die PR, weil die Bezugsgröße der PR die frontseitige Einstrahlung darstellt.

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, fehlender Verschattung, effizienterer Wechselrichter und ggf. bifazialer Mehrerträge. Auf die Einstrahlung bezogen arbeiten neu installierte PV-Kraftwerke demnach mit mittleren Wirkungsgraden von ca. **16 – 18 %** im Betrieb.

Der mittlere Stromverbrauch im Haushalt für Elektrogeräte, Beleuchtung, Warmwasser (Hygienezwecke) und Raumwärme lag im Jahr 2018 pro Haushaltsmitglied bei **1,6 MWh** [DESTATIS]. Durchschnittswerte für 1-Personen-Haushalte liegen pro Kopf etwas höher, für Mehr-Personen-Haushalte deutlich niedriger. Im Durchschnitt erzielen PV-Dachanlagen 2021 im Trendszenario **922 Vollbenutzungsstunden** [ÜNB1], vgl. Abschnitt 14.3. Von einer ungefähr nach Süden orientierten und mäßig geneigten Dachfläche eines Hauses reichen somit 22 m² aus, um mit 12 Stück 360-W_P-Modulen eine Strommenge zu erzeugen, die dem durchschnittlichen Jahresstrombedarf einer Familie (4 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 20 % 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 12).

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 35). Selbst eine Agri-PV-Anlage (Abschnitt 11), 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. 1 Mio. ha angebaut wird, bringt 18,7 MWh_{el}/ha Stromertrag [FNR], während es bei hochaufgeständerter APV (Abschnitt 11) ca. 600 MWh_{el}/ha sind. Dieser Vergleich berücksichtigt keine Abwärmenutzung (KWK) aus der Methanverbrennung.

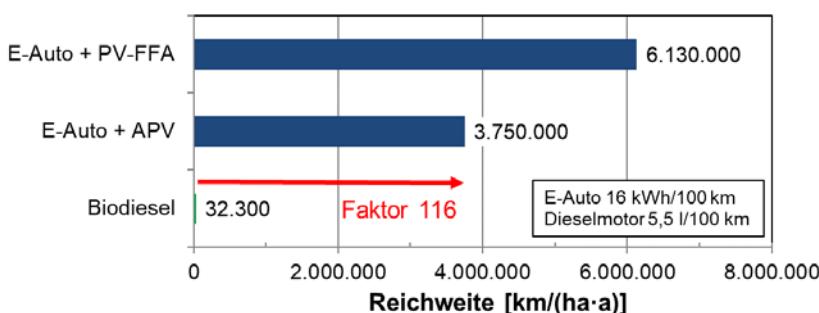


Abbildung 35: Reichweiten von Elektro- und Biodiesel-Fahrzeugen pro Hektar eingesetzter Fläche.

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.

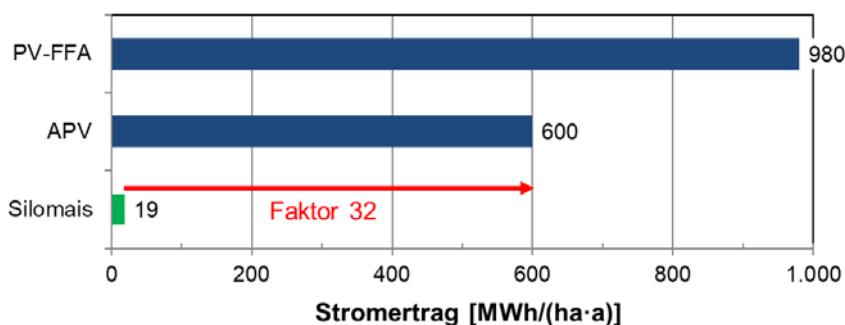


Abbildung 36: Stromerträge von PV-Kraftwerken und Silomais pro Hektar eingesetzter Fläche.

14.1 Degradieren PV-Module?

Ja, aber sehr langsam.

Waferbasierte PV-Module altern so langsam, dass es eine Herausforderung für die Wissenschaftler darstellt, Leistungsverluste überhaupt nachzuweisen. Eine Studie des Fraunhofer ISE an 44 größeren, qualitätsgeprüften Aufdach-Anlagen in Deutschland hat eine durchschnittliche jährliche Degradation der Nennleistung von ca. 0,15 % ergeben [ISE2]. Die häufig getroffene Annahme von 0,5 % Leistungsverlust pro Jahr erscheint in diesem Kontext sehr konservativ. Üblich sind Garantien der Hersteller für einen maximalen Leistungsverlust von 10 – 15 % über 25 – 30 Jahre Betrieb.

Die genannten Werte beziehen keine Ausfälle aufgrund von Produktionsmängeln mit ein. 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 viele Dünnschicht-Module liegen noch keine langjährigen Daten vor. Je nach Typ werden nennenswerte Anfangsdegradierungen in den ersten Betriebsmonaten und saisonale Schwankungen der Leistung beobachtet.

14.2 Verschmutzen PV-Module?

Ja, aber die meisten Anlagen in Deutschland reinigt der nächste Regen wieder weitgehend, so dass Schmutz keine gravierenden Ertragseinbußen bewirkt. Problematisch sind

Module mit sehr flachem Aufstellwinkel (unter 15°), naher Laubabwurf oder nahe Staubquellen. Besonders in Regionen, die aufgrund des Klimawandels zunehmend unter Trockenheit leiden, kann sich eine Reinigung der Module lohnen.

14.3 Arbeiten PV-Anlagen selten unter Vollast?

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 zu den gesamten Jahresstunden. Der spezifische Jahresertrag fällt an sonnigen Standorten, bei Südausrichtung und leichte Neigung höher aus, er hängt aber nicht vom nominellen Modulwirkungsgrad ab. Die komplette Übersicht der Prognosen zur Stromerzeugung aus EE, bereinigt um Verlustmengen durch das Einspeisemanagement (Abschnitt 10.1), zeigt Abbildung 37. Aufgrund der geringen VBh erfordern steigende Anteile von Solarstrom im Netz zunehmend flankierende Maßnahmen (Kapitel 18).

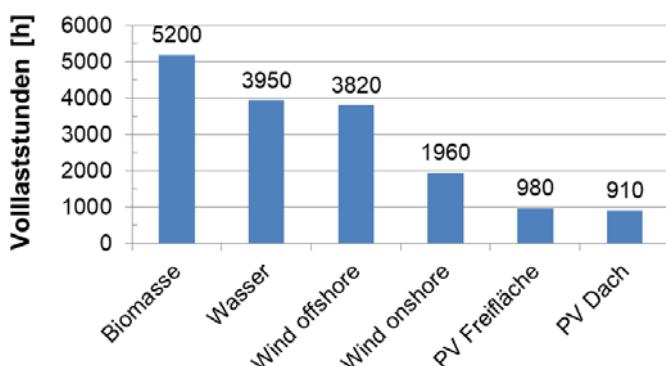


Abbildung 37: Prognostizierte Vollbenutzungsstunden für Stromerzeugung aus EE, Daten aus [ÜNB1].

Die mittlere Jahressumme der horizontalen Globalstrahlung in Deutschland für die Jahre 1998-2018 liegt gemäß Zahlen des Deutschen Wetterdienstes bei 1088 kWh/m²/a mit einem linearen Trend von +0,3 %/a. Abbildung 38 zeigt die landesweite Verteilung für eine frühere Periode, mit damals 1055 kWh/m² mittlere Jahressumme. PV-Module werden zur Maximierung des Jahresstromertrags mit einer Neigung von ca. 30° 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. 1250 kWh/m²/a.

Bei einer Performance Ratio (PR, siehe Abschnitt 24.7) von 85 % und idealer Ausrichtung wären damit im geografischen Mittel über Deutschland 1060 Volllaststunden zu erreichen. Weil nicht alle Dachanlagen ertragsoptimiert ausgerichtet sind und die PR von zahlreichen Faktoren gemindert wird (), 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 18.3.1)
- 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

Bei Windkraftwerken steigt die Anzahl der Vollaststunden mit der Nabenhöhe. Nuklear-, Kohle- und Gaskraftwerke können im Bedarfsfall fast durchgängig (1 Jahr = 8760 h) mit ihrer Nennleistung produzieren, soweit ausreichend Kühlwasser zur Verfügung steht.

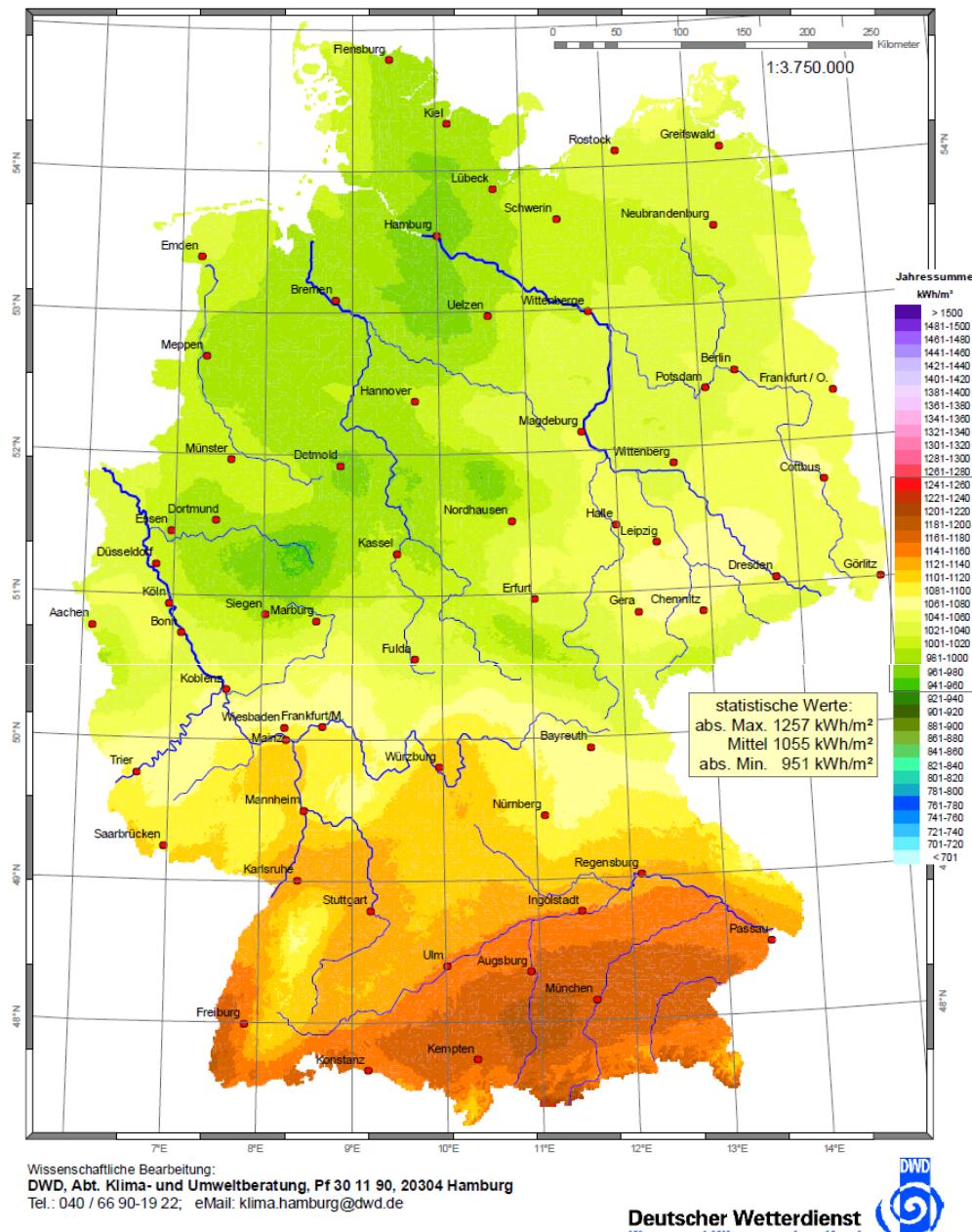


Abbildung 38: Horizontale jährliche Globalstrahlungssumme in Deutschland, gemittelt über den Zeitraum 1981-2010 [DWD].

15. Liefert PV relevante Beiträge zum Klimaschutz?

15.1 Gefährdet der anthropogene CO₂-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 große Mehrheit der Wissenschaftler ist überzeugt, dass anthropogene Emissionen von CO₂ und anderen Treibhausgasen den Anstieg der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentration und damit den globalen Temperaturanstieg verursachen.

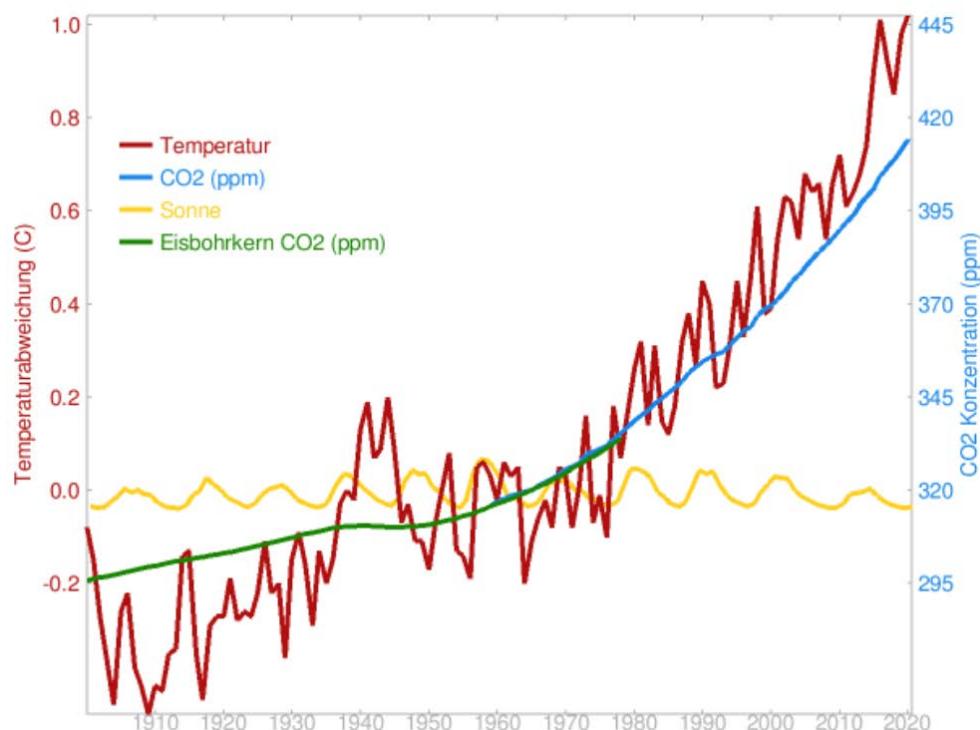


Abbildung 39: Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration, der mittleren globalen Temperaturveränderung und der Sonnenaktivität (<http://herdsoft.com/climate/widget/>).

Im Mai 2013 hat die atmosphärische CO₂-Konzentration erstmals seit mindestens 800.000 Jahren den Wert von 400 ppm erreicht. Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen die bisherige Entwicklung der atmosphärischen CO₂-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.

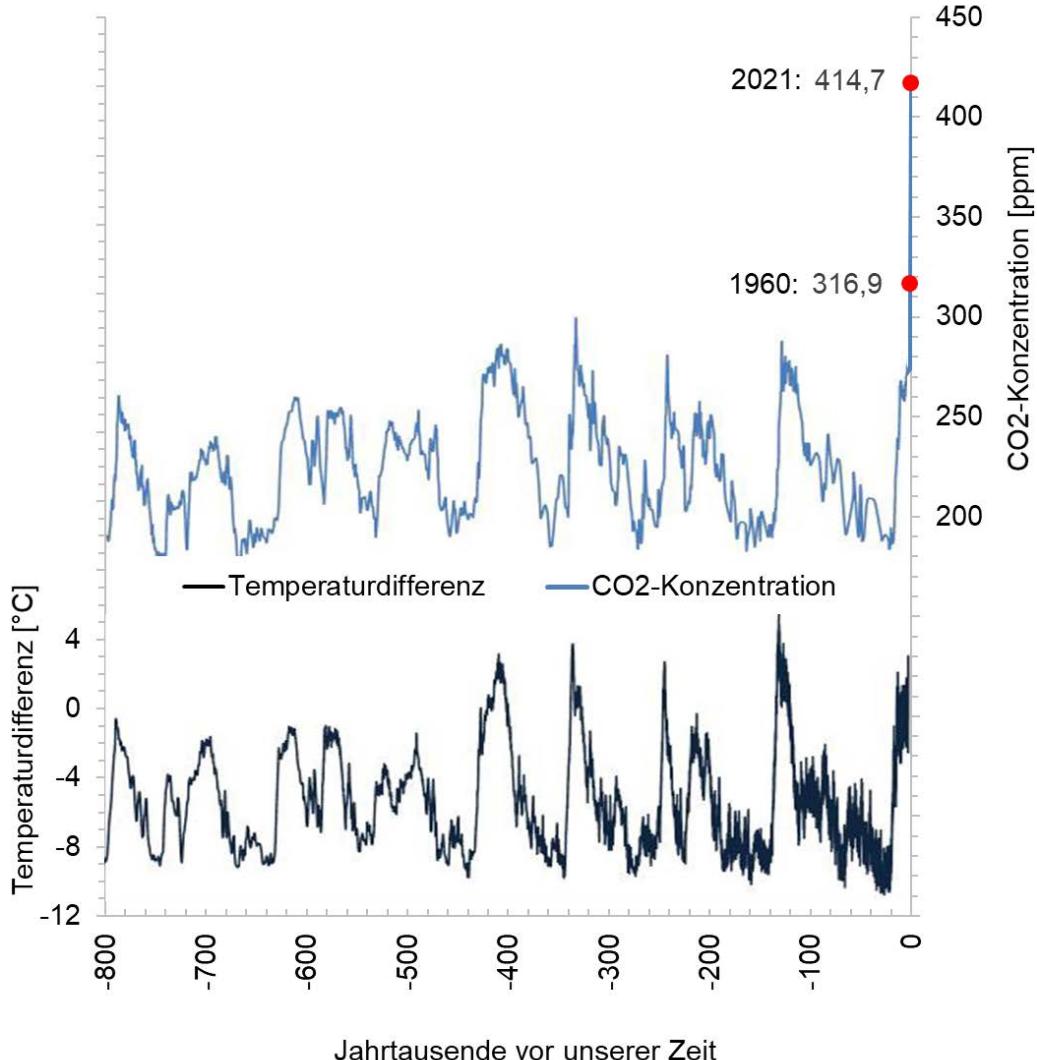


Abbildung 40: Schätzungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration und der Temperaturdifferenz in der Antarktis auf Basis von Eisbohrkernen [EPA]; Rot: zwei neuere CO₂-Messwerte des Mauna Loa Observatory [<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>].

15.2 Liefert PV relevante Beiträge zur Senkung des CO₂-Ausstoßes?

Ja.

Während PV-Anlagen im Betrieb kein CO₂ freisetzen, muss eine gesamtheitliche Betrachtung auch Herstellung und Entsorgung der Anlage berücksichtigen. Das Umweltbundesamt beziffert das Treibhausgaspotenzial für PV-Strom bei einem Anlagenbetrieb in Deutschland bei 56 g CO₂-Äq./kWh (primärenergiebezogener Emissionsfaktor nach [UBA9], s. Abbildung 41).

Besonders günstig schneiden PV-Module ab, die 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 42 zeigt die THG-Potenziale von PV-Technologien im Vergleich mit Kohle-, Erdgas- und Atomstrom. Die Emissionsfaktoren der Stromerzeugung über Biogas aus Energiepflanzen liegen im Bereich von 160 – 184 g CO₂-Äq./kWh [UBA9].

Dach- und Freiflächenanlage, Sonneneinstrahlung 1.200 kWh/(m²*a)

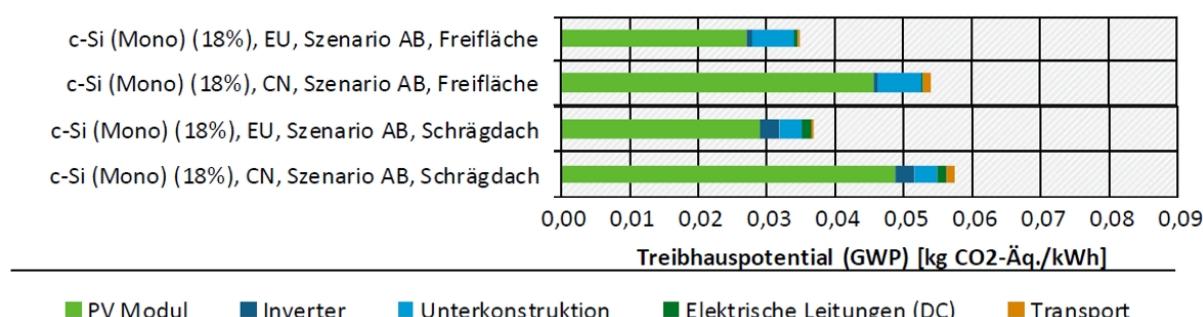


Abbildung 41: Treibhauspotenzial der Stromerzeugung mit mono c-Si PV für Dach- und Freiflächenanlagen [UBA7].

Durch den Ausbau der EE konnte der CO₂-Emissionsfaktor für den deutschen Strommix von 764 g CO₂/kWh im Jahr 1990 auf 474 g CO₂/kWh im Jahr 2018 gesenkt werden (Abbildung 43). Der Emissionsfaktor bezeichnet das Verhältnis der direkten CO₂-Emissionen der gesamten deutschen Stromerzeugung (inkl. Stromexport) zum Nettostromverbrauch in Deutschland [UBA6].

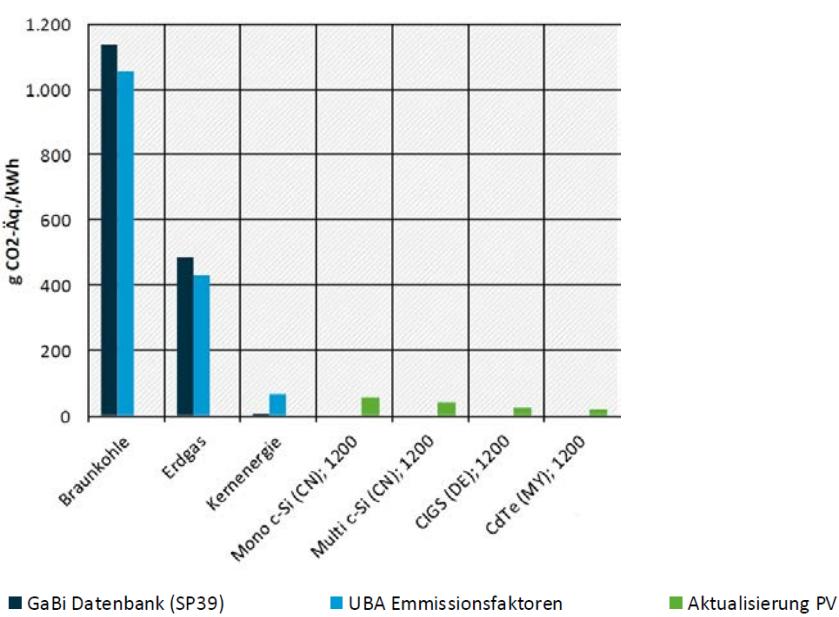


Abbildung 42: Treibhauspotenzial verschiedener Stromerzeugungstechnologien [UBA7].

Im Jahr 2020 wurden durch die Nutzung der PV in Deutschland netto 34,9 Mio. Tonnen Treibhausgasemissionen vermieden (Abbildung 44), d.h. ca. 690 g/kWh PV-Strom bei einer Stromproduktion von 50,6 TWh. Bei den Berechnungen wurden die Emissionen aus der Produktion der PV-Systemkomponenten näherungsweise berücksichtigt.

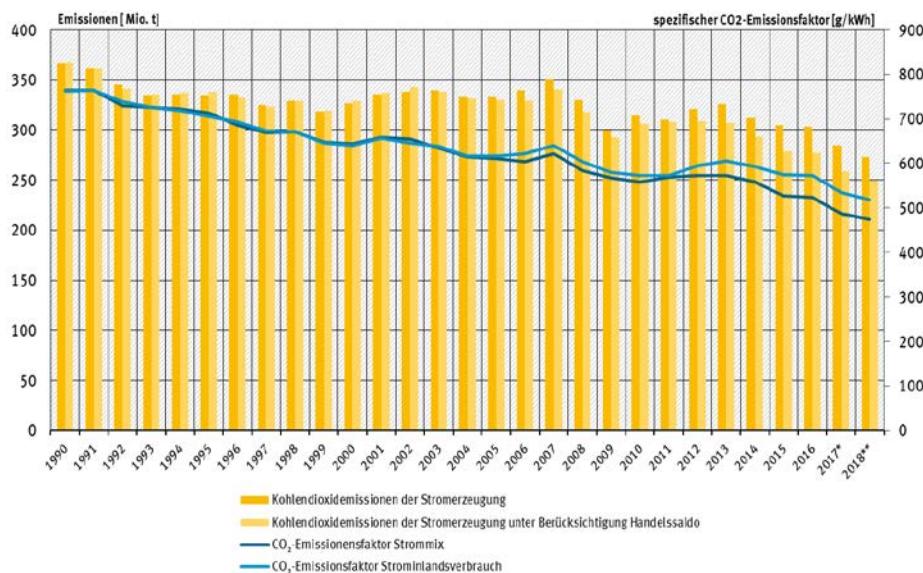
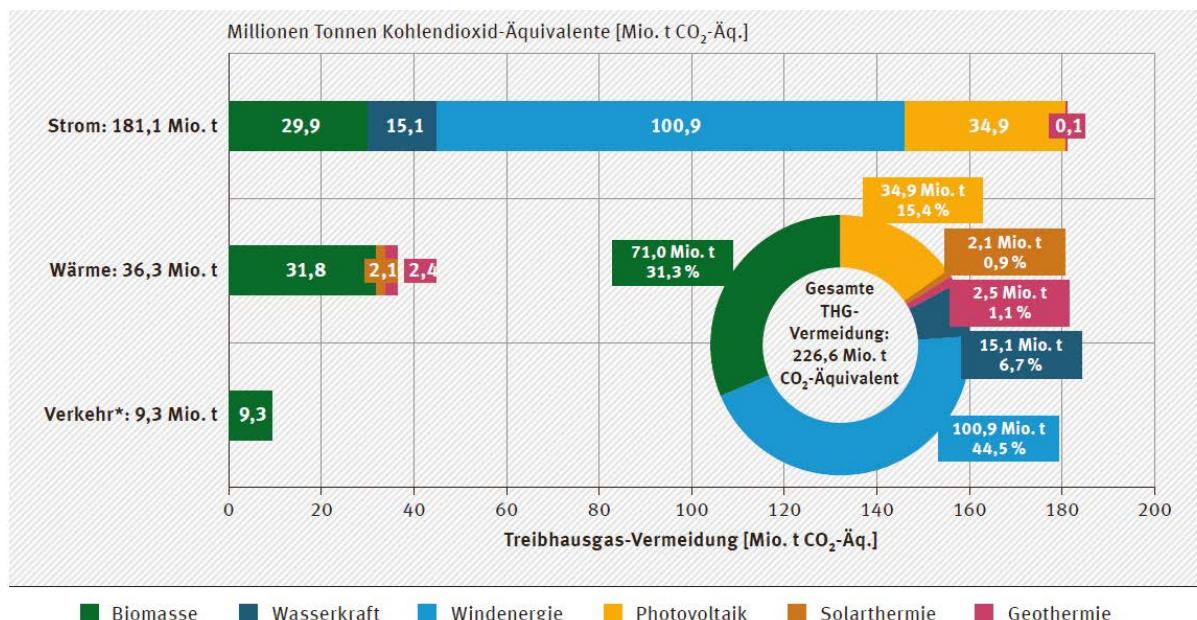


Abbildung 43: Spezifische und absolute CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland [UBA6].



* ausschließlich biogene Kraftstoffe im Verkehrssektor (ohne Land- und Forstwirtschaft, Baugewerbe sowie Militär) basierend auf BLE und RL 2009/28/EG

Quelle: Umweltbundesamt (UBA)

Abbildung 44: Vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2020 [UBA1].

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 CO₂-Vermeidung erzielt das EEG jedoch 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 45). PV senkt weltweit den Verbrauch fossiler Rohstoffe für die Stromerzeugung.

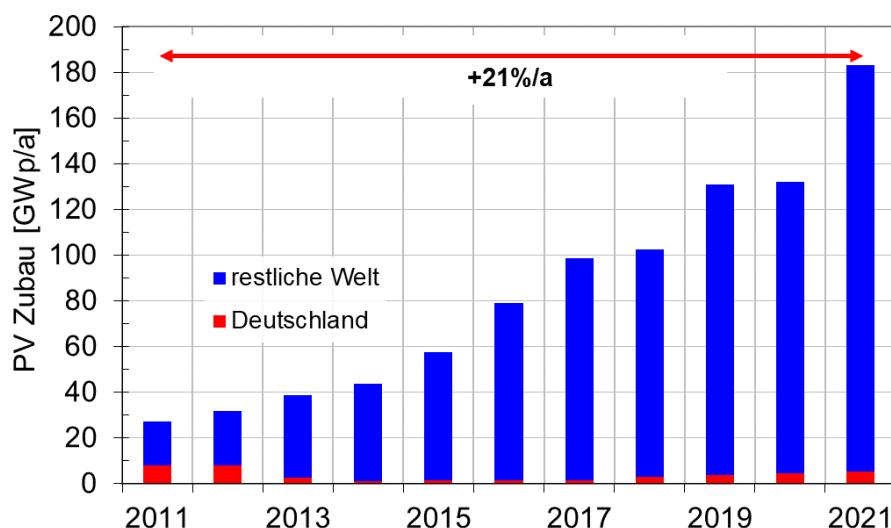


Abbildung 45: Entwicklung des jährlichen PV-Zubaus für Deutschland und die restliche Welt, Zahlen von IHS, Solar Power Europe, Bloomberg NEF.

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 CO₂ einspart.

15.3 Verschlingt die Produktion von PV-Modulen mehr Energie als diese im Betrieb 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/(m²·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. Aktuell noch unveröffentlichte Berechnungen des Fraunhofer ISE auf Basis neuester Produktionsdaten weisen eine EPBT von nur noch knapp **1,3 Jahren** für Anlagen mit marktüblichen monokristallinen Si-Module in Deutschland aus [ISE5].

15.4 Entstehen bei der Produktion von PV weitere klimaschädliche Gase?

Ja, bei manchen Dünnschicht-Technologien.

Bei der Produktion von Dünnschicht-PV und Flachbildschirmen wird teilweise noch Stickstofftrifluorid (NF₃) zur Reinigung von Beschichtungsanlagen eingesetzt. Restmengen dieses Gases können dabei in die Atmosphäre entweichen. NF₃ ist über 17.000-mal klimaschädlicher als Kohlendioxid. Aktuelle Emissionsmengen sind nicht bekannt, der NF₃-Ausstoß wird jedoch ab 2013 in 37 Staaten gemäß des ergänzten Kyoto-Protokolls ermittelt.

16. Heizen PV-Module ihre Umgebung auf?

Lokal hängt das davon ab, was verglichen wird. Global ist der zeitlich unbegrenzte Kühl-Effekt über vermiedene Treibhausgasemissionen in der Stromproduktion entscheidend.

16.1 Solare Reflexion und Absorption

Helle Oberflächen reflektieren einen größeren Teil der auftreffenden Solarstrahlung, während dunkle Oberflächen mehr absorbieren und sich dadurch stärker aufheizen. Die **solare Albedo** (der **solare Reflexionsgrad**) einer Oberfläche gibt an, welcher Prozentsatz der eintreffenden Solarstrahlung reflektiert wird. Asphalt weist eine Albedo von 12 – 25

% auf, Beton 14 – 22 %, eine graue Mauer 20 – 45 %, Dachziegel 10 (dunkel) – 30 (hell) %, grünes Gras 26% (https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_klimaatlas_5_grund).

Der solare Reflexionsgrad gewöhnlicher PV-Module neuerer Bauart liegt in einer Größenordnung von 3 – 5 %. Sie sind darauf optimiert, möglichst viel Solarstrahlung in der aktiven Schicht zu absorbieren. Eine Wärmeschutzverglasung, besonders 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. Gewöhnliche PV-Module können zwar blenden, sie reflektieren jedoch extrem wenig Solarstrahlung.

Wenn PV-Module an einem heißen Tag Sonnenenergie mit einem Betriebswirkungsgrad um 17 – 18 % in elektrische Energie umwandeln und zusätzlich einen kleinen Teil der Einstrahlung (Größenordnung 3 – 5 %) reflektieren, erzeugen sie lokal ähnlich viel Wärme wie eine Betonoberfläche mit ca. 20 % Albedo. Wir sprechen deshalb bei PV-Modulen im Betrieb von einer **effektiven Albedo** von ca. 20%. Nur wenn PV-Module keinen Strom liefern, sinkt ihre effektive Albedo auf den Wert ihres solaren Reflexionsgrads.

16.2 Verdunstungskühlung

Obwohl der Unterschied zwischen der Albedo einer Grünfläche und der effektiven Albedo eines PV-Moduls im Betrieb nicht sehr groß ist, bleibt die Grünfläche an heißen Tagen aufgrund von Verdunstungskühlung deutlich kühler als die PV-Module. 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, trockenen Moorböden und Gründächern (Abschnitte 11 und 12).

16.3 Wärmespeicherung

Die Wärmespeicherkapazität gewöhnlicher PV-Module ist deutlich geringer im Vergleich bspw. mit einer massiven Betonwand. In Folge erwärmt sich das PV-Modul unter Sonneneinstrahlung bei gleicher effektiver Albedo 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.

16.4 Treibhauseffekt

PV-Strom ersetzt insbesondere Strom aus fossilen Kraftwerken, die im Betrieb nicht nur Abwärme erzeugen (Größenordnung 2 kWh Abwärme pro kWh_{el}), sondern je nach Brennstoff bis zu 1,1 kg CO₂/kWh_{el} freisetzen. Das CO₂ gelangt in die Atmosphäre und wirkt dort mit unbegrenzter Dauer als Treibhausgas (Abbildung 43). Im Vergleich mit fossilen Kraftwerken reduziert eine Stromerzeugung über PV die Freisetzung von CO₂ massiv und bremst damit den Treibhauseffekt wirksam (Abschnitt 15).

17. Ersetzen PV-Anlagen fossile und nukleare Kraftwerke?

Nein, zumindest nicht in den nächsten Jahren.

Solange keine nennenswerten Strom-zu-Strom Speicherkapazitäten oder Speicherwasserkraftwerke im Netz zugänglich sind, reduzieren PV- und Windstrom zwar den Verbrauch an fossilen Brennstoffen, die Energieimporte und den CO₂-Ausstoß, sie ersetzen aber keine Leistungskapazitäten. Die Nagelprobe sind windstille, trübe Wintertage, an denen der Stromverbrauch Maximalwerte erreichen kann, ohne dass Sonne- oder Windstrom bereitstehen. Auf der anderen Seite kollidieren PV- und Windstrom zunehmend mit trügen konventionellen Kraftwerken (Kernkraft, alte Braunkohle). Diese – fast ausschließlich grundlastfähigen - Kraftwerke müssen deshalb möglichst schnell durch flexible Kraftwerke ersetzt werden, bevorzugt in multifunktionaler, stromgeführter KWK-Technologie mit thermischem Speicher (Abschnitt 18.3.6).

18. 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.

18.1 Ausgangspunkt: Energiebedarf und Energieangebot

Die traditionelle Energiewirtschaft fördert fossile und nukleare Energieträger (Primärenergie), wandelt sie und bereitet sie für die Endverbraucher auf (Abbildung 46).

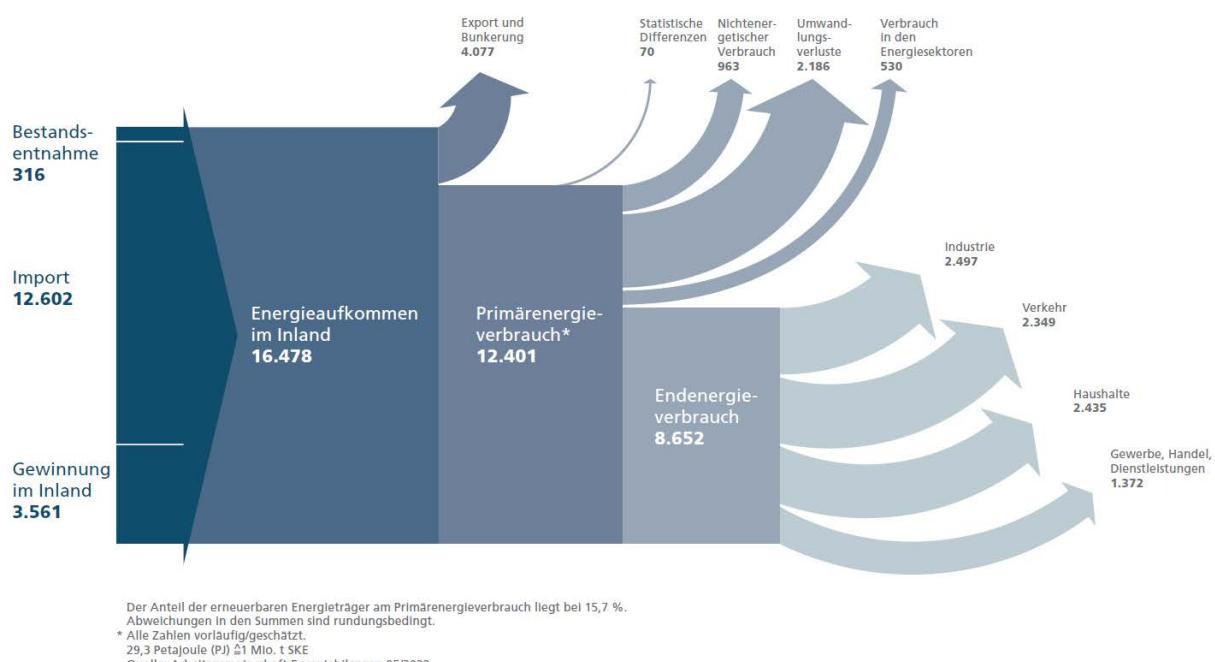


Abbildung 46: Energieflussbild 2021 für Deutschland, Angaben in Petajoule [AGEB2].

In der Wandlung und im Endenergieverbrauch herrschen dramatische Effizienzdefizite (vgl. Abschnitt 18.3.3). Unser zukünftiger Energiebedarf ist keinesfalls mit dem heutigen Primärenergieverbrauch gleichzusetzen, weder nach Mengen, noch nach Energieträgern. Deutschland war bisher hochgradig abhängig von Energieimporten (Abbildung 47), 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.

Energieträger	Netto-Importquote 2016 (bezogen auf den Primärenergieverbrauch)
Braunkohle	-1,9 %
Steinkohle	94,1 %
Uran	100,0 %
Mineralöl	100,0 %
Erdgas ²	91,2 %

Abbildung 47: Importquoten für fossile und nukleare Primärenergieträger (www.umweltbundesamt.de).

Die Kosten der Energieimporte zeigt Abbildung 48, sie liegen abzüglich der Importerlöse jährlich in der Größenordnung von 50 – 100 Mrd. Euro. Ein großer Teil des Geldes fließt an autokratische Regimes.

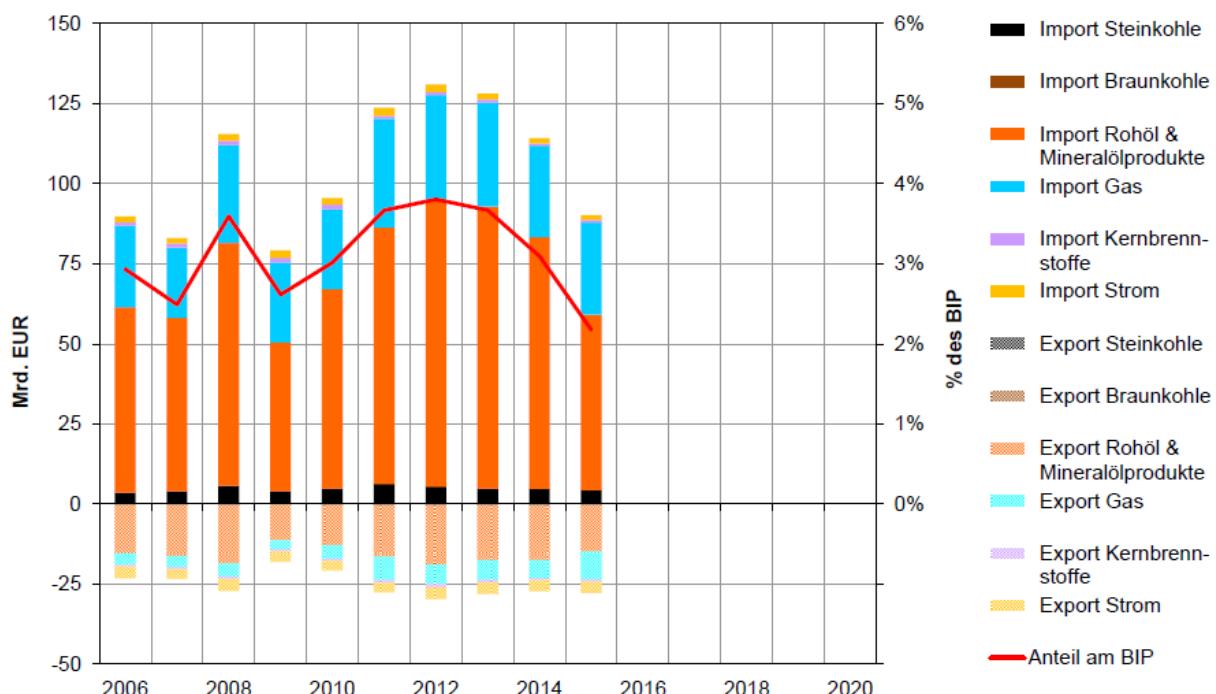


Abbildung 48: Entwicklung der Kosten für die Bereitstellung der Primärenergie in Deutschland [ÖKO3].

Die meiste Endenergie (36 %) dient der Gewinnung mechanischer Energie („Kraft“) für den Verkehr und in stationären Motoren (Abbildung 49). Für Raumwärme und Warmwasser werden jährlich ca. 800 TWh Endenergie aufgewendet [BMWK1].

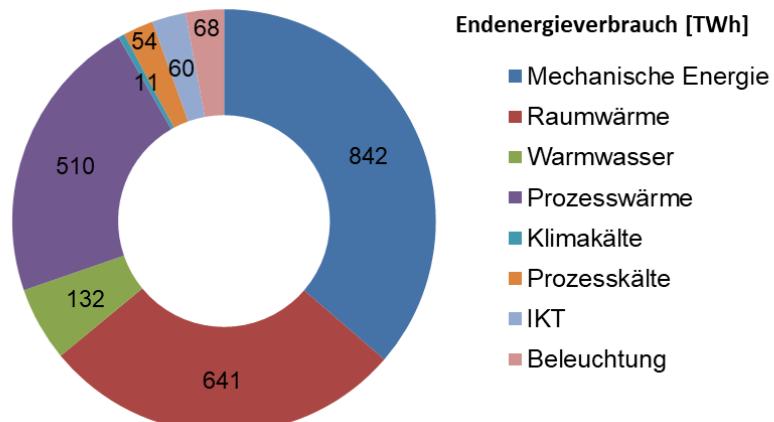


Abbildung 49: Struktur des Endenergieverbrauchs nach Anwendungsbereichen für Deutschland im Jahr 2020, Zahlen aus [BMWK1].

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 24.8. 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.

18.2 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 50) verschiedene Transformationswege zu einem klimaneutralen Energiesystem für Deutschland untersucht. In einem wirtschaftlich optimierten Erzeugungsmix trägt die PV je nach Randbedingungen mit einer installierten Leistung von 300 – 450 GW bei [ISE3].

Abbildung 51 zeigt eine schematische Residuallastkurve für Deutschland mit einer 100 %ig erneuerbaren Stromversorgung. Dargestellt sind die absteigend geordneten Stundenwerte der Residuallast (Abschnitt 10.4) 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 51 von links nach rechts fallen.

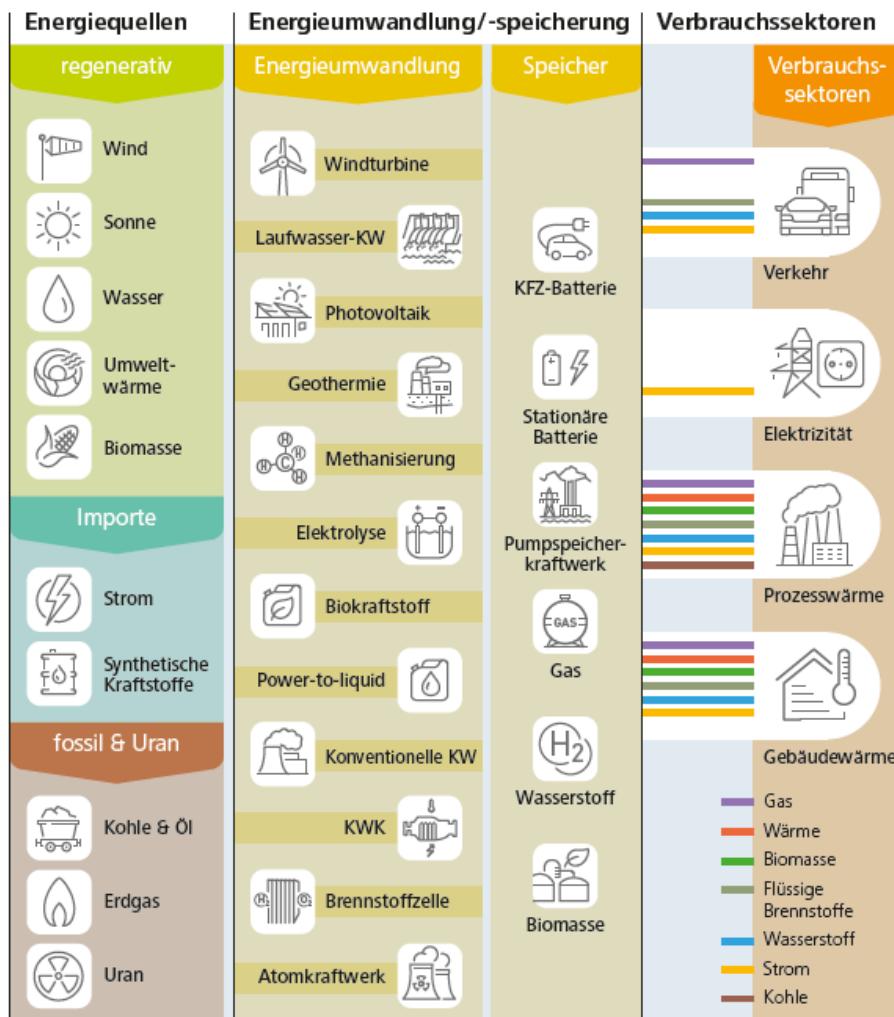


Abbildung 50: Schematische Darstellung des Modells REMod (KW: Kraftwerk, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, [ISE3]).

Auf der **Bedarfsseite** werden flexible Lasten reduziert, Batterien und Pumpspeicher entladen, Brennstoffzellen, Dampfturbinen, Gas-und-Dampf-Generatoren (GuD) und Gasturbinen in der Reihenfolge ihrer Grenzkosten aktiviert, um die Residuallast zu decken. Als Energieträger dienen Wasserstoff oder Methan, hergestellt mit EE. Bei lokaler Wärmenachfrage sind Stromgeneratoren mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ausgeführt und produzieren nutzbare Abwärme. KWK-Gasturbinen liefern Hochtemperatur-Wärme für Industrieprozesse.

Auf der **Überschusseite** werden flexible Lasten erhöht, Batterien und Pumpspeicher beladen, Elektrolyseure, Wärmepumpen und Widerstandsheizungen („Heizstäben“) 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 Abnahmleistung oder die Netzkapazitäten an wenigen Stunden des Jahres nicht ausreichen.

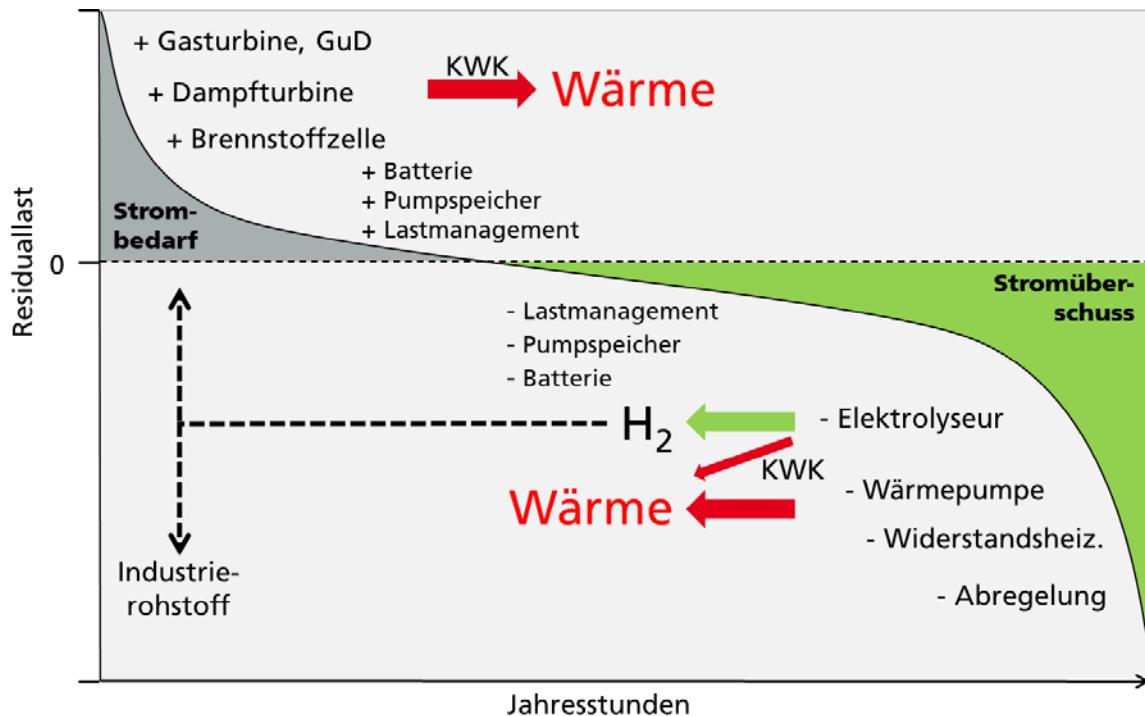


Abbildung 51: Schematische Darstellung einer Residuallastkurve für Deutschland bei Stromversorgung mit 100 % EE, mit Erzeugern (+) und Lasten (-).

Damit wärmeerzeugende Wandler auf beiden Seiten der Kurve stromgeführt betrieben werden können, benötigen sie ortsnah thermische Speicher und Wärmeverbraucher bzw. Anschluss an Wärmenetze (Abschnitt 18.3.6). 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 kann direkt oder nach Methanisierung in Drucktanks oder im Gasnetz gespeichert werden. Von dort erfolgt eine Rückverstromung (Gasturbine, GuD, Brennstoffzelle), eine Weiterverarbeitung zu synthetischen Kraftstoffen oder eine stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie.

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). Gleches 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 51 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-Szenario über mehrere Wochen anhalten.

Die **Stromabnahmleistung** des Systems auf der rechten Seite der Abbildung 51 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 Stromabnahmleistung 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 Abnahmleistung.

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 möglicherweise auch reversible Brennstoffzellen, die bei Stromüberschuss Elektrolyse betreiben und sich derzeit in der Entwicklung befinden.

Die in Abbildung 51 genannten Technologien und Maßnahmen sind bis auf Turbinen und Pumpspeicher skalierbar. Sie können nicht nur zentral im Multi-MW-Maßstab betrieben werden, sondern auch im einstelligen kW-Maßstab. Entsprechende Geräte sind als Haustechnik kommerziell verfügbar.

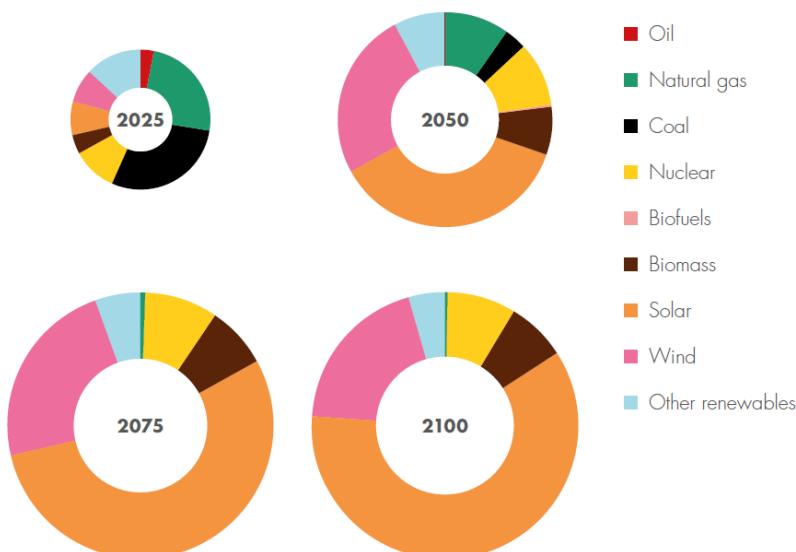


Abbildung 52: Entwicklung der globalen Stromerzeugung nach Technologien im Sky-Szenario; der Durchmesser der Tortendiagramme entspricht dem globalen Strombedarf [Shell].

Ein kurzer Seitenblick auf globale Energieszenarien: die Studie „Shell Scenarios Sky - Meeting the goals of the Paris agreement“ der Shell International B.V. vom März 2018 sieht die PV global zur wichtigsten Stromquelle heranwachsen (Abbildung 52). Der globale Stromverbrauch steigt dabei von heute 22 PWh auf 100 PWh im Jahr 2100. Die International Energy Agency (IEA) publiziert seit Jahren Szenarien zum weltweiten Ausbau der PV (Abbildung 53) und unterschätzt dabei die tatsächliche Entwicklung (schwarze Kurve) zuverlässig.

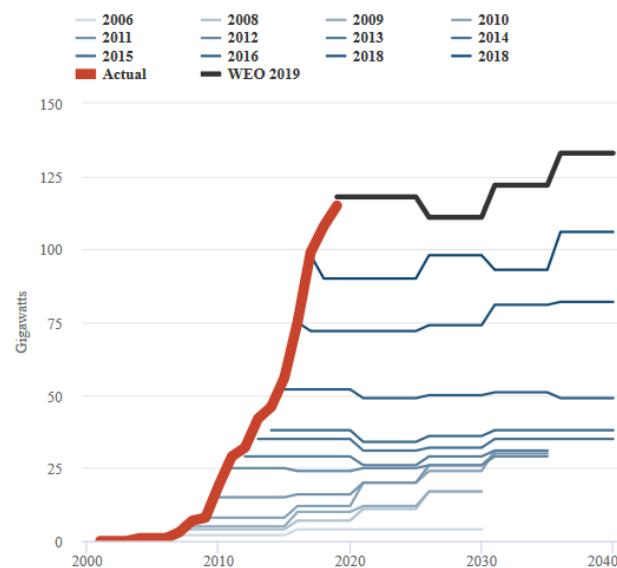


Abbildung 53: IEA-Prognosen seit 2006 und tatsächliche Entwicklung des globalen jährlichen PV-Zubaus [Carb].

Mittlerweile prognostiziert auch die IEA eine tragende Rolle der Photovoltaik in der weltweiten Primärenergieversorgung: in ihrem Bericht »Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector« geht die IEA von einem 20-fachen Ausbau der heute installierten PV-Kapazität auf über 14.000 GW_P aus [IEA2].

18.3 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.

18.3.1 Verstetigung der PV-Stromerzeugung

Wie kann das PV-Stromangebot im Netz verstetigt werden?

Eine Verstetigung im Tageslauf steigert die Vollaststunden eines PV-Kraftwerks und reduziert den Ausgleichsbedarf bspw. durch Lastmanagement und Batterien. Zu den einfachsten Maßnahmen zählt die Installation von PV-Modulen mit Ost/West-Ausrichtung, sei es auf Dächern oder auf Freiflächen (Abbildung 54). Diese Montagevariante reduziert den Flächenverbrauch, allerdings sinkt der spezifische Jahresertrag pro installierter Modulleistung, verglichen mit der Südausrichtung. 1- oder 2-achsige nachgeführte Anlagen verstetigen nicht nur die Stromproduktion über den Tageslauf (Abbildung 54), sie heben auch den spezifischen Jahresertrag um ca. 15 – 30 % an. Im Vergleich zur stationären Montage können sie auch Verluste mindern, die durch Schneeabdeckung oder durch erhöhte Betriebstemperaturen entstehen. Eine weitere Option bieten senkrecht montierte, bifaziale Module mit Nord-Süd-Verlauf, die vormittags und nachmittags mehr Strom liefern als am Mittag.

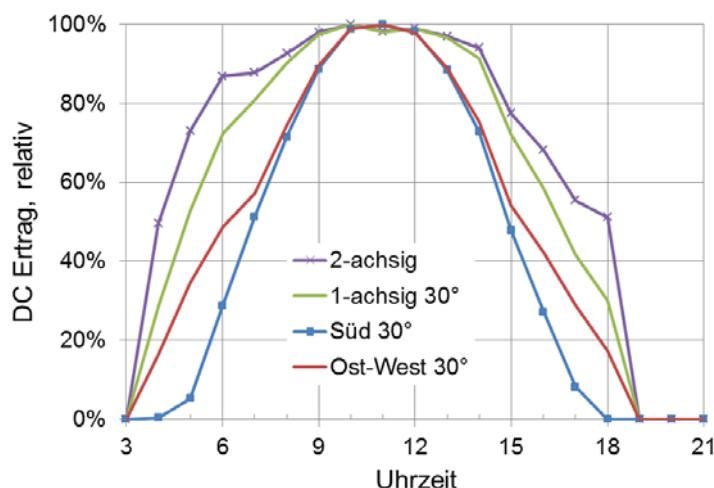


Abbildung 54: Stromertragsprofile von PV-Anlagen in verschiedenen Montagevarianten, berechnet mit der Software PVsol für einen überwiegend klaren Julitag am Standort Freiburg.

Die sehr ausgeprägte saisonale Fluktuation der PV-Stromerzeugung lässt sich geringfügig dämpfen, indem südorientierte Module mit höheren Neigungswinkeln montiert werden (Abbildung 55). Dadurch steigt der Stromertrag im Winterhalbjahr geringfügig an, allerdings auf Kosten größerer Einbußen im Sommer und beim Gesamtertrag (im Rechenbeispiel -6 %).

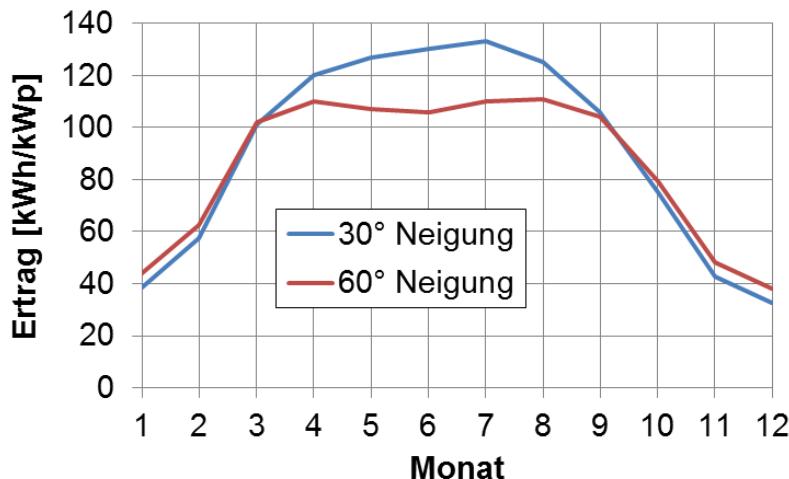


Abbildung 55: Rechenbeispiel für den spezifischen Monatsertrag einer PV-Anlage am Standort Freiburg für südorientierte Module mit 30° Neigung (max. Jahresertrag) und 60° Neigung.

Die etwas höheren Stromgestehungskosten bei den genannten alternativen Montagevarianten können sich im Kontext eines erhöhten Eigenverbrauchs und der damit verbundenen Einsparungen beim Strombezug gerade für gewerbliche Kunden amortisieren. Einspeisevergütungen, die einen höheren Wert von Strom in den Morgen- und Abendstunden honorieren, fördern den Bau systemisch vorteilhafter PV-Kraftwerke, die nicht nur auf maximalen Jahresstromertrag optimiert sind. Auch die in Abschnitt 14.3 genannten Maßnahmen zur Erhöhung der Vollaststundenzahl tragen zur Verstärkung der PV-Stromerzeugung bei.

18.3.2 Komplementärbetrieb von Kraftwerken

Kraftwerke für den Komplementärbetrieb müssen auch im Teillastbetrieb eine hohe Effizienz aufweisen, schnelle Laständerungen ermöglichen und bei Gaskraftwerken mit steigenden Wasserstoff-Anteilen zureckkommen.

Gaskraftwerke eignen sich sehr 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. Erdgas muss überwiegend importiert werden (ca. 95 % im Jahr 2017 [AGEB1]), insbesondere aus Russland und Norwegen. Im Zug der Energiewende werden Gaskraftwerke von Erdgas auf Mischgase mit steigenden Anteilen elektrolytisch erzeugten Wasserstoffs umsteigen.

Es ist technisch möglich, viele Kohlekraftwerke so zu betreiben, auszulegen oder nachzurüsten, dass sie der Residuallast teilweise folgen können (Abbildung 56). Der Teillastbetrieb an sich, der erhöhte Verschleiß und die ggf. erforderliche Nachrüstung erhöhen die Produktionskosten für Strom. In einigen Kohlekraftwerken lässt sich die Dampferzeugung

von Kohle- auf Gasbrenner umrüsten (Fuel Switch), so dass Dampfturbine und Generator weiterverwendet werden können [EnBW2].



Abbildung 56: Verfügbarkeit von Kraftwerken [VGB].

Biomasse-Kraftwerke können je nach Typ feste Biomasse (Restholz, Altholz), flüssige Biomasse (Pflanzenöl) oder Biogas (aus der Landwirtschaft oder aus Kläranlagen) verbrennen. Ende 2019 waren deutschlandweit Biomasse-Kraftwerke mit über 8 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, wenn der Vergärungsdurchsatz nur bedingt gesteuert und das Gas nicht im Gasnetz gespeichert werden kann. Der Anbau von Biomasse zum Zweck der energetischen Nutzung wird aufgrund der geringen Flächeneffizienz (Abschnitt 14) abnehmen, die Nutzung wird sich auf Rückstände der Landwirtschaft (biogene Abfälle) konzentrieren.

18.3.3 Erhöhung der Energieeffizienz

18.3.3.1 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. 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 18.3.7.5).

Abbildung 57 zeigt die kompletten Treibhausgasemissionen eines batterieelektrischen Fahrzeugs (englisch Battery Electric Vehicle, BEV) mit 35 kWh Batterie über die Fahrleistung für gemischte Nutzung Stadt/Land, verglichen mit einem Benzin- und einem Dieselfahrzeug, mit 3 Varianten für den Strommix.

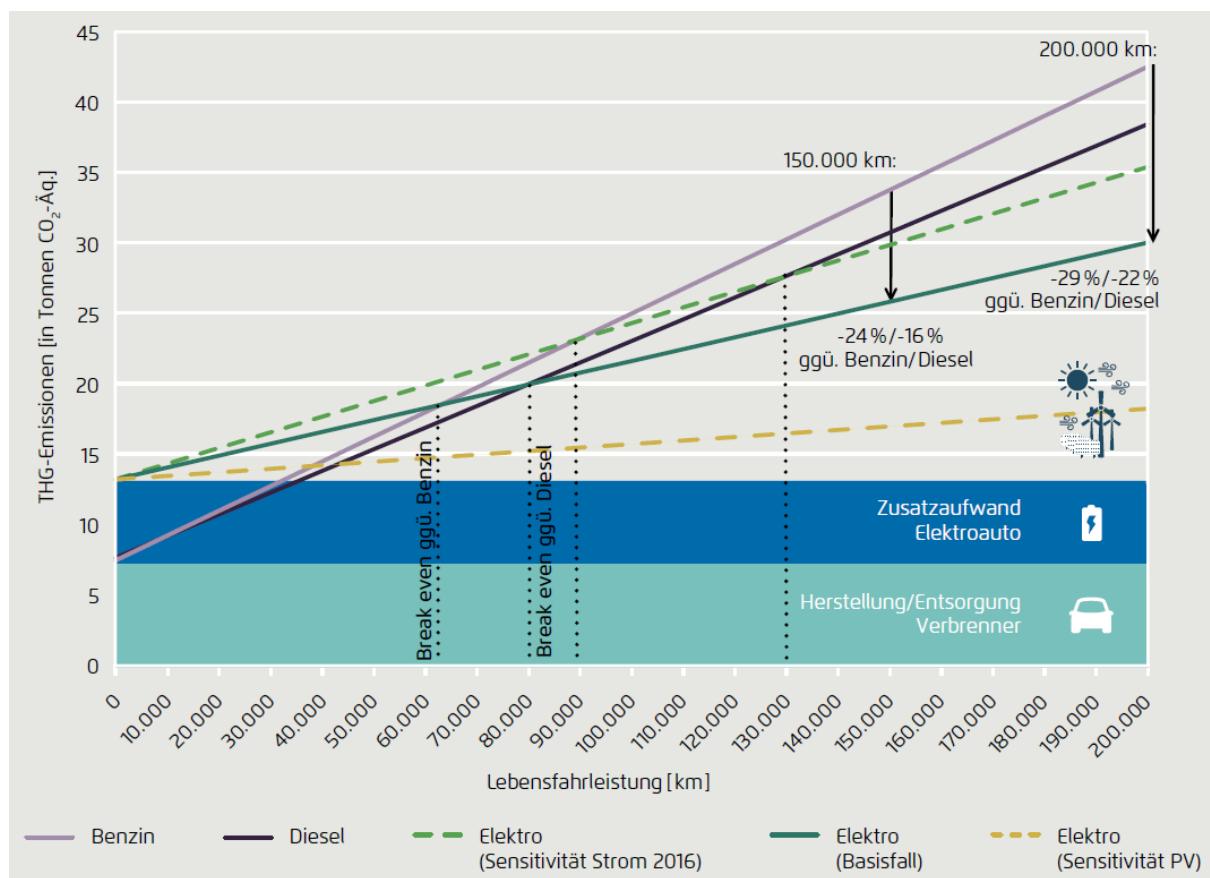


Abbildung 57: Treibhausgasemissionen von heutigen Fahrzeugen der Kompaktklasse in Abhängigkeit von der Fahrleistung [AGORA1].

Bevorzugtes Laden mit Solar- oder Windstrom (vgl. Abschnitt 18.3.7.5) führt zu einem besonders flachen Verlauf der BEV-Emissionslinie (gelb). 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. Betrachtet man reinen Stadtverkehr mit typischem Stop-and-go-Betrieb, dann sinken Verbrauch und THG-Emissionen pro km für BEV dank Rekuperation, während sie für Verbrenner wegen Bremsverlusten und ineffizientem Teillastbetrieb ansteigen.

Für Stadtbetrieb genügen meistens auch kleinere Batterien von bspw. 20 – 30 kWh Kapazität, wodurch THG-Emissionen für Herstellung und Betrieb nochmals sinken. Neuere Untersuchungen zeigen eine zwischenzeitliche Verringerung der batteriebezogenen THG-Emissionen auf Werte von 61 – 106 kg CO₂-Äq/kWh Batteriekapazität [IVL], verglichen mit den 145 kg CO₂-eq/kWh aus dem Jahr 2017, die Abbildung 57 zugrunde liegen. Perspektivisch werden bei der Herstellung von BEV steigende Anteile von EE mit entsprechend sinkenden Treibhausgasemissionen verwendet.

Eine neuere Studie [Bub] bescheinigt bspw. im Mittelklassesegment einem mit EE-Strom geladenen Tesla Model 3 eine THG-Einsparung über den gesamten Lebenszyklus von 89% gegenüber einem Volkswagen Passat 2.0 TSI (Benziner) und von 86 % verglichen mit einem Mercedes-Benz C 300 (Diesel).

Pointiert lässt sich die CO₂-Bilanz im Vergleich mit Benzin- und Diesel-PKWs 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.

18.3.3.2 *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.

18.3.4 Lastmanagement

Netzdienliches Lastmanagement („Demand Side Management“) zielt auf eine angebotsorientierte, zeitliche Verschiebung des Stromverbrauchs. Bei hoher Residuallast (Abschnitt 10.4) wird der Verbrauch zeitweise verringert oder eingestellt, dafür bei geringer Residuallast nachgeholt. Wenn der CO₂-Preis ausreichend hoch liegt, um den Merit Order (Abschnitt 4.3) zu bestimmen, können durch Lastmanagement bereits heute CO₂-Emissionen eingespart werden, weil die schmutzigsten Kraftwerke dann seltener gebraucht werden. Voraussetzungen für Lastmanagement sind Flexibilitätsoptionen durch **Materialspeicher** bzw. -reserven auf der Nachfrageseite. Eine Waschmaschine kann häufig ein paar Stunden 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. Energiespeicher werden im Abschnitt 18.3.7 betrachtet. Ihre Beladung erfolgt

bestimmungsgemäß netzdienlich (bspw. Pumpspeicherkraftwerke) oder unter Mitberücksichtigung der Netzdienlichkeit (perspektivisch bspw. Batterien von E-Autos).

Mehrere Untersuchungen haben Lastmanagementpotenziale in der Größenordnung von 20 GW und mehr für private Haushalte und bis 14 GW für gewerbliche Verbraucher identifiziert [AEE1]. Haushaltsgeräte, deren Betrieb gemäß Nutzerentscheidung in einem definierten Zeitintervall verzögert starten darf, müssen technisch in die Lage versetzt werden, netzdienliche Betriebszeiten abzuwarten. Der Stromversorger kann dafür zeitgebundene Tarife anbieten, noch wirkungsvoller ist eine direkte Steuerung. In Frage kommen einige Geräte mit besonders hoher Leistung wie Waschmaschine, Spülmaschine und Wäschetrockner.

Die technischen Voraussetzungen und ökonomischen Anreize für die Erschließung dieser Potenziale müssen größtenteils noch geschaffen werden. Von entscheidender Bedeutung sind dynamische Stromtarife und Stromzähler, die eine zeitabhängige Abrechnung ermöglichen („Smart Meter“). Dynamische Tarife bilden im besten Fall die momentane Residuallast ab. Die aktuelle Zusammensetzung der Strompreise für Haushalte (Abbildung 14) mit sehr hohen Fixkosten pro kWh würde bei den üblichen Preisschwankungen an der Strombörsen 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.

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). Die elektrolytische Produktion von grünem Wasserstoff als Rohstoff der Metallurgie, bspw. für die Direktreduktion von Eisenerz, und der chemischen Industrie, bspw. über Methanisierung und Ammoniaksynthese, wird ebenfalls zum Lastmanagement beitragen.

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.

18.3.5 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 10.2.3). Wenn es gelingt, die installierten Leistungen für PV und Windstrom in ähnliche Größenordnung auszubauen, reduziert ihre Kombination den Ausgleichsbedarf.

18.3.6 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 (Abschnitt 18.3.7.1) ermöglichen den stromgeführten Betrieb der Wandlungen. Die Ausdehnung von Wärmeverteilernetzen wird durch entfernungsabhängige Transportverluste ungleich stärker begrenzt als im Stromsektor. Deshalb müssen Anlagen mit Strom-Wärme-Kopplung (Abbildung 51) in ihrer Leistung und Platzierung auf den lokalen Wärmeverbrauch und nutzbare Wärmenetze zugeschnitten werden. Das können Nahwärmennetze sein mit einem Wärmetransport zwischen benachbarten Gebäuden oder Fernwärmennetze, 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 und Methan umgestellt, ein Teil verbrennt weiterhin Biomethan/-masse aus biogenen Abfällen.

18.3.7 Energiespeicherung

Energiespeicher sind Komponenten, die Energie aufnehmen und als nutzbare Energie wieder abgeben können. Beim Be- und Entladen kommen Energiewandler wie Wasser- oder Wärmepumpen, Elektrolyseure oder Brennstoffzellen zum Einsatz. Bei manchen Energiespeichern kann Energie nur in einer gewandelten Form entnommen werden, etwa im Fall von mit Strom geladen Wärmespeichern. Ein Wasserstoffspeicher wird als Energiespeicher genutzt, wenn der Wasserstoff oder seine Derivate als Energiequelle dienen, sonst als **Materialspeicher**, bspw. für die chemische Industrie. Die Beladung von Materialspeichern durch energieintensive Prozesse, bspw. die Aluminiumproduktion, kann dem Netz über Lastmanagement dienen (Abschnitt 18.3.4).

18.3.7.1 Niedertemperatur-Wärmespeicher

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 %. 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 51), 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 m³, 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.

Für die Abschätzung der maximal zuschaltbaren elektrischen Last (Peak-Last) über fernsteuerbare Wärmepumpen, teilweise kombiniert mit Heizstäben, wird eine durchschnittliche thermische Nennleistung von 15 kW pro Gerät angenommen sowie ein COP („Coefficient of Performance“) von 3. Im normalen Betrieb arbeiten WP üblicherweise mit COP von 3 – 5.

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.

18.3.7.2 Hochtemperatur-Wärmespeicher

Überschüssiger Strom lässt sich über Widerstandsheizungen sehr effizient in Hochtemperatur-Wärme (Größenordnung 650 °C) umwandeln. 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 Industrieprozesse bzw. 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.

18.3.7.3 Kältespeicher

Am Ort der Kälteerzeugung und -nutzung, bspw. in der Gebäudeklimatisierung oder in Kühltagern, kann Kälte mit vergleichsweise einfachen Mitteln gespeichert werden. Weitere Voraussetzung für einen netzdienlichen Betrieb ist eine ausreichend dimensionierte Leistung des Kälteerzeugers.

Bei sehr tiefen Temperaturen ist auch ein Strom-zu-Strom-Betrieb möglich. Kältespeicher auf Basis flüssiger Luft (-195°C), engl. Liquid Air Energy Storage (LAES), befinden sich in der Erprobung. Der geplante Strom-zu-Strom Wirkungsgrad beträgt ca. 25 %, er lässt sich durch Hinzunahme weiterer thermischer Systemkomponenten deutlich steigern.

18.3.7.4 Stationäre Batterien

Lithium-Ionen-Batterien haben eine ähnlich steile Preislernkurve wie PV-Module durchschritten und im Jahr 2020 ein Preisniveau von ca. 110 €/kWh erreicht (ohne Energiemanagementsystem, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/>). Bei 2000 Ladezyklen entspricht dieser Batteriepreis rechnerisch einem Aufschlag von 5,5 ct/kWh auf den Strompreis, zuzüglich Ladeverluste.

Mit kleinen, stationären Batterien können Haushalte ihren Eigenverbrauch von PV-Strom in die Abendstunden ausdehnen und damit massiv erhöhen (typischerweise verdoppeln, s. Abbildung 58). Anfang April 2022 waren in Deutschland ca. **500.000** PV-Stromspeicher installiert, mit einer Gesamtkapazität von **4,4 GWh** und einer Nennleistung von **2,5 GW** [BVES]. Eine netzdienliche Systemführung der Batterien entlastet das Netz durch gezielte Reduktion der mittäglichen Einspeisespitze (Abbildung 59). Speicher würden damit einen erhöhten PV-Zubau ermöglichen [ISE7]. In Pilotvorhaben wird derzeit auch die Speicherung von elektrischer Energie in großen, stationären Batterien untersucht [RWE].

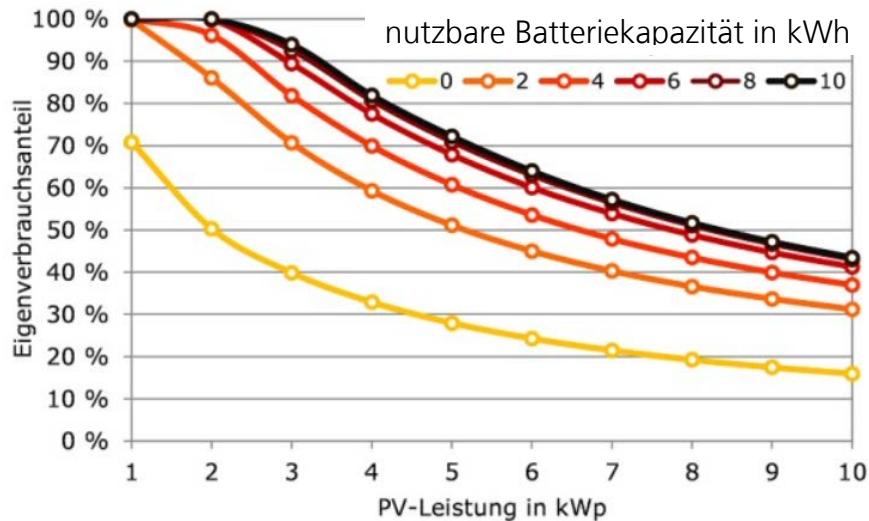


Abbildung 58: Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit von Batteriekapazität und Leistung des Solargenerators für einen Einfamilienhaushalt mit einem Jahresstromverbrauch von 4.700 kWh [Quasch].

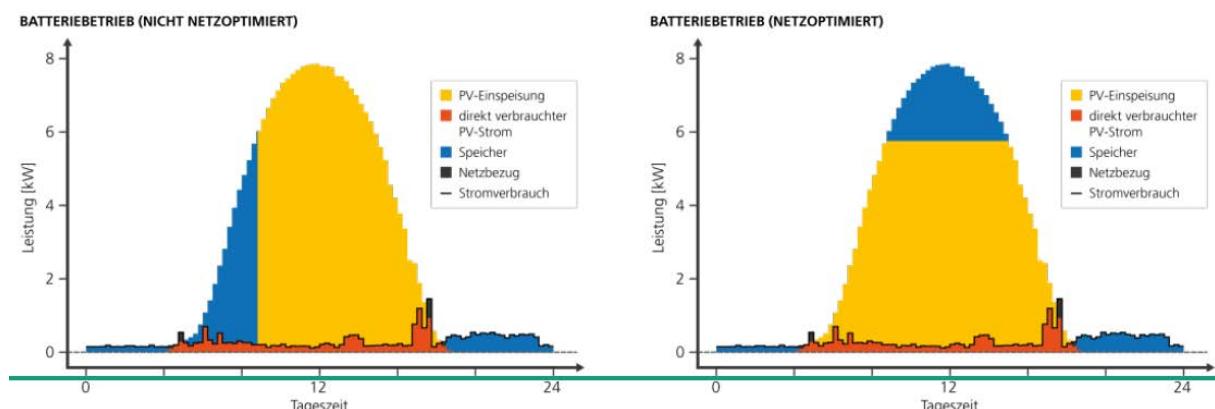


Abbildung 59: Gegenüberstellung der konventionellen und der netzdienlichen Betriebsführung [ISE7].

18.3.7.5 Fahrzeugbatterien

Elektrofahrzeuge verwenden Batterien als elektro-chemische Energiespeicher, in Hybridfahrzeugen unterstützt durch einen Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle. Ende 2020 waren in Deutschland **310.000 reine Elektro-Autos** (BEV, ohne Plug-in-Hybrid) zugelassenen, von insgesamt ca. 48 Mio. PKW (de.statista.com, www.kba.de). Rechnerisch entspricht die Gesamtfahrleistung der PKW in Deutschland von 645 Mrd. km im Jahr 2019 [KBA] bei einem Verbrauch von 160 Wh/km [AGORA1] einem Jahresstromverbrauch durch E-PKW von 100 TWh, zuzüglich ca. 15 % Ladeverluste. Der Einsatz von größeren Nutzfahrzeugen mit Elektroantrieb und vertretbaren Batteriekapazitäten ist heute noch durch ihre geringe Reichweite eingeschränkt. Für E-LKW werden aktuell Lösungen zum

Nachladen der Batterien während der Fahrt auf Streckenabschnitten mit Oberleitungen erprobt. E-Busse mit Oberleitung sind im Stadtverkehr Stand der Technik.

Mehrere Maßnahmen sind notwendig, um Fahrzeugbatterien als netzdienliche Energiespeicher zu aktivieren.

Angebotsabhängige Strompreise werden Privat- und Geschäftskunden motivieren, preisgünstige Ladezeiten mit hohem Anteil von EE im Strommix zu wählen. Variable Spritpreise sind nicht neu, auch Tankstellen variieren ihre Preise tageszeitabhängig.

Der momentane Anteil von Strom aus EE an der Nettostromerzeugung in Deutschland schwankte im Jahr 2020 zwischen 15 und 85 %. 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. Zu jeder Jahreszeit ist das Wochenende meistens vorteilhaft, der geringere Stromverbrauch verbessert tendenziell die CO₂-Bilanz. Präzise Informationen zum aktuellen und geplanten Anteil der EE am deutschen Strommix zeigen die Energy Charts [ISE4]. Eine tatsächliche CO₂-Einsparung durch angebotsorientiertes Laden wird erzielt, wenn

- der CO₂-Preis ausreichend hoch liegt, um den Merit Order (Abschnitt 4.3) zu bestimmen und damit die Auslastung von Kohlekraftwerken sinkt oder
- wenn überschüssiger EE-Strom genutzt wird, der sonst abgeregt oder in Heizstäben verbraucht werden müsste. Mit dem Ausbau der Erzeugungskapazitäten für EE werden Stromüberschüsse immer häufiger auftreten.

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.

Bidirektionale Energiemanagementsysteme ermöglichen einen Betrieb von Elektrofahrzeugen als Strom-Strom-Speicher, wenn sie 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 Verkehrs wegen 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.

18.3.7.6 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-Kraftwerksparks aus weniger als einer Betriebsstunde unter Vollast.

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.

18.3.7.7 Wasserstoff und Syntheseprodukte

Die elektrolytische Umwandlung von überschüssigem Sonnen- und Windstrom in Wasserstoff, ggf. mit anschließender Methanisierung und Weiterverarbeitung zu synthetischen Flüssigkraftstoffen (bspw. Methanol) oder zur Erzeugung von Ammoniak, befindet sich in der Skalierung und Erprobung [AMP].

Kommerzielle alkalische Elektrolyseure erreichen Wirkungsgrad bis 80 %, Hochtemperatur-Elektrolyseure über 80 %. Zusätzliche Energie wird für die Gaskompression, ggf. die Verflüssigung (20 – 30 % Verlust) und folgende Syntheseschritte benötigt. Im April 2019 waren **Elektrolyseure** mit einer Gesamtleistung von rund **30 MW_P** am Netz, in Planung waren 273 MW_P [DVGW]. Abbildung 60 zeigt aktuelle und prognostizierte Investitionskosten für verschiedene Elektrolysetechnologien.

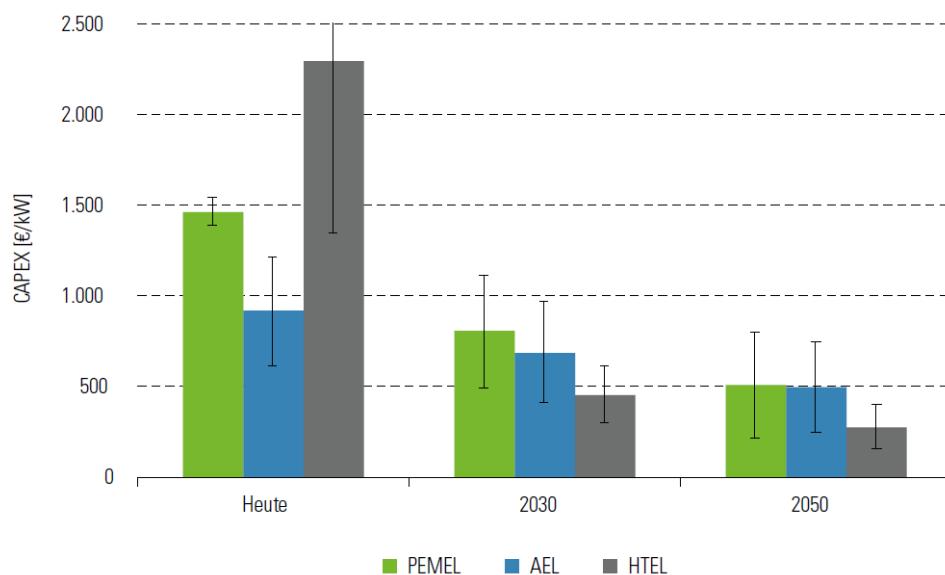


Abbildung 60: Spezifische Investitionskosten für verschiedene Elektrolyseurtechnologien (PEMEL: Membranelektrolyse, AEL: Alkalische Elektrolyse, HTEL: Hochtemperatur-Elektrolyse, [NOW]).

Die Wandlung von EE-Strom zu lagerfähigen Energieträgern („Power-to-X“) erschließt riesige, bereits vorhandene Speichermöglichkeiten. Bereits heute ist es technisch möglich, den Wasserstoffanteil im Gasnetz auf bis zu 20 % zu erhöhen. In deutschen Salzkavernen lassen sich 9,4 PWh Energie in Form von Wasserstoff speichern [Hydro], dies entspricht dem 2,6-fachen Primärenergieverbrauch Deutschlands.

Synthetische Energieträger können über stationäre Brennstoffzellen (Wirkungsgrad bis ca. 65 %) oder thermische Kraftwerke rückverstromt werden, als Kraftstoffe im

Transportsektor Verwendung finden (bspw. Wasserstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge, Dieselsubstitute für den Schiffsverkehr, Kerosinsubstitute im Flugverkehr) oder als Ausgangsstoffe für die Chemieindustrie.

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 einer Kombination von reinen Elektrolyseuren mit reinen Brennstoffzellen versprechen diese bidirektonalen Wandler als stationäre Kraftwerke im Stromnetz eine höhere Vollaststundenzahl und geringere Investitionskosten pro installierter Gesamtleistung.

18.3.7.8 Übersicht

Abbildung 61 zeigt Pfade für die Speicherung und Wandlung von PV- und Windstrom. Für die praktische Relevanz dieser Pfade sind neben dem technischen Wirkungsgrad u.a. die Kosten der zu installierenden Nennleistung von Wandlern (€/W) und Kapazität von Speichern (€/Wh) zu betrachten.

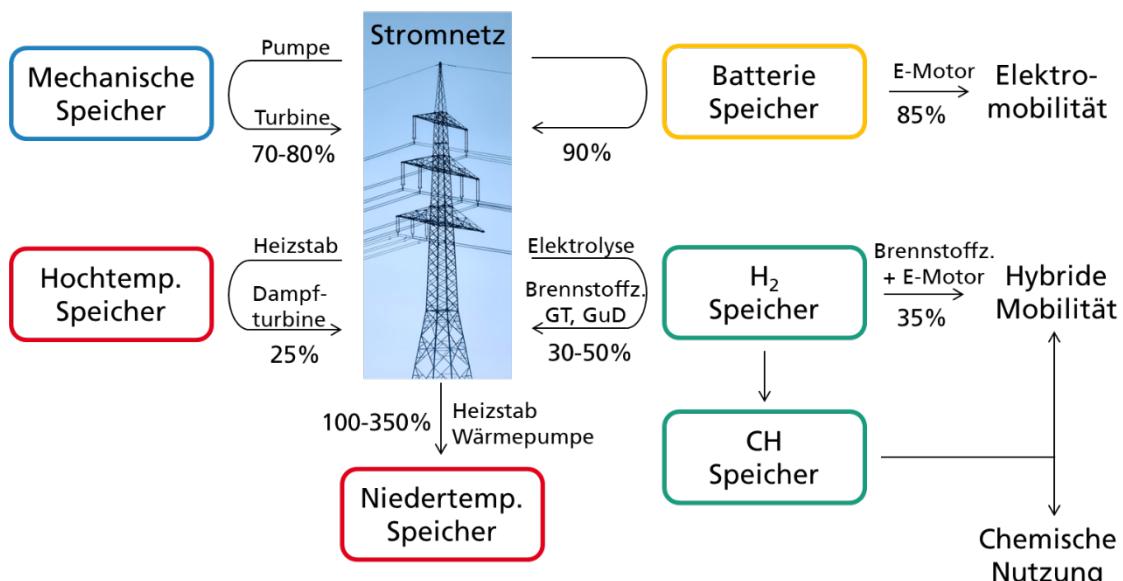


Abbildung 61: Technologien für Energiespeicher und -wandler mit heute erzielbaren Wirkungsgraden am Ende der Wandlerkette, ohne Kraft-Wärme-Kopplung (GT: Gasturbine, GuD: Gas- und Dampfturbine).

18.3.8 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. Gas-transport mit Rückverstromung in der Zielregion senkt den Ausbaubedarf auf Seiten des Stromnetzes.

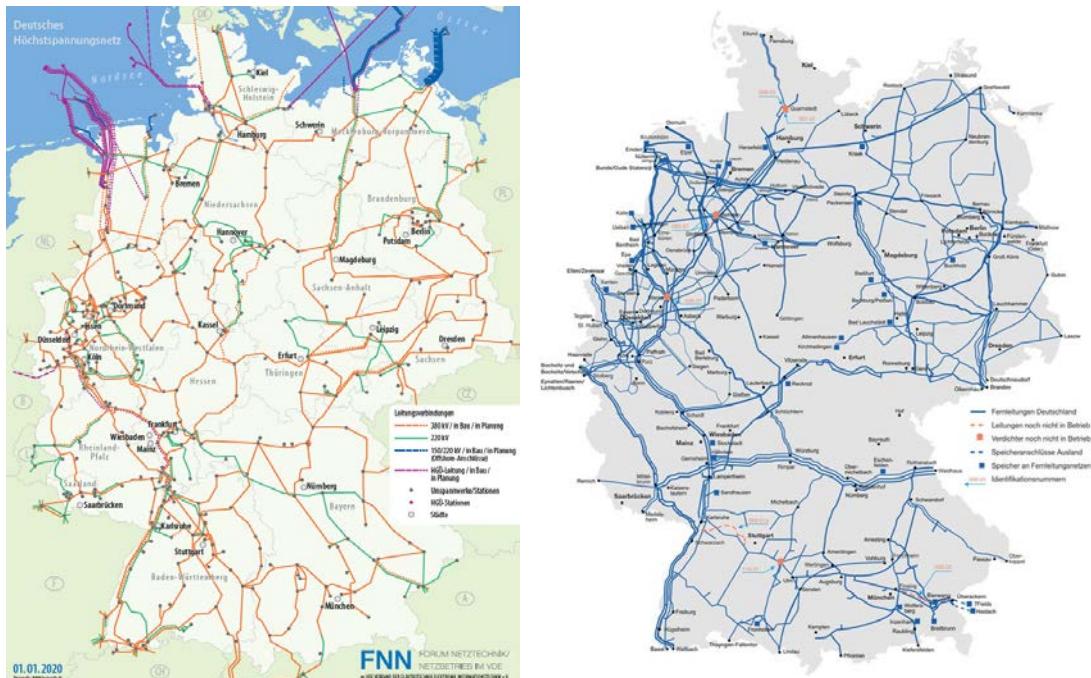


Abbildung 62: Höchstspannungsnetz [VDE] und Gas-Fernleitungsnetz [Fern].

18.3.8.1 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, Brennstoffzelle, 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.

18.3.8.2 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.

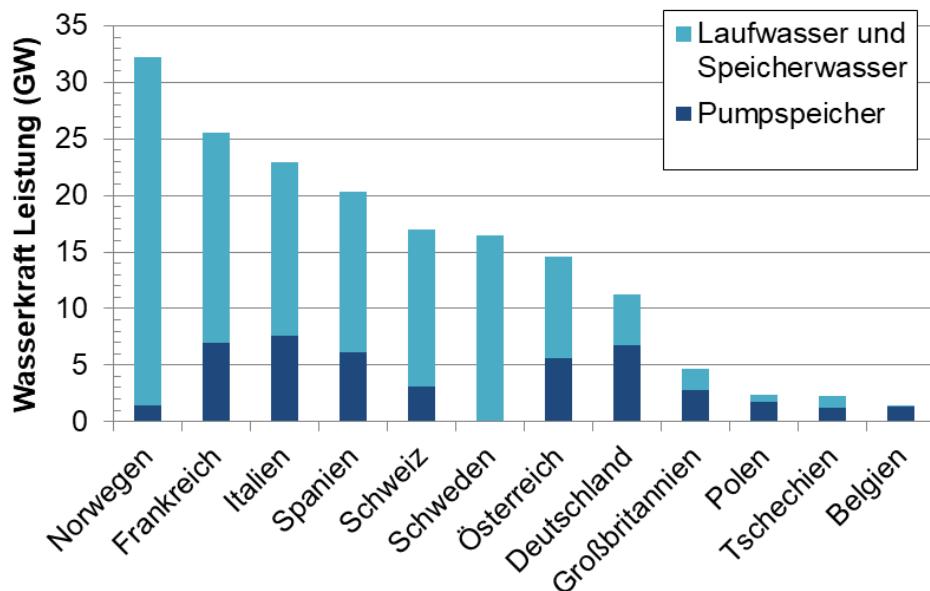


Abbildung 63: Installierte Leistung von Wasserkraftwerken in benachbarten Ländern, Zahlen aus [IHA].

Abbildung 63 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.

18.3.9 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.

18.3.10 Übersicht

Aus heutiger Sicht ist ein Energiesystem auf Basis von 100 % EE technisch und wirtschaftlich darstellbar. Abbildung 64 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.

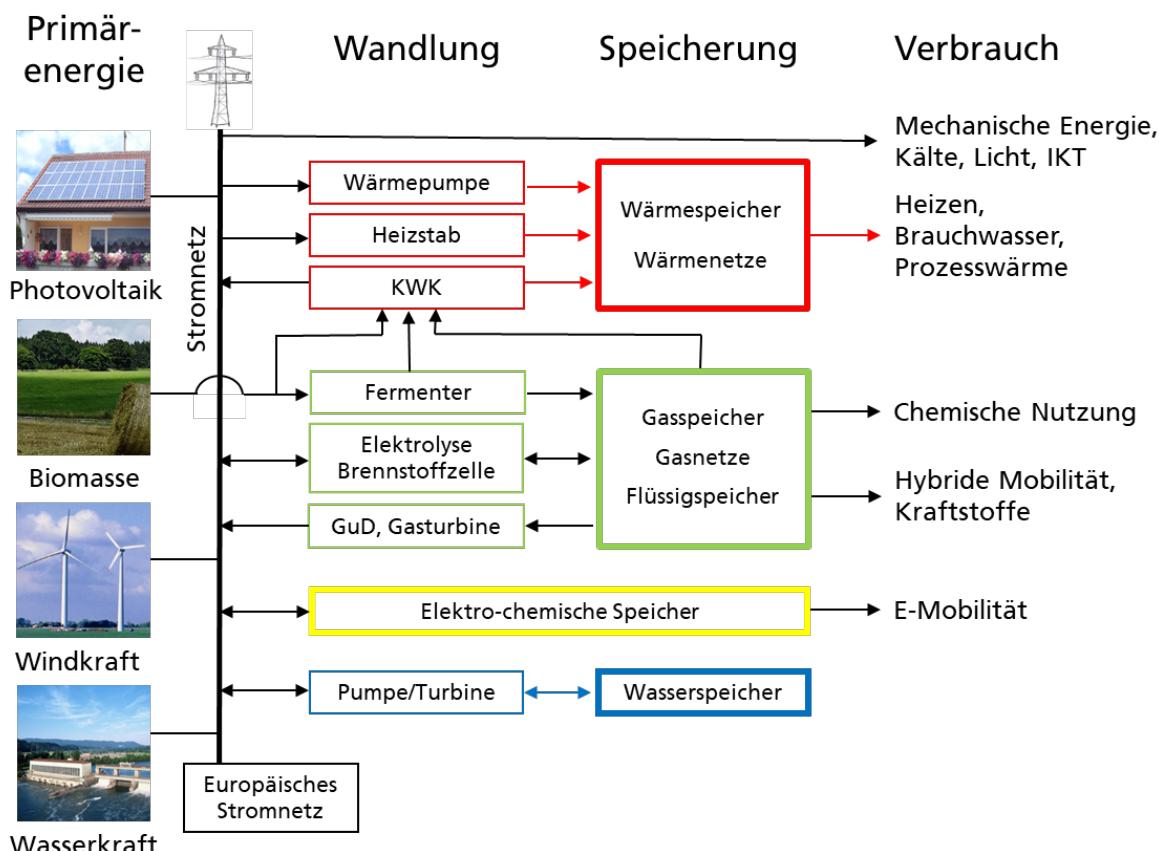


Abbildung 64: Vereinfachte schematische Darstellung eines Erneuerbaren Energiesystems mit den wichtigsten stromnetzgebundenen Bausteinen der Gewinnung, Wandlung, Speicherung und des Verbrauchs; IKT: Informations- und Kommunikationstechnik, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, GuD: Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk.

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, Brennstoffzellen und – bei Bedarfsspitzen – auch reine Gasturbinen zum Einsatz. Wasserstoff-Elektrofahrzeuge tanken ihren Treibstoff aus stationären Gasspeicher, Fahrzeuge für große Reichweiten (insbesondere Flugzeuge) tanken flüssige synthetische Kraftstoffe.

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 65 zusammen.

Nennleistung	2020	2045 (Referenz-Szenario)	
1. Primärerzeugung	54 GW _P	→	430 GW _P PV, im Netz max. 300 GW (70%)
	63 GW _P	→	260 GW _P Wind, Land + See
2. Gaskraftwerke	30 GW _P	→	150 GW _P H ₂ -ready, auch GuD, KWK, teilw. Umrüstung von Kohle + Öl
3. Stat. Batterien	0,4 GW _P	→	180 GW _P Kapazität 180 GWh
4. E-Mobilität	0,09 GW _P	→	Gesamt 270 GW _P , davon im Netz mind. 10%, Kapazität 270 GWh
5. Wärmepumpen	5 GW _{P,el}	→	75 GW _{P,el} 15 Mio. Geräte, 15 kW _{th} pro Gerät, COP ≥ 3
6. Elektrolyse	0,03 GW _P	→	80 GW _P Kapazität 9400 TWh H ₂ in Salzkavernen

Abbildung 65: Wichtige Stromerzeuger, -wandler und Speicher in einem klimaneutralen Energiesystem [ISE3]; COP: Coefficient of Performance.

18.4 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 die Förderung von Projekten, die Bereitstellung von Flächen, die Verpflichtung von Bauherren zu Solarinstallations bis hin zu eigenen Investitionsentscheidungen.

19. 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 ausgeben. 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. Der deutsche PV-Sektor mit seinen Materialherstellern, dem Maschinenbau, den Komponentenherstellern, den F&E-Einrichtungen und der Lehre nimmt trotz des gebremsten nationalen Ausbaus weltweit immer noch eine Spitzenposition ein. Ein auf Erneuerbare umgestelltes Energiesystem basiert u.a. auf ca. 300 – 450 GW installierte PV-Leistung. Für den Aufbau und zunehmend für die laufende Erneuerung dieses Anlagenparks sind jährliche Installationen von 12 – 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.

20. 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 CO₂-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 CO₂-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 Strombörsen 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 18.3 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 11) 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.

21. 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.

21.1 Waferbasierte Module

Module auf Basis von Siliciumwafern (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.

21.2 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 Silicium 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.

21.3 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. Studien deuten darauf hin, dass Antimonverbindungen ähnlich wirken wie entsprechende Arsenverbindungen. Alternative Läuterungsverfahren ohne Antimon-Beigabe sind verfügbar.

21.4 Rücknahme und Recycling

PV-Produzenten haben im Juni 2010 ein herstellerübergreifendes Recyclingsystem in Betrieb genommen (PV Cycle), mit derzeit über 300 Mitgliedern. 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).

Im Recyclingprozess werden Aluminiumrahmen, Anschlussdose und Glas vom Laminat getrennt. Aluminium und Glass werden wiederverwertet. Verfahren zur Stofftrennung für das verbleibende Laminat befinden sich in der Erprobung, zu seinen wertvollen Bestandteilen zählen Silizium, Silber auf den Solarzellen und das Kupfer der Zellverbinder. Die Deutsche Umwelthilfe zeigt in ihrem Weißbuch deutliche Verbesserungspotenziale für die Wiederverwendung und das Recycling von PV-Modulen auf [DUH].

22. Sind Rohstoffe zur PV-Produktion ausreichend verfügbar?

Waferbasierte Module 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 Zellen zu sehen. Die PV-Industrie verbraucht weltweit ca. 1500 t Silber pro Jahr, das entspricht knapp 6 % der Fördermenge in 2020. Das Silber auf der Solarzelle lässt sich technisch weitestgehend durch Kupfer substituieren, manche Hersteller nutzen diese Technologie bereits.

Bei Dünnschicht-Module, die ca. 5% des Weltmarktes ausmachen, dominiert die CdTe-Technologie. Über die langfristige Verfügbarkeit von Tellur und Indium für CdTe-Module gibt es widersprüchliche Aussagen.

23. Erhöhen PV-Anlagen das Brandrisiko?

23.1 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 – bei derzeit ca. 2 Mio. PV-Anlagen in Deutschland - 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. Brände entstanden oft dann, wenn unerfahrene Installationstruppen im Akkord Anlagen installieren. 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. So kann derzeit der Installateur einer Anlage sich selbst die ordnungsgemäße Ausführung bestätigen. 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]

23.2 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, angeschmolte 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]

23.3 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.

23.4 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].

24. Anhang: Fachbegriffe

24.1 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/m² und ein bestimmtes Einstrahlungsspektrum vor. Im realen Betrieb weichen die Bedingungen davon meistens deutlich ab, so dass der STC-Wirkungsgrad häufig unterschritten wird.

24.2 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.

24.3 Jahresvolllaststunden (Jahresvollbetriebsstunden)

Anzahl an Stunden, die ein PV-Kraftwerk mit seiner Nennleistung produzieren müsste, um den gleichen Jahresartrag zu erwirtschaften, den es im realen Betrieb mit häufiger Teillast und nächtlichem Stillstand erreicht (vgl. Abschnitt 14.3).

24.4 Jahresnutzungsgrad (Kapazitätsfaktor)

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

24.5 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 Jahresartrag entspricht der Anzahl Volllaststunden.

24.6 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.

24.7 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 %.

24.8 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 Pumpspeicherwerkten abgedeckt. Diese können innerhalb kürzester Zeit auf Nennleistung gefahren werden und so Lastschwankungen ausgleichen und Lastspitzen abdecken.

(...) Die Netzlast (ist) der Leistungswert des Strombedarfs, der aus dem Netz entnommen wird. Die residuale Last ergibt sich aus der Netzlast abzüglich der Einspeisung aus erneuerbaren Energien“ [ISET]

24.9 Stromerzeugung und -verbrauch

Abbildung 66 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. Große Gasturbinen zeigen Wandlungsverluste von 60 – 65 %. PV-Kraftwerke weisen Wandlungsverluste von 80 – 85 % auf, bei praktisch kostenlos und unbegrenzt verfügbarer Primärenergie. Die Bruttostromerzeugung, bereinigt um den Importsaldo, entspricht dem Bruttostromverbrauch. Speicherverluste treten im Betrieb von Pumpspeicherwerkten oder Batterien auf. Verluste von Pumpspeicherwerkten betragen ca. 25 % der eingespeicherten Strommenge, bei Li-Ionen-Batterien sind es 5 – 10 %, zuzüglich der Verluste im Batteriemanagementsystem. Wird Wasserstoff als Stromspeicher über stationäre Elektrolyseure und Brennstoffzellen eingesetzt, dann liegen die Verluste bei ca. 50 %. Speicherverluste werden mit dem Ausbau der installierten PV-Leistung zunehmend auch für PV-Strom eine Rolle spielen.

Der Eigenverbrauch von fossilen und nuklearen Kraftwerken liegt bei ca. 7 % ihrer Bruttostromerzeugung, bei 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.

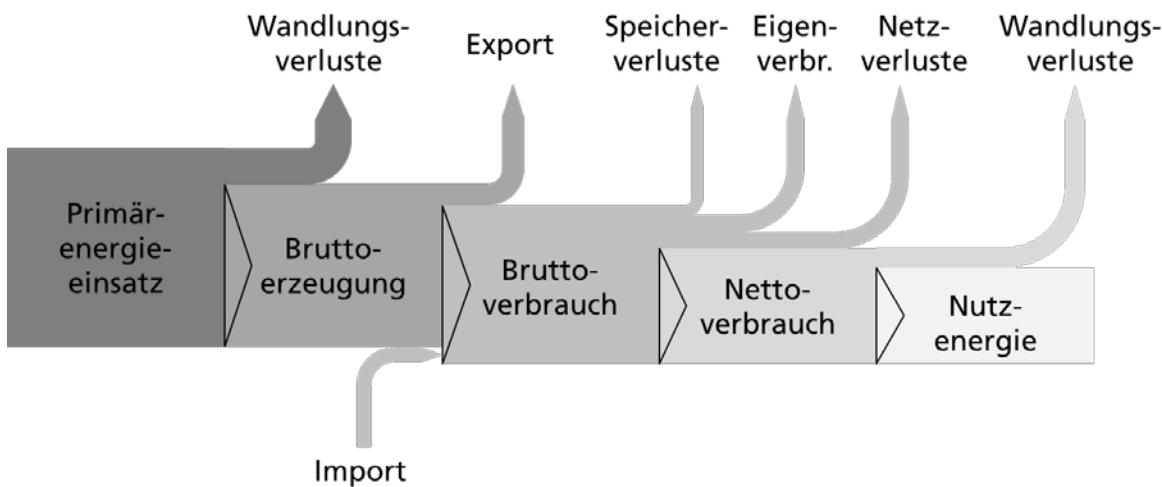


Abbildung 66: Begriffe der Stromerzeugung und des –verbrauchs.

25. 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/m ³]	Heizwert [kWh/kg]	Heizwert [kWh/l] bzw. [kWh/m ³]	Heizwert [MJ/kg]	Heizwert [MJ/l] bzw. [MJ/m ³]
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

26. Anhang: Abkürzungen

BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (englisch Battery Electric Vehicle)
BHKW	Blockheizkraftwerk, Anlage zur Gewinnung elektrischer Energie und Wärme über Verbrennungsmotor oder Gasturbine
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien, (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG)
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

27. Anhang: Quellen

AEE1	Metaanalyse: Digitalisierung der Energiewende, Agentur für Erneuerbare Energien, August 2018
AEE2	Bundesländer-Übersicht zu Erneuerbaren Energien, https://www.bundeslaender-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender/BW BY B BB HB HH HE M V NI NRW RLP SL SN ST SH TH D/kategorie/solar , Agentur für Erneuerbare Energien, Februar 2022
AEE3	https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/aee-akzeptanzumfrage-2021 , Download im Dezember 2021
AGEB1	Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2017, AGEB, Februar 2018
AGEB2	Energieflussbild 2020 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Mai 2022
AGORA1	Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial, Studie im Auftrag der Agora Verkehrswende, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, April 2019
AGORA2	Klimaneutrales Stromsystem 2035. Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann; Agora Energiewende, Prognos, Consentec (2022)
AMP	Sektorenkopplung: Amprion und Open Grid Europe geben Power-to-Gas in Deutschland einen Schub, Pressemeldung, Amprion, Juni 2018
ARIA	Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich, Kopernikus-Projekt Ariadne, Oktober 2021

ATW1	Weis M, van Bevern K, Linnemann T. Forschungsförderung Kernenergie 1956 bis 2010: Anschubfinanzierung oder Subvention? - ATW 56. Jg. (2011) Heft 8/9
ATW2	Ludwig H, Salnikova T, Waas U. Lastwechselfähigkeiten deutscher KKW, ATW 55. Jg (2010), Heft 8/9
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, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Januar 2022
BDEW2	Foliensatz Erneuerbare Energien EEG_2017, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Juli 2017
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
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 2022, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), April 2022
BMWK3	EEG: Daten und Fakten: Vergütungen, Differenzkosten und EEG-Umlage 2000 bis 2022, Stand Oktober 2021 https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Recht-Politik/Das_EEG/DatenFakten/daten-und-fakten.html#doc95662bodyText2
BNA1	Bundesnetzagentur legt Eigenkapitalrenditen für Strom- und Gasnetze fest, Pressemeldung der Bundesnetzagentur vom Oktober 2016
BNA2	Monitoringbericht 2021, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt, Dezember 2021
BNA3	www.bundesnetzagentur.de , Stand August 2022

BNE	Solarparks – Gewinne für die Biodiversität, Studie des Bundesverbands Neue Energiewirtschaft (bne) e.V., November 2019
BSW1	Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik), Bundesverband Solarwirtschaft e. V., Berlin, Februar 2022
BSW2	50.000 neue Jobs durch Photovoltaik und Speicher, Pressemeldung des Bundesverbands Solarwirtschaft e. V. (BSW-Solar), Berlin, 5. Dezember 2019
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
Carb	https://www.carbonbrief.org/profound-shifts-underway-in-energy-system-says-iea-world-energy-outlook , Carbon Brief, 2019
DENA	DENA-Gebäudereport 2022 - Zahlen, Daten, Fakten; Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.), Oktober 2021
DESTATIS	Umweltökonomische Gesamtrechnungen, Private Haushalte und Umwelt, DESTATIS, Statistisches Bundesamt, September 2020
DIW	Göke L, Kemfert C, Kendziora 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
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Pressemeldung vom 24. April 2019
DWD	Riecke W. Bereitstellung von historischen Globalstrahlungsdaten für die Photovoltaik, 2. Fachtagung Energiemeteorologie, April 2011
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-Ausbauforderungen 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
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
EUPD1	Ansteigende Amortisationszeit gefährdet weiteren Solarausbau, Studie der EUPD Research Sustainable Management GmbH, November 2021
EUPD2	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
FFE	Homepage der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Download https://www.ffegmbh.de/aktuelles/veroeffentlichungen-und-fachvortraege/828-merit-order-der-konventionellen-kraftwerke-in-deutschland-2018 , Februar 2020
FNR	Basisdaten Bioenergie Deutschland 2021, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., September 2020
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
FÖS3	Kurzanalyse zu den staatlichen Ausgaben für EURATOM, Studie des FÖS im Auftrag von Greenpeace Energy eG, Oktober 2019
FZJ	Reversible Brennstoffzelle bricht Wirkungsgrad-Rekord, Pressemeldung, Forschungszentrum Jülich, Dezember 2018
HTW	Sinnvolle Dimensionierung von Photovoltaikanlagen für Prosumer, Kurzstudie, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, März 2019
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	Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector, International Energy Agency, 2021.
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, Shammugam S, Fluri V, Peper D, Memar A, Schlegl T. Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien; Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, Juni 2021
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	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen, Studie des Fraunhofer ISE. November 2021
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, Februar 2022
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 Green-Fab, Studie des Fraunhofer ISE, Juli 2020
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 Hauptszenerien; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec GmbH, Mai 2021
ITRPV	International Technology Roadmap for Photovoltaic, VDMA Photovoltaic Equipment, 11 th ed., October 2020
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
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
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
NEHS	Nationales Emissionshandelssystem – Hintergrundpapier, Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt, November 2020
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
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
ÖKO3	Eingesparte Kosten für Energieimporte im Jahr 2015 und die Innovationseffekte durch die Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, Memo des Ökoinstituts e.V., Oktober 2016
ÖKO4	EEG-Umlage und die Kosten der Stromversorgung für 2014 - Eine Analyse von Trends, Ursachen und Wechselwirkungen, Kurzstudie im Auftrag von Greenpeace, Öko-Institut e.V., Juni 2013
Prog	Klimaneutrales Deutschland. Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität, Juni 2021
Quasch	Quaschning V. Solare Unabhängigkeitserklärung, Photovoltaik, Oktober 2012
SCBW	Weiterbetrieb von Ü20-Photovoltaikanlagen - Möglichkeiten nach Ende der EEG-Förderdauer, Faktenpapier, Solar Cluster Baden-Württemberg, Januar 2021
SPE	EU Market Outlook For Solar Power 2021 – 2025, SolarPower Europe, Dezember 2021
Sprin	Motorentechnik - Im Fokus, Onlineartikel, Dezember 2010 https://www.springerprofessional.de/motorenmechanik/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 2021, Umweltbundesamt, März 2022
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 Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, Umweltbundesamt, April 2019
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
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
VIK	VIK Strompreisindex Mittelspannung, Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V., Juli 2020
ZSW	Untersuchung zur Wirkung veränderter Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen, Studie des ZSW im Auftrag der innogy SE, Januar 2019

28. 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 2021, möglicher Ausbaupfad zur Erreichung der gesetzlichen Ziele [EEG2023].....	6
Abbildung 3: Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland, Daten aus [BMWK1], [BDEW3], [UBA1].	6
Abbildung 4: Historische Entwicklung der Preise für PV-Module (PSE AG/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 [ISE5], Daten BSW-Solar.....	9
Abbildung 6: Feste EEG-Einspeisevergütung für PV-Strom nach dem Datum der Inbetriebnahme des Kraftwerks in aktuelle 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].	10
Abbildung 7: Monatliche Börsenstrompreise in Deutschland [ISE4].....	11
Abbildung 8: Merit Order konventioneller Kraftwerke im Jahr 2018 bei einem mittleren CO ₂ -Zertifikatspreis von 16 €/t [FFE].	12
Abbildung 9: Einfluss von EE auf die durchschnittlichen Spotpreise an der Strombörse [BDEW2].....	13
Abbildung 10: PV-Ausbau und Differenzkosten, Daten aus [BMWK1], [BMWK3].	14
Abbildung 11: Stromverbrauch der Industrie und EEG-Umlage 2021 [BDEW1].....	15
Abbildung 12: Übersicht zu Einflussfaktoren und Berechnung der EEG-Umlage [ÖKO4].	16
Abbildung 13: Verfahren zur Entnahme von CO ₂ aus der Atmosphäre und Einlagerung von Kohlenstoff [MCC].	18
Abbildung 14: Zusammensetzung des durchschnittlichen Haushaltsstrompreises im Jahr 2021 (KWKG: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz; Strom-NEV: Entlastung stromintensiver Industriebetriebe; Konzessionsabgabe: Entgelte für Nutzung öffentlicher Wege [BDEW1])......	20
Abbildung 15: Entwicklung von Bruttostrompreisen für Haushalte, von Nettostrompreisen für industrielle Großabnehmer und Entwicklung der EEG-Umlage, Daten aus [BMWK1].	21
Abbildung 16: VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. Strompreisindex Mittelspannung [VIK].....	21
Abbildung 17: Stromexport (als negative Werte) im Jahr 2020 für Deutschland [ISE4].	22
Abbildung 18: Abschätzung der Stromgestehungskosten für kleine PV-Anlagen unter verschiedenen Einstrahlungsbedingungen, dazu Vergütungen gemäß [EEG2023]..	23
Abbildung 19: Wertschöpfungszyklus für die Silicium-Photovoltaik.	24

Abbildung 20: PV Produktionsstandorte, Kreisfläche bildet die Produktionskapazität ab [SPE].....	25
Abbildung 21: Fördermittel für Photovoltaikforschung in Mio. Euro [BMWK2]	26
Abbildung 22: Links: Einspeisung von PV-Strom, Rechts: Verteilung der installierten PV-Leistung im Jahr 2020 nach Anlagengröße [ISE5]	27
Abbildung 23: Abgeregelte elektrische Energie [BNA2].....	28
Abbildung 24: Stündliche Stromproduktion im Jahr 2021 [ISE4].....	29
Abbildung 25: Mittlere Leistung für die Einspeisung von Sonnen- und Windstrom im Jahr 2021, 15-Minuten-Werte [ISE4]	30
Abbildung 26: Monatssummen PV- und Windstromproduktion, Daten aus [ISE4].....	30
Abbildung 27: Beispiel für den Verlauf von Börsenstrompreisen, konventioneller und regenerativer Stromerzeugung der 19. Kalenderwoche im Mai 2021 [ISE4].....	32
Abbildung 28: System Average Interruption Duration Index (SAIDI) für die Nieder- und Mittelspannung, Daten aus [BNA2].	33
Abbildung 29: Anwendungen für die Integration von Photovoltaik.....	34
Abbildung 30: Flächennutzung in Deutschland [FNR].....	35
Abbildung 31: Gebäudebestand in Mio., Daten aus [DENA], [IWU]	36
Abbildung 32: PV-Lösungen für Dach und Fassade (oben: Aufdachsysteme, unten: Integrierte PV).....	37
Abbildung 33: Umfrageergebnisse zum Neubau von Kraftwerken, Daten aus [Licht2].	39
Abbildung 34: Umfrageergebnisse zur Akzeptanz verschiedener Kraftwerkstypen [AEE3].	39
Abbildung 35: Reichweiten von Elektro- und Biodiesel-Fahrzeugen pro Hektar eingesetzter Fläche.....	41
Abbildung 36: Stromerträge von PV-Kraftwerken und Silomais pro Hektar eingesetzter Fläche.....	42
Abbildung 37: Prognostizierte Vollbenutzungsstunden für Stromerzeugung aus EE, Daten aus [ÜNB1].	43
Abbildung 38: Horizontale jährliche Globalstrahlungssumme in Deutschland, gemittelt über den Zeitraum 1981-2010 [DWD].....	45
Abbildung 39: Entwicklung der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration, der mittleren globalen Temperaturveränderung und der Sonnenaktivität (http://herdsoft.com/climate/widget/).	46
Abbildung 40: Schätzungen der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration und der Temperaturdifferenz in der Antarktis auf Basis von Eisbohrkernen [EPA]; Rot: zwei neuere CO ₂ -Messwerte des Mauna Loa Observatory [https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html].	47
Abbildung 41: Treibhauspotenzial der Stromerzeugung mit mono c-Si PV für Dach- und Freiflächenanlagen [UBA7].....	48
Abbildung 42: Treibhauspotenzial verschiedener Stromerzeugungstechnologien [UBA7].	48
Abbildung 43: Spezifische und absolute CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung in Deutschland [UBA6].....	49

Abbildung 44: Vermiedene Treibhausgasemissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2020 [UBA1].	49
Abbildung 45: Entwicklung des jährlichen PV-Zubaus für Deutschland und die restliche Welt, Zahlen von IHS, Solar Power Europe, Bloomberg NEF.	50
Abbildung 46: Energieflussbild 2021 für Deutschland, Angaben in Petajoule [AGEB2].	54
Abbildung 47: Importquoten für fossile und nukleare Primärenergieträger (www.umweltbundesamt.de).	55
Abbildung 48: Entwicklung der Kosten für die Bereitstellung der Primärenergie in Deutschland [ÖKO3].	55
Abbildung 49: Struktur des Endenergieverbrauchs nach Anwendungsbereichen für Deutschland im Jahr 2020, Zahlen aus [BMWK1].	56
Abbildung 50: Schematische Darstellung des Modells REMod (KW: Kraftwerk, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, [ISE3]).	57
Abbildung 51: Schematische Darstellung einer Residuallastkurve für Deutschland bei Stromversorgung mit 100 % EE, mit Erzeugern (+) und Lasten (-).	58
Abbildung 52: Entwicklung der globalen Stromerzeugung nach Technologien im Sky-Szenario; der Durchmesser der Tortendiagramme entspricht dem globalen Strombedarf [Shell].	59
Abbildung 53: IEA-Prognosen seit 2006 und tatsächliche Entwicklung des globalen jährlichen PV-Zubaus [Carb].	60
Abbildung 54: Stromertragsprofile von PV-Anlagen in verschiedenen Montagevarianten, berechnet mit der Software PVsol für einen überwiegend klaren Julitag am Standort Freiburg.....	61
Abbildung 55: Rechenbeispiel für den spezifischen Monatsertrag einer PV-Anlage am Standort Freiburg für südorientierte Module mit 30° Neigung (max. Jahresertrag) und 60° Neigung.	62
Abbildung 56: Verfügbarkeit von Kraftwerken [VGB].....	63
Abbildung 57: Treibhausgasemissionen von heutigen Fahrzeugen der Kompaktklasse in Abhängigkeit von der Fahrleistung [AGORA1].	64
Abbildung 58: Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit von Batteriekapazität und Leistung des	70
Abbildung 59: Gegenüberstellung der konventionellen und der netzdienlichen Betriebsführung [ISE7].	70
Abbildung 60: Spezifische Investitionskosten für verschiedene Elektrolyseurtechnologien (PEMEL: Membranelektrolyse, AEL: Alkalische Elektrolyse, HTEL: Hochtemperatur-Elektrolyse, [NOW]).	72
Abbildung 61: Technologien für Energiespeicher und -wandler mit heute erzielbaren Wirkungsgraden am Ende der Wandlerkette, ohne Kraft-Wärme-Kopplung (GT: Gasturbine, GuD: Gas- und Dampfturbine).....	73
Abbildung 62: Höchstspannungsnetz [VDE] und Gas-Fernleitungsnetz [Fern].	74
Abbildung 63: Installierte Leistung von Wasserkraftwerken in benachbarten Ländern, Zahlen aus [IHA].	75
Abbildung 64: 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.	76
Abbildung 65: Wichtige Stromerzeuger, -wandler und Speicher in einem klimaneutralen Energiesystem [ISE3]; COP: Coefficient of Performance.....	77
Abbildung 66: Begriffe der Stromerzeugung und des –verbrauchs.	86