



ENERGIEWENDE BAROMETER

2019

2019

DAS **BAROMETER** DER ENERGIEWENDE

- 5 Energiewende Barometer 2019
- 6 Endenergiebedarf 2050
- 8 Primärenergie und Strombedarf
- 10 Windenergie
- 12 Photovoltaik
- 14 Ausgleichskraftwerke
- 16 Power-to-X
- 18 Stationäre und mobile Batteriespeicher
- 20 Wärmesektor
- 22 Mobilitätssektor
- 24 Investitionstätigkeit
- 26 Geschäftsmodell Energiewende
- 28 Akzeptanz
- 30 Quellen
- 32 Impressum



**Prof. Dr.
Clemens Hoffmann**
Institutleiter Fraunhofer IEE

ENERGIEWENDE BAROMETER 2019

Mit dem »Barometer der Energiewende« bewertet das Fraunhofer IEE jährlich den Stand der deutschen Energiewende. Die hierfür ausgewählten Indikatoren beschreiben das Energiesystem in seinen verschiedenen technischen Dimensionen Endenergie, Windenergie, Photovoltaik, Ausgleichskraftwerke, Power-to-X, Batterien, Wärmesektor, Mobilitätssektor und Investitionstätigkeit. Auf Basis aktueller Ist-Werte (Dezember 2018) werden mit Hilfe unserer Szenario-Modellierung Zielwerte für 2050 berechnet und Zielpfade aufgezeigt, die eine Transformation des Energiesystems hin zu einer 100 % regenerativen Energieversorgung ermöglichen.

Das Barometer ist in folgende Kapitel gegliedert:

- **Endenergiebedarf 2050:** Prognosen über den zukünftigen Endenergiebedarf geben Aufschluss über die Energiemengen, die auf der Landesfläche Deutschlands aber teilweise auch im Ausland aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt werden müssen. Je nach Szenario können die erwarteten Bedarfe variieren.
- **Primärenergie und Strombedarf 2010-2030-2050:** Die Entwicklung des Primärenergiebedarfs und des Strombedarfs hin zu einem regenerativen Energiesystem bis 2050 zeigen grundsätzliche Veränderungen in der Energiegewinnung und Nutzung.
- **Windenergie:** Die Windenergie ist eine der beiden wichtigsten volatilen, erneuerbaren Erzeugungstechnologien in unserem zukünftigen Versorgungssystem.
- **Photovoltaik:** Sie ist die andere wichtigste volatile Erzeugungstechnologie in unserem regenerativen Energiesystem der Zukunft.
- **Ausgleichskraftwerke:** Ausgleichskraftwerke sichern eine durchgängige Leistungsdeckung und gleichen Defizite in der Erzeugung aus.
- **Power-to-X:** Durch die Wandlung von elektrischem Strom in ein energiereiches Medium (überwiegend Wasserstoff, Methan) lassen sich überschüssige Strommengen speichern und bei Bedarf wieder rückverstromen. Dies ermöglicht den Ausgleich von Leistungs- und Energieschwankungen auch über längere Zeiträume.

- **Batterien:** Kurzfristige Schwankungen der Residualleistung können durch elektrochemische Speicher ausgeglichen werden.
- **Wärmesektor:** Die zukünftig notwendige Entwicklung der installierten Leistung von Wärmepumpen, wird als Indikator zur Bewertung der Sektorenkopplung von Wärme und Strom herangezogen.
- **Mobilitätssektor:** Elektroautos kommen als neue elektrische Verbraucher hinzu und bilden ein Bindeglied zwischen dem Mobilitäts- und Stromsektor.
- **Investitionstätigkeit** und volkswirtschaftliche Bewertung: Aktuelle und zukünftige Investitionsvolumina in die verschiedenen technischen Komponenten des Energiesystems und die volkswirtschaftliche Bewertung der Energiesystemtransformation.

Die Szenarien wurden mit dem Simulationsmodell SCOPE des Fraunhofer IEE berechnet. SCOPE berücksichtigt die Importe und Exporte in die europäischen Nachbarländer, und garantiert, dass die Stromversorgung zu jedem Zeitpunkt und in jedem Land gewährleistet ist.

Rahmenbedingung für die Optimierung ist eine CO₂-Reduktion gegenüber 1990 um 95 % bis 2050. Außerdem wurde für den Strom eine ausgeglichene Netto-Importbilanz gewählt, wodurch sichergestellt wird, dass in Summe über ein Jahr der deutsche Strombedarf bilanziell in Deutschland erzeugt wird. Dieser Bedarf beträgt 1.000 TWh. Es wird zusätzlich angenommen, dass weitere 1.419 TWh an elektrischer Energie an sonnen- und windreichen Standorten außerhalb Deutschlands für die Herstellung flüssiger Treibstoffe erneuerbar erzeugt werden. Dem Szenario liegen Wetterdaten aus dem Jahr 2011 zugrunde.

» **Verschiedene Szenarien sind möglich.
Eine hohe Effizienz für Gebäudewärme
und Verkehr ist anzustreben.**

ENDENERGIEBEDARF 2050

Um die Frage nach der benötigten Energiemenge eines zukünftigen Energiesystems zu beantworten, müssen Verbrauchsentwicklungen prognostiziert werden. Soll der gesamte Energiebedarf in 2050 CO₂-neutral gestaltet werden, muss der gesamte Endenergiebedarf aus Strom, Wärme, Verkehr und stofflicher Nutzung bilanziert werden.

Der Wärmebedarf gliedert sich in die Verbrauchsgruppen Gebäudewärme, GHD-Prozesswärme (Gebäude, Handel, Dienstleistung) und Industriewärme. Als Stromsektor wird der herkömmliche Stromverbrauch bezeichnet. Der Verkehrssektor wird in Straßen- und Bahnverkehr und Flug- und Schiffverkehr eingeteilt. Die stoffliche Nutzung von Energieträgern wird in der Kategorie »nicht energetischer Verbrauch« bilanziert. Die entsprechenden zukünftig erwarteten Energiemengen können der Grafik entnommen werden. Je nach Szenario können die benötigten Energiemengen schwanken: Im Barometer 2018 wurde ein Endenergiebedarf von insgesamt 1.850 TWh ermittelt wohingegen im diesjährigen Barometer 2019 von einem Endenergiebedarf von 2.081 TWh ausgegangen wird [1-3].

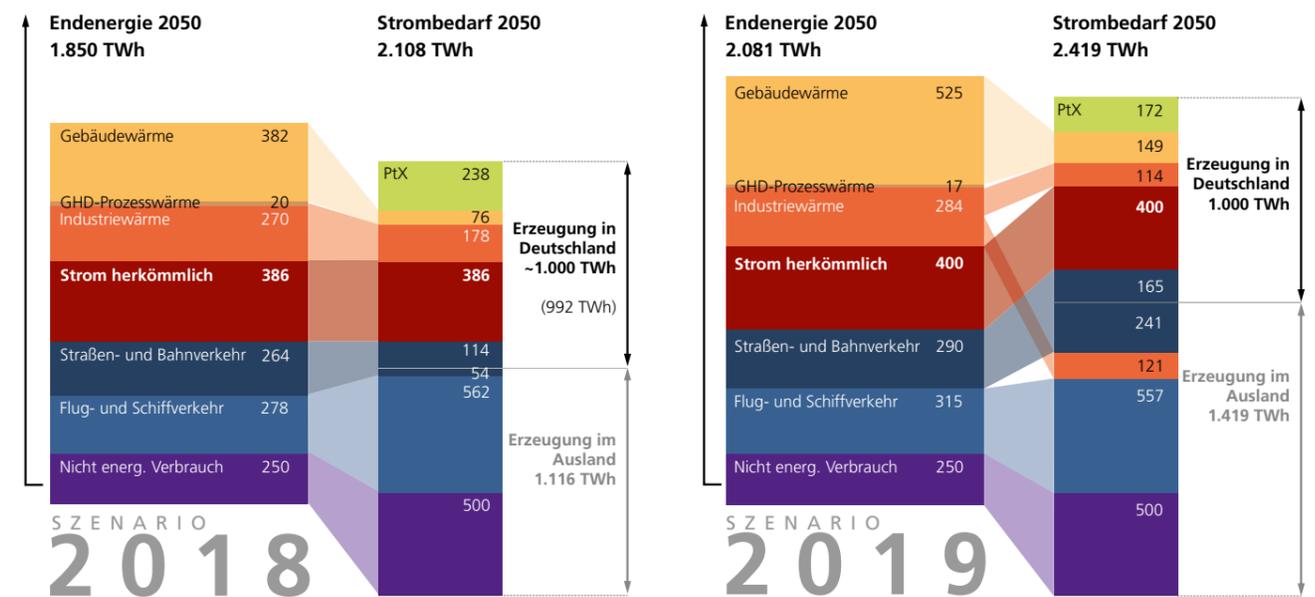
Unterschiede können je nach Effizienzscenario für Verkehr und Wärme entstehen. Wird bspw. von weniger Effizienz in Gebäuden, also weniger Sanierung ausgegangen, muss mehr regenerativ erzeugte Wärme zur Verfügung gestellt werden (Vgl. Szenario 2019 gegenüber Szenario 2018). Wichtig ist jedoch, dass heutige Entscheidungen im Zweifelsfall immer eine vollständige erneuerbare Versorgung ermöglichen, auch wenn ambitionierte Effizienzziele z.B. im Bereich der Gebäudesanierung oder im motorisierten Individualverkehr (wegen Nutzerpräferenzen) in den nächsten Dekaden verfehlt werden.

Die Art des Energieträgers hängt von der jeweiligen Endanwendung – Wärme, Strom, Gas, flüssige Treibstoffe – ab [4]. Im Vergleich zu heute werden zukünftig die Sektoren Wärme und Verkehr verstärkt über den Strompfad versorgt. Durch diese Sektorenkopplung können den volatilen erneuerbaren Erzeugungsspitzen neue flexible, elektrische Lasten gegenübergestellt und so das Residuumsignal (Differenz von Verbrauchs- und Erzeugungsleistung) abgeflacht werden. Der Großteil unseres zukünftigen Energiebedarfs wird dann in Form von Strom anfallen.

Die Strombilanz zum jeweiligen Energiebedarf in 2050 ist ebenfalls in der Grafik dargestellt. Der herkömmliche Stromverbrauch wird vollständig in der Strombilanz abgebildet (eigene Berechnungen).

Zur Deckung des Gebäudewärmebedarfs kann der benötigte Strombedarf aufgrund der Nutzung von Umweltwärme deutlich reduziert werden. Der Einsatz von Wärmepumpen bildet hier die entscheidende Koppeltechnologie für die Elektrifizierung des Wärmesektors. Damit lassen sich aus einem Teil Strom mit Hilfe von Umweltwärme vier Teile Wärme erzeugen. Ein Restbedarf an Industriewärme wird im Szenario 2019 über regenerativ hergestellte flüssige Brennstoffe (PtL) aus dem Ausland gedeckt.

Im Verkehr kann der Energieverbrauch durch Elektromobilität in den Stromsektor überführt werden. Wir gehen in unseren Szenarien von einem hohen Grad an Elektrifizierung des Straßenverkehrs aus [5-7]. Die übrigen Strecken werden mit Hybridfahrzeugen zurückgelegt, die über erneuerbar erzeugte Kraftstoffe angetrieben werden.



Überschüssiger Strom kann mit Hilfe von Power-to-X (PtX) in flüssiger Form oder als Gas gespeichert werden. Die Wandlungsverluste und der Anteil der als Gas bzw. flüssiger Kraftstoff eingesetzt wird sind in der Grafik separat unter PtX ausgewiesen. Der Anteil, der rückverstromt wird, fließt wiederum in eine der Verbrauchergruppen ein und wird nicht separat ausgewiesen.

Der Bedarf für alle direkten Stromanwendungen und Power-to-Gas muss in Deutschland erzeugt werden (etwa

1.000 TWh). Flüssige Treibstoffe die überwiegend im Flug- und Schiffverkehr oder stofflich genutzt werden, sind leicht transportier- und speicherbar und können an besseren Standorten im Ausland produziert werden.

Aufgrund von Wandlungsverlusten bei Power-to-Liquids ist der Strombedarf für die Herstellung der Treibstoffe größer als der flüssige Endenergiebedarf [8]. Im Ausland müssen dafür etwa 1.400 TWh Strom produziert werden.

» Das deutsche Energiesystem verbrauchte 2010 über 4.000 TWh fossile Primärenergie, davon wurden 70 % importiert.

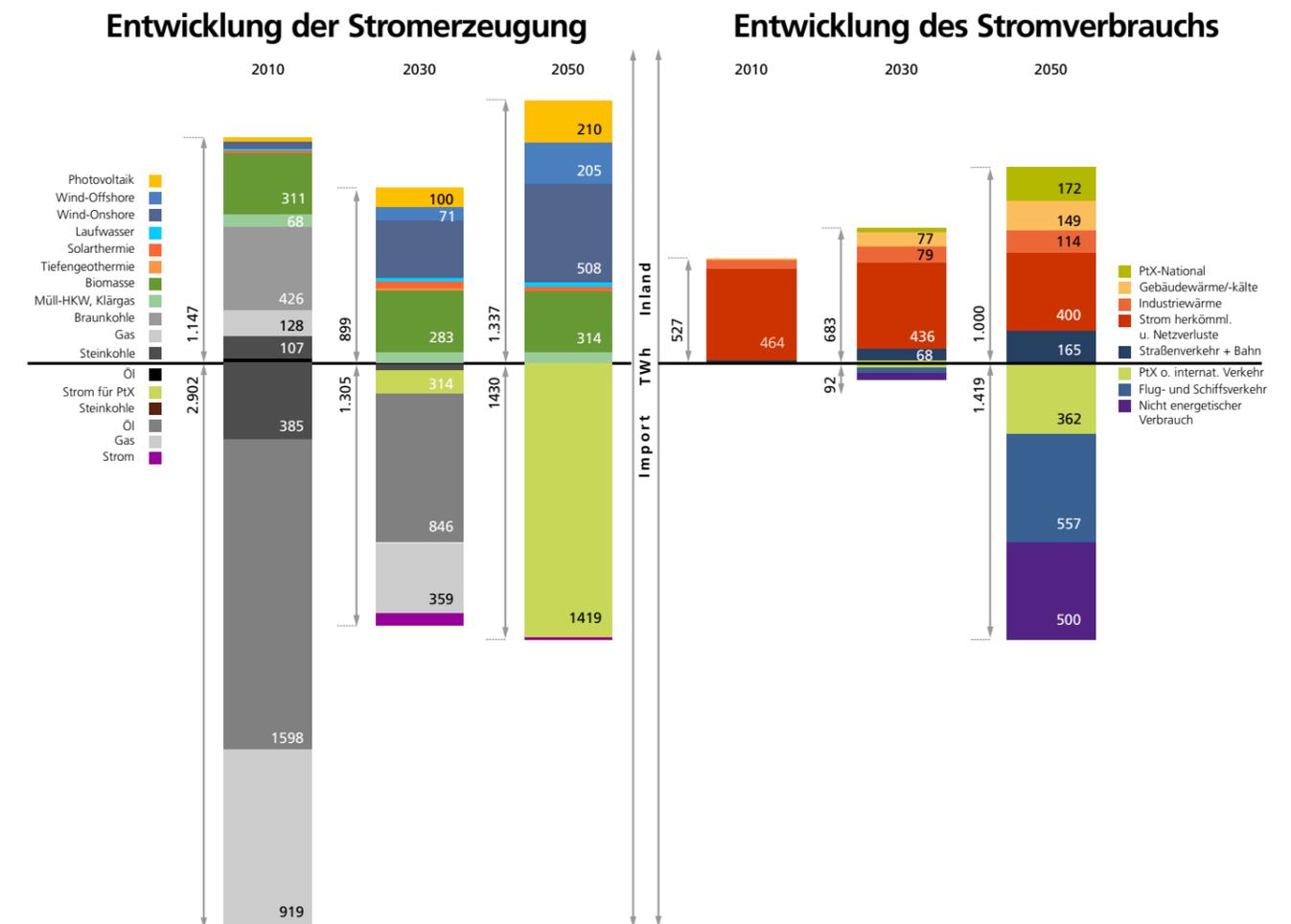
PRIMÄRENERGIE UND STROMBEDARF

Die Entwicklung der Primärenergie und des Stromverbrauchs sind stark geprägt durch die Umstellung auf ein regeneratives Energiesystem. In der Abbildung sind auf der linken Seite die Primärenergiebedarfe des gesamten Energiesystems, differenziert nach Energieträger, dargestellt. Auf der rechten Hälfte ist der dazugehörige Stromverbrauch in den unterschiedlichen Sektoren abgebildet.

Im Jahr 2010 verbrauchte das deutsche Energiesystem über 4.000 TWh fast ausschließlich fossile Primärenergie. Davon wurden 2.900 TWh importiert, was mehr als 70 % des Bedarfs entspricht [9]. Bis 2050 werden die fossilen Energieträger durch ausschließlich erneuerbare Energieerzeugung ersetzt. Die Primärenergie wird hauptsächlich aus Wind-Onshore und -Offshore, sowie Photovoltaik (PV) und Biomasse gewonnen werden. Solarthermie, Geothermie und Laufwasser werden lediglich eine untergeordnete Rolle spielen (vgl. linke Seite der Grafik). Die Energieerzeugung aus den einzelnen Quellen zeigen die durch SCOPE optimierten Szenario-Ergebnisse und können der Grafik entnommen werden [61; Annahmen

aus: 1,3-5,7,10-12]. Langfristig verringert sich der Primärenergiebedarf um mehr als 30 % und beträgt noch etwa 2.800 TWh im Jahr 2050. Importiert werden dann überwiegend nur noch Power-to-Liquids (PtL) [61]. Diese sind für ein vollständig CO₂-neutrales Versorgungssystem wichtig, sind aber um den Faktor 4 geringer als heutige fossile Importe. Aufgrund der Wandlungsverluste von Strom in flüssige Treibstoffe, muss dafür im Ausland mehr Strom erzeugt werden. Dies spiegelt sich in dem relativ hohen Strombedarf für PtX wieder.

Bei der Entwicklung des Stromverbrauchs – auf der rechten Seite der Grafik – ist ersichtlich, dass Strom der Hauptenergieträger des zukünftigen Energiesystems sein wird. Der zukünftige Stromverbrauch wird insgesamt stark ansteigen, vor allem durch die beiden neu dazukommenden Sektoren Verkehr und Wärme. Die direkte Stromnutzung bringt hohe Effizienzgewinne. Der Stromverbrauch lag im Jahr 2010 bei 527 TWh [9] und wird zukünftig nach unserem diesjährigen Szenario auf etwa 2.400 TWh ansteigen [61].



» Wind-Onshore-Ausbau bricht wegen Klagen und Abstandsregelungen ein.

WINDENERGIE

Für jede Dimension des Barometers der Energiewende wird ein repräsentativer Indikator gewählt, der ihre Entwicklung aufzeigen soll. Bei der Windenergie sind dies die on- und offshore installierten Leistungen. Das Monitoring der technischen Dimensionen wird in zwei Grafiken visualisiert. Der Barometerbalken zeigt mit dem Füllstand den Stand der Entwicklung des Ausbaus relativ zu seinem Zielwert an. Der Barometerbalken zeigt mit dem Füllstand den Stand der Entwicklung des Ausbaus relativ zu seinem Zielwert an. Der Zielwert der nach unserem Szenario bis 2050 erreicht werden muss, ist am rechten Ende als absolute Zahl aufgetragen. Alle eingetragenen Werte beziehen sich relativ auf den Zielwert der Installationsleistung. Es werden außerdem noch das Referenzjahr 2011, der aktuelle Stand (Dezember 2018) und das Stützjahr 2030 dargestellt. Die Jahreszahl steht unterhalb des Balkens, die dazugehörige Installationsleistung wird oberhalb angezeigt. Der aktuelle Stand wird durch die Füllung dargestellt, der Stand im Referenzjahr 2011 mit einer grob gestrichelten Linie und das Stützjahr 2030 mit einer fein gestrichelten Linie.

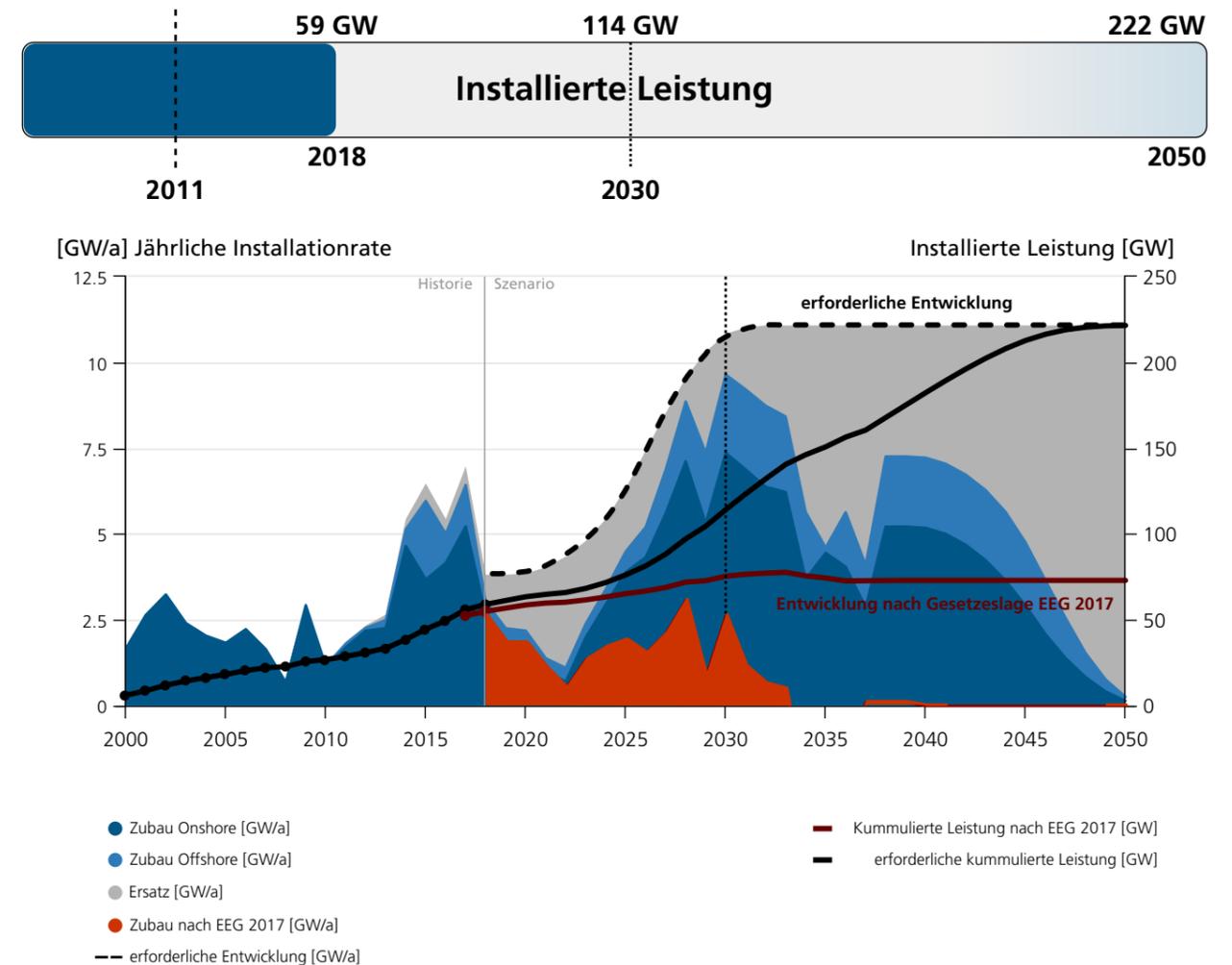
Laut unserem Barometer-Szenario 2019 müssen bis 2050 insgesamt 222 GW an Wind-onshore- und Wind-offshore-Leistung installiert werden. Im Dezember 2018 waren 59 GW installiert [13]. Um den hohen neuen Sektorkopplungs-Stromverbrauch decken zu können und zusätzlich die Effort-Sharing-Regulation-Sektorenziele zu erreichen, werden bis 2030 insgesamt 114 GW benötigt (EU -45 % THG-Emissionen und Sektorziele im Bereich Gebäudewärme und Verkehr in Deutschland). Diese setzen sich aus 97 GW Onshore- und 17 GW Offshore-Leistung zusammen [61].

Die zweite Grafik darunter stellt die zeitliche Entwicklung dar. Die Flächen zeigen den jährlichen Netto-Zubau, sowie den Ersatz und sind auf der linken Achse aufgetragen.

Der Übergang zwischen den historischen Ist-Werten [15] und unseren Szenario-Werten ist durch die graue Vertikale gekennzeichnet. Langfristig soll ein Brutto-Zubau von 11,1 GW/a bei einer Anlagenlebensdauer von 20 Jahren [16] erreicht werden. Die aktuellen Zubauraten sind gemessen an unseren Szenariorechnungen wesentlich zu niedrig. In 2018 wurden lediglich 3,8 GW Brutto-Leistung installiert (Summe aus Zubau und Ersatz) [13]. Grund für den aktuellen Einbruch des Wind-Onshore-Ausbaus, der wichtigsten Säule der Energiewende, sind Klagen und Abstandsregelungen. Die Ausnutzung des Offshore-Potenzials wird zukünftig wichtig. In 2050 werden laut unserem Szenario 49 GW Leistung offshore und 173 GW onshore benötigt.

Die durchgezogenen Markierungslinien zeigen die kumulierten installierten Leistungen. Sie sind auf der rechten Achse aufgetragen. Bis zum Jahr 2050 müssen laut unserer Szenario-Rechnung 222 GW installiert sein. Der Zubaupfad wurde nach dem Kriterium möglichst gleichmäßiger Installationsaktivitäten optimiert, die sich aus (Netto-) Zubau und dem Ersatz alter Anlagen zusammensetzen. Das bedeutet, dass die Schwankungen im Markt möglichst gering gehalten werden. Außerdem soll ein Rückgang der Installationsrate verhindert werden, um die betriebswirtschaftliche Belastung bei Herstellern und Installateuren durch ein Überschwingen des Markts zu vermeiden.

In rot ist der jährliche Netto-Zubau nach EEG 2017 und die daraus resultierenden kumulierten Leistungen (gepunktete Linie) eingezeichnet. Würden wir dem EEG-Zubau folgen, wären in 2050 nur 73 GW installiert [17]. Auf Basis unserer Szenarien sehen wir dies als deutlich zu gering an.



» Um das Ausbauziel zu erreichen, sind höhere Ausschreibungsmengen nötig und die Verzögerungen bei Wind-onshore zu kompensieren.

PHOTOVOLTAIK

Der gewählte Indikator für die Photovoltaik (PV) ist die installierte Leistung. Der Barometerbalken zeigt den aktuellen Füllstand (Dezember 2018) von 46 GW relativ zu unserem Szenario-Zielwert in 2050 von 215 GW [15]. Die gestrichelte Linie zeigt den Stand der Installation in 2011 als Referenzwert. Im Stützjahr 2030 werden 104 GW PV-Leistung benötigt, um den hohen neuen Sektorkopplungs-Stromverbrauch (Wärmepumpen, E-Mobilität) decken zu können und zusätzlich die Klimaziele zu erreichen (Effort-Sharing-Regulation-Sektorenziele im Bereich Gebäudewärme und Verkehr in Deutschland und in der EU -45 % THG-Emissionen).

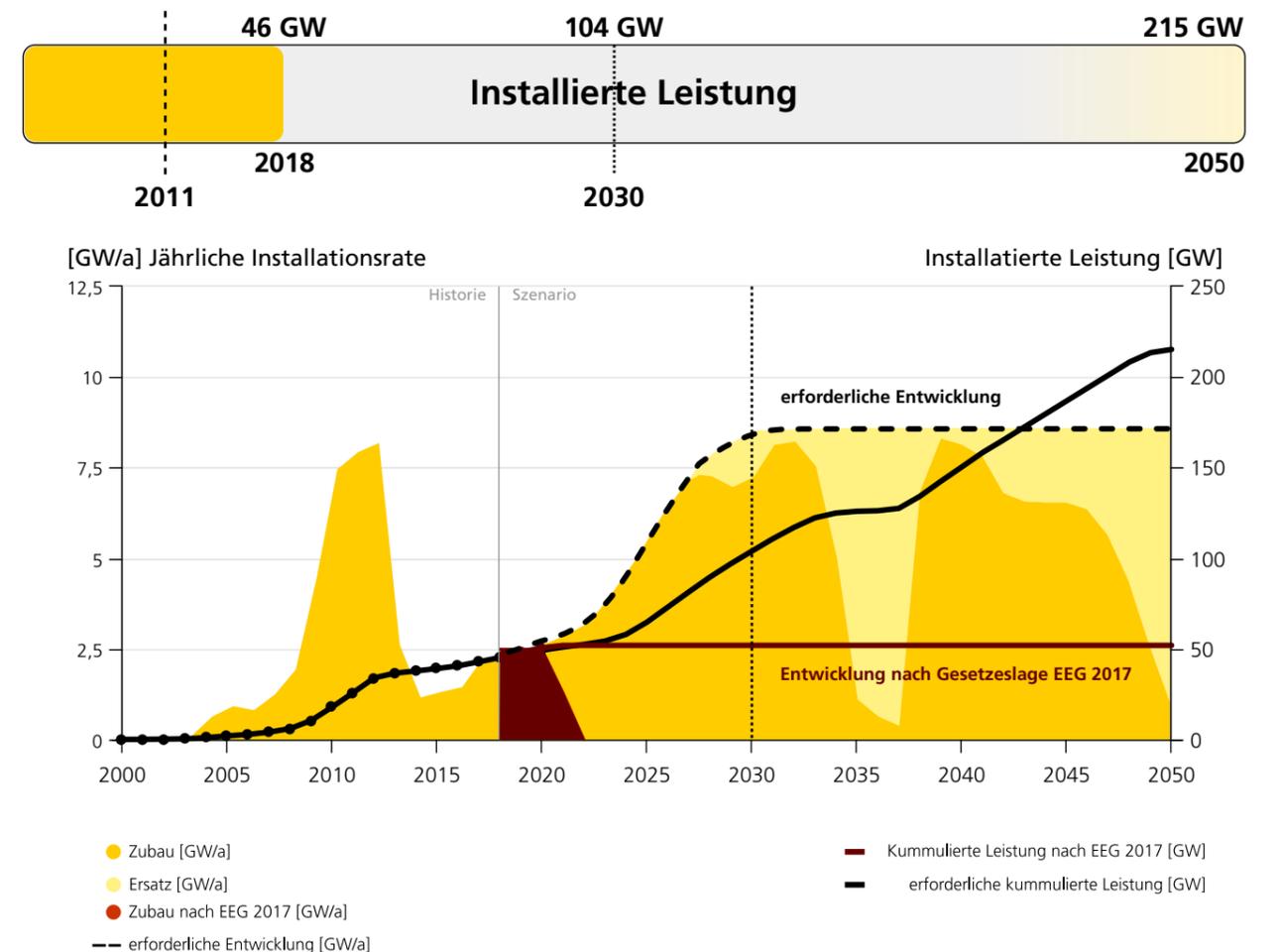
In der Grafik darunter ist die zeitliche Entwicklung dargestellt. Die historischen Werte stammen aus den vom BMWi veröffentlichten Zeitreihen [15] und sind durch die graue vertikale Linie von unseren zukünftigen Szenario-Werten getrennt. Die Flächen zeigen den jährlichen Zubau und sind auf der linken Achse aufgetragen. Der Netto-Zubau ist in dunkelgelb gekennzeichnet, der Ersatz in hellgelb. Langfristig müsste sich ein Marktvolumen von 8,6 GW pro Jahr einstellen, um bei einer Anlagenlebensdauer von 25 Jahren [18] die nach unserem Szenario notwendige Zielinstallation von 215 GW zu erreichen [61]. In der Vergangenheit wurden bereits ähnlich hohe jährliche Installationsraten erreicht [15]. Momentan sind die jährlichen Installationen jedoch deutlich zu gering. In 2018 wurden lediglich 2,3 GW Brutto-PV-Leistung installiert (Summe aus Zubau und Er-

satz) [15]. Zusätzlich müssen höhere Ausschreibungsmengen für PV-Freiflächen genutzt werden, um die aktuellen Verzögerungen beim Wind-Onshore Ausbau zu kompensieren.

Der Entwicklungspfad wurde nach denselben Kriterien wie bei der Windenergie optimiert (siehe Kapitel Windenergie). Demnach sollten wir ziemlich bald höhere Installationsraten erzielen, damit das Überschwingen des Marktes möglichst gering gehalten werden kann.

Die durchgezogenen Linien beziehen sich auf die rechte Achse. Sie zeigen die kumulierten Installationen und bilden damit das Integral der Fläche ab. Der Zielwert entspricht dem Zielwert aus dem Barometerbalken und liegt laut unserem Szenario bei 215 GW. Mit dieser installierten Basis ließen sich etwa 210 TWh Energie gewinnen. Dabei werden PV-Freiflächen und Auf-Dach-Anlagen vergleichbar hohe Anteile liefern.

In rot ist der Soll-Zubau nach EEG 2017 dargestellt [19]. Die im EEG festgelegte harte Grenze von 52 GW würde bereits im Jahr 2022 erreicht werden und dadurch einen weiteren geförderten Zubau verhindern. Würden wir dem Soll-Zubau des EEG 2017 folgen, hätten wir im Jahr 2050 nur 52 GW installiert. Unser Szenario zeigt einen Bedarf an installierter Leistung, der etwa vier Mal so hoch ist.



» In 2050 sollen Gaskraftwerke ausschließlich mit erneuerbar erzeugtem Gas betrieben werden.

AUSGLEICHSKRAFTWERKE

Durch den steigenden Ausbau der volatilen erneuerbaren Energien nehmen Erzeugungsschwankungen zu. Einerseits kann durch Demand-Side-Management der flexible Verbrauch an die Erzeugung angepasst werden, andererseits müssen Ausgleichskraftwerke dafür sorgen, dass auch bei Erzeugungsdefiziten ausreichend Leistung bereitgestellt werden kann, um den Bedarf zu jedem Zeitpunkt zu decken. Der thermische Kraftwerkspark in Deutschland in 2018 ist im linken Balken dargestellt. Kernenergie- und Mineralöl-Kraftwerke stellen den kleineren, Kohle- und Gaskraftwerke den größten Anteil der installierten Leistung bereit [20].

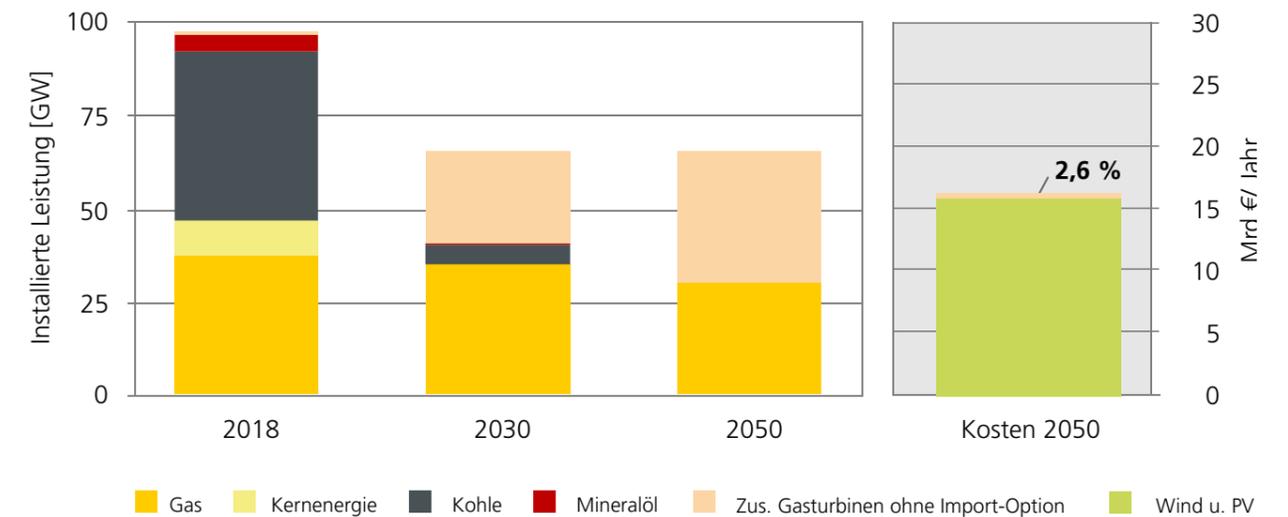
In 2050 sollen ausschließlich Gaskraftwerke installiert sein, die mit erneuerbar erzeugtem Gas betrieben werden. Die Frage nach der notwendigen Installationsleistung ist nicht einfach zu beantworten. Bei der Auslegung des Ausgleichskraftwerks geht es im Kern darum, die Wahrscheinlichkeit für einen signifikanten Einbruch (50 Prozent und mehr) der Erzeugungsleistung über einen längeren Zeitraum (Tage, Wochen) und über ein größeres Gebiet (Durchmesser 500 km und mehr) zu bewerten. Ein solches Ereignis ist bei dem durch die erneuerbare Erzeugung bestimmten Energieversorgungssystem ein sehr seltenes Wetterereignis. Aufgrund der angenommenen Großräumigkeit des Ereignisses ist dabei auch der Ausgleich des Leistungsdefizits über Ländergrenzen nicht möglich.

Die niedrige Wahrscheinlichkeit eines solchen Ereignisses ist in Beziehung zu setzen mit der Performanz-Güte des deutschen Energiesystems, die nur wenige Minuten Ausfall pro Person und Jahr beträgt. Bei der Bewertung der tolerierbaren Wahrscheinlichkeit für ein solches, extremes, systemrelevantes Wetterereignis muss der Betrachtungszeitraum über 10 bis 100 Jahre gespannt werden. Metho-

disch kann die Bewertung solcher Ereignisse nicht aus den verfügbaren Zeitreihen, die nur für wenige Jahre in der jüngeren Vergangenheit zur Verfügung stehen, gewonnen werden. Sie muss aus grundsätzlichen Überlegungen zur Auftrittswahrscheinlichkeit meteorologischer und geologischer Extremereignisse resultieren.

Beantwortet man die Frage nach der notwendigen Ausgleichsleistung szenario-basiert unter Berücksichtigung lediglich eines Wetterjahres (hier 2011), zeigen die Szenarioergebnisse für Deutschland im europäischen Verbundnetz einen Bedarf an Ausgleichsleistung im Zieljahr 2050 von 30 GW. Sind Leistungsimporte während der Defizitzeiten nicht möglich, ergibt sich ein Bedarf von 66 GW [21]. Es müssten dann zusätzlich 36 GW Leistung an Gaskraftwerken installiert werden, um unabhängig von Importmöglichkeiten den Leistungsbedarf in Deutschland selber zu decken. Im betrachteten Stützjahr 2030 wird es bereits keine Kernenergie mehr geben, bis Ende 2022 werden alle Kernkraftwerke nach dem Atomgesetz stillgelegt. Es wird allerdings noch einen Restanteil an Kohlestrom geben und auch die Gaskraftwerke werden in 2030 teilweise noch mit fossilem Gas betrieben.

Betrachtet man die Kosten, die in 2050 durch die zusätzlichen Gaskraftwerke von 36 GW entstehen würden, betragen diese etwa 0,5 Mrd € pro Jahr für Abschreibung der Investitionen über 30 Jahre ohne Berücksichtigung der Betriebskosten [21]. Bezogen auf die jährlichen Investitionskosten für den Ersatz der Windenergie- und Photovoltaikanlagen in 2050 (siehe Kapitel Investitionstätigkeit), liegt der Anteil der Kosten für die zusätzlichen Gaskraftwerke bei gerade einmal 2,6 Prozent.



» Ein frühzeitiger Markthochlauf ist Bedingung, um die sehr hohen Leistungen erreichen zu können.

POWER-TO-X

Für das Monitoring von Power-to-X (Power-to-Gas und Power-to-Liquid) ist die installierte elektrische Leistung der Elektrolyseure die von uns gewählte Maßeinheit. Die elektrolytische Herstellung von Wasserstoff dient als Grundlage für die Langzeitspeicherung von Energie. Die Wachstumsrate der Elektrolyseleistung stellt den ersten Gradmesser der Einführung dieser Speichertechnologie dar. Der Barometerbalken zeigt, dass wir uns noch in der Anfangsphase relativ zu dem Szenario-Zielwert von 39 GW bis 2050 befinden. Ende 2018 waren lediglich 0,03 GW installiert [22; 63].

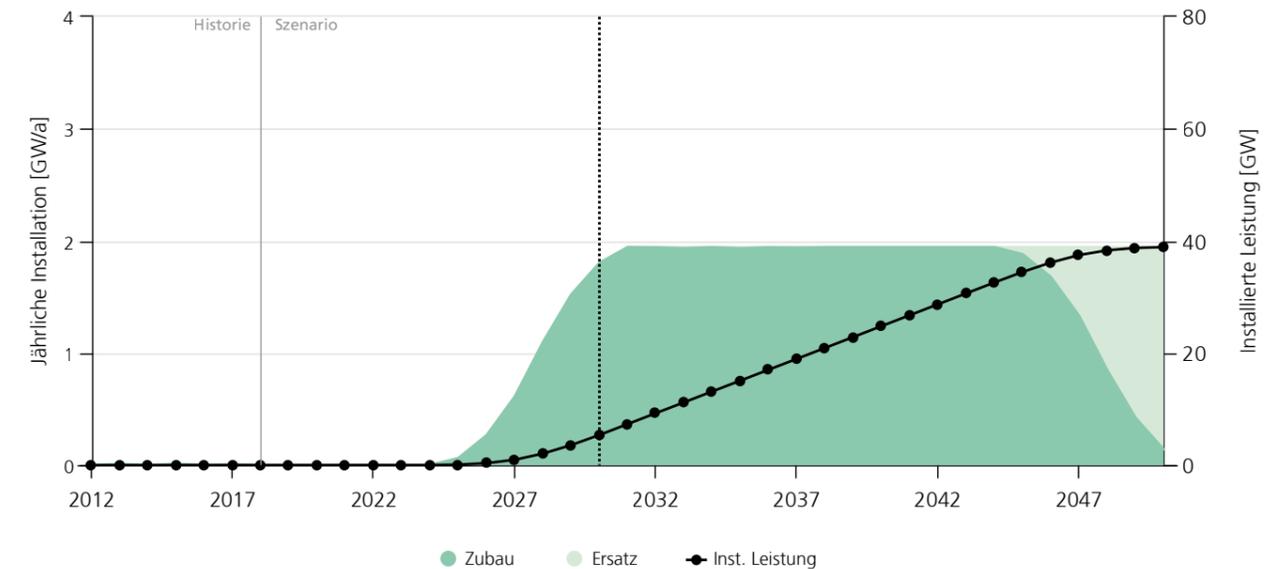
Die untere Grafik zeigt die zeitliche Entwicklung von Power-to-X. Die Flächen beziehen sich auf die linke Achse und stellen den jährlichen Zubau dar [61; 64]. Langfristig sollten rund 2 GW pro Jahr brutto (Ersatz plus Neuinstallation) zugebaut werden. Unser Zubaupfad wurde nach den gleichen Kriterien wie für die Windenergie optimiert (siehe Kapitel Windenergie). Die schwarze gepunktete Markierungslinie bildet die kumulierte installierte Leistung ab und bezieht sich auf die rechte Achse. Sie endet bei 39 GW, dies entspricht dem aus unserem Szenario errechneten Bedarf an Power-to-X Leistung im Jahr 2050.

Um auf die notwendige Installationsleistung zu kommen, müssen wir die Anfangsphase der Marktentwicklungs-

kurve überwinden und höhere jährliche Installationsraten erzielen. Dies kann zum einen über Technologieförderung, zum anderen über eine Marktanreizung erreicht werden. Ein frühzeitiger Markthochlauf ist in jedem Fall die Bedingung um die langfristig notwendigen sehr hohen Leistungen erreichen zu können.

Laut unserem Szenario sollen bis 2030 bereits 5 GW Elektrolyseleistung installiert sein. Es wird ein Zubau an Reaktorleistung für die nachgeschaltete Synthese benötigt. Insbesondere sind dies Methan, Methanol und höhere Alkane. Die genauen Mengengerüste sind noch Gegenstand aktueller Szenarienrechnungen. Für die nationale PtG- und PtL-Erzeugung bestehen auch langfristig ausreichend CO₂-Quellen beispielsweise aus Industrie, Klärgas, Biomethan und Abgasstrom der Ausgleichs-Kraftwerke.

Deutlich größer im Verhältnis zur nationalen PtL/PtG Erzeugung ist der PtL-Importbedarf für Range-Extender im Straßenverkehr, für den internationalen Flug- und Schiffsverkehr und die nicht-energetische Nutzung. Dieser Bedarf verbleibt trotz einer Maximierung der direkten Stromnutzung. Auch hierfür bedarf es einem frühzeitigen Markthochlauf.



» Der Markthochlauf für Batterien wird durch die E-Mobilität und PV-Systeme bestimmt.

STATIONÄRE UND MOBILE BATTERIESPEICHER

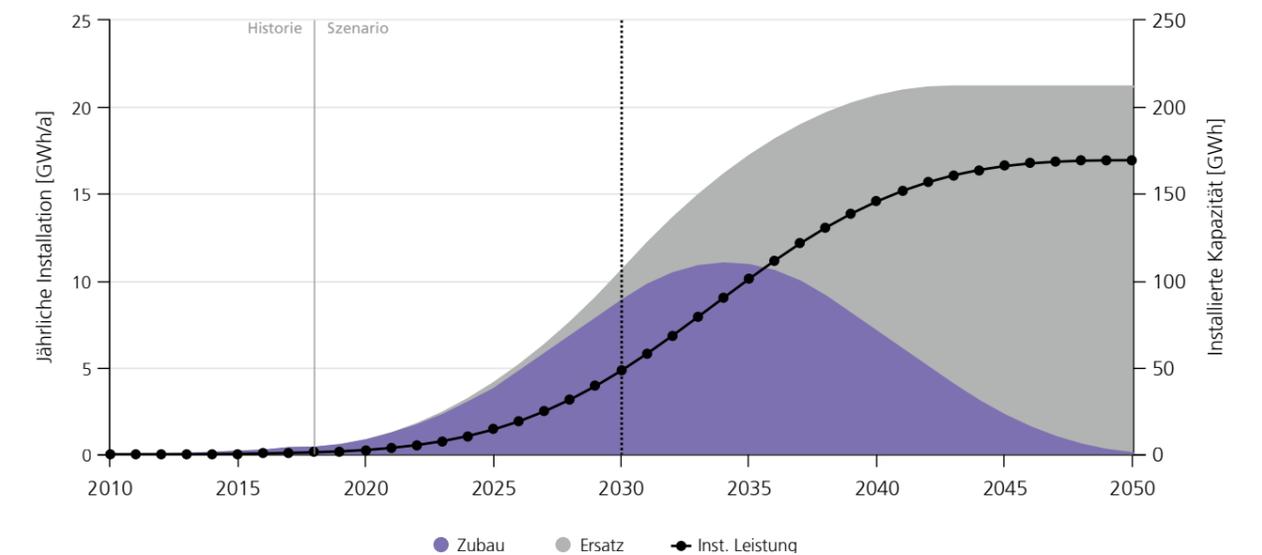
Neben Power-to-X monitoren wir als zweite Speichertechnologie die elektrochemischen Batteriespeicher. Die Messgröße ist die installierte Kapazität aller stationären und PV-Batterien. Ende 2018 waren 1,2 GWh Speicherkapazität in Deutschland installiert, wie im oberen Barometerbalken zu sehen ist [23–25; 62]. Bis 2050 müssten unserer Szenario-Rechnung zufolge 169 GWh und bis 2030 etwa 48 GWh installiert werden, um unseren Speicher- und Ausgleichsbedarf zu befriedigen.

Aus Investment-Sicht stellt sich die Frage, wie sich stationäre und PV-Batteriekapazitäten zu den Batteriekapazitäten in der Elektromobilität verhalten. Der Bereich der Batteriekapazität in der Elektromobilität ist gegenüber dem stationären Bereich (insbesondere PV-Eigenstrom) in 2050 um ca. ein 10-faches größer und wird den Speichermarkt dominieren (Vgl. Zielwerte des oberen und unteren Barometerbalkens: 169 GWh zu 1.590 GWh) [61].

Bereits heute ist die installierte Batteriekapazität im Bestand der Elektroautos und der Plug-In-Hybriden mit 4,9 GWh etwa 4-mal größer als die Speicherkapazität der stationären Batterien mit 1,2 GWh [26; 61; 65; 66]. Dies wird beim Vergleich der Füllstände der beiden Barometerbalken ersichtlich. Marktbestimmend werden also die Batterien für Elektrofahrzeuge und nicht die stationären Batterien sein. Aus dem gigantischen Potenzial für Batterien folgt die wichtige industriepolitische Forderung für die Errichtung von Produktionsstätten für Batterien in Deutschland und in Europa.

Aus der mittleren Grafik kann die zeitliche Entwicklung der stationären Batteriespeicher entnommen werden. Historische Werte werden durch die graue Vertikale von unseren Szenario-Werten getrennt. Die lila Fläche zeigt den jährlichen Netto-Zubau an Kapazität. Die graue Fläche bildet den Kapazitätsersatz, beide Flächen gestapelt zeigen den jährlichen Brutto-Zubau. Der optimierte Zubaupfad beruht auf den gleichen Kriterien wie die Windenergie (siehe Kapitel Windenergie). Dadurch soll ein möglichst marktfreundlicher Zubau erreicht werden bei dem die Änderungen der jährlichen Installationsrate möglichst gering sind und sowohl ein Überschwingen des Marktes als auch ein Rückgang der Installationsraten vermieden werden sollen. Die gepunktete Linie zeigt die kumulierten installierten Leistungen. Sie bildet somit das Integral der jährlichen Netto-Installation, die als lila Flächen dargestellt sind.

Aus energiesystemtechnischer Sicht sehen wir zukünftig einen Bedarf an Batterien. PV-Eigenstromspeicher können zukünftig im Zuge der Digitalisierung auch Systemdienstleistungen für das Gesamtsystem übernehmen. Der Markthochlauf für Batterien wird durch die Elektromobilität und PV-Systeme bestimmt. Allerdings ist die Schwankungsbreite bei der Festlegung des Zielwerts relativ groß. Die Batteriekapazität kann leicht durch andere Verschiebungstechnologien wie beispielsweise Elektrolyseure, Wärmepumpen, Ausgleichskraftwerke oder Elektromobilität verdrängt werden.



» Dezentrale Wärmepumpen versorgen zukünftig Einzelgebäude und Großwärmepumpen speisen Wärmenetze.

WÄRMESEKTOR

Der Wärmesektor ist von allen Sektoren der größte Emittent von CO₂. Das CO₂-Verringerungspotenzial ist hier somit am größten und eine Effizienzsteigerung besonders wichtig. Die Dekarbonisierung ist sowohl auf Verbraucher-, als auch auf Erzeugerseite notwendig. Auf Verbraucherseite bedeutet dies Effizienzmaßnahmen, wie beispielsweise die energetische Gebäudesanierung, auf Erzeugerseite die Überführung der Heizaggregate in den Strompfad, in der Hauptsache durch die Installation von Wärmepumpen. Beide Entwicklungen sind nicht entkoppelt voneinander zu betrachten. Eine bessere Gebäudedämmung erlaubt eine Verringerung der Vorlauftemperaturen für das Heizungssystem, was sich wiederum positiv auf den Wirkungsgrad der Wärmepumpe und somit die benötigten Installationsleistungen auswirkt.

Repräsentativ für das Monitoring des Wärmesektors wurde die installierte elektrische Leistung von Wärmepumpen gewählt. Mit diesem Indikator wird nicht der gesamte Sektor erfasst, aber er bildet eine Messgröße, über die wir abschätzen, wie wir mit der Sektorenkopplung und der Elektrifizierung des Wärmebedarfs vorankommen.

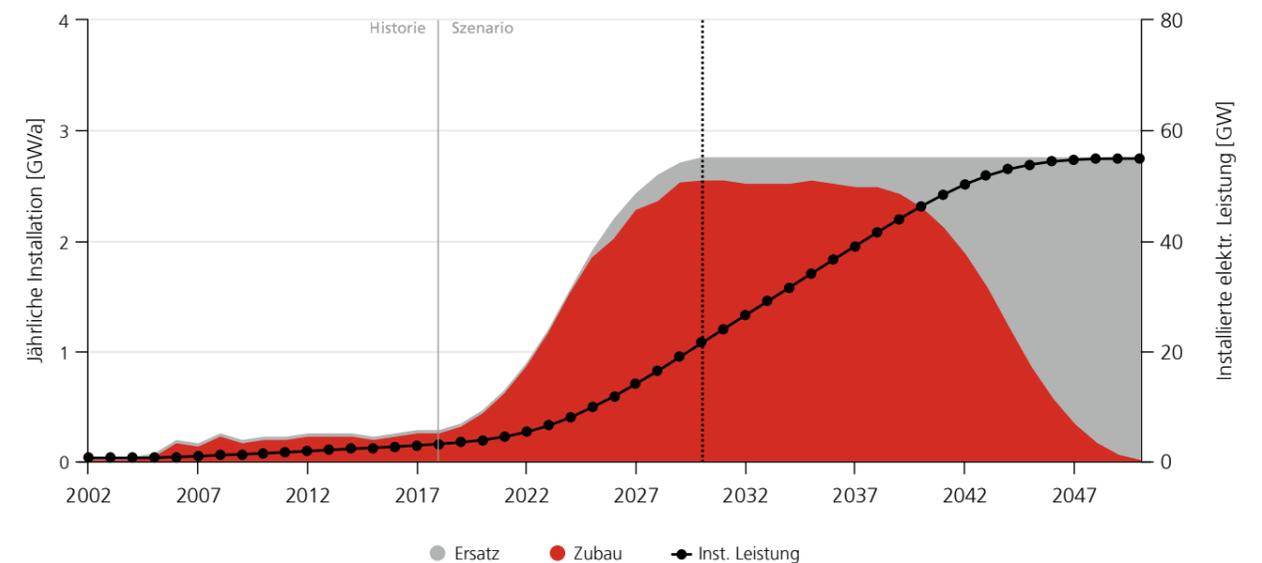
Der Barometerbalken zeigt den Zielwert aus unserem Szenario von 55 GW installierter elektrischer Leistung in 2050. Ende 2018 waren in Deutschland etwa 3,1 GW installiert [15, 27]. Bis 2030 müssen laut unserem optimierten Szenario bereits 22 GW installiert sein, damit die nationalen Klimaziele nach EU-Klimaschutzverordnung (ESR) im Bereich Gebäudewärme erreicht werden.

Die zeitliche Entwicklung der installierten Leistung ist in der unteren Grafik dargestellt. Die Flächen zeigen den jährlichen Zubau und Ersatz der Installation, die Werte be-

ziehen sich auf die linke Achse [15, 28]. Historische Werte sind von den modellierten zukünftigen Soll-Werten durch die graue Senkrechte getrennt. Der optimierte Zubaupfad folgt den gleichen Kriterien wie die anderen Technologien (siehe Windenergie). Die Werte der schwarzen, gepunkteten Linie beziehen sich auf die rechte Achse. Sie zeigt die kumulierten elektrischen Leistungen und bildet somit das Integral der roten Flächen ab. Aktuell sind die Installationsraten von Wärmepumpen zu niedrig. Besonders im Gebäudebereich sollten auf Grund der Trägheit des Sektors die Installationsraten zeitnah auf jährlich etwa 2,8 GW gesteigert werden [61]. Heute eingebaute Heizungssysteme verbleiben für etwa 30 Jahre im Gebäudebestand und sollten daher möglichst ab sofort in den Strompfad gelenkt werden.

Dezentrale Wärmepumpen, und dabei insbesondere Luftwärmepumpen sind die zentrale Heiztechnologie im Massenmarkt des Einfamilienhauses und machen in Summe langfristig ca. 62 % der Gebäudewärme aus [61]. In energetisch schlechteren Gebäuden sind Anpassungen von Heizkreis und ggf. Heizkörper möglich. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit im anlassbezogenen Kesselsanierungsfall ist die Planbarkeit der zukünftigen Preisentwicklung von Strom und fossilen Brennstoffen.

Für die Versorgung von Wärmenetzen werden Großwärmepumpen die zentrale Technologie sein [29]. Mit zunehmender Temperaturabsenkung werden diese immer effizienter werden. Entscheidend für den Betrieb von solchen Großwärmepumpen ist eine Reduktion der arbeitsbezogenen Stromkostenbestandteile. Die Einführung eines CO₂-Preises reicht hier nicht aus.



Fraunhofer IEE, 2019

» Der Markthochlauf der E-Mobilität steigt viel zu langsam, frühestens 2020 ist ein Sprung zu erwarten.

MOBILITÄTSSEKTOR

Der Mobilitätssektor befindet sich in einer Zeit des Wandels. Die Umstellung auf nachhaltige Antriebsarten stellt einen wichtigen Aspekt dar, um Emissionen zu senken und Belastungen durch Feinstaub zu reduzieren. Unser Indikator zur Bewertung dieser Entwicklung ist die Anzahl der zugelassenen Elektroautos und Hybridautos. Elektroautos fahren rein elektrisch getrieben. Plug-In Hybride verfügen neben einem Elektromotor, der das Fahrzeug direkt antreiben kann, über einen weiteren Verbrennungsmotor. Dieser kann das Fahrzeug entweder ebenfalls direkt antreiben (Parallel-Hybrid), oder aber lediglich als Energiequelle für die Batterie dienen (serieller Hybrid). Sowohl bei Plug-In Hybriden als auch bei Elektroautos kann die Batterie extern über einen Netzstecker aufgeladen werden [30].

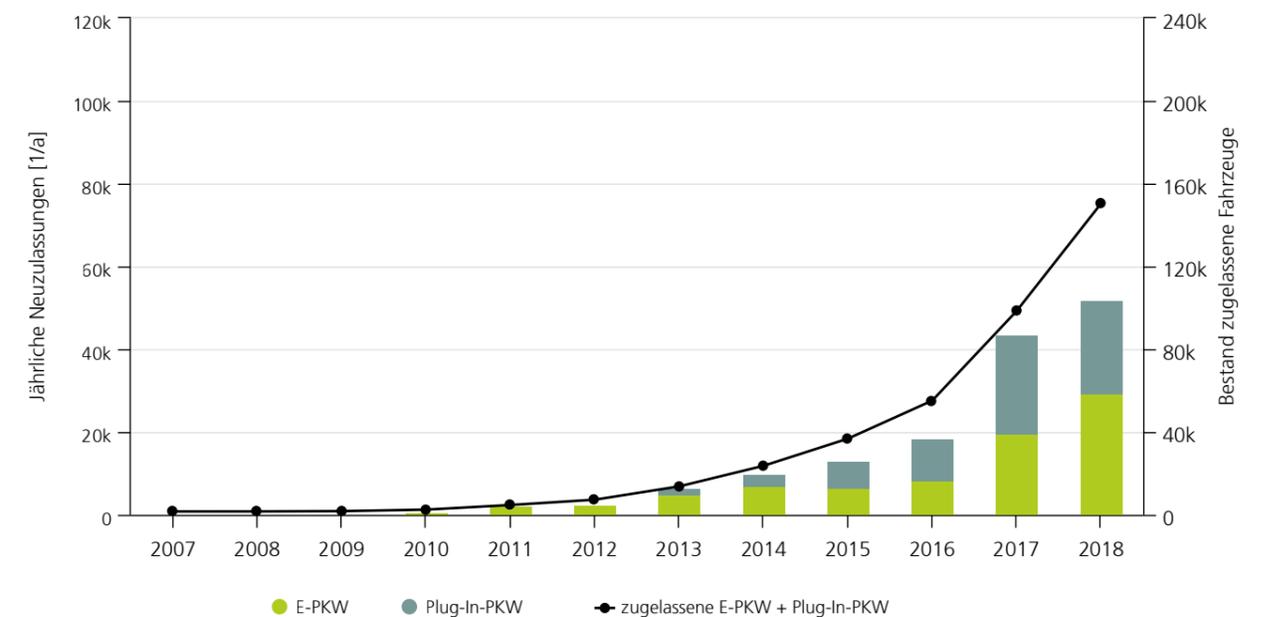
Der Füllstand des obersten Barometerbalkens zeigt den aktuellen Bestand (Dezember 2018) von 150.000 PKWs mit Strombezug (Elektroautos + Plug-In-Hybride) [31]. In unserem Szenario rechnen wir mit einer starken Elektrifizierung des Straßenverkehrs und gehen von circa 40 Millionen Bestandsfahrzeugen in 2050 aus. Die Bundesregierung hat das Ziel von einer Millionen Elektroautos bis 2020 revidiert [32]. Bis 2030 werden laut unserem Szenario 12 Mio PKWs mit Strombezug benötigt um das ESR-Sektorziel im Verkehr zu erreichen [14; 61]. Nach der aktuellen Flottengrenzwertgesetzgebung werden nur ca. 6-8 Mio PKW mit Strombezug im Jahr 2030 erwartet [14, 33; 62].

Auf der linken Achse der Grafik sind die jährlichen Netto-Neuzulassungen aufgetragen, auf der rechten Achse der aktuellen Bestand. Der hellgrüne Balken zeigt die jährlichen Netto-Neuzulassungen der E-Autos und der graue Balken die Anzahl der Plug-In Hybride. Die schwarze Linie bezieht sich auf die rechte Achse und stellt den Bestand an zugelassenen E-PKW und Plug-In Hybriden dar [31]. In den vergan-

genen Jahren ist die Zuwachsrage jährlich angestiegen. Dennoch steigt der Markthochlauf viel zu langsam an, frühestens 2020 ist hier ein Sprung zu erwarten. Für die Zuwachsraten ist die Meinungsbildung der Bevölkerung wichtig, da im Bereich der Mobilität überwiegend Privatinvestoren am Markt beteiligt sind. Für die Entwicklung der Elektromobilität sehen wir jedoch den Weltmarkt und nicht den deutschen Markt als entscheidend, da auch ein Großteil des Umsatzes deutscher Automobilhersteller im Ausland liegt.

Des Weiteren wird die Anzahl öffentlicher Ladepunkte im zweiten Barometerbalken angezeigt, da nur durch die frühzeitige Bereitstellung der entsprechenden Infrastruktur von öffentlichen Ladesäulen eine Verkehrswende erreicht werden kann. Im Barometerbalken kann man erkennen, dass es derzeit nur circa 16.000 öffentliche Ladepunkte gibt [34, 35], wir rechnen in unserem Szenario mit etwa einem Ladepunkt je zehn Fahrzeuge und kommen somit in 2050 auf einen Bedarf von 4 Millionen Ladesäulen. Somit ist auch hier ein starker Anstieg im Ausbau der Infrastruktur notwendig, um dieses Ziel zu erreichen. Bis 2030 würden 1,2 Mio öffentliche Ladepunkte benötigt, um dem Ladebedarf von 12 Millionen E-PKW (siehe oberster Barometerbalken) gerecht zu werden.

Der unterste Barometerbalken stellt den Mineralölverbrauch im Verkehrssektor dar und besitzt im Gegensatz zu den anderen Balken eine umgekehrte Skala. Die Zielgröße entspricht hier 0 und die Referenzgröße ist der Kraftstoffverbrauch des Jahres 2011. Der Verbrauch entwickelt sich gegenüber 2011 in die falsche Richtung, denn der Verbrauch in 2018 lag bei 686 TWh/a [36] während er im Jahr 2011 noch bei 600 TWh/a lag. Bis 2050 müssen wir die gesamten verkehrsbedingten Emissionen vermeiden, um einen klimaneutralen Verkehrssektor zu erreichen.



Fraunhofer IEE, 2019



» Investitionen in die Energiewende müssen in allen Bereichen steigen.

INVESTITIONSTÄTIGKEIT

Die Bewertung der Investitionstätigkeit unterscheidet sich von den technischen Dimensionen darin, dass sie in einer monetären Maßeinheit in Euro pro Jahr dargestellt wird. Die Barometerbalken zeigen jeweils das von uns erwartete Investitionsvolumen für einen eingeschwungenen Markt in 2050 für die verschiedenen Komponenten-Technologien. Die Inflation wurde nicht berücksichtigt aber Preisprognosen für die jeweilige Technologie [11; 61]. Berücksichtigt werden lediglich die Kapitalkosten für die Anlagen, da diese aus Investorensicht das entscheidende Volumen bilden. Die Kosten für Betrieb, Wartung und Netzanschluss werden nicht berücksichtigt. In einem eingeschwungenen Markt würde dies ausschließlich den Anlagenersatz bedeuten, es kommen keine zusätzlichen neu installierten Leistungen mehr dazu. Der Barometerfüllstand zeigt an, wie viel wir heute schon (im Jahr 2018) in eine Technologie investieren, relativ zum Volumen eines eingeschwungenen Marktes.

In die Windenergie wurden 6,8 Mrd Euro im Jahr 2018 investiert [13; neue Quelle im Vgl zu letztem Jahr; 61]. Ab 2050 müssten für den Anlagenersatz nach unserem Szenario jährlich etwa 15 Mrd Euro investiert werden [37–44]. Wir nehmen eine durchschnittliche Lebensdauer der Anlagen von 20 Jahren an [16].

3,4 Mrd Euro flossen im Jahr 2018 in die Installation von Photovoltaik-Anlagen [15]. Der Zielwert in einem eingeschwungenen Markt liegt laut unserem Szenario in 2050 bei etwa 3,9 Mrd Euro pro Jahr [37; 39; 40; 45–54]. Wir unterstellen eine Anlagenlebensdauer von 25 Jahren [18].

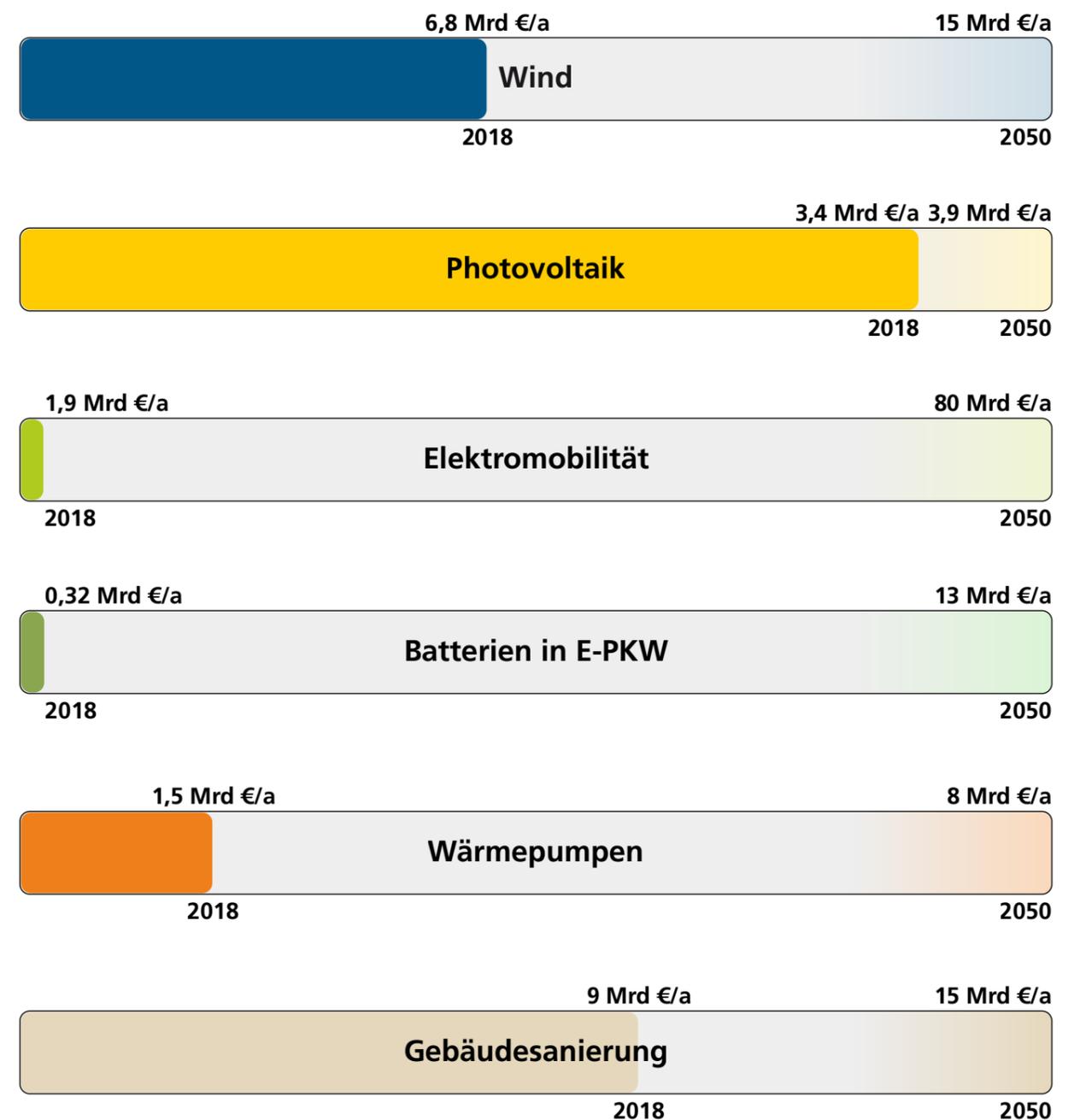
Bei der Elektromobilität sehen wir einen Zielmarkt von 80 Mrd Euro [eigene Berechnungen]. Dies entspricht dem heutigen jährlichen Netto-Umsatz auf dem PKW Markt in

Deutschland. In unserem Szenario wird es zukünftig lediglich eine Verschiebung von konventionellen hin zu elektrisch betriebenen Fahrzeugen geben [67]. 2018 wurden in Deutschland 1,9 Mrd Euro in Elektroautos und Plug-In-Hybride investiert [55] [eigene Berechnung].

Die Batterie in der Elektromobilität wurde zusätzlich separat betrachtet, sie ist aus energiesystemtechnischer Sicht die Schlüssel-Komponente in der Elektromobilität. Der Anteil der Batterien an den Investitionen in Elektrofahrzeugen betrug 0,32 Mrd Euro in 2018 [55; 61; 65]. Wir sehen hier ein langfristiges Marktvolumen von 13 Mrd Euro pro Jahr, das allein in den Batterien der Elektromobilität steckt [62; 67].

In die Installation von Wärmepumpen wurden 2018 etwa 1,5 Mrd Euro investiert [28]. Den Zielmarkt berechnen wir zu 8 Mrd Euro pro Jahr. Zugrunde liegen der Berechnung die Zielinstallation aus der Szenariorechnung, sowie eine Lebensdauer von 20 Jahren und erwarteten Kostenannahmen für große und dezentrale Wärmepumpen [62; 67].

Bei der Gebäudesanierung wurde das Investitionsvolumen betrachtet, das bis 2050 für einen klimaneutralen Wärmesektor investiert werden muss. Im Jahr 2050 müssten etwa 15 Mrd Euro investiert werden, im letzten Jahr waren es etwa 9 Mrd Euro [12]. Betrachtet wurden nur Kosten, die zusätzlich für energetische Effizienzmaßnahmen entstehen würden – bspw. werden keine Kosten für den Gerüstaufbau berücksichtigt, die bei einer Sanierung auch ohne Dämmmaßnahmen notwendig wären. Der Einbau eines Heizungssystems als energetische Sanierungsmaßnahme wurde nicht berücksichtigt, da diese Ausgaben teilweise in den obenstehenden Barometerbalken für die Installation von Photovoltaik Auf-Dach-Anlagen und Wärmepumpen berücksichtigt sind.



» Die Energiewende ist ein Geschäftsmodell mit positiven Deckungsbeiträgen: der Break-Even hängt von Zinsraten und Primärenergiekosten ab.

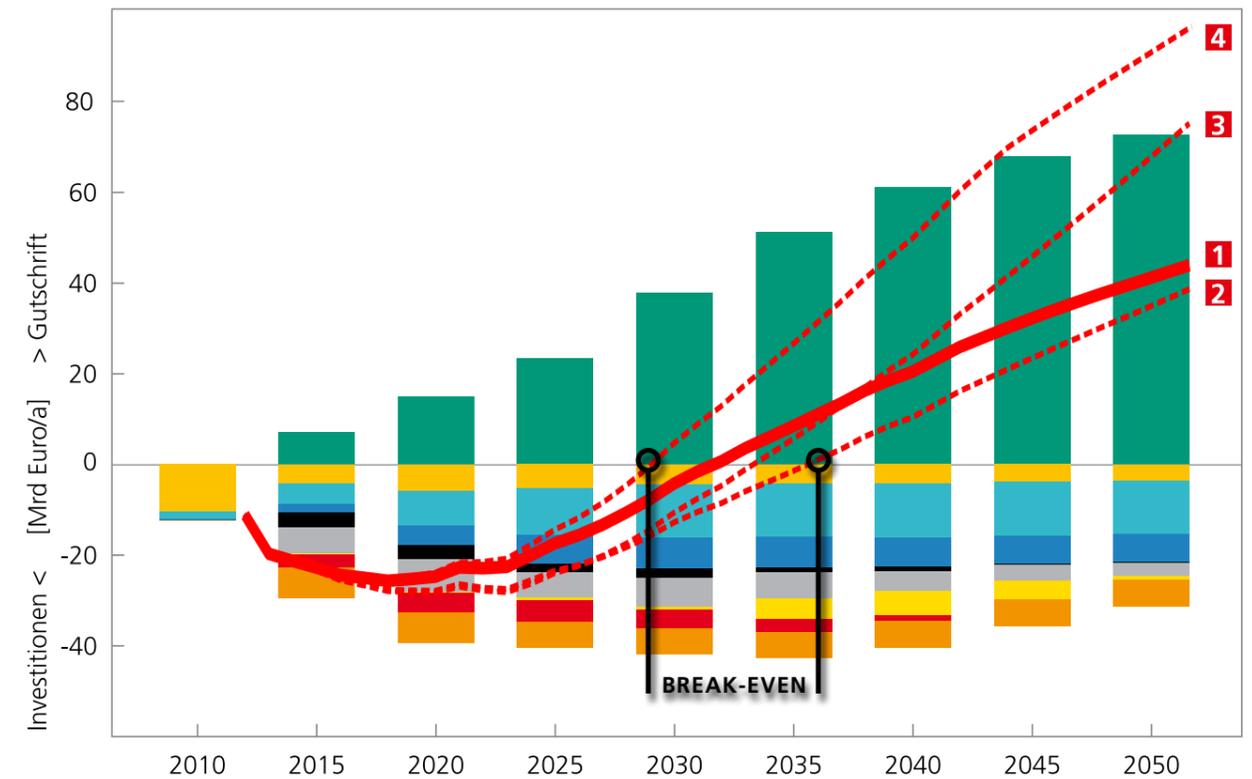
GESCHÄFTSMODELL ENERGIEWENDE

Wir können die Investitionstätigkeit der vergangenen Zeit in die Zukunft festschreiben, indem wir die Entwicklungen eines Umbau-Szenarios mit optimalen Kosten berechnen. Dies haben wir in der Studie »Geschäftsmodell Energiewende« getan [10].

Den Investitionen in die verschiedenen Erzeugungs- und Verbrauchstechnologien (Balken in negativer Richtung, siehe Grafik) stehen die Gutschriften aus dem vermiedenen Primärenergieeinsatz gegenüber (grüne Balken in positiver Richtung). Die kumulierte Summe von Ausgaben

und Ersparnissen ist durch die gestrichelten und durchgezogenen Linien dargestellt. Die Linien unterscheiden zwischen den Varianten 1-4 mit verschiedenen Zinsen und Primärenergiekosten. Die Durchstoßpunkte der kumulierten Deckungsbeiträge durch die Nulllinie sind die »Break-Even« der Transformation.

Abhängig von verschiedenen Annahmen für Zinssätze und Primärenergiepreise ergibt sich ein Zeitfenster zwischen 2029 und 2035 bis zum Erreichen von positiven Deckungsbeiträgen.



Differenz Investitionen/Gutschrift (inkl. Kapitalkosten) Szenario

- 4** Zins 2% inflationsbereinigt, Preise für Primärenergie steigend gemäß Klimaschutzkonvention 2050
- 3** Zins 2% inflationsbereinigt, Preise für Primärenergie steigend gemäß NEP 2014
- 1** Zins 0%, Preise für Primärenergie gleichbleibend
- 2** Zins 2% inflationsbereinigt, Preise für Primärenergie gleichbleibend

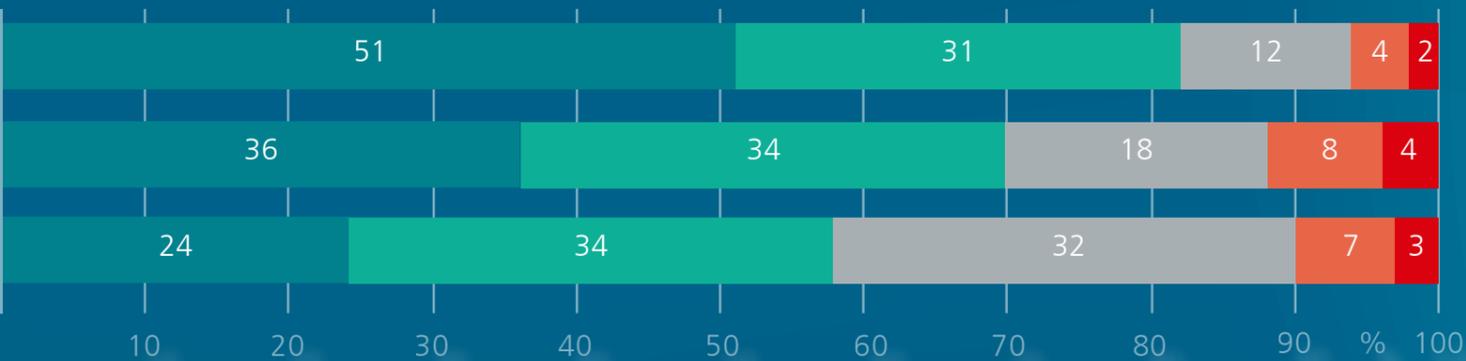
Investitionen und Gutschrift für **1**

- | | |
|---|--|
| ■ Brennstoffeinsparungen | ■ E-Mobility |
| ■ Photovoltaik | ■ Power2Gas und weitere Speicher |
| ■ Wind Onshore | ■ Wärmepumpen |
| ■ Wind Offshore | ■ Gebäudesanierung |
| ■ Infrastrukturkosten | |

UMFRAGE zur ENERGIEWENDE

Im Frühjahr 2019 hat das Fraunhofer IEE im Rahmen einer Masterarbeit an der Universität Kassel eine repräsentative Befragung zur Akzeptanz der deutschen Energiewende durchgeführt. Über ein Online-Panel nahmen 2.000 deutsche Haushalte an der Befragung teil. Ein Auszug der Ergebnisse wird hier dargestellt.

AKZEPTANZ erneuerbarer Energien



FÖRDERUNGEN erneuerbarer Energien

... für **E-Autos und PV-Anlagen** sind am bekanntesten

... sind **weniger bekannt** für Wärmepumpen, Solarthermie, Plug-In-Hybrid-Autos, Brennstoffzellenautos

10 % der Befragten **nutzen**

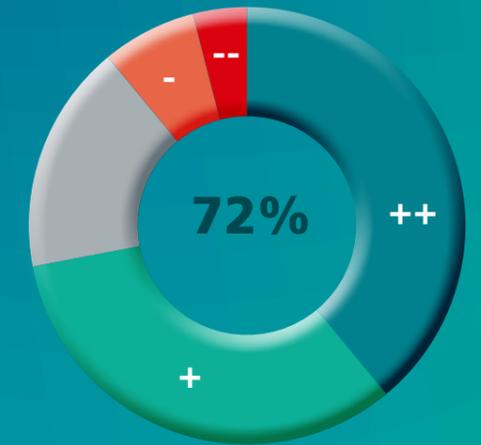
bereits eine oder mehrere der 12 abgefragten **Förderungen**

22 % kennen keine der 12 abgefragten **Förderungen**

VERTEILUNG

... überwiegend höhere Einkommen besitzen klimafreundliche Technologien

AKZEPTANZ der Energiewende



Die NUTZUNG erneuerbarer Energien

wird **mehr akzeptiert** als deren **Ausbau**

Photovoltaik

Windenergie

Bioenergie

Die ENERGIEBERATUNG

der **dena** nahmen **3 %** der Befragten in Anspruch

Lokale HEIZUNGS-INSTALLATEURE

... sind mit **69 %** die **häufigste Informationsquelle** der Kunden vor dem Heizungswechsel

... **gut 1/4** der Befragten hat sich im Anschluss **für eine Wärmepumpe, Solarthermie oder Fernwärme entschieden**

klimafreundlicher Technologien

... **PV-Anlagenbesitzer** sind zu rund **3/4 Wohneigentümer**

... **Wärmepumpenbesitzer** sind zu **2/3 Wohneigentümer**

... **Fernwärmenutzer** sind zu **2/3 Mieter**

QUELLEN

- [1] Öko-Institut e.V.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI: Klimaschutzscenario 2050. 2. Endbericht. Berlin 2015.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit BMUB: Klimaschutz-plan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung 2016.
- [3] Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE; Institut für Energie und Umweltforschung IFEU; Stiftung Umweltenergierecht; Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Endbericht. Kassel 2015.
- [4] Prognos AG; Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM; IREES GmbH; BHKW-Consult: Potential- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014. Endbericht.
- [5] Prognos AG; EWI; GWS: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Ba-se/ Köln/ Osnabrück 2010.
- [6] BVU Beratergruppe; Interplan Consult; Ingenieurgruppe IVV, P. C.: Verkehrsverflechtungs-prognose 2030. Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs, Schlussbericht 2014.
- [7] Trost, T.: Erneuerbare Mobilität im motorisierten Individualverkehr: Modellgestützte Szenarioanalyse der Marktdiffusion alternativer Fahrzeugantriebe und deren Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem, Dissertation 2017.
- [8] Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE: Mittel- und langfristige Potenziale von PtL- und H2-Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen. Teilbericht im Rahmen des Projekts: Klimawirksamkeit Elektromobilität 2017.
- [9] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.: Bilanzen 1990-2017. URL: <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.html>. Abrufdatum 05.08.2019.
- [10] Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE: Geschäftsmodell Energiewende: Eine Antwort auf das »Die-Kosten-der-Energiewende«-Argument. Kassel 2014.
- [11] Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE; Institut für Energie und Umweltforschung IFEU; Consideo; SSG: Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland im Auftrag des Umweltbundesamts. unveröffentlicht.
- [12] Institut für Energie und Umweltforschung IFEU; Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE; Consentec: Der Wert der Energieeffizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorkopplung. Endbericht, im Auftrag von: Agora Energiewende (noch nicht veröffentlicht).
- [13] Windmonitor: Entwicklung der installierten Windleistung (on- und offshore). URL: http://www.windmonitor.de/windmonitor_de/bilder_javascript.html?db_communicate=%27Windenergieeinspeisung.daten%27&p_lang=ger&img_id=428. Abrufdatum 05.08.2019.
- [14] Europäische Kommission: Emissionshandelssystem (EU-EHS). URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_de. Abrufdatum 05.08.2019.
- [15] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html. Abrufdatum 30.07.2019.
- [16] Prof. Dr.-Ing. Andreas Reuter, Mündliche Mitteilung (2018).
- [17] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi: Die nächste Phase der Energiewende: Das EEG 2017. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/eeg-2017-start-in-die-naechste-phase-der-energiewende.html>. Abrufdatum 05.08.2019.
- [18] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien 2013.
- [19] Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz BMJV: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien: Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017.
- [20] Bundesnetzagentur BNetzA: Kraftwerksliste. URL: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html. Abrufdatum 30.07.2019.
- [21] Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE: Analyse eines europäischen -95%-Klimaszenarios über mehrere Wetterjahre. Teilbericht. Kassel 2017.
- [22] Strategieplattform Power to Gas: Projektkarte. URL: <https://www.powertogas.info/projektkarte/>. Abrufdatum 30.07.2019.
- [23] Energy Storage Exchange: DOE Global Energy Storage Database: Office of Electricity. URL: <https://energystorageexchange.org/projects>. Abrufdatum 30.07.2019.
- [24] RWTH Aachen: Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0: Jahresbericht 2018. Abrufdatum 30.07.2019.
- [25] PV Magazine: Interesse an KfW-Speicherförderung 2017 gesunken – jetzt Mittel für 2018 sichern. URL: <https://www.pv.de/news/interesse-an-kfw-speicherfoerderung-2017-gesunken-jetzt-mittel-fuer-2018-sichern/>. Abrufdatum 30.07.2019.
- [26] Kraftfahrtbundesamt KBA: Monatliche Neuzulassungen. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monat_neuzulassungen_node.html. Abrufdatum 30.07.2019.
- [27] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 2018.
- [28] Bundesverband Wärmepumpe BWP e. V.: BWP Marktzahlen 2018. URL: <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/bwp-marktzahlen-2018-nachhaltiges-wachstum-mit-luft-nachoben-deutliches-signal-fuer-die-politik/#content>. Abrufdatum 31.07.2019.
- [29] Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE: Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95% THG-Klimazielszenarien. Teilbericht im Rahmen des Projektes: Transformationspfade im Wärmesektor - Betriebs- und volkswirtschaftliche Betrachtung der Sektorkopplung mit dem Fokus Fernwärme mit hohen Anteilen konventioneller KWK-Erzeugung und Rückkopplung zum Gesamtenergieversorgungssystem 2019.
- [30] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit BMU: Fahrzeugkonzepte für Elektroautos. URL: <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet/allgemeineinformationen/fahrzeugkonzepte-fuer-elektroautos/>. Abrufdatum 31.07.2019.
- [31] Kraftfahrtbundesamt KBA: Bestand an Pkw am 1. Januar 2019 nach ausgewählten Kraftstoffarten. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2019_b_umwelt_du.html?nn=663524. Abrufdatum 31.07.2019.
- [32] Mortsiefer, H.: Merkel kassiert das Ziel von einer Million E-Autos bis 2020. In: Der Tagesspiegel (2017).
- [33] Verbund der Automobilindustrie VDA: CO₂-Regulierung bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen. URL: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nfz/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen.html>. Abrufdatum 05.08.2019.
- [34] Nationale Plattform Elektromobilität: Ladeinfrastruktur 2017.
- [35] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft BDEW: Über 16.100 öffentliche Ladepunkte in Deutschland. URL: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/ueber-16100-oeffentliche-ladepunkte-deutschland/>. Abrufdatum 31.07.2019.
- [36] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle BAFA: Mineralölin-FO November 2018 (Mineralölabsatz). URL: https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Mineraloel/2018_11_mineraloelinfo.html. Abrufdatum 31.07.2019.
- [37] International Renewable Energy Agency IRENA: Renewable Power Generation Costs in 2017 2018.
- [38] Earth Policy Institute: Climate, Energy and Transportation. URL: http://www.earth-policy.org/?/data_center/C23/. Abrufdatum 05.08.2019.
- [39] International Renewable Energy Agency IRENA: Global Energy Transformation: A roadmap to 2050 2018.
- [40] Teske, S.; Sawyer, S.; Schäfer, O.: energy [r]evolution: A Sustainable-World Energy Outlook 2015,, 5. Auflage 2015.
- [41] International Renewable Energy Agency IRENA: Renewable Electricity Capacity and Generation Statistics: FeaturedDashboard - Data Download (Query Tool). URL: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>. Abrufdatum 05.08.2019.
- [42] Wallasch, A.-K.; Lüers, S.; Rehfeldt, K.: Kostendruck und Technologieentwicklungim Zuge der ersten Ausschreibungsrunden für die Windenergie an Land 2017.
- [43] Wallasch, A.-K.; Rehfeldt, K.; Wallasch, J.: Vorbereitungund Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz – Teilvorhaben II e): Wind an Land – Zwischenbericht 2018.
- [44] Global Wind Energy Council GWEC: Global Wind Report: Annual Market Update 2017 2018.
- [45] Earth Policy Institute: World Average Photovoltaic Production and Module Cost per Watt, 1975-2006. URL: http://www.earth-policy.org/?/data_center/C23/. Abrufdatum 05.08.2019.
- [46] Gan, P. Y.; Li, Z.: Quantitative study on long term global solar photovoltaicmarket. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 46, S. 88–99.
- [47] pxchange: Preisindex. URL: <https://www.pxchange.com/de/>. Abrufdatum 05.08.2019.
- [48] SolarPower Europe: Global Market Outlook 2015-2019 2015.
- [49] SolarPower Europe: Global Market Outlook 2016-2020 2016.
- [50] SolarPower Europe: Global Market Outlook 2017-2021 2017.
- [51] SolarPower Europe: Global Market Outlook 2018-2022 2018.
- [52] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Current and Future Cost of Photovoltaics: Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems - Study 2015.
- [53] International Renewable Energy Agency IRENA: The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025 2016.
- [54] European Photovoltaic Industry Association: Global Market Outlook 2014-2018 2014.
- [55] Kraftfahrtbundesamt KBA: Neuzulassungsbarometer im Dezember 2017. Kraftstoffarten 2017.
- [56] United Nations Framework Convention on Climate Change UNFCCC: Time Series - Annex I. URL: https://di.unfccc.int/time_series. Abrufdatum 31.07.2019.
- [57] World Bank: Total greenhouse gas emissions (kt of CO₂ equivalent). URL: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.GHGT.KT.CE>. Abrufdatum 31.07.2019.
- [58] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit BMUB: Klimaschutz in Zahlen: Klimaziele Deutschland und EU. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_in_zahlen_klimaziele_bf.pdf. Abrufdatum 10.04.2018.
- [59] VuMA Arbeitsgemeinschaft: VuMA-Berichtsband. URL: <https://www.vuma.de/vuma-praxis/vuma-berichtsband/>. Abrufdatum 06.08.2019.
- [60] Agentur für erneuerbare Energien EE: Klares Bekenntnis der deutschen Bevölkerung zu Erneuerbaren Energien. URL: <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/akzeptanz-erneuerbarer/akzeptanzumfrage/klares-bekanntnis-der-deutschen-bevoelkerung-zu-erneuerbaren-energien>. Abrufdatum 06.08.2019.
- [61] eigene Berechnungen und eigene Marktrecherche
- [62] eigene Annahmen
- [63] eigene Recherche
- [64] eigene Datenbank
- [65] eigene Marktrecherche
- [66] Produktdatenblätter mit Preisangaben der Hersteller
- [67] eigene Szenariorechnung

IMPRESSUM

AUTOREN BAROMETER 2019

Dr. Timo Fischer
Helen Ganal
Irina Ganal
Norman Gerhardt
Annika Haus
Prof. Dr. Clemens Hoffmann

HERAUSGEBER

Prof. Dr. Clemens Hoffmann

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und
Energiesystemtechnik IEE

Königstor 59, 34119 Kassel
Telefon +49 561 7294-0

kassel@iee.fraunhofer.de
www.iee.fraunhofer.de

REDAKTION

Helen Ganal
Norman Gerhardt
Prof. Dr. Clemens Hoffmann
Uwe Krengel

FOTODOKUMENTATION

BILDNACHWEIS

Titel: fotolia
Volker Beushausen (S.4)

GRAFIK UND LAYOUT

Uta Werner

WEB

Sascha Pogacar

Kassel, Juni 2019



FACHANSPRECHPARTNERIN

Helen Ganal
Tel: +49 561 7294-108
E-Mail: barometer@iee.fraunhofer.de

www.herkulesprojekt.de/barometer

