VERFÜGBARKEIT UND ZIELFÜHRENDER EINSATZ VON IN DEUTSCHLAND HERGESTELLTEM ERNEUERBAREN STROM

Eine Studie für UNITI

April 2023

Studie im Auftrag von:

UNITI Bundesverband
mittelständischer
Mineralölunternehmen e. V.

UNITI Bundesverband mittelständischer
Mineralölunternehmen e. V.
Jägerstraße 6
10117 Berlin
www.uniti.de
030 755 414 300

Ansprechpartner

Dirk Arne Kuhrt
kuhrt@uniti.de

Lukas Hanstein
hanstein@uniti.de

Aktualisierte 1. Auflage, Stand März 2023

Dr. Jens Perner
+49 221 337 13 102
jens.perner@frontier-economics.com

Theresa Steinfort
+49 221 337 13 139
theresa.steinfort@frontier-economics.com

Frontier Economics Ltd ist Teil des Frontier Economics Netzwerks, welches aus zwei unabhängigen Firmen in Europa (Frontier Economics Ltd) und Australien (Frontier Economics Pty Ltd) besteht. Beide Firmen sind in unabhängigem Besitz und Management, und rechtliche Verpflichtungen einer Firma erlegen keine Verpflichtungen auf die andere Firma des Netzwerks. Alle im hier vorliegenden Dokument geäußerten Meinungen sind die Meinungen von Frontier Economics Ltd.

INHALT

Erkenntnisse auf einen Blick 5

Zusammenfassung 6

1 Hintergrund und Zielsetzung der Studie 12
- 1.1 Die Zielsetzungen der Bundesregierung 12
- 1.2 Die Zielsetzungen der Studie 13
- 1.3 Die Struktur der Studie 14

2 Die Ausgangssituation: Die Transformation des Energiesystems steht (immer noch) am Anfang 15
- 2.1 Der Endenergieverbrauch ist heute durch fossile Energieträger geprägt 15
- 2.2 Der Energieverbrauch hat sich stabilisiert, ein signifikanter Rückgang ist allerdings (noch nicht) zu verzeichnen 19
- 2.3 Die Transformation des Energiesystems ist vor allem im Stromsektor schon seit langem im Gange – der Weg zur Defossilisierung ist aber auch hier noch weit 20

3 Für die Energiewende droht eine Lücke an erneuerbarem Strom 23
- 3.1 Das Leitziel der deutschen Energiepolitik: Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 24
- 3.2 Szenarien für den zukünftigen Stromverbrauch in Deutschland 26
- 3.3 Die Anforderungen an den Ausbau der Strombereitstellung sind erheblich 39
- 3.4 Stromlücken sind in Deutschland möglich – bei Energie und Leistung 53

4 Was folgt aus einer möglichen zukünftigen Lücke an EE-Strom in Deutschland? 57
- 4.1 Begrenzte Verfügbarkeit von EE-Strom erfordert sinnvolle Fokussierungen des Stromeinsatzes 58
- 4.2 Aus strategischen Gründen sollten ergänzende Energieangebote zur Elektrifizierung verfügbar gemacht werden 69

5 Schlussfolgerungen – für eine Erfolgreiche, zukunftsoffene Energiestrategie 71

Anhang A CO_2-Vermeidungskosten 81

Anhang B Abkürzungsverzeichnis 83

ERKENNTNISSE AUF EINEN BLICK

Die Energiewende steht (immer noch) am Anfang

Deutschland soll 2045 klimaneutral sein, der Stromsektor bereits 2035 nahezu vollständig auf erneuerbaren Energien (EE) basieren. Derzeit werden jedoch nur 20% des Energieverbrauchs von EE gedeckt. Der EE-Anteil an der Stromerzeugung beträgt lediglich gut 40%. Bis zum Erreichen der Klimaneutralität ist also noch ein weiter Weg.

Für das zukünftige Energiesystem droht eine Lücke an erneuerbarem Strom – bei Energie und Leistung

Zentrales Mittel der Wahl der Politik für die Transformation des Energiesystems ist weiterhin die umfassende Elektrifizierung einer Vielzahl von Sektoren. Damit wird der Stromverbrauch sowie die Spitzenlast bis 2045 gegenüber heute deutlich ansteigen. Wird der Ausbau der EE-Stromerzeugung nicht signifikant beschleunigt und/oder steigt die Stromnachfrage deutlich aufgrund starker Elektrifizierung, droht langfristig eine energetische EE-Stromlücke. Zudem droht eine Unterdeckung an gesicherter Leistung – sowohl aufgrund wachsender Spitzenlast als auch aufgrund des Wegfalls gesicherter Leistung aus fossilen und nuklearen Kraftwerken.

Begrenzte Verfügbarkeit von EE-Strom erfordert sinnvolle Fokussierungen des Stromeinsatzes

Es sind durchaus Zukunftsszenarien denkbar, in denen der EE-Strom bereits durch die Versorgung des bisherigen Stromsektors (wie Beleuchtung) sowie weiterer Stromanwendungen (Batteriefabriken) weitgehend aufgebraucht wird. Sollte jedoch bei einem deutlich beschleunigten EE-Ausbau zusätzlicher EE-Strom verfügbar sein, kann dieser in weiteren elektrifizierbaren Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Für einen optimalen Einsatz des EE-Stroms (sowie klimaneutraler Alternativen) im Sinne des kosteneffizienten Klimaschutzes sollten CO_2-Vermeidungskosten maßgebliche Orientierungsgröße sein. Je nach Einzelfall kann EE-Strom oder eine klimaneutrale Alternative die optimale Defossilisierungsoption sein - die Identifikation der besten Technologie je Einzelfall ist komplex und nicht mit pauschalen Maßgaben zu bewerkstelligen.

Aus strategischen Gründen sollten ergänzende Energieangebote zur Elektrifizierung verfügbar gemacht werden

Eine mögliche auch langfristig begrenzte Verfügbarkeit von EE-Strom in Deutschland sollte in der Energiepolitik als Szenario mitgedacht werden. Durch Technologievielfalt kann ein essenzieller Beitrag für kosteneffizienten Klimaschutz geleistet werden: Aus EE-reichen Regionen importierte chemische Energieträger (gasförmig wie z. B. Wasserstoff und flüssig wie z. B. E-Fuels) können aufgrund ihrer Vorteile wie Transportfähig- und Speicherbarkeit einen entscheidenden Beitrag zur Resilienz des Energiesystems leisten und somit die Direktverwendung von EE-Strom in Deutschland ergänzen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Transformation des heute immer noch stark fossil geprägten deutschen Energiesystems in Richtung Klimaneutralität steht vor immensen Herausforderungen: So soll Deutschland entsprechend des 2021 verabschiedeten Klimaschutzgesetzes bis 2045 Treibhausgasneutralität erreichen.

Zentrales Element der Defossilierungsstrategie der Bundesregierung ist v. a. die direkte Verwendung von erneuerbar hergestelltem Strom (EE-Strom) und damit eine umfassende Elektrifizierung einer Vielzahl von Endenergieanwendungen in allen Verbrauchssektoren inklusive Industrie, Privathaushalten und Verkehr. Zudem werden wiederholt regulative Maßnahmen diskutiert, die für bestimmte Anwendungen einen für den Klimaschutz wirksamen Hochlauf von alternativen CO_2-Reduktionsoptionen auf Basis grüner Moleküle erschweren oder sogar ein faktisches Verbot vorsehen. Damit wären auch CO_2-arme oder neutrale Gase und Flüssigkraftstoffe in diesen Anwendungen nicht mehr einsetzbar.

Vor diesem Hintergrund stellen sich die Fragen,

- ob ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien in Deutschland und Umgebung hergestellt und zu den Verbrauchern transportiert werden kann,
- wie bei mittel- und langfristiger Knappheit von EE-Strom dieser sinnvoll einzusetzen wäre,
- was eine mittel- und langfristige Knappheit von EE-Strom für das Offenhalten von Alternativen bedeuten würde und wie vor diesem Hintergrund eine Technologiestrategie aussehen müsste, in der flexibel auf die anstehenden Herausforderungen reagiert werden kann.

Ziel dieser Studie ist daher die Prüfung einer ausreichenden Verfügbarkeit und eines zielführenden Einsatzes von in Deutschland hergestellten erneuerbaren Stroms

In unserer Studie gehen wir diesen Fragen nach. Konkret bedeutet dies zu untersuchen,

- inwiefern die **aktuelle klimapolitische Strategie** mit einem relativen Fokus auf den direkten Stromeinsatz mögliche Grenzen und Unsicherheiten bezüglich der Verfügbarkeit von in Deutschland produziertem EE-Strom berücksichtigt und
- **welche Implikationen sich für den Einsatz** und die Verwendung von verfügbarem erneuerbarem **Strom** über die verschiedenen Verbrauchssektoren wie Haushalte, GHD-Sektor, Industrie und Verkehr hinweg ergeben.

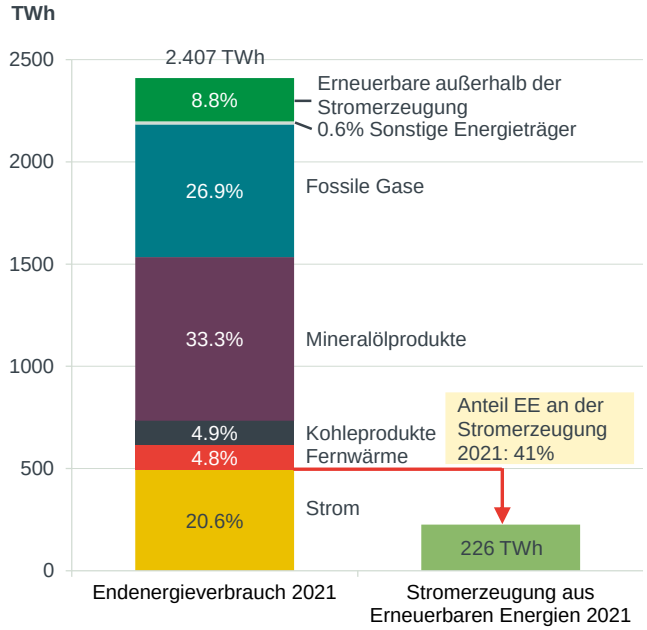
Die wesentlichen Ergebnisse unserer Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Transformation des Energiesystems steht (immer noch) am Anfang

Der heutige Endenergieverbrauch in Deutschland und Europa ist (immer noch) zu rund 80% von fossilen (und nuklearen) Energieträgern dominiert. Nur knapp 20% des Energiebedarfs werden direkt oder indirekt durch erneuerbare Energien gedeckt.

Die Energiewende im Stromsektor hat in Deutschland vor 20 Jahren begonnen. 2021 wurden 41% des Strombedarfs durch erneuerbare Energien gedeckt Somit verbleibt die enorme Herausforderung, dass in den nächsten zwölf Jahren noch mehr als 50% des heutigen Stromverbrauchs durch EE ersetzt werden müssen.

Abbildung 1 Heutiger Energiebedarf (2021)



Quelle: AG Energiebilanzen (2022a) und (2022b)

Hinzu kommt, dass es sich bei den zu ersetzenden Kraftwerkstechnologien um gesicherte Leistung handelt, während im Bereich der erneuerbaren Energien v.a. fluktuierende Windenergie an Land sowie auf See zugebaut werden.

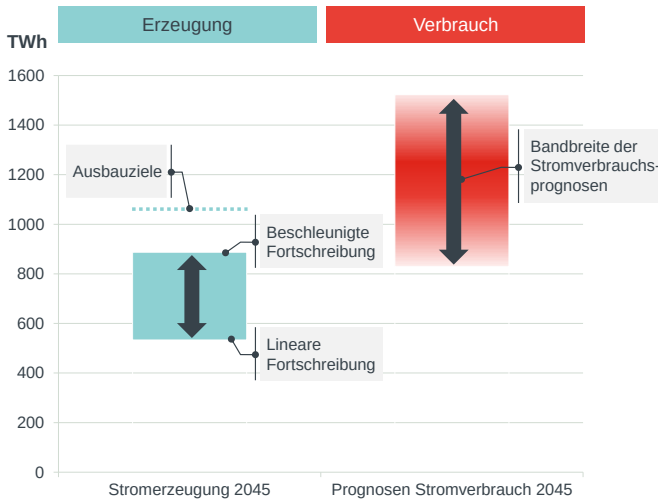
Für die Energiewende mit Fokus auf Direktstromverwendung droht eine Lücke an heimischem erneuerbaren Strom – bei Energie und Leistung

Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 erfordert einen schnelleren Ausstieg aus fossilen Energieträgern und eine umfassende Beschleunigung des EE-Ausbaus.

Ein zentrales Mittel der Wahl der Politik für die Transformation des Energiesystems ist weiterhin die umfassende Elektrifizierung einer Vielzahl von Endenergieanwendungen, die jedoch den heimischen Strombedarf ansteigen lassen.

Konkret müssen damit ca. 2.000 TWh fossile Endenergie durch EE-Strom ersetzt oder in der Energiemenge reduziert werden. Denn lediglich 230 TWh des heutigen Stromverbrauchs werden derzeit von erneuerbarem Strom gedeckt – dies entspricht einem Achtel der Endenergie und 41% des Stromverbrauchs.

Abbildung 2 Drohende Stromlücke zwischen Erzeugung und Verbrauch 2045



Quelle: Frontier Economics basierend auf diversen Studien und Fortschreibungen, vgl. Abschnitt 3

Mit der **Elektrifizierung verschiedener weiterer Sektoren wird der Bedarf an Strom bis 2045**

gegenüber heute weiter ansteigen. Je nach Szenario prognostizieren Studien, dass der heutige Stromverbrauch von knapp 600 TWh/a (brutto) auf 800 bis nahezu 1.450 TWh/a ansteigen könnte.

Die Anforderungen an den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung sind dabei erheblich: Der Ausbau inkl. Infrastrukturen zur Übertragung, Verteilung und Zwischenspeicherung muss sich stark beschleunigen, um die hohe Nachfrage nach EE-Strom erfüllen und die Versorgungssicherheit in allen Sektoren jederzeit jahres- und tageszeitunabhängig gewährleisten zu können.

Schreitet der Ausbau von erneuerbaren Energien nur im moderaten Tempo voran und/oder steigt die Stromnachfrage signifikant aufgrund starker Elektrifizierung, droht langfristig eine energetische EE-Stromlücke.

Zudem droht zukünftig auch eine Unterdeckung an gesicherter Leistung – sowohl aufgrund wachsender Spitzenlast als auch aufgrund des Wegfalls gesicherter Leistung aus fossilen und nuklearen Kraftwerken.

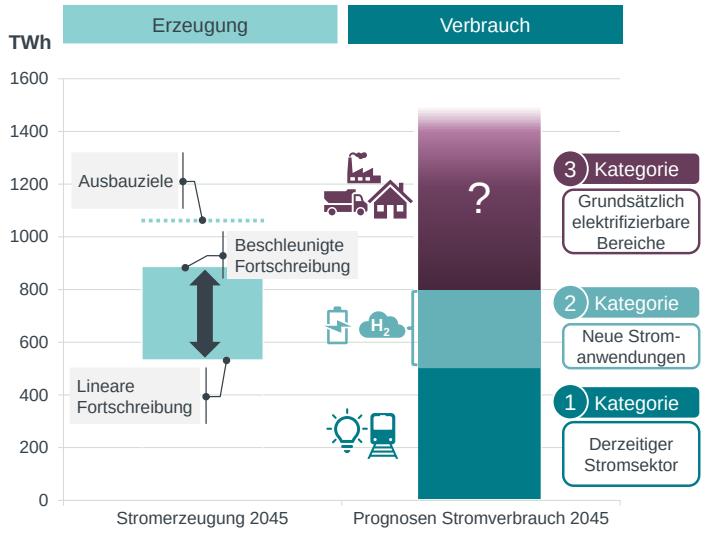
Abbildung 3 Anforderungen an die Leistungsvorhaltung und Lastflexibilität bei weitreichender Elektrifizierung

Quelle: Frontier basierend auf diversen Quellen - Details vgl. Abbildung 27

Begrenzte Verfügbarkeit von EE-Strom erfordert sinnvolle Fokussierungen des Stromeinsatzes

Droht der EE-Strom nicht auszureichen, sollte er zunächst mit Priorität in den Sektoren genutzt werden, in denen Strom bereits heute zum Einsatz kommt (Kategorie 1, wie Beleuchtung oder Bahnstrom) oder in zusätzlichen stromverbrauchenden Anwendungen (Kategorie 2), die sinnvoll nur mit Elektrizität betrieben werden können, wie z. B. neue Rechenzentren, Batteriefabriken oder bestimmte Industrieprozesse wie beispielsweise ein gewisser Anteil heimischer Wasserstofferzeugung basierend auf erneuerbarem Strom (grünem Wasserstoff).

Abbildung 4 Stromverbrauch nach prioritären Stromendanwendungen



Quelle: Frontier Economics basierend auf div. Quellen vgl. Abschnitt 3

Es sind durchaus Zukunftsszenarien denkbar, in denen der EE-Strom bereits durch die Versorgung prioritärer Anwendungen des derzeitigen Stromsektors und neuer Stromanwendungen vollständig oder weitgehend verbraucht wird. Dies ist v.a. dann der Fall, wenn der Ausbau der erneuerbaren Energien in der Praxis nur wenig über die heutige Ausbaugeschwindigkeit hinaus gesteigert werden kann. Ein solches Szenario ist keinesfalls auszuschließen.

Sollte bei einem deutlich beschleunigten EE-Ausbau zusätzlicher EE-Strom verfügbar sein, kann dieser in weiteren elektrifizierbaren Anwendungsbereichen (Kategorie 3, wie Verkehr, Gebäudewärme, manche Industriezweige) eingesetzt werden. Für einen Einsatz des EE-Stroms (sowie klimaneutraler Alternativen) im Sinne des kosteneffizienten Klimaschutzes sollten CO_2-Vermeidungskosten maßgebliche Orientierungsgröße sein.

Hierbei zeigt sich, dass je nach Einzelfall EE-Strom oder eine klimaneutrale Alternative die optimale Defossilisierungsoption sein kann – und keine Pauschalisierung möglich ist. Reicht der EE-Strom nicht für alle Anwendungen aus, in denen sein Einsatz Kostenvorteile ausweist, muss auch hier auf klimaneutrale Stromalternativen wie synthetische Brenn- und Kraftstoffe und/oder grünen Wasserstoff zurückgegriffen werden, die global kostengünstig erzeugt werden können. Die Identifikation „bester“ Technologien für den Einzelfall ist also komplex und daher nicht pauschal möglich.

Aus strategischen Gründen sollten ergänzende Energieangebote zur Elektrifizierung verfügbar gemacht werden

Reichen die Mengen an erneuerbarem Strom in Deutschland nicht aus, um alle kosteneffizienten Anwendungen zu bedienen, ist die **Verfügbarkeit alternativer Defossilisierungstechnologien** wie z.B. importierter synthetischer Brenn- und Kraftstoffe für die Energiewende von herausragender Bedeutung.

Besonders synthetische Flüssigenergieträger, aber auch in Teilen grüne Gase wie Wasserstoff und Methan, bieten gegenüber EE-Strom vielfältige Vorteile, wodurch sie den Einsatz von EE-Strom gut ergänzen können:

- **Transportfähig- und Speicherbarkeit**: Flüssige Kraft- und Brennstoffe können im Gegensatz zu EE-Strom gut und ohne weitere Umwandlungen über weite Strecken transportiert und für längere Zeiträume gespeichert werden.
- **Importfähigkeit aus EE-reichen Regionen**: Erneuerbare Flüssigkraftenergieträger haben aufgrund ihrer guten Transportfähigkeit den Vorteil, dass sie aus weit entfernten EE-reichen Weltregionen außerhalb Europas, **importiert** werden können. Als Produktionsstandorte für synthetisches Rohöl (Syncrude) und/oder synthetische Kraft- und Brennstoffe, die aus erneuerbarem Strom gewonnen werden (E-Fuels), bieten sich aufgrund der hohen Anzahl an Sonnenstunden und hoher Windhöffigkeit bspw. die MENA-Region, Patagonien oder Australien an. EE-Strom hingegen sollte aufgrund seiner begrenzten Transportfähigkeit vor allem in Deutschland bzw. der näheren Umgebung erzeugt werden. Dadurch ist das Potenzial des erneuerbar erzeugten Stroms zusätzlich räumlich begrenzt.
- **Lösung für den Bestand**: Ersetzt man die derzeitigen fossilen Gas- und Flüssigkraft- und Brennstoffe durch zunehmend erneuerbare Energieträger wie E-Kerosin, E-Benzin, E-Diesel / E-Heizöl oder synthetisches Methan kann die bereits bestehende Infrastruktur in weiten Teilen weiterhin genutzt werden. Das betrifft nicht nur die Energietransportinfrastruktur, sondern auch industrielle Anlagen und Endgeräte. Bestehende Anwendungen können defossilisiert werden: Somit können sowohl Investitionskosten in Endanwendungen als auch eine vorzeitige Außerbetriebnahme der Anlagen vor Ende des Lebenszyklus vermieden werden. Mit zunehmender Verfügbarkeit von erneuerbaren Energieträgern ist entsprechend eine schrittweise ansteigende Beimischung des klimaneutralen Kraftstoffs zu fossilen Brenn- und Kraftstoffen möglich.

Auch im Sinne einer vorsorgeorientierten und risikominimierenden Energiestrategie sollte sich mit Ergänzungen zu einer elektrifizierungsfokussierten Transformationsstrategie befasst werden. Dadurch kann flexibel auf mögliche Herausforderungen und Limitierungen reagiert werden. Alternative erneuerbare Brenn- und Kraftstoffe bieten hierbei Optionen zur Risikodiversifizierung.

Schlussfolgerung – für eine zukunftsoffene Energiestrategie

Eine **mögliche auch langfristig begrenzte Verfügbarkeit von EE-Strom** in Deutschland sollte in der Energiepolitik als Szenario mitgedacht werden.

Durch **Technologievielfalt** kann in jedem Falle ein essenzieller Beitrag für kosteneffizienten Klimaschutz geleistet werden:

- **Vielfalt bei Kunden und Verbrauchern erfordert Vielfalt bei Lösungen**: Durch die Heterogenität der Anwendungsfälle ist eine Vielfalt technologischer Lösungen innerhalb der Sektoren und über die Sektorengrenzen hinweg erforderlich, d. h. je nach einzelnem Anwendungsfall ist dezentral zu entscheiden, mit welchen Technologien defossilisiert werden soll. **Pauschale politische Vorgaben**, die die Wahl der Technologien einschränken (wie z. B. eine Beschränkung oder gar eine Nichtanerkennung von E-Fuels im Individualverkehr oder im Wärmesektor), **führen zu höheren volkswirtschaftlichen Kosten und erschweren die Transformation des Energiesystems**.
- Zielführender Klimaschutz kann nur über einen Technologiemix durch **geeignete Rahmenbedingungen und marktwirtschaftliche Mechanismen** herbeigeführt werden. Bei Options- und Technologievielfalt, ergänzt durch geeignete Rahmenbedingungen (wie einer CO_2-Bepreisung), können Marktakteure entlang der Wertschöpfungskette (vom Energieproduzenten bis zum Verbraucher) am besten für effektiven und effizienten Klimaschutz sorgen.

1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG DER STUDIE

1.1 Die Zielsetzungen der Bundesregierung

Die Transformation des heute immer noch stark fossil geprägten deutschen Energiesystems in Richtung Klimaneutralität steht vor immensen Herausforderungen: So soll Deutschland entsprechend dem 2021 verabschiedeten Klimaschutzgesetz bis 2045 Treibhausgasneutralität erreichen, bis zum Jahr 2030 soll eine Minderung der Treibhausgase von 65% im Vergleich zum Jahr 1990 erreicht werden.[1]

Zentral für das Erreichen der Klimaschutzziele sind die Transformation der Energieversorgung weg von fossilen Energieträgern (und Kernenergie) Richtung erneuerbaren Energien sowie das Einsparen von Energie. So enthält das im Sommer 2022 vom Bundestag verabschiedete „Osterpaket“ nun eine Anhebung des Ausbauziels für erneuerbare Energien im Stromsektor: Bis zum Jahr 2030 sollen 80% des Stromverbrauchs[2] aus erneuerbaren Energien (EE) bereitgestellt, bis 2035 soll Strom nahezu vollständig aus EE stammen. Außerdem wird im EEG die Nutzung von erneuerbaren Energien als „überragendes öffentliches Interesse“ verankert.[3]

Auf dem Weg zur Klimaneutralität sind per Gesetz konkrete jährliche CO_2-Minderungsziele für die einzelnen energieverbrauchenden Sektoren (Industrie, Verkehr, Haushalte, Gewerbe und Handel, Landwirtschaft etc.) festgelegt. Auch diese sollen zunehmend defossilisiert werden. So sieht das Klimaschutzgesetz fast eine Halbierung der Treibhausgasemissionen im Gebäude- und Verkehrssektor bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 2019 vor.

Zentrales Element der Defossilierungsstrategie der Bundesregierung ist v. a. die direkte Verwendung von erneuerbar hergestelltem Strom (EE-Strom). Zwar wird auch über den Einsatz von grünem Wasserstoff und synthetischen Kraft- und Brennstoffen in den Sektoren Industrie, Wärme und Verkehr diskutiert, doch wird dem direkten Stromeinsatz klarer Vorrang eingeräumt. Gegenüber dem Einsatz alternativer Energieträger wie klimaneutralen Gas- und Flüssigkraftstoffen wird als Grund für den Einsatz von EE-Strom u.a. die höhere technische Effizienz auf den Stufen der Herstellung[4] und der Endanwendungen[5] angeführt. Dabei werden diese Vorteile in einer gesamtheitlichen Betrachtung, die weitere wesentliche Aspekte der Wertschöpfungskette wie Energietransport und saisonale Speicherung berücksichtigt, häufig maßgeblich relativiert.[6]

---

1 Siehe Klimaschutzgesetz (2021).

2 Bruttostromverbrauch

3 Siehe Bundesregierung (2022).

4 Gemeint ist die Herstellung der Energieträger (EE-Strom bzw. EE-Kraftstoffe).

5 Insbesondere wird auf die höhere technische Effizienz von elektrischen Wärmepumpen ggü. Wasserstoff-Brennwertthermen sowie von batterieelektrischen Fahrzeugantrieben ggü. Verbrennungsmotoren, die mit synth. Kraftstoffen angetrieben werden, verwiesen.

6 Vgl. Frontier (2020).

Entsprechend forcieren die derzeit geplanten Klimaschutzmaßnahmen, die in den kommenden Jahren auf den Weg gebracht werden sollen, die Direktelektrifizierung. Zudem werden wiederholt regulative Maßnahmen diskutiert, die für bestimmte Anwendungen einen für den Klimaschutz wirksamen Hochlauf von alternativen CO_2-Reduktionsoptionen erschweren oder sogar ein faktisches Verbot für die Anwendungstechnologien vorsehen.[7] Damit wären auch klimaneutrale Gase und Flüssigkraftstoffe in diesen Anwendungen nicht mehr einsetzbar – ohne eine klimapolitisch standhafte Begründung.

1.2 Die Zielsetzungen der Studie

Bei der gewählten Defossilierungsstrategie mit Fokus auf die direkte Elektrifizierung auf Basis von in oder in der Nähe von Deutschland produziertem erneuerbaren Strom bleiben eine Reihe von Fragen offen:

- Kann vor dem Hintergrund der realen Herausforderungen ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien in Deutschland und den umliegenden Ländern hergestellt und zu den Verbrauchern[8] transportiert werden?[9]
- Sollte erneuerbarer Strom mittel- und langfristig knapp bleiben, wie wäre dann dieser Strom sinnvoll einzusetzen? Gibt es hierzu allgemeingültige Aussagen?
- Was bedeutet eine mittel- und langfristige Knappheit von EE-Strom für das Offenhalten von Alternativen?
- Wie sieht vor diesem Hintergrund eine Technologiestrategie aus, in der flexibel auf die anstehenden Herausforderungen reagiert werden kann? Wie sieht ein „Plan B“ aus?

Vor diesem Hintergrund ist Ziel der Studie, zu untersuchen, inwiefern die **aktuelle klimapolitische Strategie** mit einem relativen Fokus auf den direkten Stromeinsatz mögliche Grenzen und Unsicherheit bezüglich der Verfügbarkeit von in Deutschland produziertem EE-Strom reflektiert und **welche Implikationen sich für den Einsatz** und die Verwendung von verfügbarem erneuerbarem **Strom** über die verschiedenen Verbrauchssektoren hinweg ergeben.

---

7 Ein wesentliches Element der europäischen Regulierung sind die Flottengrenzwerte für neu zugelassene PKW und leichte Nutzfahrzeuge. Die durchschnittlichen Emissionen der neu zugelassenen Fahrzeuge eines Herstellers dürfen einen gesetzlich fixierten Grenzwert in Gramm CO_2 pro gefahrenen Kilometer nicht überschreiten. Hierbei werden lediglich die „Auspuffemissionen“ (Well-to-Tank-Ebene) berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wird jedoch, welchen Ursprungs und wie hoch die CO_2-Emissionen sind, die bereits bei der Energieträgerproduktion anfallen. Dies bedeutet, dass beim Verbrennungsmotor keine CO_2-Gutschrift für biogene oder mit EE-Strom hergestellte synthetische Kraftstoffe stattfindet. Alternative treibhausgasneutrale Kraftstoffe werden also behandelt wie ihre entsprechenden fossilen Pendants. Durch die derzeit beschlossene Maßgabe, dass ab dem Jahr 2035 nur noch Nullemissions-Fahrzeuge zugelassen werden dürfen, bedeutet dies de facto ein Verbot des Verbrennungsmotors (vgl. bspw. Euractiv (2022) oder tagesschau.de, Februar 2023). [Nachtrag: Aktuell wird eine Anrechnung von E-Fuels jedoch wieder diskutiert und vorgesehen (energate.de, März 2023).]

8 Hinweis: Bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Hauptwörtern verwenden wir im Folgenden die männliche Form. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter.

9 Strom ist nur begrenzt über weite Strecken transportier- und speicherbar. Soll die Umwandlung in transportier- und speicherfähige Energieträger wie klimaneutralen Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe vermieden werden (Umwandlungsverluste), muss dieser Strom daher hauptsächlich in Deutschland oder nahegelegenen und durch ausreichend Netzkapazität verbundene Regionen hergestellt werden.

1.3 Die Struktur der Studie

Die Studie ist wie folgt strukturiert:

- In Abschnitt 2 legen wir die Ausgangssituation des Energiebedarfs und der Energieversorgung in Deutschland dar und untersuchen insbesondere, inwiefern erneuerbare Energien und daraus gewonnener Strom bereits eingesetzt werden.
- In Abschnitt 3 untersuchen wir, inwiefern die derzeit vorgesehenen Maßnahmen mit Fokus auf Direktelektrifizierung durch in Deutschland produzierten Strom wirksam in der Lage sein werden, den Bedarf an erneuerbaren Energieträgern zu decken.
- In Abschnitt 4 stellen wir Überlegungen dazu an, welche Folgen sich aus der begrenzten Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms für dessen Einsatz ergeben.
- In Abschnitt 5 ziehen wir Schlussfolgerungen bezüglich der klimapolitischen Strategie Deutschlands und eines möglichen Plan B für die Defossilisierung in Deutschland.

2 DIE AUSGANGSSITUATION: DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS STEHT (IMMER NOCH) AM ANFANG

In diesem Abschnitt stellen wir zunächst die Ausgangssituation des Energiebedarfs und der Energieversorgung in Deutschland dar und untersuchen insbesondere, inwiefern erneuerbare Energien bereits heute in verschiedenen Energieanwendungen eingesetzt werden.

HINTERGRUND UND KAPITELÜBERBLICK

- Der heutige Endenergieverbrauch in Deutschland und Europa ist (immer noch) zu rund 80% von fossilen (und nuklearen) Energieträgern dominiert; nur knapp rund 20% des Energiebedarfs werden direkt oder indirekt durch erneuerbare Energien gedeckt.[10]
- Im Stromsektor hat die Energiewende bereits vor mehr als zwanzig Jahren begonnen: 2021 wurden 41% des Strombedarfs[11] durch erneuerbare Energien gedeckt. Gleichzeitig bedeutet dies jedoch, dass in den nächsten zwölf Jahren noch mehr als 50% des heutigen Stromverbrauchs durch EE ersetzt werden müssen.
- Bei den zu ersetzenden Kraftwerkstechnologien handelt es sich um gesicherte Leistung, während im Bereich der EE v.a. fluktuierende Windenergie an Land sowie auf See zugebaut werden.

2.1 Der Endenergieverbrauch ist heute durch fossile Energieträger geprägt

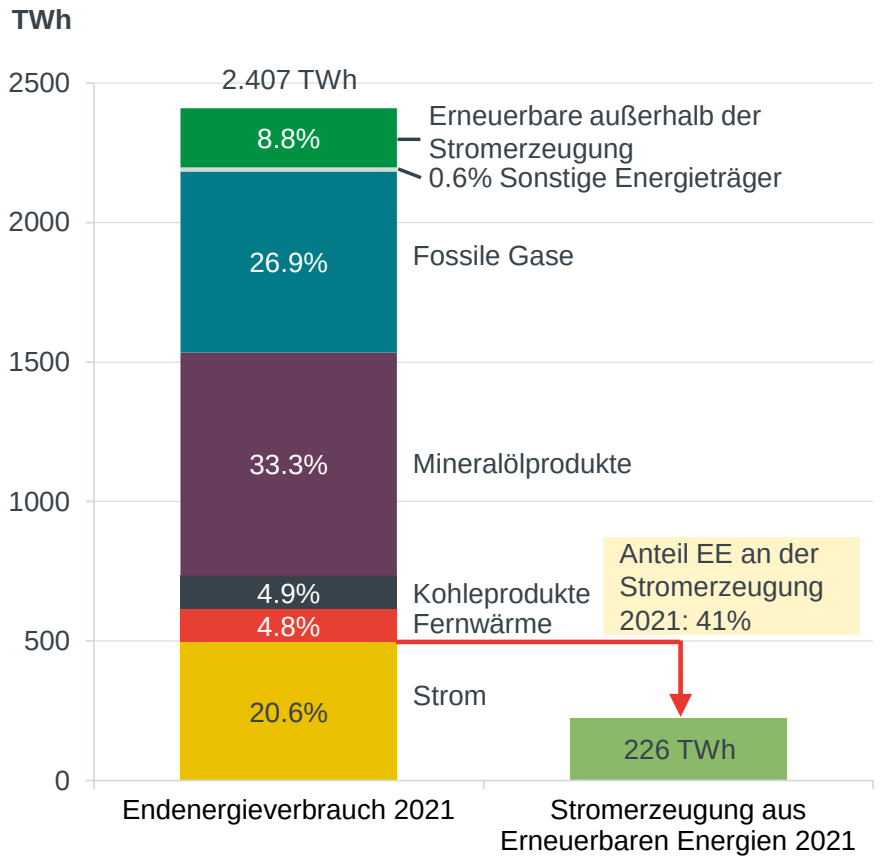
Der Energiebedarf Deutschlands wird aufkommensseitig nach wie vor zum größten Teil von fossilen Energieträgern gedeckt. Mit Blick auf den Endenergieverbrauch in Deutschland dominieren Mineralölprodukte und Erdgas (siehe Abbildung 5). Beide Energieträger zusammen stellen über 60% des Endenergieverbrauchs[12] bereit (2021). Strom, der sowohl aus fossiler als auch aus nuklearer und erneuerbarer Energie generiert wird, hat einen Anteil von ca. 20% am Endenergieverbrauch. Direkt und nicht zur Stromerzeugung eingesetzte erneuerbare Energieträger kommen lediglich auf einen Anteil von knapp 9%. Zu noch kleineren Anteilen wird die Nachfrage nach Endenergie durch Kohleprodukte, Fernwärme und sonstige Energieträger bedient.

[10] https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-erneuerbare-energien#die-wichtigsten-fakten

[11] Bruttostromverbrauch, https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#ueberblick

[12] Zum rein energetischen Einsatz kommt darüber hinaus der Bedarf an Mineralölprodukten, Erdgas und Kohle für die stoffliche Nutzung in der Industrie hinzu: In Deutschland werden jährlich im Schnitt etwa 250 TWh der fossilen Energieträger nicht als Brennstoffe eingesetzt, sondern als Rohstoffe zu Produkten oder Gütern (z.B. Chemikalien, Kunststoffe) verarbeitet (vgl. Eurostat, Energiedaten).

Abbildung 5 Heutiger Energiebedarf (2021) in Deutschland differenziert nach Energieträgern



Quelle: AG Energiebilanzen (2022a) und (2022b)

EXKURS: BRUTTO- VS. NETTOSTROMERZEUGUNG UND -VERBRAUCH

- Gemäß der Definition der AG Energiebilanzen e. V. ist die **Bruttostromerzeugung** als die Strommenge definiert, die insgesamt in einem Land erzeugt wird, inklusive des Eigenbedarfs der Erzeugungsanlagen und Netzverluste. Die **Nettostromerzeugung** entspricht der Energiemenge der Bruttostromerzeugung allerdings abzüglich des Eigenbedarfs der Kraftwerke und der Netzverluste.[13] Der Wert für Nettostromerzeugung war seit 1990 bis heute durchschnittlich um ca. 6% geringer als der für Bruttostromerzeugung.[14]
- Der **Bruttostromverbrauch** entspricht der Bruttostromerzeugung abzüglich Importen und zuzüglich Exporten. Der Bruttostromverbrauch gibt die Strommenge an, die in einem Land verbraucht wird.[15] Der **Nettostromverbrauch** entspricht wiederum dem Bruttostromverbrauch bereinigt um den Eigenbedarf der Kraftwerke und den Anteil der Strommenge, der durch den Transport im Netz verloren geht. Der Nettostromverbrauch wird auch häufig als Endenergieverbrauch bezeichnet.[16]
- Verschiedene Studien weisen entweder nur Netto- oder nur Bruttostrom aus. Für eine einheitliche Begriffsnutzung wäre eine Umwandlung der Werte basierend auf verschiedenen Annahmen erforderlich, weshalb in dieser Studie darauf verzichtet wird.[17]

→ Im Folgenden wird Brutto- bzw. Nettostrom nicht im Haupttext sondern lediglich in Fußnoten ausgewiesen, da die geringe Differenz nicht ausschlaggebend für die Aussagen der Studie ist.

Der Energiebedarf sowie die zu dessen Deckung verwendeten Energieträger verteilen sich ungleich über die Endanwendungssektoren (siehe Abbildung 6).

- Während in **Haushalten** und im **Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungssektor** (GHD) der Endenergieverbrauch durch Raumwärme und Warmwasser dominiert wird, bestimmt im **Industriesektor** der Bedarf an Prozesswärme und mechanischer Energie in einem hohen Maße den Energieverbrauch. In allen drei Sektoren kommen dafür insbesondere Strom, Erdgas und Mineralölprodukte (überwiegend Heizöl) zum Einsatz. Auch Fernwärme (mit einem Anteil von fast 9% im Haushaltssektor) spielt eine relevante Rolle. Stein- und Braunkohle wird in der Industrie in der Regel in Hochtemperaturprozessen eingesetzt (hier Anteil von 16%).

  Die direkte Nutzung von erneuerbaren Energien erfolgt zu größeren Mengen insbesondere im Haushaltssektor (ca. 16% des Endenergieverbrauchs der Haushalte) in Form von holzbasierten Brennstoffen (z.B. Holzpellets) oder von Umgebungswärme bei Nutzung von Wärmepumpen. Wird zusätzlich der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung[18] (41%) berücksichtigt, beträgt der gesamte EE-Anteil am Endenergieverbrauch der Haushalte knapp 24%, des GHD-Sektors 25% und der Industrie 18%. Dies bedeutet, dass in diesen

[13] Vgl. Definitionen/Methodik der AG Energiebilanzen, https://ag-energiebilanzen.de/faq/definitionen-methodik/.

[14] Vgl. Kramer und Maaßen (2022).

[15] Vgl. Definitionen/Methodik der AG Energiebilanzen, https://ag-energiebilanzen.de/faq/definitionen-methodik/.

[16] Vgl. BMWi (2016).

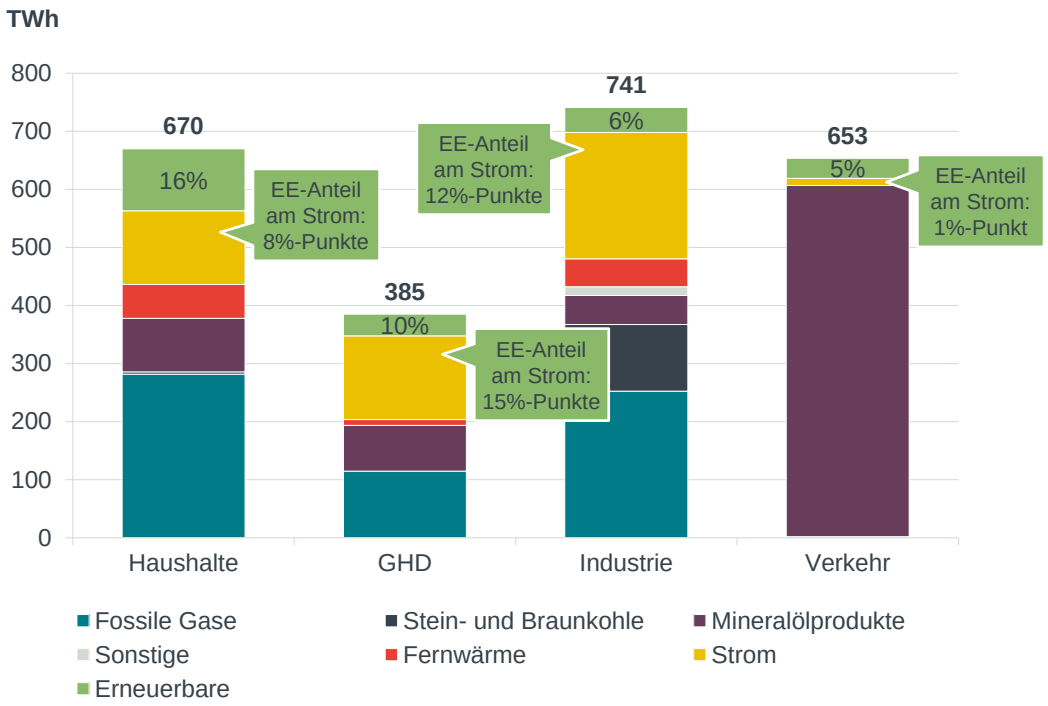
[17] Vgl. Kramer und Maaßen (2022).

[18] Hier Nettostromerzeugung.

Sektoren jeweils mindestens drei Viertel der Endenergie aus fossilen oder nuklearen Energieträgern stammt.

- Im **Verkehrssektor** wird Energie für den Personen- und Warentransport im Straßen-, Schienen- und Luftverkehr sowie in der Küsten- und Binnenschifffahrt eingesetzt. Hier dominieren insgesamt Flüssigkraftstoffe mit einem Anteil von 98%.[19] Mineralölprodukte haben einen Anteil von 93% am Endenergieverbrauch im Verkehr, Biokraftstoffe kommen auf 5%. Der Strombedarf im deutschen Verkehrssektor im Jahr 2021 stammt zum Großteil aus dem Schienenverkehr und beträgt ca. 12 TWh (2%).[20]

Abbildung 6 Endenergieverbrauch der Sektoren in Deutschland nach Energieträgern (2021)



Quelle: AG Energiebilanzen (2022a)

Hinweis: Der EE-Anteil am Strom stellt den rechnerischen Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch des jeweiligen Sektors dar, ausgedrückt in Prozentpunkten. Die Berechnung erfolgt über die Multiplikation des Stromanteils am Endenergieverbrauch des Sektors mit dem Anteil EE an der Nettostromerzeugung in Höhe von 41% im Jahr 2021 (siehe AG Energiebilanzen).

Insgesamt ist der Anteil fossiler Energieträger am Endenergieverbrauch mit ca. 80% noch sehr hoch. Es muss daher noch ein weiter Weg zurückgelegt werden, um das Energiesystem über alle Verbrauchssektoren hinweg zu defossilisieren, trotz aller Anstrengungen beim Ausbau der erneuerbaren Energien in den letzten zwanzig Jahren.

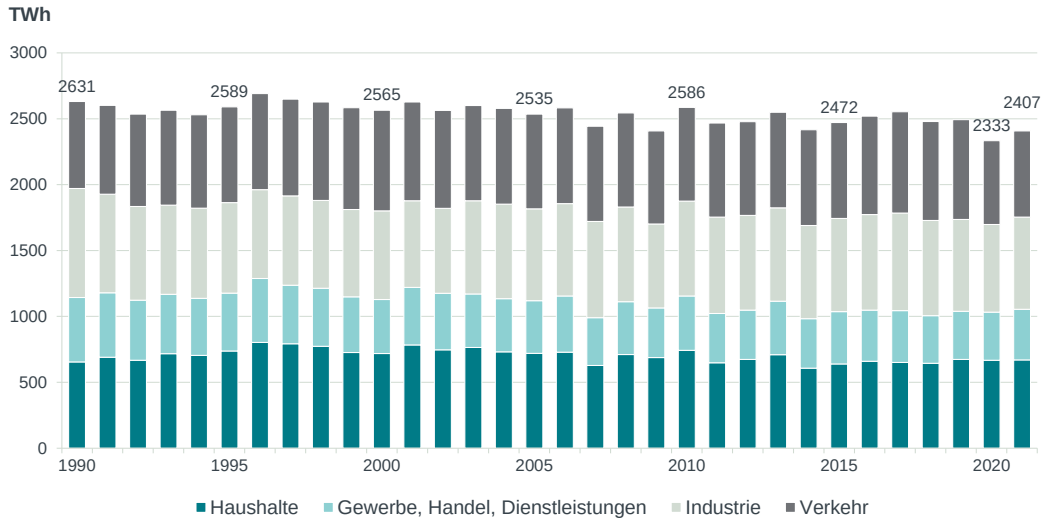
[19] Dies ist durch die hohe Energiedichte von flüssigen Energieträgern bedingt, die bei mobilen Anwendungen besonders relevant ist.

[20] Vgl. AG Energiebilanzen (2022a).

2.2 Der Energieverbrauch hat sich stabilisiert, ein signifikanter Rückgang ist allerdings (noch nicht) zu verzeichnen

Der Energieverbrauch Deutschlands hat sich in den vergangenen 30 Jahren relativ stabil entwickelt. Im Gegensatz zu den 1960er und 1970er Jahren hat sich der Verbrauch vom Wirtschaftswachstum entkoppelt. Dies ist energiepolitisch bereits ein erheblicher Erfolg. Seit 1990 schwankt der Endenergieverbrauch in Deutschland um die 2.500 Terrawattstunden (TWh), mit einem schwach fallenden Trend. Während der Endenergiebedarf in Deutschland im Jahr 1990 bei über 2.600 TWh lag, betrug dieser im Jahr 2021 noch ca. 2.400 TWh. Dies entspricht einem Rückgang des Endenergieverbrauchs von 8,5%, bzw. von 0,3% pro Jahr bei gleichzeitig tendenziell steigender Wirtschaftsleistung.

Abbildung 7 Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren

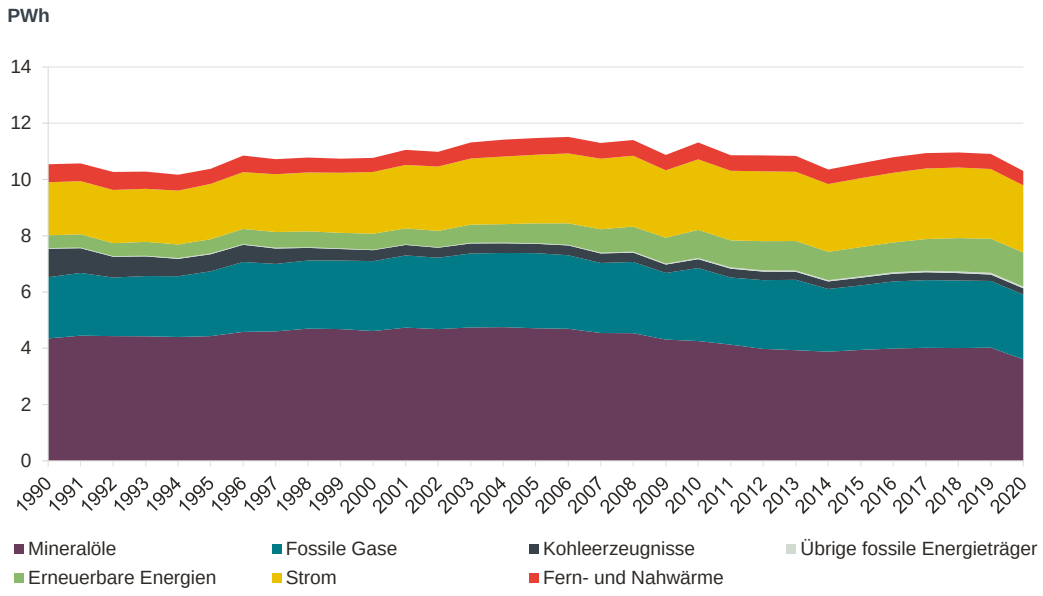


Quelle: AG Energiebilanzen (2022a)

Hinweis: Die Daten für das Jahr 2020 sind aufgrund der Corona-Pandemie nur bedingt aussagekräftig.

Auch in der **gesamten EU** hat der Endenergieverbrauch gegenüber 1990 stagniert, siehe Abbildung 8. Effizienzsteigerungen bei Energieanwendungen und -umwandlung sind über die Zeit durch gestiegene Nachfrage durch neue Energieverbräuche und wachstumsbedingte Energienachfrage kompensiert worden. Beispielsweise sind Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren heute wesentlich effizienter als 1990, gleichzeitig ist der individuelle Mobilitätsbedarf sowie der Anspruch an komfortablere PKW-Fahrzeuge in Bezug auf Leistung, Sicherheit und Größe gestiegen.

Abbildung 8 Endenergieverbrauch in der EU nach Energieträgern



Quelle: Eurostat, Energiedaten

Hinweis: Die Daten für das Jahr 2020 sind aufgrund der Corona-Pandemie nur bedingt aussagekräftig.

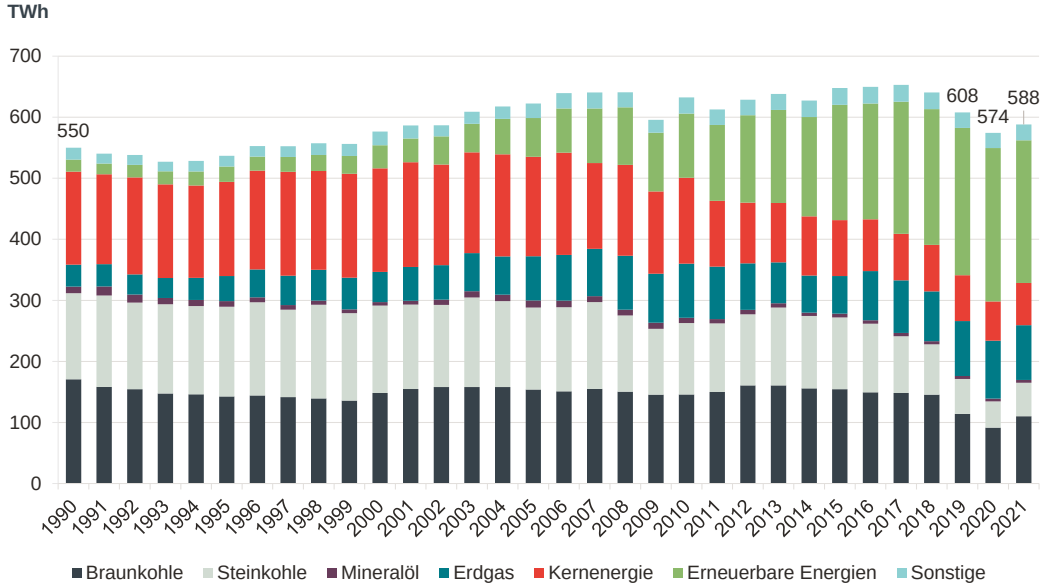
Die Krisen der 1970er und 80er Jahre und relativ hohe Energiepreise haben demnach in Deutschland und Europa zu einer erheblichen Steigerung der Energieeffizienz und zu einer statistischen Entkopplung des Energieverbrauchs vom Wirtschaftswachstum geführt. Eine merkliche Absenkung des Energieverbrauchs in absoluten Größen konnte allerdings trotz aller bisherigen Effizienzanstrengungen nicht erreicht werden.

2.3 Die Transformation des Energiesystems ist vor allem im Stromsektor schon seit langem im Gange – der Weg zur Defossilisierung ist aber auch hier noch weit

Im Vergleich zu anderen Sektoren hatte die Transformation des Energiesystems im Bereich Strom relativ früh eingesetzt. Begonnen hat der systematische Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland 1991 mit Inkrafttreten des ersten Stromeinspeisungsgesetzes. Eine deutlich höhere Dynamik des Zubaus folgte dann ab dem Jahr 2000 mit dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG).[21] Die EE-Stromerzeugung in Deutschland mit Wind- und Solarenergie blickt also auf eine Historie von über 30 Jahren systematischen Ausbaus zurück.

[21] Siehe z.B. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Recht-Politik/Das_EEG/DatenFakten/daten-und-fakten.html

Abbildung 9 Stromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern (1990 bis 2021)



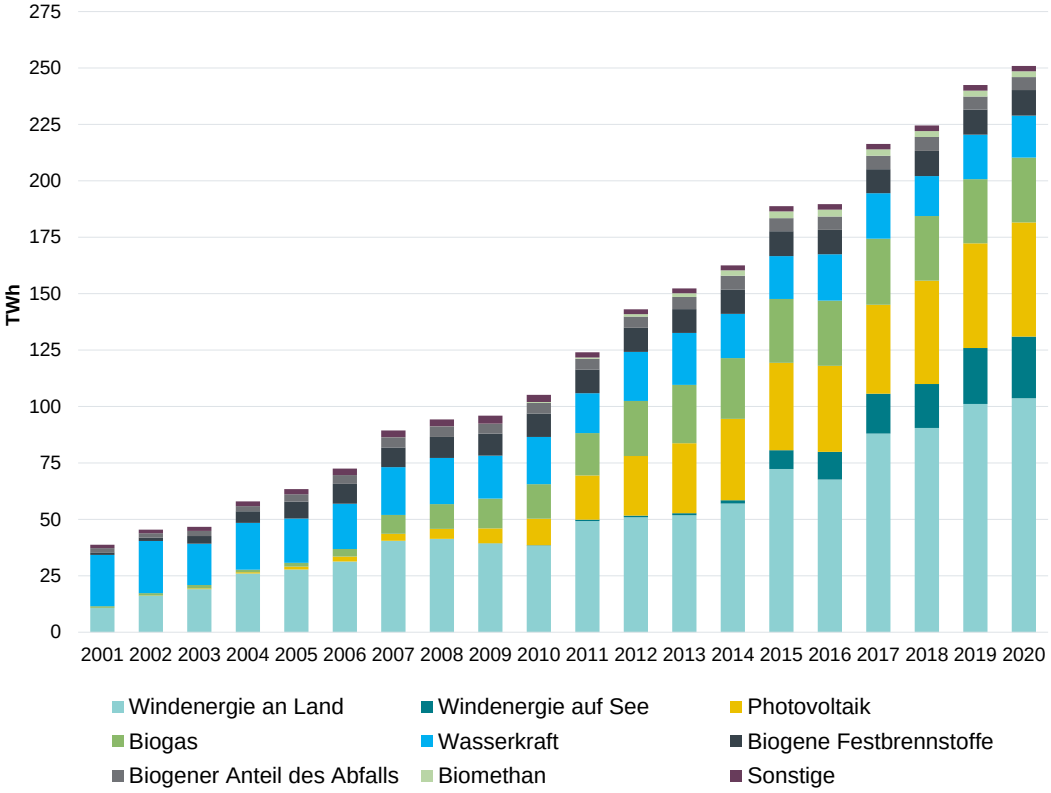
Quelle: AG Energiebilanzen (2022b)

Hinweis: Das Diagramm weist die Bruttostromerzeugung aus.

Heute erreichen erneuerbare Energien in Deutschland einen Anteil von 41% an der gesamten Stromerzeugung.[22] Dies ist ein beträchtlicher Fortschritt. Allerdings bedeutet dies gleichzeitig, dass alleine zur Deckung des heutigen Strombedarfs noch einmal nahezu 60% der Erzeugung durch erneuerbare Energien ersetzt werden müssen.

[22] Hier bezogen auf die Nettostromerzeugung.

Abbildung 10 Entwicklung der Stromerzeugung erneuerbarer Energieträger in Deutschland seit 2001



Quelle: Frontier Economics basierend auf BMWK (2022c), Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland

Hinweis: Hier wird die Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien dargestellt.

Noch herausfordernder wird es dadurch, dass es sich bei den nicht-erneuerbaren Energien mit Kernenergie, Kohlen und Erdgas um Erzeugungstechnologien handelt, die gesicherte Leistung bereitstellen können. Dies ist bei fluktuierender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nicht der Fall. Insbesondere Windenergie an Land sowie Solarenergie wurden seit dem Jahr 2000 deutlich ausgebaut, seit 2015 auch Windenergie auf See. Diese Technologien sollen in Zukunft die Stützen der Stromversorgung in Deutschland bilden. Zusammen kamen sie im Jahr 2020 für knapp 72% der aus erneuerbaren Energien erzeugten Strommenge auf. Die Stromerzeugung aus Wind- und PV-Anlagen hängt von der stark variierenden Windhöffigkeit und der Zahl der Sonnenstunden ab, weswegen diese keine gesicherte Leistung darstellen.[23] Hierauf werden wir im nächsten Abschnitt noch einmal vertieft eingehen.

[23] Vergleich dazu auch Abschnitt 3.3.4.

3 FÜR DIE ENERGIEWENDE DROHT EINE LÜCKE AN ERNEUERBAREM STROM

Für das Erreichen der Klimaschutzziele ist eine vollständige Reduktion der Treibhausgasemissionen und somit ein Ersatz aller fossiler Energieträger erforderlich. In Anbetracht der im vorherigen Abschnitt dargestellten Dominanz der fossilen Energieträger ist die erforderliche vollständige Energiewende von fossilen zu erneuerbaren Energien noch in weiter Ferne.

In diesem Kapitel setzen wir die im vorherigen Abschnitt beschriebene Ausgangssituation ins Verhältnis zu den für die Erreichung der Klimaschutzziele notwendigen Schritte. Hierfür

- fassen wir zunächst kurz die deutschen Klimaschutzziele zusammen (Abschnitt 3.1);
- stellen wir aus verschiedenen Studien Stromverbrauchsprognosen für Deutschland zusammen, die sich aus den Zielsetzungen zur Defossilisierung insbesondere in einer Welt mit einem starken Fokus auf Elektrifizierung ergeben würden (Abschnitt 3.2);
- stellen diesen den EE-Stromerzeugungsausbau gegenüber, der notwendig ist, um diesen Bedarf zu decken (Abschnitt 3.3); und
- untersuchen, inwiefern sich eine Versorgungslücke für EE-Strom unter den realen Gegebenheiten in Deutschland ergeben könnte.

HINTERGRUND UND KAPITELÜBERBLICK

- Um das Leitziel der deutschen Energiepolitik zu erfüllen – bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu werden – ist ein schnellerer Ausstieg aus fossilen Energieträgern und eine umfassende Beschleunigung des Ausbaus der erneuerbaren Energien notwendig.
- Für die Transformation des Energiesystems hat die Politik regulative Maßnahmen zur Beschleunigung der Stromwende aufgesetzt und sieht zudem die umfassende Elektrifizierung einer Vielzahl von Endenergieanwendungen in allen Verbrauchssektoren inklusive Industrie, Haushalte und Verkehr vor, was die heimischen Stromerzeugungskapazitäten vor große Herausforderungen stellt.
- Ca. 2.000 TWh fossile Endenergie müssen bis 2045 ersetzt oder in der Menge reduziert werden. Lediglich 230 TWh des heutigen Stromverbrauchs werden derzeit von erneuerbarem Strom gedeckt – dies entspricht einem Achtel der Endenergie und 41% des Stromverbrauchs.
- Mit der Elektrifizierung verschiedener weiterer Sektoren wird der Bedarf an Strom bis 2045 weiter ansteigen. Je nach Szenario prognostizieren Studien, dass der heutige Stromverbrauch von knapp 600 TWh/a (brutto) auf 800 bis nahezu 1.450 TWh/a ansteigen könnte. Die Anforderungen an den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung sind dabei erheblich. Der Ausbau muss sich zukünftig stark beschleunigen, um die hohe Nachfrage nach EE-Strom erfüllen und die Versorgungssicherheit jederzeit jahres- und tageszeitunabhängig gewährleisten zu können.
- Schreitet der Ausbau von erneuerbaren Energien nur im moderaten Tempo voran und/oder steigt die Stromnachfrage signifikant aufgrund starker Elektrifizierung, droht langfristig eine energetische EE-Stromlücke.
- Zukünftig droht auch eine Unterdeckung an gesicherter Leistung – sowohl aufgrund wachsender Spitzenlast als auch aufgrund des Wegfalls gesicherter Leistung aus fossilen und nuklearen Kraftwerken.

3.1 Das Leitziel der deutschen Energiepolitik: Klimaneutralität bis zum Jahr 2045

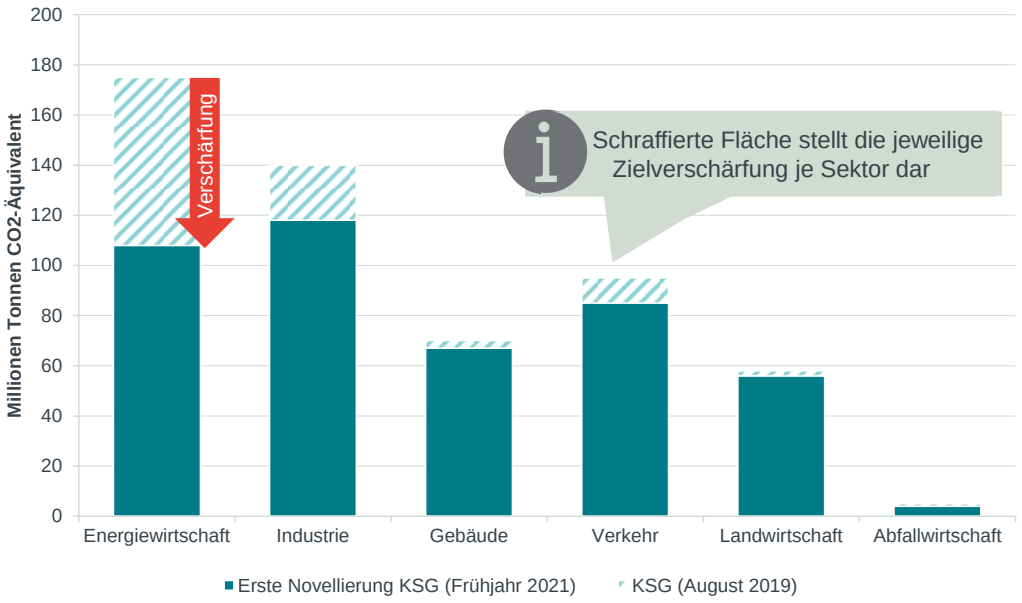
Im Zuge des im Dezember 2019 von der Europäischen Kommission vorgestellten **European Green Deal** hat sich die EU das Ziel gesetzt, ab dem Jahr 2050 (netto) keine Treibhausgase mehr auszustoßen. Auf dem Weg in Richtung Klimaneutralität sollen zudem die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 um 55% sinken. Um das Zwischenziel 2030 zu erreichen, hat die Europäische Kommission am 14. Juli 2021 das sogenannte „Fit-for-55"-Paket vorgestellt.[24] Es beinhaltet Vorschläge für eine Reihe reformierter und neuer Richtlinien und Verordnungen zur EU-Klimapolitik. Der vorgeschlagene Maßnahmenkatalog beinhaltet neben marktorientierten Instrumenten wie der CO_2-Bepreisung konkrete Zielvorgaben wie die Aktualisierung der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie, Vorschriften wie strengere CO_2-Emissionsstandards für PKW und leichte Nutzfahrzeuge sowie Fördermaßnahmen wie die Förderung von Innovation und Solidarität.

Auf **nationaler Ebene** bestimmt das deutsche Klimaschutzgesetz (KSG) die Klimaschutzziele, bis hin zu Treibhausgasemissionsreduktionszielen für die einzelnen Verbrauchssektoren. Seit der Novellierung des KSG im August 2021 sind in Deutschland sowohl die Klimaneutralität bis zum Jahr 2045, als auch eine Verschärfung der Sektorziele für das Jahr 2030 gesetzlich bindend.[25] Im Hinblick auf das Jahr 2030 sollen zusätzliche Treibhausgasreduktionen hauptsächlich aus der Energiewirtschaft kommen, jedoch wurden auch die Ziele der Industrie und des Verkehrsbereichs signifikant durch das novellierte KSG gegenüber dem Gesetz aus dem Jahr 2021 verschärft (Abbildung 11).

[24] Siehe Europäische Kommission (2023).

[25] Mit dem im April 2021 veröffentlichen Beschluss des Bundesverfassungsgerichts wurde das KSG von 2019 in Teilen als verfassungswidrig eingestuft, da laut BVerfG-Entscheidung hinreichende Maßnahmen zur Emissionsreduktion ab 2031 nicht in ausreichender Form enthalten waren (vgl. BVerfG (2021)). Im Zuge dessen schlug das Bundesumweltministerium im Referentenentwurf zur Novellierung des KSG neben der Klimaneutralität bis 2045 auch verschärfte Sektorziele bis 2030 vor, welche seit der Verabschiedung im Bundestag im August 2021 gesetzlich bindend sind (vgl. Bundestag (2021)).

Abbildung 11 Nationale Sektorzielverschärfung 2030 im Rahmen des KSG



Quelle: Frontier Economics auf Basis des KSG (siehe Klimaschutzgesetz (2021))in seiner ursprünglichen Fassung vom 12.12.2019 (BGBl. I S. 2513) und ersten Novellierung vom 18.08.2021 (BGBl. I S. 3905)

Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels und des völkerrechtswidrigen Angriffskrieges Russlands gegen die Ukraine hatte das BMWK im April 2022 mit dem sogenannten Osterpaket eine Reihe an weiteren Energiesofortmaßnahmen vorgeschlagen,[26] die von Bundestag und Bundesrat im Juli 2022 verabschiedet wurden.[27] Vorrangiges Ziel des Pakets ist ein schnellerer Ausstieg aus fossilen Energieträgern und eine umfassende Beschleunigung des Ausbaus der erneuerbaren Energien. Die Gesetzesreform betrifft beispielsweise

- das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG): Es wurde ein neuer Ausbaupfad für erneuerbare Energien definiert und daraus adjustierte Ausschreibungsmengen, vor allem für Wind- und Solaranlagen, abgeleitet. Bis zum Jahr 2030 soll der Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch auf 80% gesteigert werden, und bis zum Jahr 2040 sollen 160 GW Windanlagen an Land und 400 GW an Solaranlagen ausgebaut werden.
- das Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG): Hiermit sollen die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Ausbau von Offshore-Windkraftkapazitäten auf jeweils mindestens 30 GW bis zum Jahr 2030, 40 Gigawatt bis zum Jahr 2035 und 70 Gigawatt bis zum Jahr 2045 geschaffen werden.

Zentrales Element der Transformation des Energiesystems in Richtung Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 ist (weiterhin) die umfassende Elektrifizierung einer Vielzahl von Endenergieanwendungen in allen Verbrauchssektoren (inklusive Industrie, Wärme und Verkehr) mit einem gleichzeitigen erheblichen Ausbau der erneuerbaren Energien. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, was diese Strategie für den zukünftigen Stromverbrauch bedeutet, welche

[26] Siehe BMWK (2022a).
[27] Siehe BMWK (2022b).

Herausforderungen sich für die Stromversorgung ergeben und ob ein solcher Umbau des Energiesystems im vorgegebenen Zeitrahmen realistisch erscheint. Im Folgenden gehen wir diesen Fragen nach, bevor wir auf alternative Transformationsstrategien als „Sicherheitsnetz“ und Ergänzung zur derzeitigen klimapolitischen Strategie eingehen.

3.2 Szenarien für den zukünftigen Stromverbrauch in Deutschland

Die Verfolgung der Klimaschutzziele erfordert die Defossilisierung aller energieverbrauchenden Sektoren. Dies bedeutet, dass

- der derzeit aus fossilen Energieträgern bereitgestellte Teil der Endenergie in Höhe von ca. 2.000 TWh pro Jahr durch Energiesparmaßnahmen reduziert oder in irgendeiner Form durch erneuerbare Energien ersetzt werden muss (Abschnitt 3.2.1); und
- dies insbesondere bei weitgehender Elektrifizierung von Endanwendungen zu einem massiven Anstieg des Strombedarfs führen wird (Abschnitt 3.2.2).

3.2.1 Ca. 2.000 TWh fossile Endenergie müssen in Deutschland bis 2045 ersetzt oder reduziert werden

Entsprechend den klimapolitischen Zielsetzungen der Bundesregierungen muss ausgehend von aktuellen Zahlen ein Endenergieverbrauch an fossilen Energieträgern von etwa 2.000 TWh bis 2045 in Deutschland ersetzt werden. Zum Vergleich: Der Stromverbrauch beläuft sich in Deutschland heute auf knapp 600 TWh pro Jahr, die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auf lediglich ca. 230 TWh.[28] Die EE-Stromerzeugung entspricht also lediglich ca. einem Achtel des zu ersetzenden Endenergieverbrauchs.

Der Ersatz fossiler Energie kann durch verschiedene Maßnahmen erfolgen:

- Reduzierung des Energiebedarfs durch Steigerung der Energieeffizienz,
- Direkter Einsatz erneuerbarer Energien, z.B. in Form von Biomasse, Biogasen, Solarthermie etc.,
- Einsatz erneuerbarer Energien in Form von Strom in
  - bisherigen Stromanwendungen, in denen bislang fossil hergestellter Strom eingesetzt wurde, und
  - neuen Stromanwendungen (wie beispielsweise neu errichtete Batterieproduktionsfabriken oder auch elektrisch betriebene Fahrzeuge oder Wärmepumpen)
- Einsatz erneuerbaren Stroms als Power-to-X (PtX oder E-Fuels), also erneuerbare gasförmige (Power-to-Gas wie Wasserstoff oder synthetisches Methan) oder erneuerbare flüssige Kraft- und Brennstoffe wie Power-to-Liquids

[28] Es handelt sich hier jeweils um Brutto-Werte.

(z.B. E-Diesel, E-Benzin, E-Kerosin oder E-Heizöl oder synthetisches Methanol).

Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz benötigen Zeit, und Energieeinspareffekte sollten nicht überschätzt werden

Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sind spätestens seit dem im Jahr 2016 im „Grünbuch Energieeffizienz“ und dem „Impulspapier Strom 2030“ vorgestellten Dreiklang der Energiewende ein wesentliches Element der Klimapolitik in Deutschland. Neben dem direkten und indirekten Einsatz erneuerbarer Energie stellt das Prinzip „Efficiency First“ einen wesentlichen Pfeiler der Klimapolitik dar, der besagt, dass der Energiebedarf, wo volkswirtschaftlich sinnvoll, deutlich verringert werden sollte.[29]

Allerdings hat es bereits seit den Ölpreiskrisen in den 1970er und 80er Jahren erhebliche Anstrengungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs gegeben. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, konnte in den letzten vierzig Jahren der Endenergieverbrauch vom Wirtschaftswachstum entkoppelt werden. Möglich wurde dies durch eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz von Energieanwendungen (wie z.B. energiesparende Leuchtmittel oder effizientere Verbrennungsmotoren und Wärmeerzeuger), sowie weitere Energiesparmaßnahmen wie z.B. die energetische Sanierung und Isolierung von Gebäuden. Vor diesem Hintergrund sind in allen energieverbrauchenden Sektoren schon deutliche Effizienzsteigerungen erreicht worden. Trotz aller Anstrengungen hat es allerdings bisher keine nennenswerte absolute Reduktion des Energieverbrauchs gegeben.

Studien prognostizieren, dass der Energieverbrauch für diverse Sektoren zukünftig sinken wird, teilweise begründet durch Effizienzsteigerungen bei bestehenden Anwendungen oder einem Wechsel zu effizienteren Technologien. In BMWi Langfristszenarien (2021) wird angenommen, dass die Energieeffizienz „ambitioniert gesteigert“ wird.[30] Studien gehen davon aus, dass sich der Endenergiebedarf im Verkehrssektor durchschnittlich um knapp 2% und im Industriesektor um knapp 1% pro Jahr reduzieren lässt.[31] Das bedeutet, dass sich der Energiebedarf von 2020 bis 2045 bei sonst gleichbleibenden Bedingungen um 50% im Verkehrssektor und um 20% im Industriesektor reduzieren würde. Dem gegenüber steht die zuletzt tatsächlich realisierte Energieverbrauchsreduktion über die Jahre 2010 bis 2021: Der Endenergiebedarf im Verkehrssektor hat sich in diesem Zeitraum jährlich nur um durchschnittlich 0,7% pro Jahr reduziert, im Industriesektor lediglich um durchschnittlich 0,3% pro Jahr.[32] Die prognostizierten jährlichen Effizienzsteigerungen im Verkehrs- und Industriesektor wären dann mehr als doppelt so hoch verglichen zu den Werten aus der jüngeren Vergangenheit.

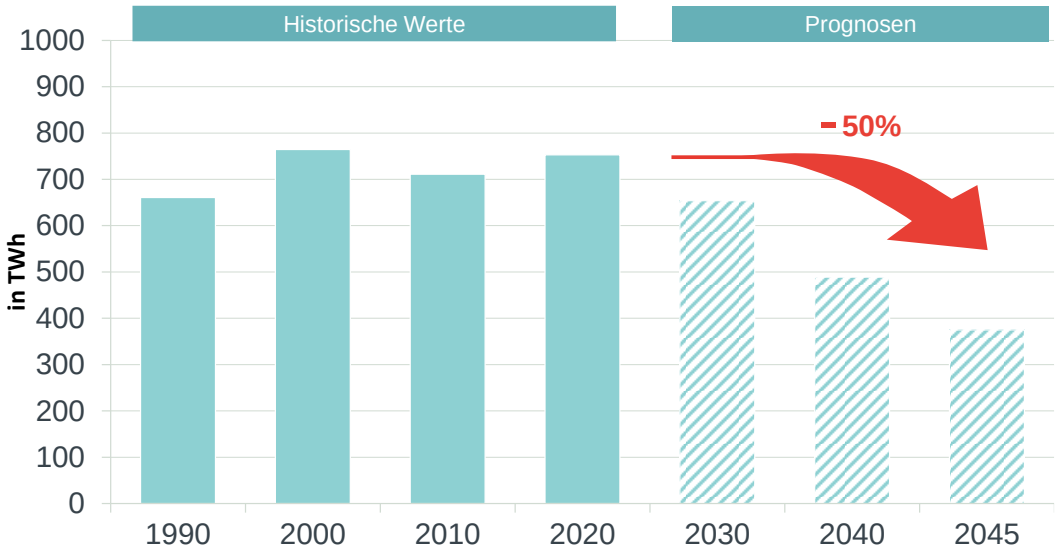
[29] Vgl. BMWi (2017), Grünbuch Energieeffizienz.

[30] Vgl. BMWi Langfristszenarien (2021), S.11.

[31] Vgl. BMWi Langfristszenarien (2021), TN-Strom Szenario für Verkehr und Industrie, und BDI (2021), Zielpfad für Industrie.

[32] Vgl. AG Energiebilanzen (2022a).

Abbildung 12 Energieverbrauch im Verkehrssektor von 1990 bis 2045



Quelle: Die Daten für die Jahre von 1990 bis 2020 stammen aus den AG Energiebilanzen (2022a), die Werte für 2030 bis 2050 basieren auf Prognosen aus BMWi Langfristszenarien (2021), Szenario TN Strom.

Die Fortsetzung dieser Effizienzmaßnahmen wird auch in Zukunft wichtige Beiträge zur Transformation des Energiesystems leisten, auch durch den vermehrten Einsatz von Elektrofahrzeugen (statt Verbrennungsmotoren) und Wärmepumpen (statt Heizkesseln). In klassischen, z.B. industriellen Anwendungen stellt sich eine massive Erhöhung der Energieeffizienz allerdings als Herausforderung dar, da „Quick wins“ bei Energieeinsparungen bereits erschlossen sind. In anderen Bereichen wie dem Gebäudesektor können Effizienzmaßnahmen nicht ad hoc umgesetzt werden. Insofern werden weitere Steigerungen der Energieeffizienz Zeit benötigen. Zudem werden potentielle Mehrverbräuche durch neue Energieanwendungen und zukünftiges Wirtschaftswachstum zumindest teilweise die Wirkung dieser Effizienzmaßnahmen kompensieren. Hohe Erwartungen an Energieeinsparungen in absoluten Größen sind damit kritisch zu hinterfragen.

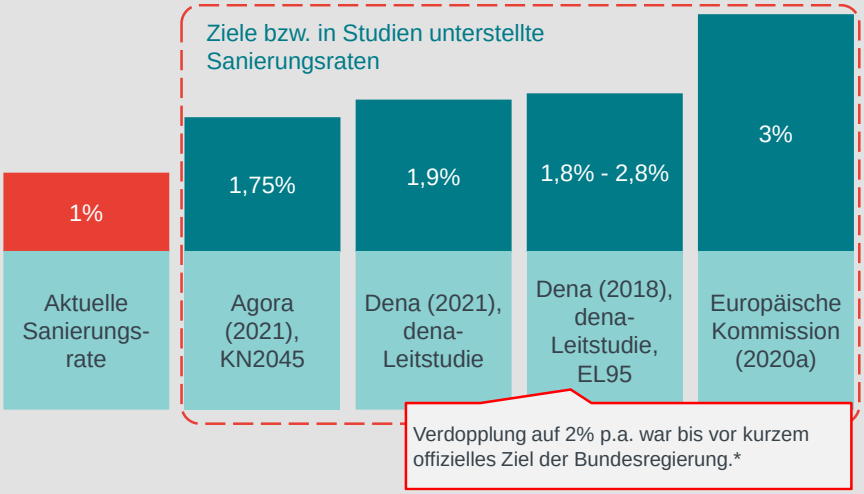
DAS BEISPIEL DES GEBÄUDESEKTORS

Die Herausforderungen im Bereich der Energieeffizienz lassen sich anhand des Beispiels des Gebäudesektors veranschaulichen, in dem Effizienzmaßnahmen in Form von Sanierungen einen wichtigen Beitrag leisten, um den Heizbedarf zu reduzieren. So setzt die Bundesregierung im **Gebäudesektor** zur Erreichung der Klimaziele bislang vorrangig auf eine Steigerung der Energieeffizienz durch umfassende energetische Gebäudesanierungen.[33] Die zur Erreichung der Klimaziele erforderliche Sanierungsrate für Gebäude liegt bei 2% pro Jahr. Dies unterstellen mehrere Studien entsprechend auch in ihren Zukunftsprognosen. Dena (2021) geht von einer notwendigen jährlichen Sanierungsrate von 1,9% von 2030 bis 2045 aus. Dena (2018) nimmt im EL95 Szenario Sanierungsraten zwischen 1,6% und 2,8% zwischen 2015 und 2050 an.

[33] Es existiert keine einheitliche Definition von Sanierungsgrad und -tiefe. Laut Umweltbundesamt gilt ein Gebäude als vollsaniert, wenn mindestens vier Maßnahmen, die zu Energieeinsparungen führen,

DAS BEISPIEL DES GEBÄUDESEKTORS

Abbildung 13 Aktuelle Sanierungsrate ggü. Zielvorgaben



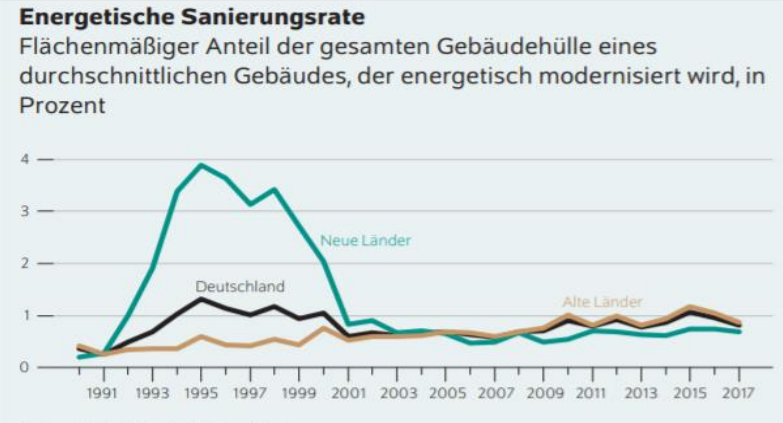
Quelle: *Frontier Economics basierend auf den genannten Quellen*

Hinweis: *Vgl. „Die Sanierungsrate als wichtige Größe für die Energiewende soll laut Bundesregierung bis zum Jahr 2020 auf **zwei Prozent** jährlich erhöht und damit verdoppelt werden, um die festgelegten Energiesparziele zu erreichen.", Umweltbundesamt (2019), S.70, und „Das Ziel einer Verdopplung der Rate bzw. einer Erhöhung auf **2%/a** […] ist allerdings noch **weit entfernt**.", IWU (2018), S. 98.*

** Im Koalitionsvertrag der Ampel-Koalition ist diese Zielvorgabe allerdings nicht mehr explizit vorhanden.*

Tatsächlich betrug jedoch die energetische Sanierungsrate in Deutschland in den letzten 20 Jahren nicht mehr als 1% pro Jahr.[34] Zudem weist die EU-Kommission darauf hin, dass jährlich nur 0,2% der Gebäude energetisch so umfangreich saniert werden, dass eine Senkung des Energieverbrauchs um 60% erreicht werden könnte („*deep renovation*"). Bei gleichbleibender Sanierungsgeschwindigkeit würde demnach die Erreichung von Klimaneutralität im Gebäudesektor erst weit nach dem anvisierten Jahr 2045 erzielt werden.[35]

Abbildung 14 Energetische Sanierungsrate von 1990 bis 2017



Quelle: DIW Berlin (2019), S. 628, Abbildung 7

durchgeführt wurden. Als teilsaniert gelten Gebäude bereits nach der Durchführung von nur einer energetischen Sanierungsmaßnahme, vgl. Umweltbundesamt (2019), S. 67.

34 Vgl. DIW Berlin (2019).

35 Europäische Kommission (2020a), S. 2: „*The weighted annual energy renovation rate is low at some 1%. Across the EU, deep renovations that reduce energy consumption by at least 60% are carried out only in*

Die Nutzung biogener Energieträger stößt aufkommensseitig an Grenzen und steht in Konkurrenz zu anderen Zielen

Feste Biomasse, Biogas, Biomethan und Biokraftstoffe sind per Definition klimaneutrale Energieträger, die in verschiedenen energierelevanten Sektoren eingesetzt werden und fossile Energieträger ersetzen können. In Deutschland basiert der Großteil der Bioenergie auf Holz und Holzresten, landwirtschaftlichen Abfällen, Gülle und speziell angebauten Energiepflanzen.

In den letzten beiden Jahrzehnten entstand zudem eine gesellschaftliche **Debatte um die Flächennutzungskonkurrenz zwischen dem Anbau von Pflanzen zur Erzeugung von Bioenergie und dem Anbau zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion**. Insbesondere in der Nahrungsmittelkrise ab dem Jahr 2007 stiegen die Nahrungsmittelpreise auf dem Weltmarkt.[36] Als Ursache wurde unter anderem (neben etwa der Spekulation auf Nahrungsmittel oder Flächenkonkurrenz zur Fleischproduktion) die Nachfrage nach Bioenergie, im Besonderen nach Biokraftstoffen, in Europa und den USA angeführt. Eine der Folgen aus der „Teller-oder-Tank"-Debatte war die Einführung von Nachhaltigkeitskriterien auf EU-Ebene per Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2009/28/EG für die Nutzung von „Energiepflanzen". In Deutschland erfolgte die Umsetzung durch eine Biomassestrom- sowie eine Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. In jedem Fall setzt die Debatte der Nutzung von Biomasse und biogenen Energieträgern für die nächsten Jahre Grenzen. Zwar soll die Nutzung von Biomasse der 2. und 3. Generation, die v.a. aus biogenen Reststoffen bestehen, ausgebaut werden, doch sind die erschließbaren Potenziale ungewiss.

50 TWh der erzeugten Strommenge in Deutschland wurde im Jahr 2021 aus Biogas, fester Biomasse und biogenem Abfall produziert. Rohbiogas wird zum überwiegenden Teil direkt zur dezentralen Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt. Es kann jedoch auch zu Biomethan aufbereitet werden. Biomethan ist chemisch gleichzusetzen mit Erdgas und kann in das Erdgasnetz eingespeist werden. Heute werden in Deutschland knapp 10 TWh Biomethan eingespeist, was etwa einem Anteil von 1% am Erdgasverbrauch entspricht.[37] Des Weiteren können aus Biomasse flüssige Biokraftstoffe erzeugt werden, die derzeit in Deutschland aufgrund der gesetzlichen Biokraftstoffquoten vor allem im Straßenverkehr zum Einsatz kommen und dort etwa 6% des Kraftstoffbedarfs decken.[38]

Zwar könnte die Produktion von Biomethan unter günstigen regulatorischen Rahmenbedingungen grundsätzlich erheblich gesteigert werden. Allerdings ist das Potenzial vor allem durch die begrenzte Verfügbarkeit nachhaltiger Biogassubstrate, die nicht in Konkurrenz zum Nahrungsmittelanbau stehen,

0.2% of the building stock per year and in some regions, energy renovation rates are virtually absent. At this pace, cutting carbon emissions from the building sector to net-zero would require centuries."

36 Vgl. bspw. Socialwatch.org (2009).

37 Vgl. BNetzA (2022a), S. 341 und 359.

38 6,1% beträgt der Anteil auf Basis des Endenergieverbrauchs im Straßenverkehr im Jahr 2021. Bezogen auf den Endenergiebedarf des gesamten deutschen Verkehrssektors kommen erneuerbare Energieträger auf einen Anteil von 5,3%. Vgl. AG Energiebilanzen (2022a).

beschränkt und beläuft sich voraussichtlich in Deutschland nach Expertenschätzungen auf bis zu 100 TWh.[39]

Der direkte und der indirekte Einsatz grünen Stroms werden in Deutschland die Grundpfeiler der Transformation des Energiesystems bleiben

Die Erhöhung der Energieeffizienz sowie der Einsatz von biogenen, erneuerbaren Energien werden somit einen Beitrag zur Transformation des Energiesystems leisten, allerdings sind die Potenziale begrenzt. Damit verbleiben der **direkte Einsatz von erneuerbarem Strom** sowie der Einsatz von synthetischen, aus erneuerbarem Strom hergestellten Brenn- und Kraftstoffen (Power-to-X – Pfad zur Herstellung von PtG und PtL) als weitere Optionen zur Substitution fossiler Energieträger:

- Politisch wird v.a. die direkte Elektrifizierung von Endanwendungen und deren Versorgung mit erneuerbarem Strom forciert.
- Synthetische Brenn- und Kraftstoffe sollen gemäß den derzeitigen Klimaschutzmaßnahmen lediglich in jenen Bereichen eingesetzt werden, die technisch schwer oder nicht elektrifizierbar sind. Dazu gehören der Luftverkehr, in dem absehbar bereits aus technischen Gründen keine Alternative zu Flüssigkraftstoffen (E-Kerosin) erkennbar ist, und verschiedene industrielle Prozesse (v.a. Hochtemperaturprozesse), in denen zukünftig vorrangig Wasserstoff verwendet werden soll.

Der für die umfassende Elektrifizierung benötigte Strom aus erneuerbaren Energien wird vor allem in Deutschland und geographisch nahegelegenen Regionen produziert werden müssen. Der Strom kann in diesem Fall über das Stromnetz effizient transportiert und mit wenig Umwandlungsverlusten direkt eingesetzt werden. Im Folgenden gehen wir der Frage nach, ob, inwieweit und unter welchen Umständen es realistisch ist, einen großen Teil der fossilen Energieträger vornehmlich durch den direkten Einsatz von Strom zu ersetzen. Hierbei wenden wir uns zunächst dem zu erwartenden zukünftigen Strombedarf zu, bevor wir die Perspektiven der zukünftigen Bereitstellung des erneuerbaren Stroms diskutieren.

3.2.2 Die Elektrifizierung von Energieanwendungen wird zu einem erheblichen weiteren Anstieg des Strombedarfs führen

Stromverbrauchsanstiege sind in allen energierelevanten Sektoren zu erwarten

Die Transformation der Energiebereitstellung hin zu weitreichender Elektrifizierung wird zu einem deutlich ansteigenden Strombedarf in Deutschland führen. Heute liegt der Stromverbrauch in Deutschland bei ca. 570 TWh,[40] wovon 41% aus erneuerbaren Energien bedient werden. Der Großteil des

[39] Vgl. Dena (2019) und Energate (2022).

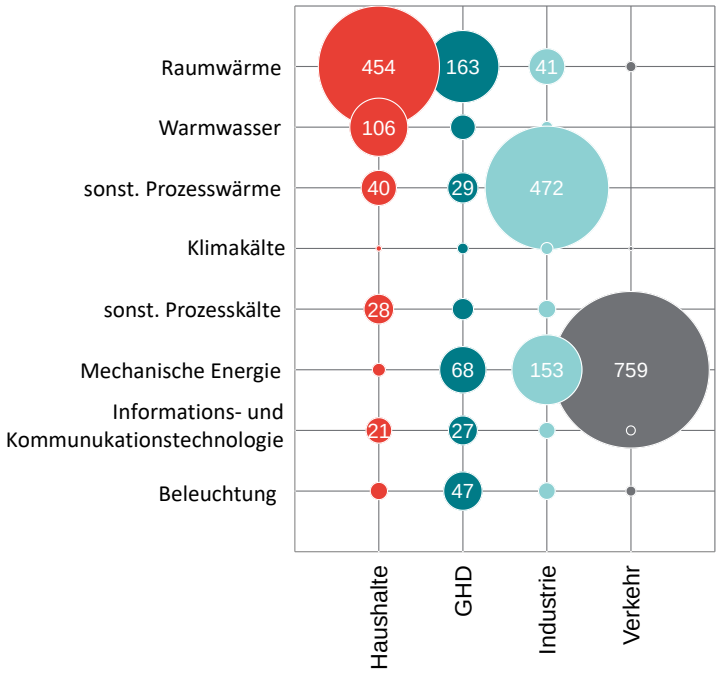
[40] Gemeint ist der Bruttostromverbrauch. Der Nettostromverbrauch liegt bei etwa 500 TWh. Vgl. AG Energiebilanzen (2022b) für das Jahr 2021.

Gesamtendenergieverbrauchs ist heute noch, wie dargestellt, nicht-elektrisch und fossil. Dies bestätigt sich bei genauerer Betrachtung der Energieverbräuche innerhalb der verschiedenen Verbrauchssektoren. Dabei zeigt sich, für welche Anwendungen jeweils zukünftig vermehrt Strom eingesetzt werden könnte:

- **Für Haushalte (HH)** liegt ein Großteil des nicht-elektrifizierten Energieverbrauchs in der Raumwärme und der Warmwasseraufbereitung. In beiden Anwendungen dominieren heute die fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl. Für beide Anwendungsbereiche gibt es verschiedene Defossilisierungsoptionen (z.B. ein Ersatz der fossilen Brennstoffe durch erneuerbare synthetische flüssige und gasförmige Brennstoffe in Brennwertgeräten, Kombination mit solarthermischen oder PV-Anlagen in Hybridanlagen, Einsatz von holzbasierten Brennstoffen, Stromheizungen und Wärmepumpen mit einem nicht-fossil erzeugten Strommix, Wärmenetzanschlüsse mit nicht-fossil erzeugter Nah- und Fernwärme). Der Anwendungsbereich Raumwärme zeichnet sich zudem durch die Möglichkeit zur Ergreifung von Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle aus.
- Im **Bereich Gewerbe Handel, Dienstleistungen (GHD)** wird neben Raumwärme und Warmwasser v.a. Energie für mechanische Prozesse, Beleuchtung sowie Informations- und Kommunikationstechnologie eingesetzt. Die beiden letztgenannten Bereiche sind bereits nahezu in vollem Umfang elektrifiziert. Für Raumwärme und Warmwasser gilt Ähnliches wie bei den Haushalten. Hier besteht ebenso noch erhebliches Elektrifizierungspotential wie bei der Erzeugung mechanischer Energie.
- Die **Industrie** benötigt Energie v.a. zur Erzeugung von Prozesswärme und für mechanische Energie. Beim mechanischen Energiebedarf kommt hauptsächlich Strom zum Einsatz (elektrische Antriebsmotoren). Das größte Potential für den darüber hinausgehenden Einsatz von Strom liegt damit bei Nieder- und Mitteltemperaturprozessen. Energie wird in Zukunft auch für neue Industrieanwendungen wie Batteriefabriken benötigt werden.[41]
- Der **Verkehrssektor** ist durch den deutlich geringsten Elektrifizierungsgrad gekennzeichnet. Die Antriebe von Straßenfahrzeugen, Flugzeugen und Schiffen beruhen zum ganz überwiegenden Teil auf flüssigen fossilen Energieträgern. Die Ausnahme stellt der Schienenverkehr dar, der zum großen Teil elektrisch betrieben wird. Zudem steigen die Marktanteile Elektro- und Hybridfahrzeuge bei Neuzulassungen langsam aber stetig. Einzelne Schiffsverbindungen auf kürzeren Distanzen (z.B. im Fährbetrieb) werden auch heute bereits mit Strom betrieben.

[41] Deren Energiebedarf kann bis zum Jahr 2045 laut den Langfristszenarien aus dem Jahr 2022 auf 14 TWh steigen, wovon die Hälfte in Form von Strom bereitgestellt werden muss. Vgl. Fraunhofer ISI (2022a), S. 17.

Abbildung 15 Energiebedarfe in den verschiedenen Sektoren nach Anwendungen in Deutschland in TWh



Quelle: Frontier Economics basierend auf Daten der AG Energiebilanzen.

Hinweis: Die Größe der Kreisfläche zeigt den Umfang der jeweiligen Energiemenge an.

Langfristige Prognosen für den zukünftigen Stromverbrauch bewegen sich zwischen 800 und 1.500 TWh pro Jahr

Vor diesem Hintergrund gehen Prognosen von einem deutlichen langfristigen Anstieg des Strombedarfs für die Jahre 2045 bzw. 2050[42] aus. Die Bandbreite der jüngsten Schätzungen des langfristigen Strombedarfs ist erheblich:

- Einige der neueren Studien liegen mit einer Steigerung des Strombedarfs auf etwas mehr als **800 TWh am unteren Rand der Schätzungen**. Hierzu gehört die Dena Leitstudie aus dem Jahr 2021.[43] Diese verhältnismäßig moderate Bedarfssteigerung wird zum einen dadurch getrieben, dass Wasserstoff und aus grünem Wasserstoff hergestellte synthetische Energieträger zukünftig vornehmlich aus Ländern mit Standortvorteilen importiert werden und somit weniger Stromerzeugungsbedarf innerhalb Deutschlands entsteht. Zum anderen werden grundlegende Maßnahmen zur Energieeinsparung vorgenommen, die den Energiebedarf deutlich reduzieren. Im Segment der Personenkraftfahrzeuge wird etwa prognostiziert, dass **der heutige Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2045 um 72%[44] reduziert wird**, indem bspw. ein Rückgang des PKW-Bestandes, der Umstieg vom Individualverkehr

[42] Die Prognosen beziehen sich teilweise auf das Jahr 2050. Da seit der Änderung des Klimaschutzgesetzes der Bundesregierung jedoch Klimaneutralität in Deutschland bereits 2045 erreicht werden soll, bewerten wir diese Prognosen als mittlerweile für 2045 gültig.

[43] Siehe Dena (2021).

[44] Vgl. BMWi Langfristszenarien (2021), Szenario TN-Strom

auf öffentlichen Nahverkehr und die vermehrte Nutzung der sogenannten Mikromobilität (z.B. Fahrrad) unterstellt wird. Im Gebäudesektor wird angenommen, dass die Sanierungsrate sich etwa gegenüber heute verdoppelt.

- Andere, teilweise neuere Prognosen kommen auf einen Gesamtstrombedarf von etwa **1.000 bis 1.300 TWh** für 2045. So geht etwa der von der Bundesnetzagentur genehmigte Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan 2037/2045[45] von einem Stromverbrauch (netto) von etwa 1.300 TWh aus (Abbildung 16). Die im November 2022 aktualisierten Langfristszenarien des BMWK (vormals BMWi) prognostizieren im Jahr 2045 einen Strombedarf (brutto) von mindestens 1.237 TWh[46] im wesentlichen Elektrifizierungsszenario.[47]

[45] BNetzA (2022b)

[46] Fraunhofer ISI (2022b) beinhaltet neue sogenannte T45-Szenarien als Ergänzung zu den TN-Szenarien in BMWi Langfristszenarien (2021). Im Gegensatz zu den TN-Szenarien wurden für die T45-Szenarien nicht für alle Sektoren Daten veröffentlicht. Daher haben die neuen Szenarien keinen Eingang in die Studienauswertung im weiteren Verlauf dieses Kapitels gefunden. Es wird an dieser Stelle nur auf die Prognose für den Gesamtbruttostromverbrauch im Szenario T45-Strom verwiesen. Die Werte für die Langfristszenarien in der folgenden Studienauswertung (siehe Abbildung 18) entsprechen den 2021er-Ergebnissen der TN-Szenarien. Gegenüber der Vorjahresstudie steigt der Gesamtstrombedarf im entsprechenden Hauptelektrifizierungsszenario der aktualisierten Langfristszenarien (963 TWh netto (TN-Strom) versus 1.237 TWh brutto (T45-Strom)) deutlich an.

[47] Hier liegt das Szenario T45-Strom zugrunde. Vgl. Fraunhofer ISI (2022b), S. 21, Szenario T45-Strom.

Abbildung 16 Exemplarische Schätzungen für den Strombedarf aus dem aktuellen von der BNetzA genehmigten Szenariorahmen

Installierte Leistung [GW]							
Energieträger	**Referenz 2020*/2021**	**Szenario A 2037**	**Szenario B 2037**	**Szenario C 2037**	**Szenario A 2045**	**Szenario B 2045**	**Szenario C 2045**
Kernenergie	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle	18,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle	19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gaskraftwerke (zzgl. endogenem Zubau)	32,1	> 38,4	> 38,4	> 38,4	> 34,6	> 34,6	> 34,6
Öl	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pumpspeicher	9,8	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
sonstige konv. Erzeugung	4,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Summe konventionelle Erzeugung	**92,9**	**> 50,5**	**> 50,5**	**> 50,5**	**> 46,7**	**> 46,7**	**> 46,7**
Wind Onshore	56,1	158,2	158,2	161,6	160,0	160,0	180,0
Wind Offshore	7,8	50,5	58,5	58,5	70,0	70,0	70,0
Photovoltaik	59,3	345,4	345,4	345,4	400,0	400,0	445,0
Biomasse	9,5	4,5	4,5	4,5	2,0	2,0	2,0
Wasserkraft	4,9	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
sonstige regenerative Erzeugung	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Summe regenerative Erzeugung	**138,7**	**564,9**	**572,9**	**576,3**	**638,3**	**638,3**	**703,3**
Summe Erzeugung	**231,6**	**615,7**	**623,7**	**627,1**	**685,3**	**685,3**	**750,3**
Stromverbrauch [TWh]							
Nettostromverbrauch	478*	828	891	982	999	1025	1222
Bruttostromverbrauch	533*	899	961	1053	1079	1106	1303
Treiber Sektorenkopplung							
Elektromobilität [Anzahl in Mio.]	1,2	25,2	31,7	31,7	34,8	37,3	37,3
Power-to-Heat [GW]	0,8*	12,6	16,1	22,0	14,9	20,4	27,0
Wärmepumpen (HH und GHD) [Anzahl in Mio.]	1,2	14,3	14,3	14,3	16,3	16,3	16,3
Elektrolyse [GW]	<0,1*	40,0	26,0	28,0	80,0	50,0	55,0
Weitere Speicher und nachfrageseitige Flexibilitäten [GW]							
PV-Batteriespeicher	1,3*	67,4	67,4	67,4	97,7	97,7	113,4
Großbatteriespeicher	0,5*	23,7	23,7	24,2	43,3	43,3	54,5
DSM (Industrie und GHD)	1,2*	5,0	7,2	7,2	8,9	12,0	12,0

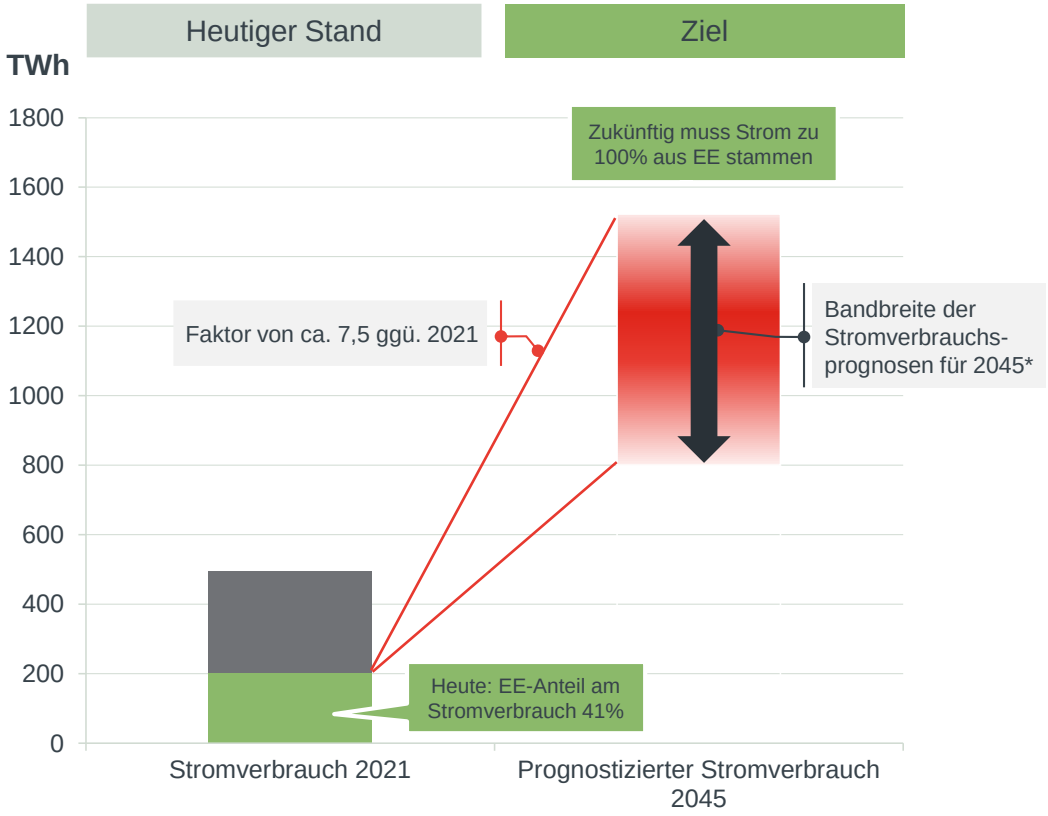
Quelle: BNetzA (2022b), Seite 4

Studien, die davon ausgehen, dass hohe Anteile der Produktion von grünem Wasserstoff und von aus Wasserstoff hergestellten synthetischen Energieträgern in Deutschland stattfindet, leiten einen Strombedarf von über **1.500 TWh** her.[48] Im Extremfall kommen einzelne Studien aus der Vergangenheit sogar zu dem Ergebnis, dass als Konsequenz der heimischen PtX-Produktion im Jahr 2050 ein Stromverbrauch von fast 2.000 TWh bedient

[48] Bei Ariadne (2021) wird im Szenario REMIND - H2 DE eine Stromnachfrage von bis zu 1.523 TWh im Jahr 2045 prognostiziert.

werden muss.[49] Dies beschreibt das obere Ende der Bandbreite, kann aber aufgrund eher weniger realistischer Annahmen wie einer weitgehenden Energieautarkie Deutschlands mehr als gedankliches Szenario, denn als realistische Stromverbrauchsprognose interpretiert werden.

Abbildung 17 Heutiger Stromverbrauch ggü. Stromverbrauchsszenarien in verschiedenen Prognosestudien – Gesamtverbrauch



Quelle: Frontier Economics basierend auf BMWK (2022c), Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energien, und diversen Prognosen

*Hinweis: * Die Prognosen beziehen sich teilweise auf das Jahr 2050. Da seit der Änderung des Klimaschutzgesetzes der Bundesregierung jedoch Klimaneutralität in Deutschland bereits 2045 erreicht werden soll, bewerten wir diese Prognosen als mittlerweile für 2045 gültig. Das obere Ende der Bandbreite des geschätzten Stromverbrauchs ergibt sich aus Ariadne (2021) mit 1.523 TWh im Szenario REMIND – H2 DE. Dena (2021) geht von einem Strombedarf im Jahr 2045 von 829 TWh aus und stellt damit das untere Ende der Bandbreite dar.*

Der obere Rand der Verbrauchsprognosen wird dann erreicht, wenn annahmegemäß – wie von der Politik gewünscht – mehrere Sektoren gleichzeitig umfassend elektrifiziert werden

Insbesondere dann, wenn in mehreren oder allen energieverbrauchenden Sektoren umfassend elektrifiziert wird, wird sich absehbar ein sehr hoher Stromverbrauch in Deutschland einstellen. Dies wird deutlich, wenn aktuelle Stromverbrauchsprognosen nicht nur insgesamt, sondern auch differenziert nach den Sektoren analysiert werden. Hierbei fällt auf, dass Studien oftmals hohe Verbrauchserwartungen in einzelnen Sektoren ausweisen, diese jedoch teilweise

[49] Im Szenario ‚Maximale Elektrifizierung' bei Enervis (2017) beträgt der Gesamtstrombedarf im Jahr 2050 1.991 TWh pro Jahr. Die Enervis Studie wurde im Zuge dieser Studienanalyse nicht berücksichtigt.

durch geringe Verbrauchsanstiege in anderen Sektoren kompensiert werden, z.B. da in diesen Sektoren mit hohen Energieeffizienzeffekten oder einer deutlichen Veränderung des Verbrauchsgeschehens gerechnet wird. Legt man hingegen die Verbrauchszuwächse bei starken Elektrifizierungserwartungen für die verschiedenen Sektoren aus unterschiedlichen Studien in Kombination zugrunde, ergibt sich folgendes Bild:

- Im Bereich **Haushalte und GHD** werden in einzelnen Studien für den Stromverbrauch im Jahr 2045 **zusammen bis zu 444 TWh/a** (Ariadne (2021), Szenario REMIND – Mix) erwartet – im Vergleich zu einem **heutigen Strombedarf von 127 TWh/a**.

  Getrieben wird die höhere Stromverbrauchsprognose gegenüber Studien mit geringen Zuwächsen durch folgende Faktoren:

  - Auf Erdgas und Heizöl basierende Heizungstechnologien werden durch elektrisch betriebene Wärmepumpen ersetzt.
  - Gleichzeitig finden klimaneutral hergestellter (importierter) Wasserstoff und erneuerbare synthetische Flüssigbrennstoffe keine bzw. kaum Verwendung als potenzieller Ersatz für Erdgas bzw. Heizöl in Gas- und Ölheizungen, so dass für die Wärmeversorgung verstärkt auf die heimische oder geografisch nahegelegene Stromproduktion abgestellt werden muss.
  - Während in Studien mit geringeren Verbrauchszuwächsen häufig eine durchgehend hohe Sanierungsrate für den Gebäudesektor unterstellt wird, steigt die Sanierungsrate im Mix-Szenario bei Ariadne lediglich auf maximal 2% bis 2030 an und sinkt aufgrund von Sanierungs- bzw. Investitionszyklen danach wieder auf die derzeit beobachteten 1%.[50] Dies führt dazu, dass der Stromverbrauch im Gebäudesektor, der hauptsächlich durch Wärmepumpen und direkten Stromeinsatz in der Fernwärmeerzeugung entsteht, ab dem Jahr 2030 verhältnismäßig stark weiter ansteigt.

- In der **Industrie** wird mit einem Stromverbrauch **bis zu 539 TWh/a** gerechnet (Dena (2018), Szenario EL95). Demgegenüber liegt der **heutige Strombedarf der Industrie bei 218 TWh/a**.

  Treiber für den hohen Strombedarf in der Industrie ist in der Dena (2018) Studie die Umstellung auf strombasierte Herstellungsverfahren in der Chemieindustrie. Die Substitution von Gas, Öl und Kohle durch Strom führt dazu, dass zwei Drittel des Endenergiebedarfs in der Industrie durch Strom gedeckt werden.

- Im **Verkehrssektor** wird mit einem Strombedarf von **bis zu 246 TWh** gerechnet (Ariadne (2021); Szenario TIMES PanEU – Mix) – gegenüber dem heutigen Bedarf von 12 TWh.

  Der Strombedarf im Verkehrssektor steigt in allen ausgewerteten Studien in den nächsten Jahren massiv an. Der Hauptgrund dafür liegt in der angenommenen erheblichen Verbreitung von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), v.a. aufgrund von Politikmaßnahmen. Im Ariadne TIMES PanEU – Mix-Szenario kommt es zu einem besonders hohen Stromverbrauch im Verkehr im Jahr 2045, da angenommen wird, dass der Straßen- und Güterverkehr

[50] Vgl. Ariadne (2021), S. 97-98.

insgesamt stark zunehmen wird. Der PKW-Bestand steigt weiter stark an und wird nahezu ausschließlich aus BEV bestehen. In relativen Größen steigt der LKW-Bestand noch stärker an. Es wird angenommen, dass der LKW-Bestand ungefähr zur Hälfte elektrifiziert sein wird, wohingegen die andere Hälfte mit importieren synthetischen Flüssigkraftstoffen angetrieben werden soll.

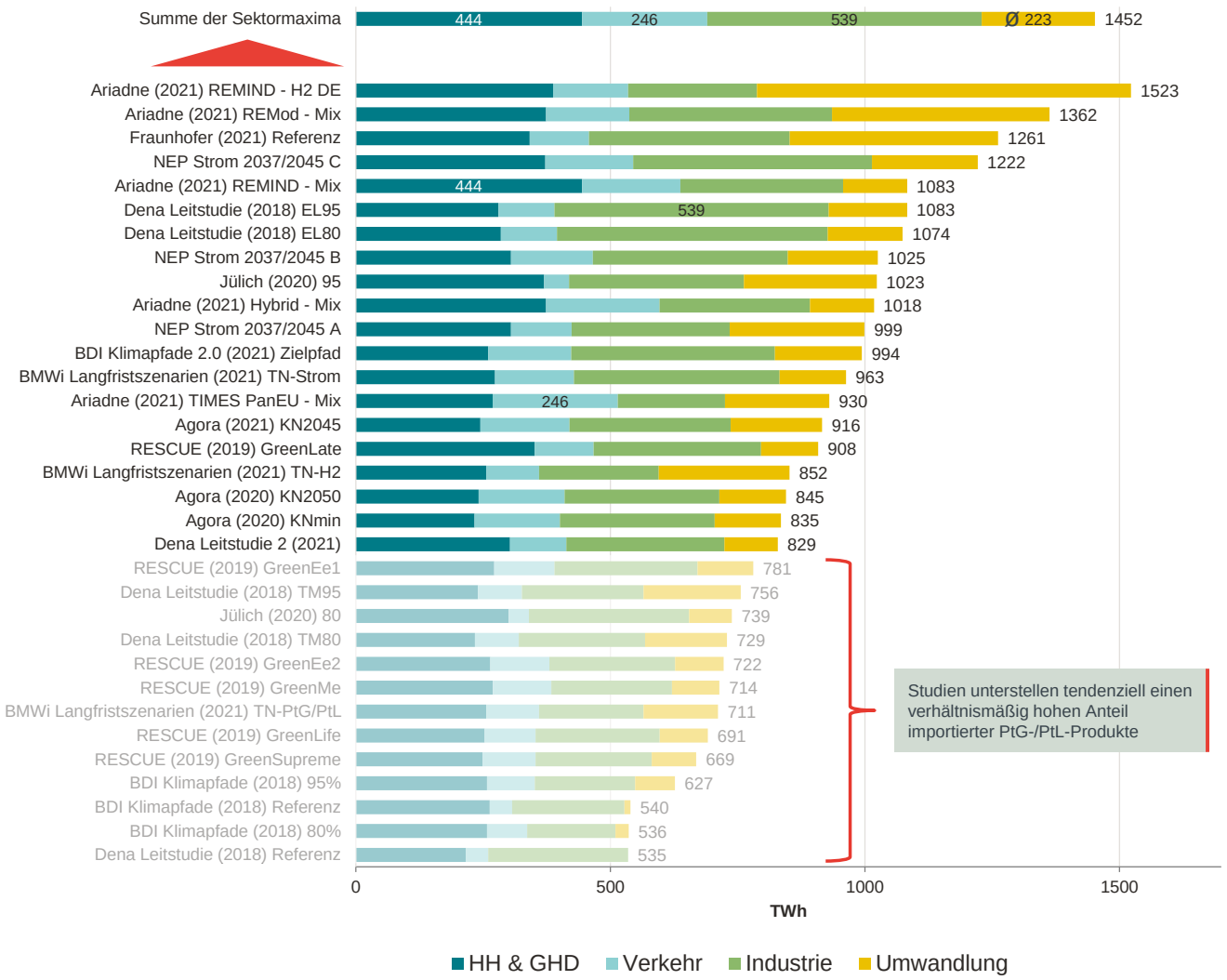
- im **Energieumwandlungssektor wird über die Studien ein Durchschnittswert von 223 TWh** berücksichtigt. Dieser in Zukunft in erster Linie durch die Produktion von Wasserstoff geprägte Sektor hat heute einen nur sehr geringen Strombedarf (nahezu null).

  Im Gegensatz zu den anderen Sektoren (Haushalte, GHD, Industrie, Verkehr) wurde hier der Durchschnittswert über alle betrachteten Studien gebildet. Die Sektormaxima von Haushalte & GHD, Industrie und Verkehr implizieren, dass von einer hohen Elektrifizierung in allen Bereichen ausgegangen wird. Dies führt im Umkehrschluss dazu, dass beispielsweise der Einsatz von Wasserstoff oder Fernwärme in den größtenteils elektrifizierten Sektoren verhältnismäßig gering ausfällt. Trotzdem ist der Umwandlungssektor hier sehr relevant, da die intermittierende Stromerzeugung in einem Szenario mit weitreichender Elektrifizierung den Speicherbedarf treibt, um die erzeugte Energie Verbrauchern auch dann zur Verfügung zu stellen, wenn gerade nicht ausreichend Wind weht oder die Sonne scheint. Um EE-Strom speichern zu können, muss dieser in andere Energieträger wie z.B. grünen Wasserstoff umgewandelt werden.

Geht man von einer starken Elektifizierung und weniger opimistischen Annahmen z.B. zur Energieefizienzentwicklung aus, kann sich auch aus dieser Betrachtung ein Strombedarf von ca. 1.450 TWh/a in Deutschland im Jahr einstellen. Dieser Wert liegt relativ nahe an dem Wert von gut 1.500 TWh/a, der bei Auswertung aggregierter Stromverbrauchsprognosen aus verschiedenen Studien als „oberer Rand“ für den langfristigen Stromverbrauch in Deutschland abgeleitet werden kann.[51] Als mittlere Bandbreite sollte mit einem Strombedarf in Höhe von 1.000 bis 1.300 TWh in einem mittleren Elektrifizierungsszenario gerechnet werden, so wie es die aktuellsten Studien aus dem Jahr 2022 nahelegen (siehe BNetzA (2022b) und Aktualisierung der BMWi Langfristszenarien (Fraunhofer ISI 2022b).

[51] Bezogen auf Ariadne (2021) mit 1.523 TWh im Szenario REMIND - H2 DE, siehe oben.

Abbildung 18 Stromverbrauchsszenarien aus verschiedenen Prognosestudien – Stromverbrauch 2045/2050 nach Sektoren



Quelle: Frontier Economics basierend auf diversen Studien

Hinweis: Der hier ausgewiesene Stromverbrauch bezieht sich i.d.R. auf den Nettostromverbrauch, berechnet über die Addition der Endenergiebedarfe in Form von Strom der Sektoren plus den Stromverbrauch des Umwandlungssektors. Der Umwandlungssektor beinhaltet den Stromverbrauch für die Wasserstoffelektrolyse und den direkten Stromeinsatz zur Fernwärmeerzeugung. Der Übersichtlichkeit halber sind nicht alle Szenarien aller Studie enthalten, wobei die gezeigten Szenarien trotzdem die komplette Bandbreite der Ergebnisse aufzeigen. Bei Berücksichtigung aller Ariadne Szenarien würde sich die Summe der Sektormaxima leicht erhöhen.

3.3 Die Anforderungen an den Ausbau der Strombereitstellung sind erheblich

Die zukünftige Stromnachfrage wird mittel- bis langfristig (nach Zielsetzung der Bundesregierung spätestens zum Jahr 2045), vollständig auf erneuerbaren Energien basieren müssen. Zwei wesentliche Faktoren treiben hierbei den Ausbaubedarf für die Stromerzeugung aus EE:

- **Stromnachfrageentwicklung**: Wie im vorhergehenden Abschnitt 3.2.2 dargelegt, wird ein deutlicher Anstieg der zukünftigen Stromnachfrage erwartet, wenn auch abhängig von Studie und Szenario in unterschiedlichem Ausmaß (vgl. Abbildung 17). Dieser Verbrauchsanstieg muss mit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gedeckt werden und erfordert den massiven Ausbau an EE-Stromproduktion. Im Folgenden gehen wir der Frage nach, ob dies realistisch ist.
- **Ersatz von Kernenergie und Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern**: Die heutige Stromerzeugung[52] beträgt 559 TWh/a, wovon 226 TWh/a erneuerbar hergestellt werden.[53] Kernenergie und die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern tragen derzeit rund 350 TWh/a bei. Auch diese Strommengen müssen durch EE-Strom ersetzt werden.

Im Folgenden gehen wir der Frage nach, wie sich die Stromerzeugung im Weiteren unter realistischen Bedingungen entwickeln könnte und welche Faktoren sich für die Transformation des Stromsystems als hinderlich erweisen könnten. Es zeigt sich hierbei, dass keineswegs gesichert ist, dass die erforderlichen Strommengen im anvisierten Zeitrahmen in Deutschland bei den Endkunden im erforderlichen Umfang zur Verfügung gestellt werden können.

3.3.1 Bisherige Ausbaugeschwindigkeit würde 2045 zu einer jährlichen Stromerzeugung[54] von ca. 530 TWh, eine deutliche Beschleunigung bis zu 880 TWh führen

Es ist derzeit unklar, welche Potenziale an erneuerbaren Energien in Deutschland zur Stromerzeugung langfristig unter realistischen Bedingungen erschlossen werden können. Hinderlich ist hierbei insbesondere, dass Deutschland als sehr dicht besiedeltes Land außergewöhnlich restriktiven Rahmenbedingungen für die Erschließung von für EE-Anlagen nutzbare Flächen unterliegt. Ebenso stehen anderweitige politische Zielsetzungen wie z.B. Naturschutz (Biotopen- und Artenschutz) im Konflikt mit dem Flächenbedarf für den EE-Ausbau. Schließlich ist unklar, in welchen Zeiträumen der Ausbau der erneuerbaren Energien vollzogen werden kann. Neben der Frage nach Investitionsanreizen erweisen sich v.a. langwierige Planungs- und Genehmigungsverfahren als herausfordernd.

Im Folgenden leiten wir Indikationen für die mögliche zukünftige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland aus historischen Ausbaudaten ab. So hat, wie in Abschnitt 2.3 dargestellt, bereits in der Vergangenheit ein deutlicher Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien stattgefunden. Seit 1990 wurde die jährliche Menge des aus erneuerbaren Energien produzierten Stroms von 19 TWh auf 234 TWh im Jahr 2021 ausgeweitet. Hierbei hat sich die Ausbaugeschwindigkeit im Laufe der Zeit beschleunigt. Aus der Entwicklung der erneuerbaren[55] Stromproduktion seit dem Jahr 2001 leiten wir verschiedene vereinfachte Fortschreibungen ab:

52 Dieser Wert bezieht sich auf die Nettostromerzeugung.

53 Vgl. AG Energiebilanzen (2022b)

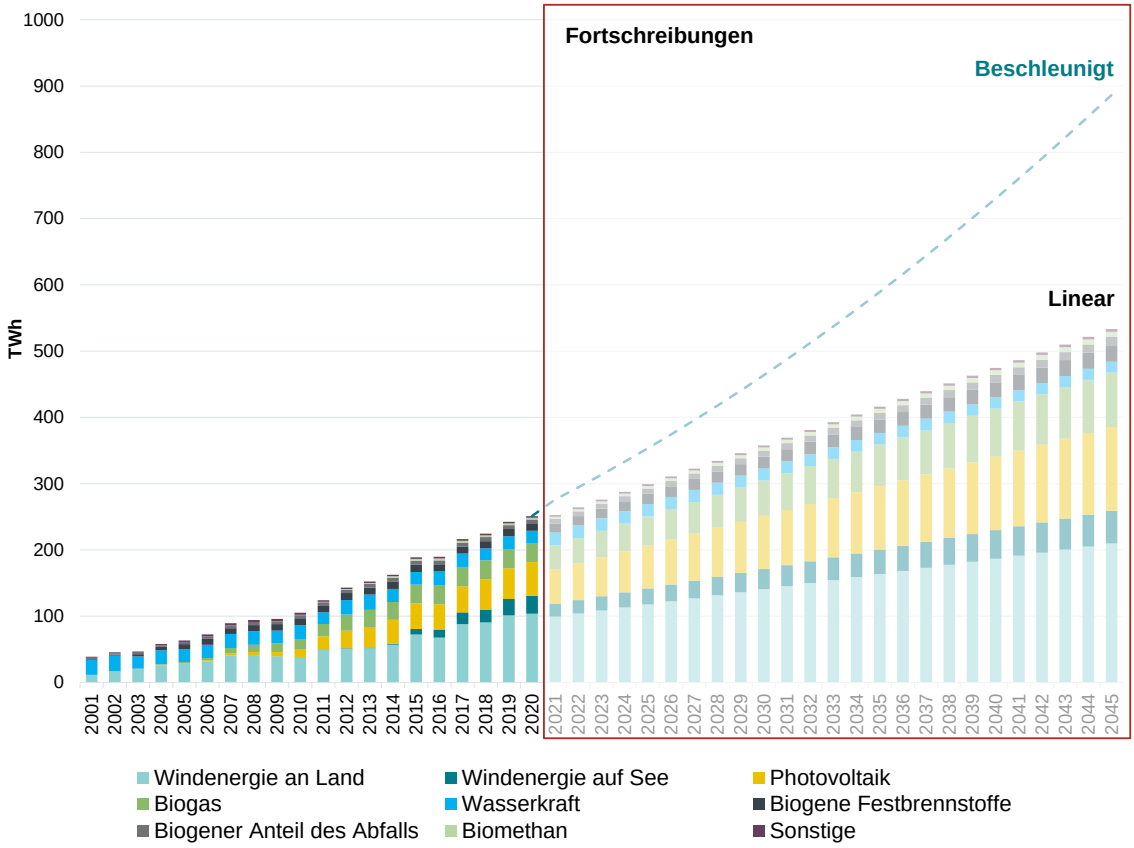
54 Bruttostromerzeugung

55 Aus allen erneuerbaren Energiequellen, nicht nur aus Wind- und Solarenergie.

- **Lineare Fortschreibung der bisherigen Geschwindigkeit des EE-Ausbaus:** Bei linearer Fortschreibung des von 2001 bis 2021 beobachteten Trends der EE-Ausbaugeschwindigkeit, wird im Jahr 2045 ein EE-Stromangebot von etwa 530 TWh/a erreicht. Dieser Berechnung liegt eine Ausbaugeschwindigkeit zugrunde, wie sie sich als Durchschnitt über die Jahre seit 2001 ergibt.
- **Fortschreibung des EE-Ausbaus mit Trendbeschleunigung**: Ermittelt man eine quadratische Trendlinie über den beobachteten Ausbau von 2001 bis 2020 und schreibt diesen Trend bis 2045 fort, wird ein EE-Stromangebot von etwa 880 TWh/a erreicht. Hierbei ist zu beachten, dass durchgehend bis zum Jahr 2045 eine **stetige Beschleunigung** des Ausbaus unterstellt wird, entsprechend der Beschleunigungsrate, wie sie in der Vergangenheit beobachtet werden konnte. Es wird also nicht nur unterstellt, dass zukünftig mehr EE-Kapazitäten gebaut werden als bisher, sondern jedes weitere Jahr auch mehr als im Vorjahr. Dies reflektiert die Erwartung, dass sich insbesondere die politischen Bemühungen zum Ausbau der EE über das bisherige Ausmaß hinaus intensivieren.

Die hier gezeigten Fortschreibungen würden also insgesamt zu einer Strombereitstellung von 530 TWh/a (lineare Fortschreibung) bzw. 880 TWh/a (beschleunigte Fortschreibung) im Jahr 2045 führen (Abbildung 19).

Abbildung 19 Fortschreibungen der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien



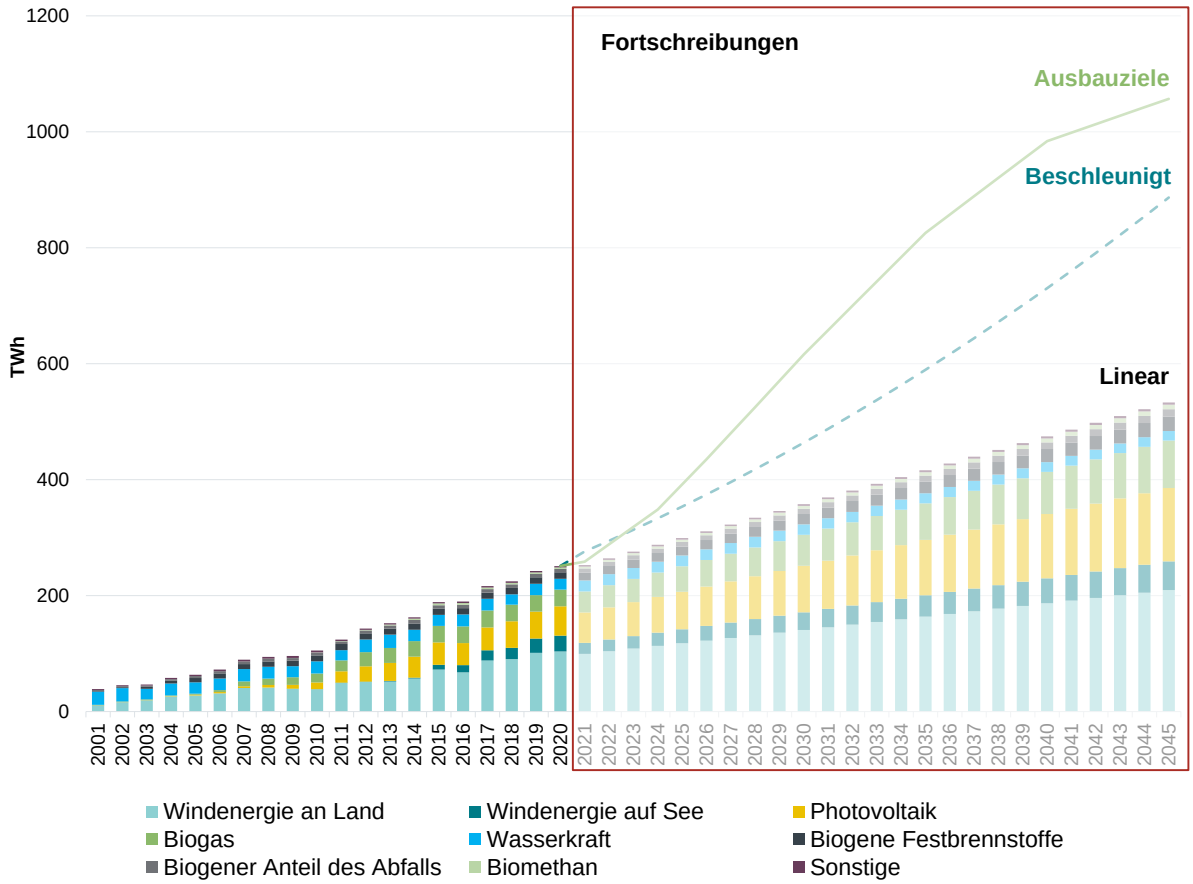
Quelle: Frontier Economics basierend auf Daten von BMWK (2022c).
Hinweis: Hier bezeichnet die Stromerzeugung die Bruttostromerzeugung.

3.3.2 Die Bundesregierung geht von einer noch deutlich stärkeren Beschleunigung des EE-Ausbaus aus

Wie verhalten sich die dargestellten Trendabschätzungen für die zukünftige EE-Erzeugung mit den Ausbauzielen der Bundesregierung für erneuerbare Energie an Land, auf See und Solarenergie? Zur Beantwortung dieser Frage modellieren wir im Folgenden die zukünftige EE-Stromerzeugung auf Basis der Ausbauziele der Bundesregierung: Als Orientierungsgröße für das Jahr 2030 werden die im „Osterpaket“ des BMWK hinterlegten 600 TWh an erneuerbarer Stromerzeugung verwendet,[56] für die Jahre 2040 und 2045 wird der in den aktualisierten Gesetzen hinterlegte Kapazitätsausbau für die Windenergie an Land, Windenergie auf See sowie für Solaranlagen angenommen (Annahmen: Volllaststundenzahl aus dem Jahr 2016).

Im Ergebnis würde das Erreichen der Ausbauziele eine EE-Stromerzeugung von etwa 1.060 TWh im Jahr 2045 bedeuten.

Abbildung 20 Fortschreibungen der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien



Quelle: Frontier Economics basierend auf BMWK (2022c) und den Novellen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2023) und des Windenergie-auf-See-Gesetzes (WindSeeG)

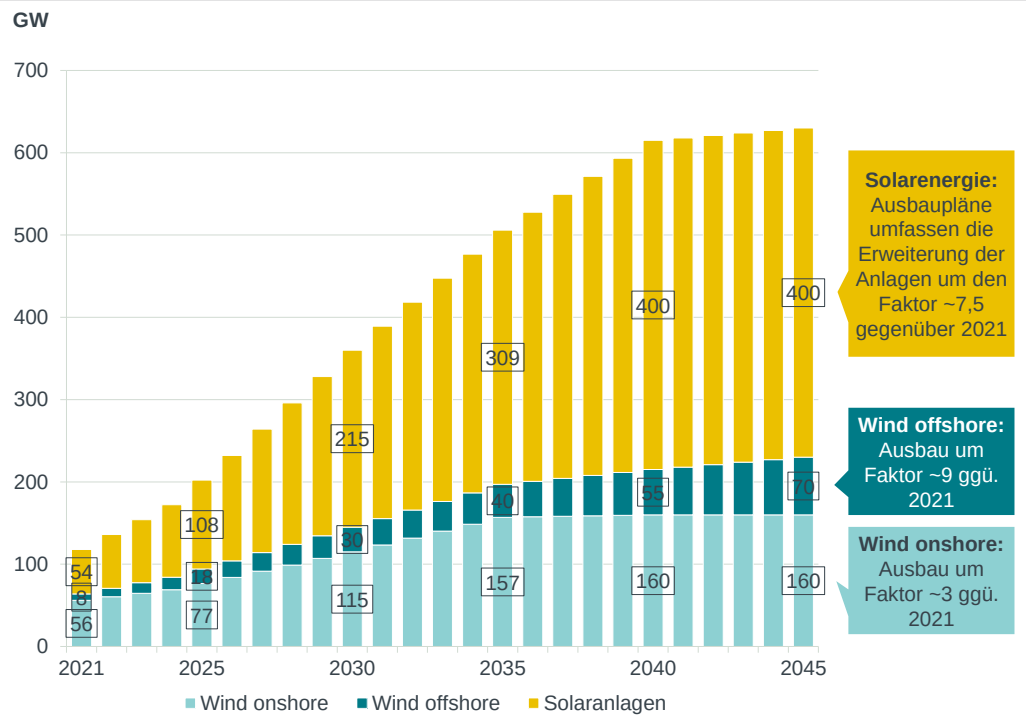
Hinweis: Hier bezeichnet die Stromerzeugung die Bruttostromerzeugung. Die Fortschreibung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die auf den neuesten Ausbaupfaden der Bundesregierung basiert, erfolgt anhand der in Deutschland im Jahr 2016 realisierten Volllaststundenzahl der Technologien Windenergie an Land, Windenergie auf See und Photovoltaik. Die Stromerzeugung aus den übrigen erneuerbaren Energien wird in diesem Szenario fortgeschrieben wie im Szenario mit linearer Fortschreibung.

[56] Bruttostromerzeugung (vgl. BMWK (2022a))

Die Zielsetzungen der Bundesregierung übersteigen die von uns durchgeführten Trendfortschreibungen im Ergebnis deutlich, sowohl im Vergleich zum linearen wie auch zum quadratischen Trend: Im Vergleich zum quadratischen Trend wird in der mittleren Frist (2030) noch einmal zusätzlich 100 TWh/a an EE-Stromerzeugung in Deutschland ausgegangen, bis 2045 von fast 200 TWh/a. Im Vergleich zum linearen Szenario sind die Differenzen zu den Ausbauzielen noch deutlicher: Im Jahr 2030 wird von knapp 200 TWh/a mehr an erneuerbarer Stromerzeugung ausgegangen, im Jahr 2045 mehr als 400 TWh. Diese Differenz im Jahr 2045 entspricht etwa dem Stromverbrauch von Frankreich im Jahr 2021.[57]

EXKURS: GEPLANTER AUSBAU DER ANLAGENKAPAZITÄTEN DER EE-TECHNOLOGIEN IN DEUTSCHLAND VON 2021 BIS 2045

Die oben gezeigte Darstellung der EE-Stromerzeugung gemäß der „Ausbauziele“ basiert für Windenergie an Land, auf See und Solarenergie auf dem von der Regierung vorgegeben Zielen und den Novellen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2023) für Windenergie an Land und Solarenergie und des Windenergie-auf-See-Gesetzes (WindSeeG) für Windenergie auf See.



Damit würde also bis zum Jahr 2040 ein Ausbau der Solaranlagen auf 160 GW, der Windanlagen an Land auf 400 GW und der auf See auf 55 GW einhergehen. Bis zum Jahr 2045 würden Windenergieanlagen auf See weiter bis auf 70 GW ausgebaut.

[57] Vgl. Enerdata (2020), https://energiestatistik.enerdata.net/strom/strom-heimisches-verbrauch-data.html

Das EE-Stromangebot gemäß der Ausbauziele findet sich implizit auch in den Energieprognosen verschiedener Institute wieder. So unterstellt bspw. Agora Energiewende in einer Studie aus dem Jahr 2022[58] einen Ausbau der installierten Leistung erneuerbarer Energien bis 2030 auf 374 GW und eine Stromerzeugung von knapp 600 TWh im Jahr 2030 und 845 TWh im Jahr 2035. Auch die aktuellen Langfristszenarien unterstellen, dass die Ausbauziele für Erneuerbare mindestens erfüllt werden.

Unter dem Strich bedeutet dies, dass allein eine Steigerung der EE-Ausbauraten, wie er in der Vergangenheit erreicht wurde, nicht ausreichend ist, um die EE-Ausbauziele der Bundesregierung zu erreichen. Die Dynamik des EE-Ausbaus muss sich im Vergleich zur Vergangenheit nicht nur entsprechend der realisierten Rate erhöhen, sondern die Beschleunigungsrate muss sich noch einmal erhöhen. Der Frage, ob dies in jedem Fall realistisch ist, gehen wir im folgenden Abschnitt nach.

3.3.3 Eine weitere Beschleunigung des EE-Ausbaus stößt in der energiewirtschaftlichen Praxis auf Widerstände

Ob sich die Zielsetzungen der Bundesregierung zum zukünftigen Ausbau der erneuerbaren Energien in der energiewirtschaftlichen Praxis zukünftig realisieren lassen, hängt von einer Reihe unsicherer Faktoren ab, die sich für den EE-Ausbau bereits als hinderlich erwiesen haben oder zukünftig erweisen können:

- **Wind an Land (onshore):** (siehe Textbox),

  Die Bundesregierung strebt gemeinsam mit den Bundesländern an, 2% der Fläche in Deutschland für Windkraft an Land zu erschließen. Hierfür wird im sogenannten Osterpaket der Bundesregierung ab 2025 für Wind onshore eine Ausbaurate von jährlich 10 GW anvisiert. Schätzungen von Deutsche WindGuard zufolge kann sich bei Nutzung von 2% der Fläche ein Potenzial für Wind an Land von etwa 200 GW ergeben.[59]

  Die bisherige Erfahrung hat allerdings gezeigt, dass die Realisierung des Ausbaus der Windkraftanlagen an Land regelmäßig mit Herausforderungen verbunden ist:

  - **Heute liegt der Zubau von Windkraftanlagen an Land deutlich hinter den gesteckten Ausbauzielen** der Bundesregierung. Das bereits im EEG 2014 festgelegte Ziel eines jährlichen Nettozubaus von 2,5 GW Windenergiekapazität an Land wird seit 2018 nicht mehr erreicht.[60] Als Gründe für den stockenden Windenergieausbau werden insbesondere langwierigen Planungs- und Genehmigungsverfahren,

[58] Agora Energiewende (2022)

[59] Für das Maximum des Potenzialschätzers in **Error! Reference source not found.** wird etwa bei den **verfügbaren Flächen von 2% der Landesfläche** ausgegangen. Das ist aktuell in Schleswig Holstein der Fall, aber in Gesamtdeutschland liegt der Wert lediglich bei 0,9% – Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und das Saarland weisen zusammen sogar nur 0,5% der Fläche aus (vgl. Deutsche WindGuard (2020)).

[60] Seit der EEG-Novelle 2017 erhalten Betreiber von Windparks eine Vergütung vom Staat, nachdem sie erfolgreich an Ausschreibungsverfahren teilgenommen haben. In den meisten der bisher erfolgten Ausschreibungen lag die Gebotsmenge jedoch unterhalb der maximal verfügbaren Ausschreibungsvolumens.

Abstandsregelungen sowie zuletzt auch Fachkräftemangel und lange Lieferzeiten für Bauteile angesehen.[61]

- Durch Anpassungen bei den Planungs- und Genehmigungsverfahren, sowie Abstandsregelungen soll die limitierte Flächenverfügbarkeit überwunden werden. Ob dies allerdings dauerhaft gelingt, ist noch offen: Die Verfügbarkeit von Flächen wird u. a. durch den Natur- und Artenschutz eingeschränkt.[62] Natur- und Artenschutz unterliegen hierbei i. d. R. europäischem Recht, d.h. Änderungen von geltenden Regelungen alleine durch die Bundes- oder Landesregierungen sind nur eingeschränkt möglich.

- **Wind auf See (Offshore)**: Das Potenzial für Wind-Offshore-Anlagen an den deutschen Küsten wird auf knapp 70 GW geschätzt. Nicht nur die aktuellen Ausbauziele der Regierung, auch der Szenariorahmen der Bundesnetzagentur sowie einige weitere Studien nehmen an, dass dieses Potenzial vollständig ausgeschöpft werden kann.[63]

  Wie weit die Realisierung des gesamten Potenzials von Wind Offshore tatsächlich gelingen kann, hängt von der Zulassung von Windparks (abhängig u. a. vom maritimen Raumordnungsplan[64]) und der dort verfügbaren Windleistung und Leistungsdichte der Windparkanlagen ab. Auch hier konkurrieren Natur- und Artenschutzbelange sowie Militär und Landwirtschaft um die Flächennutzung.[65]

  Zudem kann ein Teil des ausgewiesenen Potenzials nur dann erschlossen werden, wenn auch einzelne Flächen, die derzeit noch für Schifffahrtsrouten genutzt werden, langfristig für Offshore-Windparks zur Verfügung stehen werden.[66]

61 Vgl. Tagesspiegel (2021).

62 Vgl. Deutsche Windguard (2020).

63 Vgl. BNetzA (2022b).

64 Innerhalb der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone gibt es verschiedene Nutzungsansprüche, zu denen auch die Offshore-Windenergie zählt. Um eine Koordinierung der verschiedenen Nutzungsarten zu erreichen und Nutzungskonflikte zu minimieren, wurde ein Raumordnungsplan erstellt, analog zur Raumordnung an Land (vgl. BMWSB (2022)).

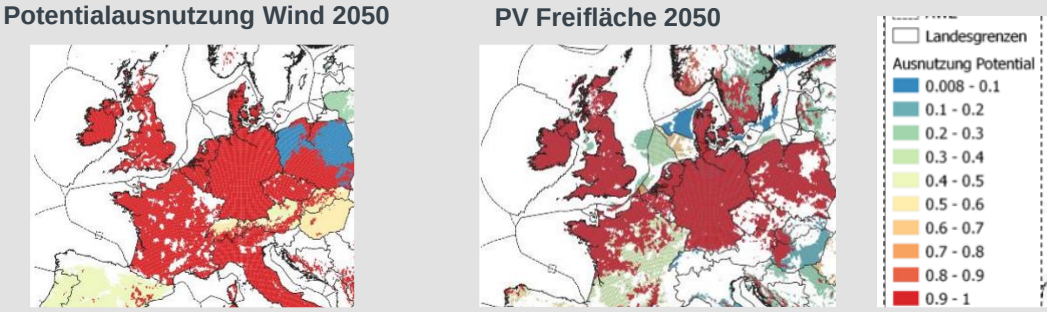
65 Vgl. Süddeutsche Zeitung (2022).

66 Vgl. Deutsche Windguard (2021), S. VI und S. 40.

ERSCHLIESSUNG VON EE-POTENZIALEN IN DEUTSCHLAND

Die meisten Studien zu Prognosen der EE-Erzeugung unterstellen eine erhebliche Ausschöpfung der technisch-ökonomischen EE-Potenziale[67] in Deutschland, obwohl eine vollständige Potenzialausschöpfung mit den im Haupttext beschriebenen Herausforderungen verbunden ist. Insbesondere Prognosen mit weitreichenden Elektrifizierungsszenarien gehen dabei häufig davon aus, dass das EE-Potenzial in Deutschland nahezu vollständig gehoben werden kann. So wird sowohl in BMWi Langfristszenarien (2021) als auch in der Aktualisierung (Fraunhofer ISI 2022b) (vgl. Abbildung 21) auf diesen Vorbehalt explizit hingewiesen.

Abbildung 21 Beispiel Langfristszenarien für die Bundesregierung: *„Potenziale von erneuerbaren Energien an Land (PV Freifläche, Wind an Land) werden sehr stark ausgeschöpft“*

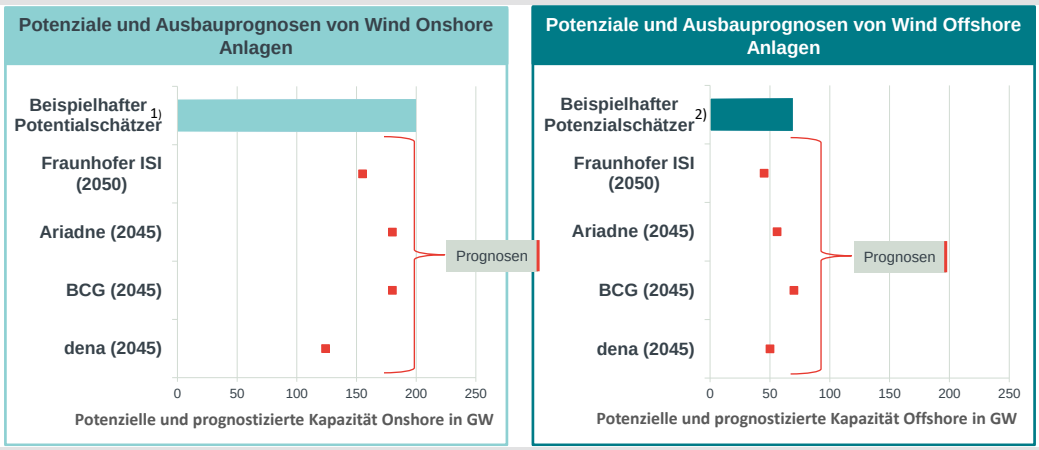


Quelle: BMWi Langfristszenarien (2021)

Hinweis: Die rot markierten Flächen zeigen auf, dass das EE-Potenzial zu 90-100 % ausgeschöpft wird.

Andere Studien prognostizieren die Ausschöpfung noch höherer EE-Potenziale:

Abbildung 22 Gegenüberstellung des technisch-ökonomischen Ausbaupotenzials für Wind in Deutschland mit den in verschiedenen Energieprognosen erwarteten Kapazitäten



Quelle: Frontier Economics basieren auf Potenzialschätzungen von Deutsche Windguard (2020) und diversen Studienprognosen

Hinweis: Das Potenzial für den Ausbau von Windkraftanlagen 1) an Land und 2) auf See basiert auf Deutsche Windguard (2020) bzw. Deutsche Windguard (2021).

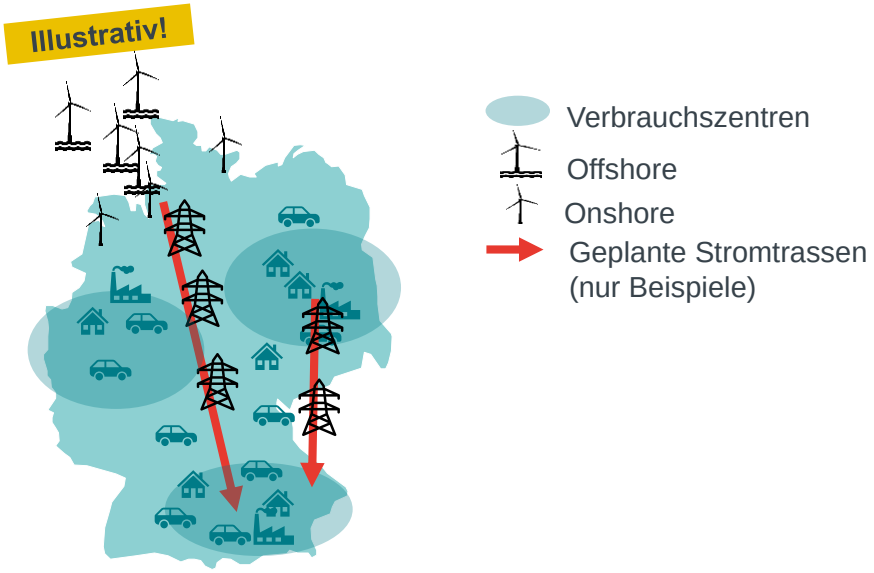
[67] Typischerweise wird auf das technisch-ökologische Potenzial abgestellt. Das technische Potenzial ist die Energie, die bei der Umwandlung in elektrische Energie durch den Betrieb von Windenergieanlagen nutzbar gemacht wird. Technisch-ökologisches Potenzial ist der Teil des technischen Potenzials, der unter Berücksichtigung ökologischer Restriktionen nutzbar ist. Diese Potenziale könnte durch ökonomische Machbarkeit oder andere Restriktionen auch kleiner ausfallen und entspräche dann dem realisierbaren Potenzial (vgl. Umweltbundesamt (2013)).

- **Freiflächen-Photovoltaik**: Potenziale für den Ausbau von Freiflächen-PV bestehen z. B. auf brachliegenden Industrieflächen, ehemaligem Militärgelände oder auf Flächen in ehemaligen Kohleabbaugebieten. Bestehende Anlagen sind heute v. a. auf vormals agrarwirtschaftlich genutzten Flächen installiert. Allerdings sind auch bei Freiflächen-PV dem Zubau in der Realität praktische Grenzen gesetzt, wie z. B. durch landwirtschaftliche Nutzungskonkurrenz, fehlender Akzeptanz der Bevölkerung wegen des veränderten Landschaftsbildes, Betretungseinschränkungen, sowie mögliche Einflüsse auf Tierarten wie wiesenbrütende Vögel.[68] Technische Lösungen, die die Nachteile von Solarparks mildern sollen (etwa durch die Integration von PV bspw. per „Agri-PV“ durch Nutzung der Fläche sowohl für PV oberhalb des Bodens als auch für Landwirtschaft auf der Fläche), befinden sich noch im Erprobungsstadium.[69]
- **Netzausbau:** Neben der Erzeugung ist eine weitere Herausforderung die Bereitstellung des EE-Stroms an den Orten, an denen er benötigt wird. Erforderlich ist hierfür ein erheblicher **Ausbau der Stromnetze:**
  - Zum einen ist eine **Erweiterung** des Stromtransportnetzes notwendig, da erneuerbarer Strom zu erheblichen Anteilen nicht dort erzeugt wird, wo er nachgefragt wird. Heutzutage befinden sich (konventionelle thermische) Kraftwerke häufig in der Nähe von Industrie- bzw. Lastzentren (Ruhrgebiet, Rhein/Main-Agglomerationsraum, Süddeutschland), weshalb Strom oft nur über kurze Distanzen transportiert werden muss. Wird der Strom hingegen in Windparks in Norddeutschland oder der Nord- bzw. Ostsee erzeugt, ist ein Stromtransport über weite Strecken in die Lastzentren notwendig.
  - Neben dem Übertragungsnetz muss auch das **Stromverteilnetz** verstärkt werden, um die erhöhte Stromnachfrage zu bedienen. Der Netzausbaubedarf wird dabei u. a. durch den vermehrten Stromeinsatz in den Bereichen Wärme und Mobilität, aber auch durch neue Lastschwerpunkte wie z.B. den Netzanschluss von Rechenzentren getrieben. Ein weiteres Beispiel hierfür ist Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge. Auch für eine Wärmeversorgung via Wärmepumpen sind Leistungserweiterungen des bestehenden Stromverteilnetzes erforderlich.

  Entsprechend hoch ist der Netzausbaubedarf. Laut Bundesnetzagentur müssen ca. 6.000 km Übertragungsnetz bis 2035 ausgebaut werden.[70] Langfristig, also nach dem Jahr 2035, wird der Netzausbaubedarf weiter ansteigen.

[68] Vgl. KNE (2021).
[69] Vgl. Fraunhofer ISE (2022).
[70] Siehe BNetzA (2022c).

Abbildung 23 Illustrative Darstellung von erneuerbarer Stromerzeugung und Verbrauchszentren



Quelle: Frontier Economics

Die Erfahrungen mit den heute in Planung und Umsetzung befindlichen Netzausbauprojekten zeigen, dass erhebliche Hürden für den Ausbau der erforderlichen Netzinfrastruktur bestehen: Deutschland steht in verschiedenen Bereichen vor der Herausforderung, dass sich größere Bauvorhaben häufig verzögern. Der Netzausbau ist hierbei keine Ausnahme. So haben Übertragungsnetzbetreiber bereits mehrjährige Verzögerungen beim Ausbau der Leitungsprojekte SuedLink und SuedOstLink angekündigt. SuedLink sollte beispielsweise nach ursprünglichen Planungen im Jahr 2022 fertiggestellt werden, nach aktuellen Planungen soll die Fertigstellung 2026 erfolgen. Erste Medienberichte deuten sogar darauf hin, dass SuedLink erst 2028 fertiggebaut sein wird.[71] SuedLink wurde ursprünglich als Freileitung geplant, wird aber derzeit als Erdkabel neu geplant, v. a. um die Akzeptanz der Bevölkerung zu erhöhen – allerdings mit sehr begrenztem Erfolg. Gleichzeitig führte die Corona-Pandemie zu diversen Verzögerungen in den Genehmigungsprozessen.[72] Weiterhin besteht in der Baubranche Personalmangel, der zu weiteren Verzögerungen bei großen Bauprojekten führen könnte. So fehlen beispielsweise Bauingenieure sowohl in der Privatwirtschaft, aber vor allem auch in den zuständigen Genehmigungsbehörden.[73]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die energiewirtschaftliche Praxis auf erhebliche Risiken für den Ausbau der erneuerbaren Energien hinweist. Ob sich unter den realen Rahmenbedingungen der EE-Ausbau in dem Maße weiter beschleunigen lässt, wie dies in den Zielplanungen hinterlegt ist, kann zumindest bezweifelt werden. Dies geht mit entsprechenden Implikationen für eine limitierte Verfügbarkeit von Strom für die Elektrifizierung von Endverbräuchen einher.

[71] Siehe FAZ (2022).
[72] Vgl. Bayern Innovativ (2021).
[73] Vgl. Süddeutsche Zeitung (2019).

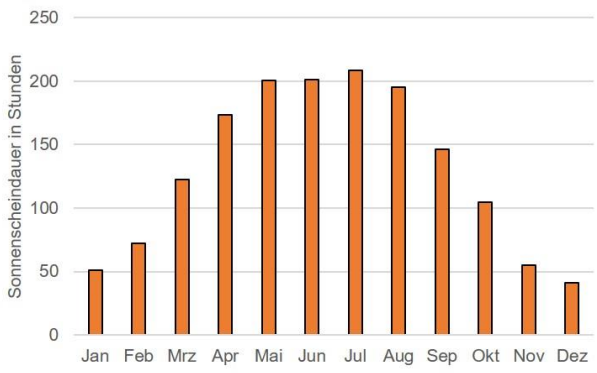
3.3.4 Die Bereitstellung gesicherter Leistung stellt eine weitere wesentliche Herausforderung dar

Eine der zentralen Herausforderungen für die Bereitstellung des EE-Stroms ist die Abhängigkeit der Erzeugung von Wind und Sonne. Für die Verbraucher ist letztlich nicht entscheidend, ob erneuerbare Energien über das Jahr verteilt die Menge Strom (in Kilowattstunden, kWh) erzeugen können, die dem aggregierten Jahresverbrauch entsprechen, sondern vielmehr, ob der Strom zum richtigen Zeitpunkt auch mit der erforderlichen Leistung (in Kilowatt (kW), Megawatt (MW) oder Gigawatt (GW)) zur Verfügung steht.

Die Erzeugung von Strom aus Solar- und Windkraft ist abhängig vom natürlichen Dargebot an Sonne und Wind. Dieses schwankt allerdings erheblich, sowohl über das Jahr wie auch kurzfristig:

- Die Sonneneinstrahlung ist in Deutschland im Winter erheblich niedriger als im Sommer. Auch können sich die Verhältnisse für die Stromerzeugung aus PV sehr schnell, d.h. stündlich oder minütlich, verändern. Abrupte Wetterwechsel können dafür sorgen, dass die Stromeinspeisung aus PV-Anlagen massiven Schwankungen unterliegt.
- Die Windstromerzeugung, sowohl an Land als auch auf See, ist deutlich gleichmäßiger über das Jahr verteilt als die Stromerzeugung mit PV. Für das Energiesystem ist dabei grundsätzlich hilfreich, dass Windkraft im Winter mehr Strom erzeugt als im Sommer – es findet also eine gewisse Glättung der Stromerzeugung aus PV und Windkraft statt. Allerdings ist keinesfalls auszuschließen, dass auch die Windbedingungen über mehrere Tage oder Wochen im Rahmen einer Windflaute im Winter sehr ungünstig sei können.

Abbildung 24 Saisonale Verteilung der durchschnittlichen Sonnenscheindauer



Quelle: Klimaatlas NRW (2022)

Hinweis: Die Abbildung zeigt die durchschnittliche Sonnenscheindauer pro Monat in Nordrhein-Westfalen für den Zeitraum 1991-2020.

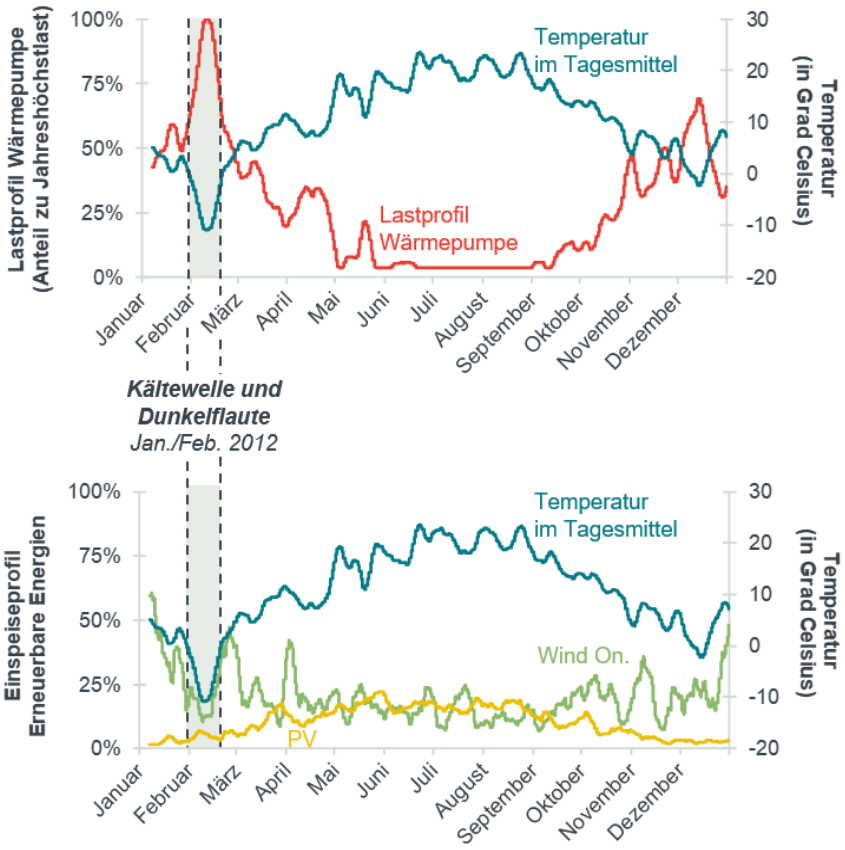
Treffen sonnenarme Zeitperioden mit längeren Windflauten zusammen (z.B. **Dunkelflauten**), steht das Stromsystem vor erheblichen Herausforderungen, sofern nicht gesicherte Leistung, die bislang v. a. durch konventionelle Kraftwerke wie Kohle- und Gaskraftwerke bereitgestellt wurde, den Leistungsabfall bei den erneuerbaren Energien Anlagen ausgleichen können.

Gleichzeitig werden die **Stromverbräuche über das Jahr zunehmend ungleich verteilt** – insbesondere, wenn Sektoren mit saisonaler Nachfrage zukünftig mit Strom versorgt werden sollen: Während die Industrie und der Handels-, Gewerbe- und Dienstleistungssektor i. d. R. die Energie für Prozessanwendungen relativ

gleichmäßig über das Jahr verteilt einsetzen, ist der Energieverbrauch für Raumwärme und Klimatisierung sowie Mobilität deutlich ungleicher.

- Der Energiebedarf für **Raumwärme** ist im Winter temperaturbedingt höher als zu anderen Jahreszeiten. Durch den vermehrten Einsatz von elektrischen Wärmepumpen[74] zu Heizzwecken wird der Strombedarf in den Wintermonaten in Zukunft deutlich ansteigen. Diese Entwicklung stellt das Stromsystem vor dem Hintergrund der geringen Stromausbeute durch PV-Anlagen im Winter und möglicher Dunkelflauten vor besondere Herausforderungen. Dies wird v.a. in Kältephasen relevant, in denen z.B. Wärmepumpen einen deutlich geringeren Wirkungsgrad und entsprechend höheren Leistungsbedarf aufweisen, und/oder in denen Wärme über vergleichsweise ineffiziente Direktheizungen bereitgestellt werden muss. Eine „Dunkelflaute“ bei gleichzeitig hoher Last ist z.B. im Januar 2012 in Deutschland aufgetreten (vgl. bspw. Abbildung 25)

Abbildung 25 Lastprofil von Wärmepumpen vs. Stromverfügbarbarkeit bei Dunkelflauten



Quelle: Frontier Economics (2021) auf Basis verschiedener Quellen (KommEnergie, SWM Infrastruktur, netztransparenz.de und Bundesnetzagentur)

Hinweis: Eine Dunkelflaute entspricht einer windstillen und sonnenarmen Wetterperiode (geringe Stromerzeugung aus Wind und PV).

[74] Die Regierung plant bis 2030 den Einbau von sechs Millionen Wärmepumpen (Vgl. Handelsblatt (2022) und BMWK (2022d)).

- Der **Mobilitätsbedarf** in Deutschland ist im Grundsatz relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt.[75] Im Laufe einer Woche und eines Tages sind allerdings erhebliche Nachfragespitzen zu verzeichnen. So sind Arbeitnehmer an Werktagen deutlich häufiger unterwegs als an Wochenenden und Feiertagen. Im Tagesverlauf ist das meiste Verkehrsaufkommen in den Morgenstunden und am Nachmittag zu verzeichnen. Entsprechend sind Gleichzeitigkeiten beim Ladeverhalten für Fahrzeuge mit batterieelektrischen Antriebssystemen zu erwarten. [76]

Insbesondere der winterliche Strombedarf für Heiz- und andere Zwecke wird das Stromsystem vor dem Hintergrund der geringen Stromausbeute durch PV-Anlagen im Winter und möglicher Dunkelflauten aller Voraussicht nach vor besondere Herausforderungen stellen. Um in einem Stromsystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien den Leistungsbedarf auch in Wintermonaten mit Kälteperioden und Dunkelflauten sicher zu stellen, sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich, die mit erheblichen Kosten einhergehen. Optionen sind hierbei:

- Errichtung **erheblicher Überkapazitäten** für dargebotsabhängige Energieträger: Durch die Installation von Überkapazitäten an Windkraft- und PV-Anlagen lässt sich statistisch die verfügbare Leistung des deutschen Anlagenparks erhöhen. So planen die deutschen Netzbetreiber in ihrem jüngst veröffentlichten Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan 2023-2037/2045 mit der Errichtung von bis zu ca. 700 GW[77] an erneuerbaren Energien bis 2045. Im Vergleich zu einem Spitzenlastbedarf im Jahr 2045 von möglicherweise knapp 200 GW (vgl. Abbildung 27) ist diese Kapazität um einen Faktor 3,6 höher (zum Vergleich: Die gesicherte Leistung in Deutschland im Jahr 2019 ist mit 100 GW etwa um den Faktor 1,3 höher als die Spitzenlast desselben Jahres von knapp 78 GW). Dies reflektiert zum einen die grundsätzlich relativ niedrigen Verfügbarkeiten der EE-Anlagen über das Jahr, zum anderen aber auch einen hohen Leistungsbedarf im Winter.

  Allerdings sind auch diese Zahlen noch zu niedrig, soll der Leistungsbedarf alleine aus fluktuierender EE-Erzeugung gedeckt werden. So ermittelt eine Studie für das Vereinigte Königreich[78] eine Deckung des Leistungsbedarfs durch erneuerbare Energien von 5%, wenn Wetterlagen mit geringer EE-Verfügbarkeit auf hohe Stromnachfrage treffen. Eine vollständige Deckung des Leistungsbedarfes würde also die Installation der 20-fachen EE-Kapazität erfordern. Auch in Deutschland wurde historisch den dargebotsabhängig einspeisenden erneuerbaren Energien per Definition nur eine sehr geringe sichere Verfügbarkeit als Beitrag (Leistungskredit) zur gesicherten Leistung zugeschrieben. Zurzeit liegt dieser für Windenergie bei 6%, für Solarenergie sogar bei nahezu 0%, da in den Nachtstunden oder Abendstunden im Winter keine Sonne scheint.[79]

[75] Die Mobilitätsquote – bestimmt als Anteil an Personen der Gesamtbevölkerung, die an einem Tag mindestens einmal aus dem Haus gehen und somit Verkehrsaufkommen verursachen – und Unterwegszeit, liegt von Frühjahr bis Herbst im Schnitt etwas höher als Winter. (Siehe Infas (2019), Seite 25f.)

[76] Vgl. Infas (2019), Seite 73ff.

[77] Vgl. BNetzA (2022b), Seite 4, Szenario C 2045.

[78] Vgl. MacLean et al. (2021).

[79] Vgl. https://www.energie-lexikon.info/gesicherte_kraftwerksleistung.html .

- **Speicherung von Energie**: Speicherung von Strom wird in Zukunft sowohl kurzfristig (Tag/Nacht, über Tage und Wochen) als auch saisonal über die Jahreszeiten von herausragender Bedeutung sein. Die kurzfristige Speicherung von EE-Strom über Stunden oder wenige Tage ist mit Pumpspeicherkraftwerken oder Batteriespeichern technisch relativ einfach lösbar und erfordert v. a. kostenseitige Abwägungen. Die saisonale Speicherung von Energie hingegen stellt in Form von Strom eine massive Herausforderung dar: So können in Stromspeichern heute weniger als 0,04 TWh Elektrizität und nur über kurze Zeiträume gespeichert werden, bei einem jährlichen Stromgesamtverbrauch von ca. 500 TWh.[80] Zum Vergleich: In Ölspeichern lassen sich heute in Deutschland ca. 270 TWh Energie speichern, in Gasspeichern ca. 250 TWh – beides über Zeiträume von mehreren Monaten oder Jahren.
- Aus diesem Grund sind **neue Technologien zur saisonalen Speicherung großer EE-Strommengen erforderlich**. EE-Strom muss für eine Speicherdauer über mehrere Tage hinaus in chemische Energieträger wie Wasserstoff umgewandelt werden, die dann wiederum für die Dauer gespeichert werden. Nach der Ausspeicherung müssen die chemischen Energieträger wieder in Strom rückumgewandelt werden, damit sie in elektrischen Anwendungen zum Einsatz kommen können. Technisch sind diese Prozessketten bekannt, allerdings müssen diese erst in der Praxis umgesetzt werden.
- Zudem ist die Stromspeicherung auf diesem Wege kostspielig, nicht zuletzt, da neben den Elektrolyseanlagen und Speichern für die Rückumwandlung zu Strom auch Kraftwerke vorgehalten werden müssen. Sollen wasserstofffähige Gaskraftwerke, in denen grüner Wasserstoff und/oder klimaneutrales Methan eingesetzt werden können, als Back-up-Kapazitäten fungieren, müssen Investitionsanreize und eine Langfristperspektive für die Betreiber bestehen. Bei den heute bestehenden Unsicherheiten sind entsprechende Investitionen allerdings mit hohen Risiken verbunden – eine rege Investitionstätigkeit ist derzeit nicht erkennbar.
- **Nutzung von Nachfrageflexibilität**: Um das Stromsystem weiterhin stabil zu halten, ist eine verbesserte Steuerung der Stromverbräuche notwendig, also eine system- und netzorientierte Laststeuerung. Eine reine auf erneuerbaren Energien beruhende Stromerzeugung schwankt stärker verglichen zur fossilen Stromerzeugung, weshalb die system- und netzorientierte Laststeuerung herausfordernder wird. Z. B. könnten Wärmepumpen oder Elektroautos in Abhängigkeit der Stromverfügbarkeit eingesetzt bzw. geladen werden, zumindest insoweit Verbraucher bereit sind, ihren Energiebedarf – etwa für Mobilität – um einige Stunden zu verschieben. Auch Industrie- oder Gewerbebetriebe könnten, soweit produktionsprozessbedingt möglich, ihre Anlagen entsprechend des Stromangebots steuern. Allerdings sind auch diese Maßnahmen mit Kosten verbunden: Zum einen zur Schaffung der technischen Einrichtungen für die Laststeuerung. Zum anderen, weil die Verbrauchsverlagerung auch direkt mit Kosten für die Verbraucher (sowohl in Industrie- und Gewerbebetrieben als auch für Privatpersonen) einhergehenden

[80] Vgl. Geth et al. (2015).

kann. Laststeuerung uns Spitzenlastglättung stößt zudem an Akzeptanzgrenzen, wenn Komfortverluste und Kosten für die Verbraucher, die mit Lastverlagerungen oder -einschränkungen verbunden sind, zu hoch werden. Dies kann in industriellen Prozessen zu hohen (Ausfall-)Risiken und letztlich zu Entscheidungen für andere Standorte mit gesicherter Energiebereitstellung führen.

Insgesamt kann also festgestellt werden, dass die zukünftigen Anforderungen an das Stromsystem und die EE-Strombereitstellung nicht nur bezüglich der Strommengen, sondern auch bezüglich der zeitgerechten Bereitstellung von Leistung erheblich sind. In beiden Bereichen sind Transformationsanstrengungen in einem bisher nicht dagewesenen Ausmaß erforderlich, um die ambitionierten Zielsetzungen der Elektrifizierungsstrategien zu erreichen.

3.4 Stromlücken sind in Deutschland möglich – bei Energie und Leistung

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob Deutschland mittel- bis langfristig in der energiewirtschaftlichen Praxis in eine „Stromlücke“ laufen könnte, d.h. ob die EE-Strombereitstellung in der Realität mit dem zukünftigen Strombedarf mithalten kann. Entsprechend der Systematik der vorhergehenden Abschnitte können sich hierbei zwei unterschiedliche Lücken ergeben:

- im energetischen Sinne; und
- in Bezug auf die gesicherte Leistung.

3.4.1 Die mögliche energetische Stromlücke

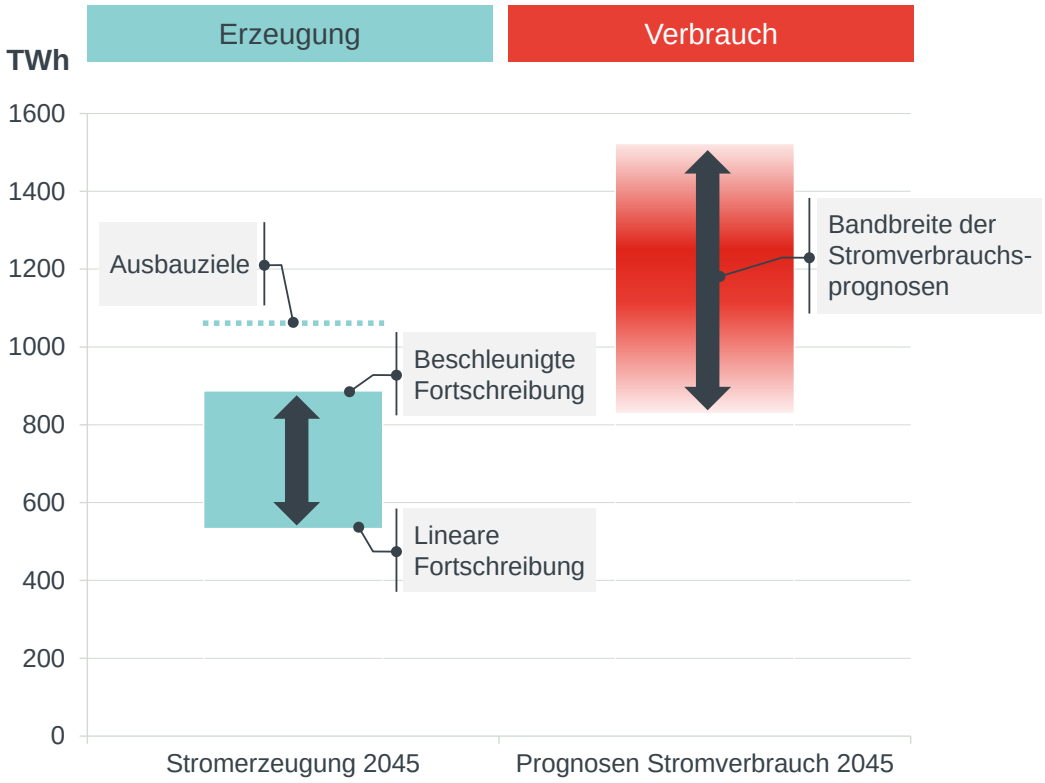
In den Abschnitten 3.2 haben wir verschiedene Szenarien für die Stromnachfrage untersucht, im vorhergehenden Abschnitt 3.3 mögliche Zukunftsszenarien für den Zubau an erneuerbaren Energien. Stellt man diese Szenarien gegenüber, ergeben sich **zahlreiche Szenarien** in denen der EE-Strom knapp sein wird (siehe Abbildung 26)**:**

- **EE-Ausbau entsprechend der durchschnittlichen Ausbaurate der letzten 20 Jahre:** Erreicht der EE-Ausbau nur eine moderate Ausbaugeschwindigkeit, z.B. mit einer durchschnittlichen Zubaurate der letzten 20 Jahre, liegt die erneuerbare Stromerzeugung für 2045 lediglich in einer Größenordnung von 530 TWh/a. Damit könnte nicht einmal der heutige Stromverbrauch in Höhe von knapp 570 TWh/a gedeckt werden, geschweige denn ein wachsender Stromverbrauch im Zuge der Elektrifizierung.
- **Beschleunigter EE-Ausbau entsprechend der Dynamik der Ausbaurate der letzten 20 Jahre, durchschnittlicher Anstieg der Stromnachfrage:** In diesem Fall erreicht die Stromerzeugung eine Größenordnung von bis zu 880 TWh/a im Jahr 2045. Dies würde ausreichen, um den Stromverbrauch im Falle unterer Nachfrageprognosen zu treffen, allerdings liegt die Mehrzahl der jüngeren Stromverbrauchsprognosen (mit tendenziell realistischen Annahmen z.B. zu Effizienzsteigerungen) in Bereichen über 1.000 TWh/a. Auch in diesem Fall ergibt sich eine Stromlücke.

- **EE-Ausbau entsprechend der Ziele der Bundesregierung, starke Elektrifizierung in allen Sektoren:** Selbst wenn die Zielsetzungen der Bundesregierung zum EE-Ausbau (und damit eine deutliche Beschleunigung des EE-Ausbaus gegenüber der Vergangenheit) erreicht werden, würde die Erzeugung von EE-Strom in Höhe von ca. 1.060 TWh/a nicht ausreichen, um den Strombedarf einer starken Elektrifizierung über alle Sektoren hinweg zu bedienen, der in einer Größenordnung von 1.200 TWh/a bis 1.500 TWh/a liegen könnte. Es ergäbe sich auch dann eine Stromlücke. Das bedeutet: selbst bei Erreichen der von der Bundesregierung gesetzten Ausbauziele, könnte die EE-Stromerzeugung im Jahr 2045 gemäß der aktuellen Ausbauziele lediglich in einem optimistischen Stromverbrauchszenario ausreichen, d.h. wenn sich der zukünftige Stromverbrauch eher im unteren Bereich der Bandbreite befindet.

Es droht also langfristig eine energetische Stromlücke vor allem dann, wenn der Ausbau von Erneuerbaren nur in moderatem Tempo voranschreitet und/oder die Stromnachfrage aufgrund starker Elektrifizierung von Endanwendungen über alle Sektoren hinweg deutlich ansteigt.

Abbildung 26 Drohende energetische Lücke zwischen Stromerzeugung und Verbrauch im Jahr 2045



Quelle: Frontier Economics basierend auf diversen Studien und Fortschreibungen, vgl. Abschnitt 3

Hinweis: Die Stromerzeugung bezieht sich hier auf die Bruttostromerzeugung. Der Stromverbrauch bezieht sich auf Nettostromverbrauch.

3.4.2 Die mögliche Leistungslücke

Auch leistungsseitig droht dem Stromsystem in Deutschland eine Lücke. Kritisch sind hierbei, wie beschrieben, insbesondere Situationen mit (temperaturbedingt) hoher Stromnachfrage und wenig bis keiner Leistung aus erneuerbaren Energien wie dies bei „Dunkelflauten“ der Fall wäre.

Aktuell besteht eine Situation mit hinreichender Überdeckung an gesicherter Leistung (Abbildung 27): So betrug die gesicherte Kraftwerksleistung in Deutschland im Jahr 2019 noch ca. 100 GW, bereitgestellt v.a. aus Kohle, Gas- und Kernkraftwerken, Wasserkraftanlagen und Biomasseverstromung. Bei einer Spitzenlast von ca. 78 GW bedeutete dies im Jahr 2019 noch eine Überdeckung von gesicherter Leistung von etwa 20 GW.[81]

Zukünftig droht eine deutliche Unterdeckung an gesicherter Leistung – sowohl aufgrund von wachsender Spitzenlast als auch aufgrund des Wegfalls sicherer Leistung aus fossiler und nuklearer Energie (Abbildung 27 **unten):**

- **Lastspitzen**: Bis zum Jahr 2045 könnte die Spitzenlast in Deutschland v. a. in Kälteperioden im Winter auf etwa knapp 200 GW ansteigen, wenn in einem nahezu vollständig elektrifizierten Energiesystem massive Lasten aus dem Verkehr, der Industrie und für die Wärmeerzeugung hinzukommen.[82]
- **Kernkraftwerke, mit Erdgas betriebene Gaskraftwerke sowie Kohlekraftwerke** werden im Jahr 2045 keine Leistung mehr zur Verfügung stellen.
- **Pumpspeicher und Biomassekraftwerke** werden ca. 15 GW an gesicherter Leistung bereitstellen.[83]

Für die Abdeckung der Lastspitzen müssten Wasserstoffspeicher und wasserstofffähige Gaskraftwerke gebaut, Nachfrageflexibilität geschaffen und dargebotsabhängige EE-Anlagen mit deutlicher Überkapazität errichtet werden. Möglich wäre auch der Import von EE-Leistung aus dem Ausland, wobei die Leistungsverfügbarkeit in einer entsprechenden Wetterlage auch international begrenzt sein dürfte. In jedem Fall ist der Investitionsbedarf in neue Infrastruktur, gesicherte Leistung und verschiedene Arten von Energiespeichersystemen beträchtlich. Aus heutiger Sicht ist nicht sicher, ob dies bis zum Jahr 2045 in der Praxis im erforderlichen Maße gelingen wird.

[81] Installierte Erzeugungsleistung 2019: Berechnungen von Frontier basierend auf Daten der Bundesnetzagentur (Strommarktdatenportal SMARD.de), für Spitzenlast 2019 vgl. 50Hertz et al. (2020).

[82] Zusätzlicher Bedarf an gesicherter Leistung 2045: Verkehr: Anzahl der PKW basierend auf BNetzA (2022) Szenario B 2045, Ladeleistung 11 kW, Ladegleichzeitigkeit 7%, Wärme: Basierend auf Frontier (2021) bei Unterstellung einer optimistischen mittleren Sanierungsrate von 2,3% via EL95-Szenario aus Dena (2018), Industrie: basierend auf dem Industrieprofil aus Frontier et al. (2017); zudem unterstellen wir auch zwischen den Sektoren eine Gleichzeitigkeit von 90%.

[83] Unter der vereinfachten Annahme, dass sich die Kapazität dieser Technologien nicht verändert.

Abbildung 27 Anforderungen an die Leistungsvorhaltung und Lastflexibilität bei weitreichender Elektrifizierung

Quelle: Gesicherte Leistung 2019: Berechnungen von Frontier basierend auf Daten der Bundesnetzagentur (Strommarktdatenportal SMARD.de); Prognose gesicherte Leistung 2045: Gleichbleibende Leistung bei Abschaltung fossiler/nuklearer Kraftwerke, historische Spitzenlast: 50Hertz et al. (2020) – „heute" vollständig dargestellt, im Jahr „2045" um einen Gleichzeitigkeitsfaktor von 90% reduziert. Zusätzlicher Bedarf an gesicherter Leistung 2045: vgl. Fn 82.

4 WAS FOLGT AUS EINER MÖGLICHEN ZUKÜNFTIGEN LÜCKE AN EE-STROM IN DEUTSCHLAND?

Es besteht ein beträchtliches Risiko, dass ein zunehmend auf Solar- sowie Windkraft basierendes Stromsystem in Deutschland in der Realität mittel- bis langfristig an seine Grenzen stoßen und damit den Energiestrategien, die allein auf vollständige Elektrifizierung von Endanwendungen setzen, die Grundlage entzogen wird. Zum einen ist in einem solchen Fall durch einen ggf. unausweichlichen Rückgriff auf fossile Energien das Erreichen der Ziele der Energiewende, also insbesondere die angestrebte Klimaneutralität des Energiesystems, akut gefährdet. Zum anderen ist nicht auszuschließen, dass es mittel- und langfristig zu Versorgungsengpässen und Stromausfällen kommen kann, die mit erheblichen volkswirtschaftlichen Kosten einhergehen – hierzu gehören ein hohes Strompreisniveau bedingt durch das (zeitweise) knappe Angebot sowie existentielle Ausfallrisiken für (energieintensive) Industrien, was beides zur Schließung von Produktionsstätten führen kann.

Für die Energiestrategie hat der Befund, dass EE-Strom in Deutschland, gemessen an der zu erwartenden Stromnachfrage, ein physisch nicht ausreichend zur Verfügung stehendes Gut bleiben könnte, in Kombination mit dem Vorsichtsprinzip zwei wesentliche Implikationen:

- Zum einen ist zu überlegen, wie die limitierte EE-Strommenge auf die einzelnen Endverbrauchssektoren verteilt werden kann, um dabei den größten Beitrag zu Klimaschutz und volkswirtschaftlichem Nutzen zu erzielen.
- Zum anderen sollte die Energiestrategie technologieoffen sein und flexibel auf mögliche Herausforderungen und Limitierungen reagieren können. Zur Vermeidung des Risikos, dass nicht immer ausreichend erneuerbare Energieträger zur Verfügung stehen, sollte nicht allein auf eine einzelne Technologie – direkten Stromeinsatz - in allen Bereichen gesetzt werden. Vielmehr sollte ein Portfolio an Klimaschutztechnologien für die Transformation des Energiesystems verfügbar und flexibel einsetzbar sein, um so die Versorgungssicherheit mit klimaneutralen Energien jahres- und tageszeitunabhängig zu gewährleisten.

Im Folgenden gehen wir auf diese Punkte näher ein.

HINTERGRUND UND KAPITELÜBERBLICK

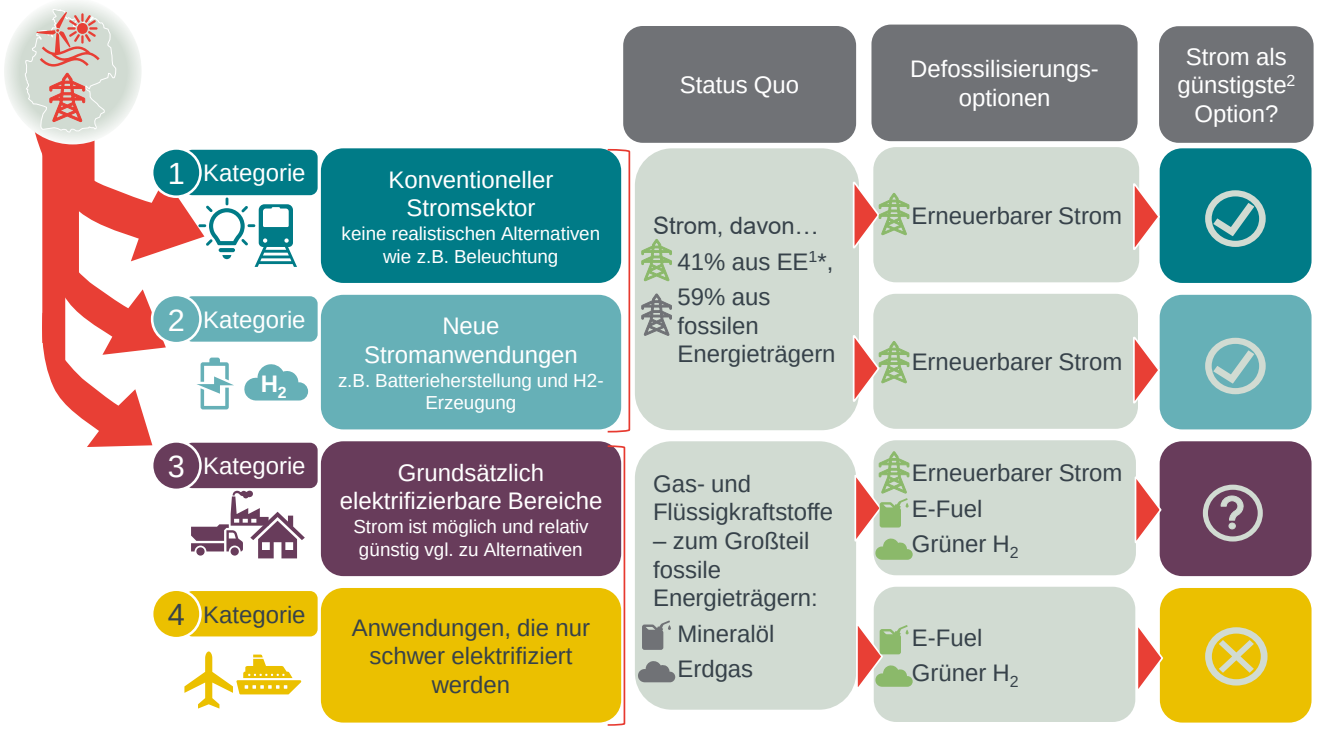
- Droht der EE-Strom nicht auszureichen, sollte er zunächst mit Priorität in jenen Sektoren genutzt werden, in denen Strom bereits heute zum Einsatz kommt wie Beleuchtung oder Bahnstrom oder in zusätzlichen stromverbrauchenden Anwendungen, die sinnvoll nur mit Elektrizität betrieben werden können, wie z. B. neue Rechenzentren oder Batteriefabriken.
- Es sind durchaus Zukunftsszenarien denkbar, in denen der EE-Strom bereits durch prioritäre Anwendungen vollständig oder weitgehend verbraucht wird. Dies ist v.a. dann der Fall wenn der Ausbau der erneuerbaren Energien in der Praxis nur wenig über die heutige Ausbaugeschwindigkeit hinaus gesteigert werden kann. Ein solches Szenario ist keinesfalls auszuschließen.
- Sollten bei einem deutlich beschleunigten EE-Ausbau zusätzliche EE-Strommengen verfügbar sein, können diese in weiteren elektrifizierbaren Anwendungsbereichen wie bspw. Verkehr oder Gebäudewärme eingesetzt werden. Maßgeblich sollte beim EE-Stromeinsatz der Nutzen insbesondere im Sinne eines kosteneffizienten Klimaschutzes sein.
- Reichen die Mengen an erneuerbarem Strom in Deutschland nicht aus, um alle Anwendungen, bei denen es für kosteneffizienten Klimaschutz angezeigt wäre, zu bedienen, ist die Verfügbarkeit alternativer Defossilisierungstechnologien wie z.B. synthetischer Brenn- und Kraftstoffe für die Energiewende von herausragender Bedeutung.
- Auch im Sinne einer vorsorgeorientierten und risikominimierenden Energiestrategie sollte sich mit Ergänzungen zu einer elektrifizierungsfokussierten Transformationsstrategie befasst werden. Dadurch kann flexibel auf mögliche Herausforderungen und Limitierungen reagiert werden. Alternative erneuerbare Brenn- und Kraftstoffe bieten hierbei Optionen zur Risikodiversifizierung.

4.1 Begrenzte Verfügbarkeit von EE-Strom erfordert sinnvolle Fokussierungen des Stromeinsatzes

4.1.1 EE-Strom sollte mit höchster Priorität in Stromanwendungen eingesetzt werden, für die es keine Alternativen gibt

Für einen zielführenden EE-Stromeinsatz kann anwendungsseitig zwischen vier Kategorien unterschieden werden:

Abbildung 28 Kategorien der Anwendungsbereiche, die zukünftig defossilisiert werden müssen



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: H_2=Wasserstoff, 1) Erneuerbare Energien, 2) Günstig in Bezug auf CO_2-Vermeidungskosten

Kategorie 1 – Heutige Stromanwendungen: Ersatz von Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern und Kernenergie unumgänglich

Heutige Stromanwendungen[84] werden noch immer überwiegend mit Elektrizität aus fossilen Energieträgern und Kernenergie versorgt, wenn auch mit einem sinkenden Anteil. Erneuerbare Energieträger werden diese Erzeugungsmengen, wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben, bis zum Jahr 2045 vollständig ersetzen müssen. Hier ist noch ein guter Teil des Weges in Richtung Klimaneutralität zu gehen: Wie bereits dargestellt, bewegt sich der Anteil des erneuerbar erzeugten Stroms derzeit (im Jahr 2021) bei rund 41%, d. h. fast 60% des Stromaufkommens für diese Anwendungen sind bis 2045 noch durch erneuerbaren Strom zu ersetzen, also rund 330 TWh der Stromerzeugung.[85]

Kategorie 2 – Neue Stromanwendungen in Prozessen u.a. in der Industrie, die nicht sinnvoll mit anderen Energieträgern bedient werden können, werden zukünftig für weiteren Stromverbrauch sorgen – dieser muss ebenfalls mit EE-Strom gedeckt werden:

Zukünftig sind zusätzliche Stromverbräuche durch neue Industrie- und Gewerbeprozesse zu erwarten, in denen es zum Stromeinsatz absehbar keine sinnvollen Alternativen gibt. Beispiele sind Elektrolichtbögen in der Stahlindustrie, der Einsatz von Wärmepumpen für verschiedene Niedrigtemperaturprozesse oder

[84] Hierzu gehören z.B. stromgetriebene Prozesse, Schienenverkehr, Strommotoren in industriellen Anwendungen oder Beleuchtung.

[85] Nettostromerzeugung, vgl. AG Energiebilanzen.

die verstärkte Ansiedlung von Industrien wie Batteriefabriken oder Rechenzentren. Weiterhin gehören zu dieser Kategorie zusätzliche Strombedarfe z.B. aus den Bereichen Gebäudewärme (Wärmepumpen in einem hohen Anteil der Neubauten) und im Verkehrsbereich (z.B. elektrische Kleinfahrzeuge), die u.a. gemäß regulatorischer Erwägungen in guten Teilen mit Strom betrieben werden sollen. Auch wird es ein Minimum an Wasserstofferzeugung basierend auf Strom aus erneuerbaren Energien in Deutschland geben, alleine schon aufgrund der politischen Zielsetzungen. Auch dieser Strombedarf ist prioritär durch EE-Strom zu bedienen.

Kategorie 3 – Bereiche, in denen derzeit hauptsächlich Erdgas, Kohlen und Mineralölprodukte zum Einsatz kommen, für die aber neben Elektrifizierung auch andere Alternativen zur Verfügung stehen:

Eine Reihe von Energieanwendungen, die heute noch über fossile Energieträger bedient werden, können sowohl über mit Strom betriebene Technologien wie auch über alternative klimaneutrale Energieträger defossilisiert werden. Beispiele hierfür sind:

- Bei landgestützten Verkehrsarten (PKW, LKW, Bahn): Batterieelektrische Fahrzeuge, Verbrennungsmotoren betrieben mit synthetischen Kraftstoffen oder Biokraftstoffen, Wasserstofffahrzeuge, etc.
- Im Schiffsverkehr: Erneuerbar hergestellte synthetische Kraftstoffe wie Methanol, Ammoniak, E-Diesel oder Biokraftstoffe, für kürzere Distanzen auch Wasserstoff oder Strom etc.
- Wärme/Kälte in Gebäuden: Strombasierte Heizsysteme (Wärmepumpen, Stromdirektheizungen), erneuerbare strom- oder biobasierte Flüssigbrennstoffe, Biogas und Biomasse, grüner Wasserstoff etc.
- In der Industrie: Grüner Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe, Bioenergien oder Elektrizität in Wärmeprozessen und für die Dampferzeugung.

Ist über den konventionellen und zukünftigen Stromsektor hinaus (Kategorie 1 und 2) EE-Strom verfügbar, kann dieser in den genannten grundsätzlich elektrifizierbaren Anwendungen der Kategorie 3 eingesetzt werden. Inwieweit dies sinnvoll ist und nach welchen Grundsätzen Strom in diesen Bereichen eingesetzt werden sollte, werden wir in den folgenden Abschnitten diskutieren.

Kategorie 4 – Für einige derzeit mit Erdgas, Kohlen oder Mineralölprodukten versorgte Sektoren ist eine Defossilisierung durch erneuerbaren Strom bereits aus anwendungsseitigen technischen Gründen[86] absehbar keine realistische Option

[86] Beispielsweise wird die kommerzielle Luftfahrt auf absehbare Zeit aus technisch-ökonomischen Gründen nicht sinnvoll elektrifiziert werden können. Auch wenn es generell technisch möglich ist zumindest kleinere Flugzeuge technisch zu elektrifizieren (E-Fahrer (2021)). Batterien haben eine zu geringe Energiedichte, was die Reichweite einschränkt. Interkontinentalflüge, die ausschließlich mit Batterieantrieben stattfinden, werden nach derzeitigem Forschungsstand auch langfristig nicht möglich sein. (https://www.dlr.de/content/de/artikel/dossier/elektrisches-fliegen/wie-gelingt-die-energiewende-in-der-luftfahrt.html)

Zu diesen Bereichen gehören der Flugverkehr, der Schiffsverkehr über weite Distanzen, der (Fern-)Schwerlastverkehr sowie verschiedene Industrieanwendungen (bspw. in der Chemieindustrie). Für diese Bereiche sind in jedem Fall klimaneutrale Flüssigkraftstoffe, Biokraftstoffe oder Wasserstoff (vgl. Definition Kategorie 3) erforderlich.

Daraus **wird deutlich**, dass Strom aus erneuerbaren Energien prioritär in jenen Sektoren genutzt werden sollte, in denen Strom bereits heute zum Einsatz kommt (Kategorie 1) oder in zusätzlichen neuen Anwendungen, die sinnvoll nur mit Elektrizität betrieben werden können (Kategorie 2). Diese stellen gleichzeitig i. d. R. stationäre Energieanwendungen dar. Bei verschiedenen Energieeinsätzen, die einer sehr hohen Energiedichte bedürfen, etwa mobile Anwendungen aber auch stationären Einsätze bspw. in der Chemieindustrie, ist dagegen der Einsatz erneuerbarer chemischer Brenn- und Kraftstoffe wie z. B. E-Kerosin, E-Diesel, E-Benzin oder Biokraftstoffe erforderlich. Strom wird hier absehbar keine oder eine nur sehr untergeordnete Rolle spielen (Kategorie 4).

Weniger eindeutig ist die Situation bei den Anwendungsfällen, die zwar bisher überwiegend mit fossilen Brenn- und Kraftstoffen betrieben wurden, bei denen als Defossilisierungsoption jedoch neben klimaneutralen biogenen und synthetischen Brenn- und Kraftstoffen auch EE-Strom eingesetzt werden kann (Kategorie 3). Hier stellt sich die Frage, wieviel EE-Strom nach Abzug der erforderlichen Bedarfsdeckung in den Kategorien 1 und 2 speziell für die Anwendungen in dieser Kategorie noch zur Verfügung steht. Falls sich eine Versorgungslücke ergeben kann, ist zu überlegen, welche Methode der Allokation des verfügbaren EE-Stroms in Frage kommen kann und wann EE-Strom im Vergleich zu den verfügbaren Alternativen die geeignetste Option darstellt. Im folgenden Abschnitt gehen wir näher auf die Frage ein, wie eine Abwägung grundsätzlich gestaltet sein sollte.

4.1.2 Prioritäre Stromanwendungen könnten bereits einen hohen Anteil des zukünftig verfügbaren Stroms beanspruchen

Sollte der Ausbau des Stromsystems mittel- bis langfristig an Grenzen stoßen und Strom aus erneuerbaren Energien damit langfristig knapp bleiben (siehe Abschnitt 3.4), sollte dieser – wie bei allen knappen Wirtschaftsgütern – dort eingesetzt werden, wo er den höchsten Nutzen stiftet. Wie im Abschnitt zuvor erläutert, ist dieser Nutzen unzweifelhaft dort am größten, wo es keine sinnvollen Alternativen zum Stromeinsatz gibt (Kategorie 1 und 2). Der dort auftretende Strombedarf kann indikativ wie folgt hergeleitet werden:

- **Aktueller Strombedarf in „klassischen“ Anwendungen (Kategorie 1)**: Der **Stromverbrauch** (netto) in Deutschland beträgt **aktuell ca. 500 TWh**.[87] Diese Größe beinhaltet alle Anwendungen, die bereits heute mit Strom versorgt werden. Inwieweit in Zukunft der Stromverbrauch aus diesen eher „klassischen“ Anwendungen zu- oder abnimmt, ist nicht eindeutig. Einerseits können Effizienzsteigerungen den Strombedarf verringern, andererseits stehen dem ein zu erwartendes Wirtschaftswachstum und ein höherer Verbrauch durch Nachfrage nach mehr „Convenience Produkten“ entgegen.

[87] Nettostromverbrauch vgl. AG Energiebilanzen.

Wir gehen gemäß dem Trend der Vergangenheit von einem stabilen Stromeinsatz in diesen klassischen Anwendungen aus.

- **Zusatzstrombedarf der Industrie der Kategorie 2**: Weiterhin werden für zukünftige Defossilisierungsmaßnahmen in der Industrie und neue Industrien wie Batteriefabriken und neue Dienstleistungen wie KI-Anwendungen und Rechenzentren weitere neue Energieverbräuche entstehen, die sinnvoll nur mit Strom bedient werden können. In den Stromverbrauchsprognosen aus Abschnitt 3.2 (Abbildung 18) weist das untere Quartil der Studien einen Verbrauchsanstieg für die Industrie von **mindestens 80 TWh/a** bis zum Jahr 2045 auf. Approximativ setzen wir diesen Wert für die neuen Stromanwendungen aus diesem Bereich an.
- **Zusatzstrombedarf aus dem Wärmebedarf der Haushalte der Kategorie 2**: Im Haushaltsbereich werden mindestens im Bereich der Neubauten und kernsanierten Altbauten in Zukunft verstärkt Wärmepumpen eingesetzt werden. Dies ergibt sich u.a. aus den relativ strikten Vorgaben zur Wärmeeffizienz und -versorgung von Neubauten und für Vollsanierung im Gebäudebestand aus der Energieeinsparverordnung (EnEV). Geht man davon aus, dass unter der Regulierung bis zum Jahr 2045 rund 9 Mio. Wärmepumpen in Neubauten und vollsanierten Altbauten eingesetzt werden[88], ergibt sich ein zusätzlicher Strombedarf von gut 20 TWh/a bis 2045.[89] Dies unterstellt jedoch, dass i) die Wärmepumpenanzahl relativ moderat ist (Schätzungen reichen bis zu rund 16 Mio. Wärmepumpen im Jahr 2045[90]) und ii) diese im Effizienzbereich arbeiten können. Der zusätzliche Strombedarf könnte beispielsweise steigen, wenn die angenommenen 9 Mio. Wärmepumpen teilweise in nicht vollsanierten Altbauten eingesetzt werden.
- **Zusatzstrombedarf des Verkehrssektors der Kategorie 2:** Im Verkehrsbereich werden absehbar auch aufgrund gesetzlicher Vorgaben für Neuwagen zumindest in kleinen Fahrzeugen in Zukunft v.a. batterieelektrische Antriebssysteme vorherrschen. Zudem werden innerstädtische Busflotten und der Schienenverkehr absehbar vollständig elektrifiziert werden. Die Stromverbrauchsprognosen aus Abschnitt 3.2 (Abbildung 18) gehen im Vergleich zu heute im Minimum von einem Anstieg des Stromverbrauchs im Verkehr von 38 TWh /a bis zum Jahr 2045 aus. Näherungsweise unterstellen wir diesen Wert als den zukünftigen Stromverbrauch der Kategorie 2 im Verkehrsbereich.
- **Heimische Herstellung von grünem Wasserstoff (Kategorie 2):** Schließlich ist davon auszugehen, dass EE-Strom aus Deutschland teilweise auch für die **lokale Herstellung von grünem Wasserstoff** eingesetzt wird. Auch wenn das aufgrund relativ ungünstiger Standortbedingungen für die Herstellung von Wasserstoff aus Elektrolyse nicht in überragendem Maße geschehen wird. Die Stromverbrauchsprognosen aus Abschnitt 3.2 (Abbildung 18) gehen im

[88] Siehe Dena (2021), Abbildung 27 Hauptszenario Klimaneutralität 100, S. 283.

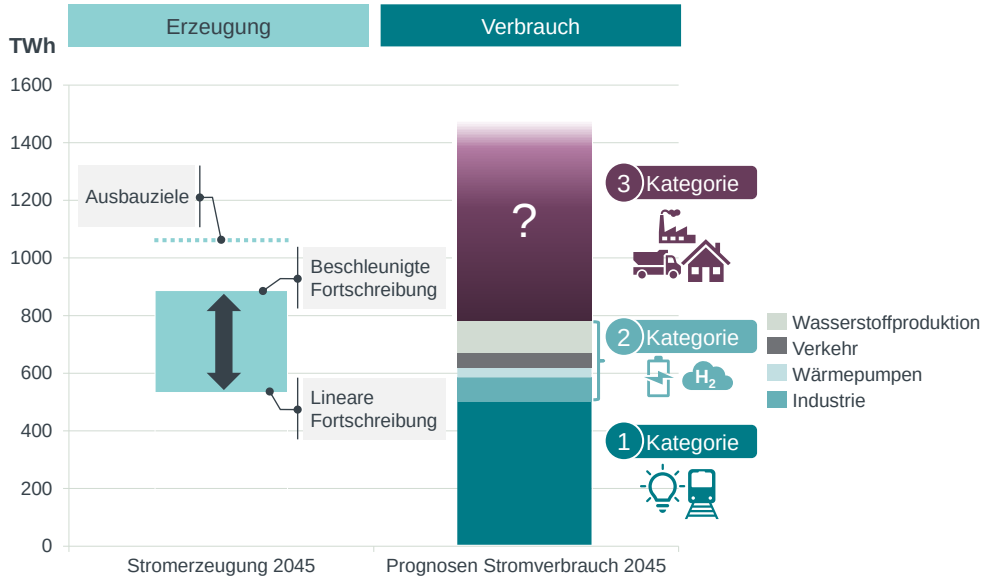
[89] Die überschlägige Rechnung legt für eine Wärmepumpe einen jährlichen Bedarf von 30 kWh/m²/a für einen Neubau (vgl. Bosch (2023)) und eine durchschnittliche Wohnfläche von ca. 80 m² zu Grunde. Der hier angegebene jährliche Bedarf liegt eher am unteren Rand für die angenommene Anzahl der Wärmepumpen, abhängig vom Baujahr und der Jahresarbeitszahl kann der Verbrauch auch wesentlich höher liegen.

[90] Siehe bspw. BNetzA (2022b), Fraunhofer IEE (2020) oder Energiezukunft (2018)

unteren Quartil[91] von einem Strombedarf für die Wasserstofferzeugung in Deutschland von ca. **130 TWh/a** aus.[92] Diesen Wert setzen wir als Mindeststrombedarf der Kategorie 2 für die Wasserstofferzeugung in Deutschland an.

Insgesamt ergibt sich auf Basis der indikativen Abschätzung der Strombedarfe ein **Stromverbrauch von ca. 770 TWh/a** alleine für die Anwendungen der Kategorien 1 und 2.

Abbildung 29 Stromverbrauch aufgeschlüsselt nach prioritären Stromendanwendungen



Quelle: Frontier Economics basierend auf AG Energiebilanzen und diversen Studien, vgl. Abschnitt 3

Im Vergleich zu den Analysen zu möglichen zukünftigen Ausbaupfaden für die Stromerzeugung in Deutschland (siehe Abschnitt 3.3) zeigt sich, dass der Strombedarf der Kategorien 1 und 2 nicht gedeckt werden kann, wenn die jährliche EE-Zubaurate nicht über den durchschnittlichen Anstieg der letzten 20 Jahre hinaus gesteigert werden kann. Diese Zubaurate würde lediglich zu einem Stromangebot von 530 TWh im Jahr 2045 führen. Sollte sich der EE-Ausbau in Deutschland entsprechend der Dynamik der letzten Jahre beschleunigen (Stromverfügbarkeit von ca. 880 TWh/a im Jahr 2045), könnte die Stromnachfrage der Kategorien 1 und 2 zwar gedeckt werden, für weitere Stromanwendungen der Kategorie 3 stünden allerdings nur noch rund 110 TWh/a zur Verfügung.

Darüber hinausgehende Energiebedarfe, wie sie in den Verbrauchprognosen aufgezeigt werden (bis zu 1.450-1.500 TWh/a in starken Elektrifizierungsszenarien für das Jahr 2045), müssten dann anderweitig gedeckt werden.[93] Der Strom wäre

[91] Hier wurde konservativerweise das untere Quartil (d.h. der Grenzwert des unteren Viertels) der verfügbaren Verbrauchsprognosen statt des Durchschnittswerts zu Grunde gelegt. Einige Studien analysieren explizite Szenarien, in denen Wasserstoff eine zentrale Rolle spielt (und Elektrifizierung weniger vollumfänglich stattfindet). Das führt dazu, dass die Prognosen für die Wasserstoffproduktion verhältnismäßig hohe Werte aufzeigen.

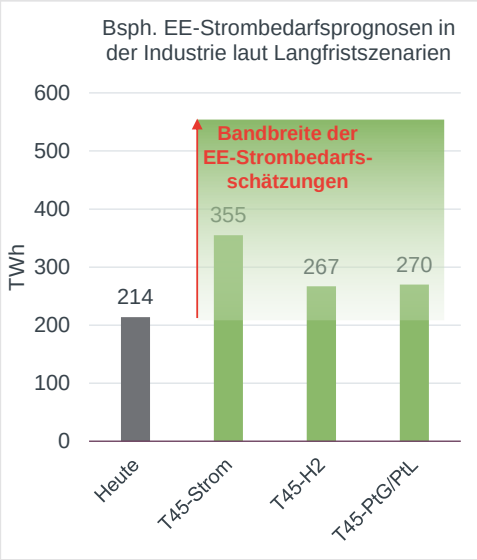
[92] Vgl. BDI (2021) Zielpfad. Die BDI Studie liegt ungefähr im mittleren Bereich beim unmittelbaren Vergleich mit den anderen Studien.

[93] Wie in Abschnitt 3 erläutert geht der Anstieg der nachgefragten EE-Strommenge ebenfalls mit einem Anstieg der Stromspitzenlast einher. Selbst wenn die Elektrifizierung nicht so weitreichend umgesetzt wird wie in Abschnitt 3.4.2 illustriert, droht aufgrund drohender mangelnder gesicherter Leistung eine Situation,

dann konsequent in den Anwendungen einzusetzen, die den höchsten Nutzen stiften. Auf diesen Aspekt gehen wir im folgenden Abschnitt weiter ein.

EXKURS: PROGNOSEN FÜR DEN STROMBEDARF DER INDUSTRIE

Kann der Industriebestand in Deutschland gehalten werden (kann also einer Abwanderung ins Ausland – insbesondere motiviert durch dort günstiger zur Verfügung stehende Energie – entgegengewirkt werden), wird dies zu einer signifikanten Steigerung des EE-Strombedarfs führen. Studien gehen davon aus, dass der **Gesamtstrombedarf der Industrie pro Jahr von 214 TWh** auf **durchschnittlich 350 TWh und in der Spitze bis zu 539 TWh**[94] anwachsen könnte. In den Szenarien am oberen Ende der Bandbreite wird davon ausgegangen, dass der Industriesektor zu einem großen Teil elektrifiziert wird. In den 2022 aktualisierten Langfristszenarien etwa werden Strombedarfe von bis zu 355 TWh geschätzt.[95]



- Grund für den deutlich höheren Strombedarf ist, dass die Defossilisierung der Industrie nicht allein durch einen Ersatz der fossilen Energieträger durch erneuerbare Energien (etwa Ersatz des fossil hergestellten durch erneuerbaren Strom) zu bewerkstelligen ist. Zusätzlich ist teilweise die Umstellung auf gänzlich andere Prozesse erforderlich, die auch Elektrifizierung und somit den Einsatz von zusätzlichem (erneuerbarem) Strom umfassen.
- Ein Beispiel ist die Stahlindustrie. Für eine treibhausgasneutrale Produktion des Rohstahls muss insbesondere der Kohleeinsatz im Hochofen ersetzt werden. Eine Defossilisierungsoption ist hierbei die Direktreduktion mit Wasserstoff. Dabei wird mit Hilfe von Wasserstoff der Sauerstoff aus den Eisenerzen in Direktreduktionsanlagen reduziert und der erzeugte Eisenschwamm anschließend mit Strom zu Stahl weiterverarbeitet. Für einen treibhausgasneutralen Prozess ist hier also sowohl klimaneutral hergestellter Wasserstoff als auch erneuerbarer Strom erforderlich. Bei einer jährlichen Produktion von etwa 36 Mio. t Rohstahl[96] beträgt damit **alleine im Stahlsektor die zusätzliche Menge** an direkt eingesetztem erneuerbarem Strom ca. **25 TWh**. Die benötigten Mengen an erneuerbarem Wasserstoff gehen weit darüber hinaus und erhöhen den Strombedarf noch zusätzlich: Wird dieser Wasserstoff inländisch strombasiert hergestellt, kann der EE-Strombedarf für diese Menge um weitere etwa 100 TWh steigen.[97]

in der Spitzenlast nicht gedeckt werden könnte. Nicht nur der Mengenbedarf, sondern auch der Leistungsbedarf müssten demnach anderweitig gedeckt oder entsprechend reduziert werden.

94 Vgl. Dena (2018), EL-95 Szenario. Dena (2021) schätzt einen Strombedarf in der Industrie von 311 TWh für 2050.

95 Vgl. Fraunhofer ISI (2022b).

96 Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl (2021).

97 Diese Schätzung basiert auf der Annahme, dass im Prozessablauf etwa 0,7 MWh(el) Strom und etwa 2 MWh Wasserstoff für die Produktion einer Tonne DRI bzw. Rohstahl benötigt wird (vgl. LBST (2022)) und der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs zur Wasserstoffproduktion aus Strom 67% beträgt.

4.1.3 Begrenzte Verfügbarkeit von EE-Strom erfordert Fokussierungen des Stromeinsatzes bei Anwendungen der Kategorie 3

Es besteht ein substantielles Risiko, dass die erneuerbar erzeugten Strommengen aus Deutschland und den Nachbarländern nicht für alle potentiellen Anwendungsbereiche ausreichen werden. Wie bereits gezeigt, ist es sinnvoll, den EE-Strom zunächst prioritär dort einzusetzen, wo es keine Alternative zum Stromeinsatz gibt oder die Alternativen wenig sinnvoll sind. Dies betrifft heutige Stromanwendungen, aber auch (neue) Anwendungen wie z.B. in bestimmten Industrieprozessen (Vergleich Kategorien 1 und 2).

Ist nach Deckung des Strombedarfs von prioritären Stromanwendungen noch EE-Strom verfügbar, könnte dieser für Anwendungen innerhalb von Kategorie 3 genutzt werden, in denen derzeit hauptsächlich Erdgas, Kohle- und Mineralölprodukte eingesetzt werden. In den Stromanwendungen der Kategorie 3 gibt es hierbei definitionsgemäß auch Defossilisierungsalternativen zu EE-Strom.

Wie zuvor beschrieben besteht ein maßgebliches Risiko einer EE-Stromlücke für die Nachfrage der Kategorie 3. Ist EE-Strom nicht ausreichend vorhanden, führt dies notwendigerweise zu Überlegungen einer Ressourcenallokation, die den größten Beitrag zu Klimaschutz und volkswirtschaftlicher Nutzen erzielt.

Für einen Einsatz des EE-Stroms (sowie klimaneutraler Alternativen) im Sinne des kosteneffizienten Klimaschutzes sollten CO_2-Vermeidungskosten maßgebliche Orientierungsgröße sein

Ist EE-Strom knapp, sollte der Stromeinsatz auf die Anwendungen fokussiert werden, in denen der Einsatz den größten Nutzen bzw. Vorteil aufweist. Mit Blick auf die Klimaschutzziele und die damit verbundenen Investitionen/Kosten, hängt der Nutzen des Einsatzes verschiedener Defossilisierungstechnologien grundsätzlich von deren **CO_2-Vermeidungskosten** ab. Diese geben an, wie hoch die Kosten sind, um eine bestimmte Menge an CO_2-Emissionen zu reduzieren. Je geringer die CO_2-Vermeidungskosten einer Defossilisierungsoption sind, desto günstiger kann hierdurch CO_2 vermieden werden. Eine Option mit relativ zur Alternative niedrigeren CO_2-Vermeidungskosten ist somit vorteilhaft.

Je nach Einzelfall kann EE-Strom oder eine klimaneutrale Alternative die optimale Defossilisierungsoption sein – es ist keine Pauschalisierung möglich

Die CO_2-Vermeidungskosten hängen in allen Anwendungen von vielen verschiedenen Faktoren ab (für weitere Details vgl. **Anhang A**). In jedem Anwendungsbereich gibt es aufgrund unterschiedlicher Faktoren eine Vielzahl von Einzelfällen. Je nach Einzelfall kann also EE-Strom oder eine klimaneutrale Alternative die optimale Defossilisierungsoption sein - es kann also nicht pauschal pro Anwendungsbereich beantwortet werden, welche der Optionen zur Defossilisierung optimal ist.

Um diesen Sachverhalt zu veranschaulichen, ein Beispiel aus dem Wärmesektor: Angenommen es ist zu entscheiden, ob in Bezug auf die CO_2-Vermeidungskosten (i) eine mit EE-Strom betrieben Wärmepumpe oder (ii) eine Öl- oder

Gasbrennwerttherme, betrieben mit E-Fuel bzw. grünem Wasserstoff vorteilhaft ist. Die Entscheidung ist u.a. abhängig vom Heizbedarf und den jeweiligen Kosten. Der Heizbedarf wiederum wird sowohl von der Wohnfläche, der Personenanzahl, des Sanierungsstands des Gebäudes, als auch von individuellen Faktoren wie dem Heizverhalten, der Raumaufteilung oder generellem Verhalten/Anwesenheit der Bewohner bestimmt. Zusätzlich wird die Entscheidung von den Kosten und der Effizienz der Brennwerttherme oder Wärmepumpe beeinflusst. Hinzu kommen die Kosten für eventuelle Sanierungsarbeiten, Installationen oder Umrüstungskosten, und auch die Preise für EE-Strom oder grünen Brennstoff spielen eine Rolle.

Ein analoges Beispiel lässt sich aus dem Verkehrsbereich anführen. So ist die klima- und kostenbezogene Vorteilhaftigkeit eines Kraftfahrzeugs mit i) batterieelektrischen Antrieb vs. ii) eines Fahrzeugs mit grünen E-Fuels betriebenen Verbrennungsmotors u.a. abhängig von

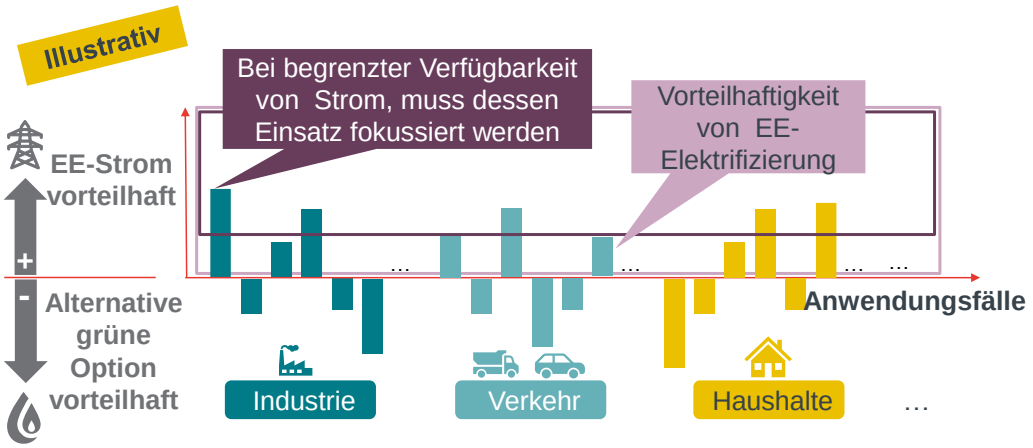
- der Größe des Fahrzeugs;
- dem Fahrverhalten der Nutzer und der jährlichen gefahrenen Kilometer;
- der CO_2-Intensität der Herstellung des Fahrzeugs, im Fall des BEV v.a. der Batterie und damit auch der Reichweite des Fahrzeugs;
- der Fahrumgebung (Stadt vs. Land);
- den Betriebszeiten (Sommer vs. Winter);
- und nicht zuletzt den Gesamtkosten des Fahrzeugs sowie des grünen Stroms bzw. grünen Kraftstoffs.

Die Vielzahl an Einflussfaktoren führt für jeden Einzelfall zu sehr unterschiedlichen CO_2-Vermeidungskosten je nach Defossilisierungstechnologie . Je nach Einzelfall kann sich die Vorteilhaftigkeit gemessen an CO_2-Vermeidungskosten zwischen alternativen Technologien bereits bei Änderung weniger Einflussfaktoren umkehren. Je nach Einzelfall kann also EE-Strom oder eine klimaneutrale Alternative die optimale Defossilisierungsoption sein. Darüber hinaus ändern sich Einflussfaktoren (wie z.B. Fahrverhalten von KFZ-Nutzern) über den Zeitablauf, wodurch sich Vorteilhaftigkeit dynamisch über die Zeit etwa abhängig vom technologischen Fortschritt verändert.

Besteht Stromknappheit, muss auch in Anwendungsfällen, in denen der Stromeinsatz im Verhältnis zu den Alternativen bezüglich der CO_2-Minderungskosten einen Vorteil aufweisen, auf eine Alternative zurückgegriffen werden. So illustriert Abbildung 30 die Vorteilhaftigkeit von Strom für Anwendungsfälle in Kategorie 3 in Bezug auf CO_2-Vermeidungskosten für verschiedene Anwendungsfälle und Sektoren. In Anwendungsfällen, in denen alternative grüne Defossilisierungsoptionen (z.B. E-Fuels oder grüner Wasserstoff) bezüglich der CO_2-Vermeisungskosten vorteilhaft sind, sollte dieser auch eingesetzt werden (siehe Abbildung; Bereich unterhalb der horizontalen Achse). Ist Strom zudem knapp, muss auch in bestimmten Fällen, in denen Elektrizität gegenüber den Alternativen eigentlich kostenseitig vorteilhaft wäre (siehe Abbildung; Bereich oberhalb der horizontalen Achse), auf die effizientesten Einsatzzwecke fokussiert werden. Dies sind die Einsatzzwecke mit dem höchsten volkswirtschaftlichen Nutzen, also in der Abbildung beispielhaft die Anwendungen, die durch den obersten Bereich markiert sind. Anwendungen außerhalb dieses oberen, markierten Bereichs müssten dann mit alternativen Optionen bedient

werden, auch dann, wenn EE-Strom bei ausreichender Verfügbarkeit die effizientere Variante wäre. Der Bedarf alternativen Defossilisierungsoptionen steigt entsprechend an.

Abbildung 31 Vorteilhaftigkeit von Strom für illustrative Anwendungsfälle in Kategorie 3 in Bezug auf CO_2-Vermeidungskosten



Quelle: Frontier Economics

Die Identifikation "bester" Technologien für die Defossilisierung ist daher nicht pauschal möglich

Das Bestreben, die Wahl von Technologien in zentraler Weise politisch zu determinieren, z.B. durch die Nichtanerkennung von E-Fuels in den Flottengrenzwerten der Hersteller oder das Verbot der Installation von mit Grüngas oder synthetischem Heizöl betriebenen Brennwertthermen in Haushalten, kann vor diesem Hintergrund nicht zu optimalen Ergebnissen führen und geht mit erheblichen volkswirtschaftlichen Mehrkosten einher. Die Vielfalt an Anwendungsfällen kann zentral nicht erfasst werden. Die Koordination des Einsatzes knappen EE-Stroms sollte deshalb dezentral erfolgen und den einzelnen Verbrauchern überlassen bleiben. Marktwirtschaftliche Mechanismen, zusammen mit einem offenen Zugang zu Informationen und Entscheidungshilfen, bieten sich hierbei an. Davon bleibt unberührt, dass fossile Energieträger aus dem Markt ausscheiden müssen.

Gleichzeitig führt Technologieoffenheit dazu, dass bei einem entsprechendem regulatorischem Rahmen ausreichend erneuerbare Defossilisierungsoptionen auf dem Markt verbleiben, um die Energienachfrage insgesamt bedienen zu können, insbesondere wenn sich eine Stromlücke ergeben sollte. Die Diversifikation klimaneutraler Technologieoptionen reduziert somit auch das Risiko, dass in Zeiten von Knappheit auf fossile Energieträger zurückgegriffen werden muss.

MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN EINER LANGFRISTIGEN VERKNAPPUNG DES ANGEBOTS AN (GRÜNER) ENERGIE

In der vorhergehenden Analyse zur Allokation knappen EE-Stroms in Deutschland der Kategorie 3 gehen wir davon aus, dass ausreichend grüne alternative Energieträger wie alternative Brenn- und Kraftstoffe, grüner Wasserstoff usw. zur Verfügung stehen, so dass auch bei nicht ausreichendem EE-Strom der Energieverbrauch durch erneuerbare Energien gedeckt werden kann. Sollte EE-Strom in Deutschland dauerhaft nur in ungenügendem Ausmaß zur Verfügung stehen und sollten gleichzeitig die alternativen Energieangebote nicht in ausreichendem Maße nutzbar gemacht werden, weil diese politisch nicht zugelassen werden, können weitergehende negative Effekte für die deutsche Klimapolitik, die Volkswirtschaft sowie Verbraucher folgen. Beispiele hierfür sind:

- Verfehlen der Klimaschutzziele: Im Falle einer drohenden Unterversorgung des Energiebedarfs in Deutschland ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass entgegen der politischen Zielsetzungen auch langfristig auf fossile Energieträger zur Deckung des Energiebedarfs zurückgegriffen werden muss. Dies ergibt sich schon alleine aus dem Umstand, dass eine Gefährdung der Energieversorgung mit hohen energiewirtschaftlichen Kosten einhergehen würde, und kann nicht im Sinne der deutschen Klimapolitik sein. Dies hat sich bspw. jüngst gezeigt, als in Deutschland angesichts der drohenden Gasmangellage u.a. ein bereits stillgelegtes Kohlekraftwerk wieder in Betrieb genommen werden sollte[98].
- Steigende Energiepreise: Bleibt grüne Energie, also nicht nur EE-Strom, dauerhaft knapp, ist im internationalen Vergleich mit einem hohen Energiepreisniveau in Deutschland zu rechnen. Erneuerbarer Strom würde dann verstärkt nach der Zahlungsbereitschaft verteilt, so dass preissensitive Verbraucher wie Industrieunternehmen mit höheren Energie- und Stromverbräuchen ihre Produktion einschränken oder ins Ausland verlagern müssten. Es wäre mit weitreichenden negativen Auswirkungen auf den Industriestandort Deutschland zu rechnen. Dies ist umso bedenklicher, da es sich um einen schleichenden Prozess handelt, bei dem Investitions- und Standortentscheidungen (für oder gegen Deutschland) stetig getroffen werden und die Abwanderungswelle erst mittel- bis langfristig spürbar wird.

  Zudem zeigt sich aus den aktuellen Krisen, dass ein hohes Energiepreisniveau mit erheblichen verteilungspolitischen Debatten mit Blick auf die Endverbraucherpreise einhergeht. So dürfte die Zahlungsbereitschaft der Haushalte und des GHD-Sektors für EE-Strom bei mangelnden Alternativen sehr hoch sein. Allerdings zeigt die jüngste Vergangenheit, dass hohe Energiepreise für die breite Bevölkerung gleichzeitig als gesellschaftliche und sozialpolitische Bedrohung wahrgenommen werden. Entsprechend groß ist die Wahrscheinlichkeit weiterer staatlicher Eingriffe in die Energiemarktmechanismen mit hoher Gefahr von kurz- und langfristigen Fehlsteuerungen.
- Sinkende Resilienz des Energiesystems: Gleichzeitig würde bei Mangel an erneuerbarer Alternativen die Resilienz, also Widerstandsfähigkeit des Energiesystems, abnehmen. Kurzfristige Störungen des Energiesystems gehen dann mit einer deutlich höheren Wahrscheinlichkeit an Versorgungsunterbrechungen oder Preisschocks einher – das System wäre weniger stressresistent. Ohne erneuerbare Alternativen kann negativen externen Schocks weniger entgegengesetzt werden.

[98] Vgl. https://www.zdf.de/nachrichten/politik/eu-notfallplan-gas-europa-massnahmen-ukraine-krieg-russland-100.html

4.2 Aus strategischen Gründen sollten ergänzende Energieangebote zur Elektrifizierung verfügbar gemacht werden

Wie in Abschnitt 3 herausgearbeitet, besteht ein substantielles Risiko, dass mittel- bis langfristig, energie- wie kapazitätsseitig, eine Lücke an erneuerbarem Strom entstehen könnte. Auch wenn sich EE-Ausbauszenarien einstellen können, in denen es nicht zu einem solchen Fall kommt, sollte eine vorsorgeorientierte und risikobewusste Energiestrategie Entwicklungspfade offen halten, welche die Abhängigkeit von nur einem einzigen Energieträger reduziert. Eine solche einseitige strategische Ausrichtung (und verbunden mit politisch eingeschränkter Zulassung von Beiträgen aus biogenen Energien, synthetischen Energieträgern und grünem Wasserstoff) kann nicht im Sinne einer Risikodiversifizierung sein, weder hinsichtlich der Sicherung der Versorgung, noch hinsichtlich des Erreichens der Klimaschutzziele.

Analog zu den konventionellen Stromsektoren, deren Stromverbrauch zukünftig zunehmend durch EE-Strom anstelle von fossilem Strom gedeckt werden muss, besteht die Möglichkeit, die derzeitigen fossilen Kraft- und Brennstoffe durch zunehmend erneuerbare Alternativen zu ersetzen. Diese können grundsätzlich als grüne Energieträger in vielfältiger Weise sowohl in flüssiger Form als Kerosin, Heizöl, Diesel, Benzin, Flüssiggas, Ammoniak, Methanol, etc. oder in gasförmigen Zustand als Wasserstoff oder Methan bereitgestellt werden. Erzeugt werden diese synthetische Brenn- und Kraftstoffe entweder aus biogenen Ausgangsstoffen (z.B. Biomasse der 2. oder 3. Generation) oder mittels grünen Stroms über Elektrolyse und weitere Syntheseschritte. Insbesondere erneuerbare Flüssigkraftstoffe – in Teilen aber auch grüne Gase wie Wasserstoff und Methan – bieten gegenüber EE-Strom vielfältige Vorteile und können EE-Strom daher ergänzen:

- Ersetzt man die derzeitigen fossilen Kraft- und Brennstoffe durch zunehmend klimaneutrale Energieträger wie E-Kerosin, E-Benzin, E-Diesel oder E-Heizöl kann die bereits **bestehende Infrastruktur** in weiten Teilen weiterhin genutzt werden. Das betrifft nicht nur die Energietransportinfrastruktur, sondern auch industrielle Anlagen, sowie Endgeräte wie Kraftfahrzeuge und Heizungsanlagen etc. Von Vorteil ist, dass sowohl Investitionskosten in neue Endanwendungen und gleichzeitig eine vorzeitige Außerbetriebnahme der Anlagen vor Ende des Lebenszyklus vermieden werden kann. Dies bedeutet, dass existierende Anwendungen auf diese Weise defossilisiert werden können. Mit zunehmender Verfügbarkeit von erneuerbaren Energieträgern kann schrittweise ein höherer Anteil klimaneutralen Kraftstoffs zu fossilen Brenn- und Kraftstoffen beigemischt werden.
- Flüssige Kraft- und Brennstoffe können im Gegensatz zu EE-Strom leicht und ohne weitere Umwandlungsschritte über **weite Strecken transportiert** und **für längere Zeiträume gespeichert** werden.
- Erneuerbare flüssige Kraft- und Brennstoffe haben aufgrund ihrer guten Transportfähigkeit den Vorteil, dass sie aus weit entfernten EE-reichen Weltregionen, auch außerhalb Europas, **importiert** werden können. Als Produktionsstandorte für synthetisches Rohöl (Syncrude) und/oder

synthetische Kraftstoffe, die etwa aus erneuerbarem Strom hergestellt werden (E-Fuels),[99] bieten sich aufgrund der hohen Anzahl an Sonnenstunden und hoher Windhöffigkeit bspw. die **MENA-Region, Patagonien oder Australien** an. EE-Strom hingegen muss aufgrund seiner eingeschränkten Transportfähigkeit vor allem in Deutschland bzw. der näheren Umgebung erzeugt werden. Dadurch ist das Potenzial des erneuerbar erzeugten Stroms zusätzlich räumlich begrenzt.

Deutschland sollte vor diesem Hintergrund großes Interesse daran haben, neben dem Ausbau erneuerbaren Stroms in Deutschland, verstärkten Energieeffizienzanstrengungen und dem intensivierten direkten Einsatz von biogenen Energieträgern auch den Aufbau einer globalen Erzeugungs- und Transportinfrastruktur für alternative Brenn- und Kraftstoffe voranzutreiben. Pilotprojekte und -anlagen können hierbei durchaus auch innerhalb Deutschlands entwickelt werden, allerdings sollte gleichzeitig das Ziel des Aufbaus eines weltumspannenden Handels- und Liefernetzwerkes vorangetrieben werden. Die entsprechenden politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen sind hierbei auf deutscher wie europäischer Ebene weiter voranzureiben.

[99] Andere Ressourcen der klimaneutralen Kraftstoffproduktion sind z. B. Biomasse. Das Potenzial der Kraftstoffe biogenen Ursprungs ist jedoch deutlich begrenzter als das von E-Fuels.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN – FÜR EINE ERFOLGREICHE, ZUKUNFTSOFFENE ENERGIESTRATEGIE

Aus den bisherigen Betrachtungen lassen sich folgende wesentliche Schlussfolgerungen für die zukünftige Energiestrategie in Deutschland ableiten:

Eine mögliche **langfristig begrenzte Verfügbarkeit von EE-Strom in Deutschland** sollte in der Energiepolitik als Szenario mitgedacht werden.

- **Zielführender Klimaschutz erfordert die Berücksichtigung aller Herausforderungen (und Chancen) über sämtliche Bereiche des Energiesystems** hinweg – von der Energieerzeugung bis zum Verbrauch. Technisches Elektrifizierungspotenzial auf der Anwenderseite lässt keine Rückschlüsse darauf zu, dass in der Realität ausreichend Strom zur Versorgung zur Verfügung steht. Ein bedingungsloses Vertrauen auf die Elektrifizierbarkeit aller Endanwendungen ist daher nicht zielführend – es muss stets das gesamte Energiesystem mit all seinen Limitierungen in der Praxis mitgedacht werden.
- **Daher müssen Alternativen zur Strategie einer umfassenden Elektrifizierung** in die Wege geleitet und weiter entwickelt werden. Hierzu gehören neben biogener Energie auch strombasierte klimaneutrale Brenn- und Kraftstoffe (inklusive grüner Wasserstoffe). Diese – und gerade flüssige Energieträger- können aufgrund ihrer Transportierfähigkeit und ihrer Speicherbarkeit in großen Mengen aus Drittländern mit umfassendem EE-Potential und günstigen EE-Erzeugungskosten importiert werden.
- Klimaneutrale synthetische Energieträger helfen erheblich, die **Versorgungssicherheit** zu erhöhen, da sie aus einer Vielzahl von Ländern flexibel importiert werden können. Die Abhängigkeit von einzelnen Energie-Exportländern wird damit im Sinne der Risikodiversifikation reduziert.
- Zudem stärkt eine Vielzahl an technischen Lösungen **die Resilienz[100] des Energiesystems**. Gerade eine Fokussierung auf einen einzelnen Energieträger wie Strom schwächt die Resilienz des Energiesystems gegenüber Störungen und Krisen deutlich. Einschätzungen darüber wie sich zukünftig technologischer Fortschritt, Kosteneinsparungen und Klimaschutzanstrengungen[101] entwickeln, sind mit reichlich Unsicherheiten behaftet. Technologische Vielfalt ermöglicht es, flexibler auf unvorhergesehene Änderungen der Rahmenbedingungen zu reagieren.

[100] Resilienz bedeutet, dass das Energiesystem seine Funktionsfähigkeit auch unter hoher Belastung aufrechterhält oder nach temporärem Ausfall schnell wiederherstellt.

[101] Entscheidend für die Einhaltung des 1.5°- bzw. 2°-Ziel ist letztlich, dass ein bestimmtes globales „Budget“ an CO_2-Emissionen nicht überschritten wird. Je nachdem wie sich die Emissionsmenge der Weltgemeinschaft in der Atmosphäre und damit die globale Erderwärmung entwickelt, müssen Klimaschutzziele ggf. verschärft werden. Ein aktuelles Beispiel ist die Verschärfung der Klimaschutzziele der Bundesregierung sowie der EU im Sommer 2021, in der festgelegt wurde, dass Klimaneutralität bereits 2045 erreicht werden soll.

Durch **Technologievielfalt** kann ein essenzieller **Beitrag für kosteneffizienten Klimaschutz** geleistet werden:

- **Vielfalt bei Kunden und Verbrauchern erfordert Vielfalt in den Lösungen**: Durch die Heterogenität der Anwendungsfälle und individuellen Bedarfe ist eine Vielfalt technologischer Lösungen innerhalb der Sektoren und über die Sektorengrenzen hinweg erforderlich, d. h. je nach einzelnem Anwendungsfall ist dezentral zu entscheiden, mit welchen Technologien defossilisiert werden soll. Je nach Anwendungsfall erzielt die Elektrifizierung mit EE-Strom oder die Energieversorgung mit klimaneutralen Gas- und Flüssigkraftstoffen die kostengünstigste CO_2-Vermeidung. **Pauschale politische Vorgaben**, die die Wahl der Technologien einschränken (wie z. B. eine Beschränkung oder gar ein faktisches Verbot von E-Fuels im Individualverkehr oder im Wärmesektor), **führen zu höheren volkswirtschaftlichen Kosten und erschweren die Transformation des Energiesystems**.
- Darüber hinaus kann zielführender Klimaschutz über einen **Technologiemix** nur durch geeignete Rahmenbedingungen und marktwirtschaftliche Mechanismen herbeigeführt werden. Bei **Options- und Technologievielfalt**, ergänzt durch geeignete Rahmenbedingungen (wie einer zwingend erforderlichen CO_2-Bepreisung), können Marktakteure entlang der Wertschöpfungskette (vom Energieproduzenten bis zum Verbraucher) am besten für effektiven und effizienten Klimaschutz sorgen.

Der Aufbau von Bezugsmöglichkeiten für den Import von strombasierten PtX-Energieträgern sollte daher fester strategischer Bestandteil der Energiewende und der angestrebten Transformation des Energiesystems sein. PtX-Energieträger können herkömmliche, fossile Energien ersetzen und so ergänzend zu direkt eingesetzten EE-Strom das Angebot an erneuerbaren Energieträgern erhöhen und so einen essenziellen Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten. Hierfür sind klare europäische Rahmenbedingungen für den Bezug, Aufbau und die Integration importfähiger Energieträger auf Grundlage erneuerbarer Energien unabdingbar.

LITERATURVERZEICHNIS

- **50Hertz et al. (2020)**, Bericht der deutschen Übertragungsnetzbetreiber zur Leistungsbilanz 2018-2022, 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und TransnetBW GmbH, 18. Februar 2020, https://www.amprion.net/Dokumente/Netzkennzahlen/Leistungsbilanz/Bericht-zur-Leistungsbilanz/Bericht_zur_Leistungsbilanz_2019.pdf
- **AG Energiebilanzen (2022a)**, Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland, Daten für die Jahre von 1990 bis 2021, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., September 2022, https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/09/awt_2021_d.pdf
- **AG Energiebilanzen (2022b)**, Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2022 (in TWh) Deutschland insgesamt, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Dezember 2022, https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2022/09/STRERZ22_Abgabe-12-2022_inkl-Rev-EE.pdf
- **Agora (2021)**, Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, Juni 2021, https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf
- **Agora Energiewende (2022)**, Klimaneutrales Stromsystem 2035 - Wie der deutsche Stromsektor bis zum Jahr 2035 klimaneutral werden kann, Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Projektpartner Prognos AG und Consentec GmbH, Juni 2022, https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-stromsystem-2035/
- **Ariadne (2021)**, Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Oktober 2021, https://doi.org/10.48485/pik.2021.006
- **Bayern Innovativ (2021)**, Verzögerungen beim Bau der Südlink-Trasse: Südlink-Termin wohl kaum noch einzuhalten, 04. Mai 2021, https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/verzoegerungen-bau-suedlink-trasse
- **BDI (2021)**, Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft, Boston Consulting Group (BCG), Gutachten im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie e.V. (BDI), Oktober 2021, https://www.bcg.com/klimapfade
- **BMWi (2016)**, Was bedeutet "Bruttostromverbrauch"?, Energiewende direkt, BMWi Energiewende, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Januar 2016, https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2016/01/Meldung/direkt-erklaert.html#:~:text=Zieht%20man%20die%20Stromverluste%20beim,Nettos

tromverbrauch%E2%80%9C%20oder%20%E2%80%9EEndenergieverbrauch%E2%80%9C

- **BMWi (2017)**, Grünbuch Energieeffizienz, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Mai 2017, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/gruenbuch-energieeffizienz.pdf?__blob=publicationFile&v=26
- **BMWi Langfristszenarien (2021)**, Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3, Kurzbericht: 3 Hauptszenarien, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec GmbH, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Technische Universität Berlin, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Mai 2021, https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS_Kurzbericht_final_v5.pdf
- **BMWK (2022a)**, Überblickspapier Osterpaket, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Berlin, 6. April 2022, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf?__blob=publicationFile&v=12
- **BMWK (2022b)**, Bundesrat beschließt größtes Beschleunigungspaket für den Erneuerbaren-Ausbau seit Jahrzehnten und erweitert Instrumentenkasten für Vorsorgemaßnahmen, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Pressemitteilung, 8. Juli 2022, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/07/20220708-bundesrat-beschliesst-grosstes-beschleunigungspaket-fur-den-erneuerbaren-ausbau.html
- **BMWK (2022c),** Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland, Stand: September 2022, https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html
- **BMWK (2022d)**, Energiewende im Gebäudebereich, Breites Bündnis will mindestens 500.000 neue Wärmepumpen pro Jahr, Gemeinsame Pressemitteilung, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/06/20220629-breites-buendnis-will-mindestens-500000-neue-waermepumpen-pro-jahr.html
- **BMWSB (2022)**, Maritime Raumordnung, Raumordnungsplan für die AWZ, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/raumentwicklung/maritime-raumordnung/maritime-raumordnung-node.html
- **BNetzA (2022a)**, Monitoringbericht 2021, Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i.V.m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i.V.m. § 53 Abs. 3 GWB, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt, 15. März 2022, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2021.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- **BNetzA (2022b)**, Bedarfsermittlung 2023-2037/2045 - Genehmigung des Szenariorahmens 2023-2037/2045, Bundesnetzagentur, Juli 2022,

https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bedarfsermittlung/2037/SR/Szenariorahmen_2037_Genehmigung.pdf;jsessionid=E19867CDB01737DB756986E627F3FA02?__blob=publicationFile

- **BNetzA (2022c)**, Fact Sheet zur Bestätigung des Netzentwicklungsplans Strom, Bedarfsermittlung 2021-2035, Januar 2022, https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/2035/NEP/Fact_Sheet.pdf?__blob=publicationFile
- **Bosch (2023)**, Stromverbrauch von Wärmepumpen: Berechnung und Einsparmöglichkeiten, https://www.bosch-thermotechnology.com/de/de/wohngebaeude/wissen/heizungsratgeber/waermepumpe/stromverbrauch-waermepumpe/#:~:text=Ein%20mittlerer%20Stromverbrauch%20f%C3%BCr%20W%C3%A4rmepumpen,jedes%20zweite%20Geb%C3%A4ude%20liegt%20niedriger.
- **Bundesregierung (2022)**, EEG 2023: Ausbau erneuerbarer Energien massiv beschleunigen, https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/novellierung-des-eeg-gesetzes-2023972
- **Bundestag (2021)**, Bundestag verschärft das Klimaschutzgesetz, Dokumente, https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2021/kw25-de-klimaschutzgesetz-846922#:~:text=Mit%20der%20%C3%84nderung%20des%20Klimaschutzgesetzes,auf%20mindestens%2065%20Prozent%20steigen.
- **BVerfG (2021)**, Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich, Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021, https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html#:~:text=Hinsichtlich%20der%20von%20den%20Beschwerdef%C3%BChrenden,Die%20Verfassungsbeschwerden%20haben%20teilweise%20Erfolg.
- **Dena (2018)**, dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Juli 2018, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf
- **Dena (2019),** biogaspartner – gemeinsam einspeisen: Biogaseinspeisung und -nutzung in Deutschland und Europa Markt, Technik und Akteure, dena Deutsche Energie-Agentur, Januar 2019, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/biogaspartner_-_gemeinsam_einspeisen.pdf
- **Dena (2021)**, dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität – Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Oktober 2021, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf

- **Deutsche WindGuard (2020)**, Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land – Entwicklung, Einflüsse, Auswirkungen, Deutsche WindGuard GmbH, im Auftrag von Bundesverband WindEnergie e.V. und Landesverband Erneuerbare Energien NRW e.V., 5. Oktober 2020, https://www.lee-nrw.de/data/documents/2020/11/23/532-5fbb61e5e6bb2.pdf
- **Deutsche Windguard (2021)**, Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Windenergie auf See – Potential und Bedarf in Deutschland, Deutsche WindGuard GmbH, im Auftrag von Stiftung Offshore-Windenergie, 22. September 2021, https://www.offshore-stiftung.de/sites/offshorelink.de/files/documents/210922_Wasserstoffpotentialanalyse_Gesamtbericht.pdf
- **DIW Berlin (2019)**, Wärmemonitor 2018: Steigender Heizenergiebedarf, Sanierungsrate sollte höher sein, Puja Singhal und Jan Stede, DIW Wochenbericht, 36/2019, https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.676231.de/19-36-1.pdf
- **E-Fahrer (2021)**, Erste Airline legt sich E-Flotte zu: Die 100 Elektro-Flieger kommen aus Europa, https://efahrer.chip.de/news/erste-airline-legt-sich-e-flotte-zu-die-100-elektro-flieger-kommen-aus-europa_105451
- **Energate (2022)**, energate-Interview - 100 TWh Biomethan bis 2025 möglich, 6. Mai 2022, https://www.energate-messenger.de/news/222195/100-twh-biomethan-bis-2025-moeglich
- **Energate (2023),** Verbrenner-Aus beschlossen**,** 28. März 2023 https://www.energate-messenger.de/news/231654/verbrenner-aus-beschlossen
- **Energiezukunft (2018)**, 17 Millionen Wärmepumpen bis zum Jahr 2050, 10. Januar 2018, https://www.energiezukunft.eu/meinung/nachgefragt/17-millionen-waermepumpen-bis-zum-jahr-2050/
- **Enervis (2017)**, Erneuerbare Gase: Ein Systemupdate der Energiewende, im Auftrag von Initiative Erdgasspeicher e.V. (INES) und Bundesverband Windenergie e.V. (BWE), Dezember 2017, https://erdgasspeicher.de/wp-content/uploads/2019/07/20171212_studie_erneuerbare_gase_enervis.pdf
- **Euractiv (2022)**, EU einigt sich auf Verbrenner-Aus ab 2035, https://www.euractiv.de/section/verkehr/news/eu-einigt-sich-auf-verbrenner-aus-ab-2035/
- **Europäische Kommission (2020a)**, A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0638aa1d-0f02-11eb-bc07-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF
- **Europäische Kommission (2020b)**, JEC Well-to-Tank report v5, European Commission's Joint Research Centre (EC-JRC), https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119036

- **Europäische Kommission (2023)**, Fit for 55, https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/
- **EWI (2021)**, dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität: Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems, Gutachterbericht im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur (dena), Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH (EWI), Oktober 2021, https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2022/03/211005_EWI-Gutachterbericht_dena-Leitstudie-Aufbruch-Klimaneutralitaet.pdf
- **FAZ (2022)**, Suedlink: Deutschland droht nächstes Großprojektdebakel, 31. Januar 2022, https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/suedlink-deutschland-droht-naechstes-grossprojektdebakel-17768304.html
- **Fraunhofer IEE (2020)**, Das »Barometer der Energiewende« https://www.barometer-energiewende.de/de/barometer_2020/waermesektor.html
- **Fraunhofer ISE (2022)**, Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fassung vom 17.7.2022, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf
- **Fraunhofer ISI (2022a)**, Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Treibhausgasneutrale Szenarien T45 – Industriesektor, 16. November 2022, https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFSIII_Webinar16.11.2022_Industrie_final.pdf
- **Fraunhofer ISI (2022b)**, Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Treibhausgasneutrale Szenarien T45, Dr. Frank Sensfuß, 15. November 2022, https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Szenarien_15_11_2022_final.pdf
- **Frontier et al. (2017)**, Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland – Eine modellbasierte Analyse, Frontier Economics, IAEW, 4Management und EMCEL, Studie im Auftrag der Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber (FNB Gas e.V.), September 2017, https://www.frontier-economics.com/media/2260/der-wert-der-gasinfrastruktur.pdf
- **Frontier (2020)**, Der Effizienzbegriff in der klimapolitischen Debatte zum Straßenverkehr - Ein gesamtheitlicher Ansatz für die Effizienzbewertung von Technologien, Frontier Economics, Studie im Auftrag von UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V. und Mineralölwirtschaftsverband e.V., Oktober 2020, https://www.frontier-economics.com/media/4371/der-effizienzbegriff-in-der-klimapolitischen-debatte-zum-strassenverkehr.pdf

- **Frontier (2021)**, Der Wert von Wasserstoff im Wärmemarkt - Analyse unter Betrachtung verschiedener Heiztechnologien mit Fokus auf Wasserstoffbrennwertkessel und elektrische Wärmepumpe, Studie im Auftrag der Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber (FNB Gas e.V.), August 2021, https://www.frontier-economics.com/media/4828/der-wert-von-wasserstoff-im-waermemarkt.pdf
- **FVV (2021)**, Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IV, https://www.fvv-net.de/fileadmin/user_upload/medien/download/FVV__Future_Fuels__StudyIV_The_Transformation_of_Mobility__H1269_2021-10__EN.pdf
- **Geth et al. (2015)**, An overview of large-scale stationary electricity storage plants in Europe: Current status and new developments, Renewable and Sustainable Energy Reviews 52 (2015)
- **Handelsblatt (2022)**, Energieversorgung: Wie die Regierung Wärmepumpen zur Standardheizung machen will, 01. Juli 2022, https://www.handelsblatt.com/politik/energieversorgung-wie-die-regierung-waermepumpen-zur-standardheizung-machen-will/28465616.html
- **Infas (2019)**, Mobilität in Deutschland – MiD: Ergebnisbericht, infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Februar 2019, http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf
- **IWU (2018)**, Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 - Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 17. April 2018, https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf
- **Klimaatlas NRW (2022)**, Methodik-Papier zur Datenerhebung im Handlungsfeld Sonne: Globalstrahlung und Sonnenscheindauer, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 26. Oktober 2022, https://www.klimaatlas.nrw.de/sites/default/files/2022-11/Methodik_Klima_06_Sonne.pdf
- **Klimaschutzgesetz (2021)**, Klimaschutzgesetz: Generationenvertrag für das Klima, https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672
- **KNE (2021)**, Anfrage Nr. 318 zu den Auswirkungen von Solarparken auf bodenbrütenden Offenlandarten, Antwort vom 17.09.2021, Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (KNE), https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE-Antwort_318_Solarparke_Bodenbrueter.pdf
- **Kramer und Maaßen (2022)**, Das Bruttoprinzip ist europäische Vorgabe - Unterschiedliche Berechnungsmethoden schaffen Verwirrung bei der EE-Quote, Wieland Kramer und Uwe Maaßen, Energiewirtschaftliche

Tagesfragen, 72. Jahrgang 2022, Heft 4, https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2022/03/et_2022_04_Kramer_Maassen.pdf

- **LBST (2022)**, Emissionsfreie Stahlerzeugung: Metastudie zu den technischen, technologischen und wirtschaftlichen Parametern für die Umstellung der deutschen Stahlindustrie auf eine emissionsarme Stahlproduktion auf Basis von grünem Wasserstoff, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, im Auftrag des Deutschen Wasserstoff und Brennstoffzellen-Verbands (DWV), März 2022, https://lbst.de/wp-content/uploads/2022/04/2022-03-30-HySteel-LBST_Emissionsfreie_Stahlerzeugung.pdf
- **MacLean et al. (2021)**, Net Zero – Keeping The Energy System Balanced, University of Birmingham, August 2021, https://zenodo.org/record/5172034#.Yt_iVehBw2x
- **Socialwatch.org (2009)**, Ursachen und Folgen der Nahrungsmittelkrise, Michael Windfuhr, Social Watch Report Deutschland 2009, https://www.socialwatch.org/sites/default/files/SW2009_Ursachen_und_Folgen_der_Nahrungsmittelkrise-ger.pdf
- **Süddeutsche Zeitung (2019)**, Ingenieurrat warnt vor Folgen eines Bauingenieurmangels, 09. Dezember 2019, https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/bau-schwerin-ingenieurrat-warnt-vor-folgen-eines-bauingenieurmangels-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-191209-99-61389
- **Süddeutsche Zeitung (2022)**, Bundesamt: Herausforderung bei Ausbau der Windkraft auf See, 20. Januar 2022, https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/energie-hamburg-bundesamt-herausforderung-bei-ausbau-der-windkraft-auf-see-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-220119-99-772839
- **tagesschau.de (2023)**, Verbot ab 2035: EU-Parlament besiegelt Verbrenner-Aus, https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/verbrenner-aus-eu-101.html
- **Tagesspiegel (2021)**, Habecks Hürden bei der Energiewende: Darum stockt der Ausbau der erneuerbaren Energien, 30. Dezember 2021, https://www.tagesspiegel.de/politik/habecks-huerden-bei-der-energiewende-darum-stockt-der-ausbau-der-erneuerbaren-energien/27933604.html
- **Umweltbundesamt (2013)**, Potenzial der Windenergie an Land – Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land, Juni 2013, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf
- **Umweltbundesamt (2019)**, Wohnen und Sanieren, Empirische Wohngebäudedaten seit 2002, CLIMATE CHANGE 22/2019,

  EVUPLAN des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-23_cc_22-2019_wohnenundsanieren_hintergrundbericht.pdf

- **Wirtschaftsvereinigung Stahl (2021)**, Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2021, November 2021, https://issuu.com/stahlonline/docs/wv-stahl_fakten-2021_rz_web

ANHANG A CO_2-VERMEIDUNGSKOSTEN

Als **Orientierungsgröße** für den Vergleich von Defossilisierungsoptionen sollten grundsätzlich **CO_2-Vermeidungskosten** herangezogen werden. Bei einer systemischen Perspektive sollten die gesamten volkswirtschaftlichen Kosten über das Energiesystem sowie die CO_2-Emssionen über den Lebenszyklus erfasst werden.

Vermeidungskosten setzen stets eine Defossilisierungsoption ins Verhältnis zu einem fossilen Referenzszenario und legen dar, mit welchem Kostenaufwand eine Klimaschutzmaßnahme eine Tonne CO_2 verglichen zu einem fossilen Referenzszenario vermeidet.

$$Vermeidungskosten = \frac{Mehrkosten}{Eingespartes\ CO2} = \frac{Kosten\ (Option) - Kosten\ (Fossil)}{CO2\ (Fossil) - CO2\ (Option)}$$

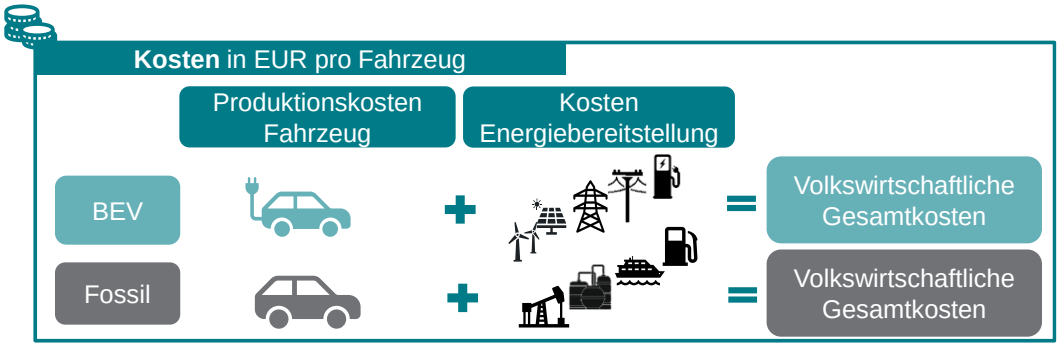
Somit sind sie ein Maß für die volkswirtschaftliche Effizienz der CO_2-Vermeidung einer Klimaschutzmaßnahme – je geringer die Kosten für die vermiedene CO_2-Menge, desto effizienter die CO_2-Vermeidung.

Vorteilhaftigkeit: Verschiedene Defossilisierungsoptionen können dann für einen bestimmten Einsatz- und Anwendungszweck (bspw. die Beheizung eines bestimmten Hauses) anhand der jeweiligen CO_2-Vermeidungskosten miteinander verglichen werden. Die **Vorteilhaftigkeit** von EE-Strom gegenüber der Alternative wie grünem Wasserstoff oder E-Fuels zeigt sich anhand der Differenz der Vermeidungskosten.

Kosten

Es sollten die gesamten volkswirtschaftlichen Systemkosten über den Lebenszyklus einer Endanwendung (z. B. eines Fahrzeugs bzw. einer Wärmepumpe) betrachtet werden. Diese umfassen zum einen die Produktionskosten der Endanwendung, als auch die Energiebereitstellungskosten. Letztere beinhalten Investitions- bzw. Instandhaltungskosten, die für die Herstellung, den Transport und die Speicherung des Kraftstoffs bzw. Stroms notwendig sind (vgl. folgende Abbildung bzgl. der zu berücksichtigenden Kosten an einem Beispiel im Verkehr).

Abbildung 32 Systemkosten je Lebenszyklus pro Fahrzeug – hier am Beispiel Verkehr illustriert



Quelle: *Frontier Economics*

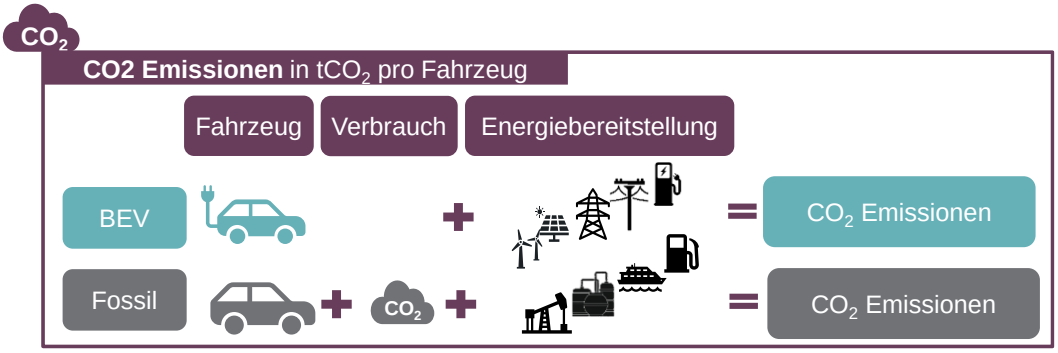
Hinweis: *Beispiel für Verkehr – Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV) verglichen mit einem Verbrennerfahrzeug mit fossilem Kraftstoff*

CO_2-EMISSIONEN ÜBER DEN LEBENSZYKLUS

Analog zu den Kosten sollten auch die CO_2-Emissionen systemisch betrachtet werden – dies bedeutet auch die CO_2-Emissionen über den Lebenszyklus der Technologien. Dies umfasst CO_2-Emissionen über Sektoren, Länder und Jahre hinweg – zum einen verbunden mit der Herstellung und Verschrottung/Recycling der Anwendungen (bspw. Fahrzeuge oder Brennwertthermen), zum anderen mit der Energiebereitstellung – das impliziert alle CO_2-Emissionen, die bei der Herstellung des Stroms und Kraftstoffs, Transport, Speicherung und Bereitstellung (bspw. In der Ladestation oder Tankstelle) sowie dem Verbrauch entstehen.

Das bedeutet beispielsweise, dass auch die CO_2-Emissionen berücksichtigt werden müssen, die durch die Produktion eines Fahrzeugbestandteils oder beim Aufbau eines Windrads entstehen. CO_2-Emissionen durch den Verbrauch fallen hingegen nur im fossilen Referenzszenario an. Die folgende Abbildung zeigt die berücksichtigten CO_2-Emissionen einmal am Beispiel Verkehr.

Abbildung 33 CO_2-Emissionen während des Lebenszyklus eines Fahrzeugs – hier am Beispiel Verkehr illustriert



Quelle: *Frontier Economics*

Hinweis: *Beispiel für Verkehr – Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV) verglichen mit einem Verbrennerfahrzeug mit fossilem Kraftstoff*

ANHANG B ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Agri-PV	Agri-Photovoltaik (gleichzeitige Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für die Nahrungsmittelproduktion und die PV-Stromerzeugung)
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNetzA	Bundesnetzagentur
CO_2	Kohlenstoffdioxid
E-Fuels	Synthetisch hergestellte Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom und einer CO_2-Quelle
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbaren-Energien-Gesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
H_2	Wasserstoff
HH	Haushalte
KFZ	Kraftfahrzeug
KSG	Klimaschutzgesetz
LKW	Lastkraftwagen
MENA	Middle East and North Africa
PKW	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquids
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik
Syncrude	Synthetisches Rohöl
WindSeeG	Windenergie-auf-See-Gesetz

www.frontier-economics.com