Wuppertal Institut

Begleitende Präsentation zur Studie

CO_2-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze

13.10.2020

Georg Kobiela, Sascha Samadi, Jenny Kurwan, Annika Tönnies,
Thorsten Koska, Dietmar Schüwer, Steven März,
Stefan Lechtenböhmer, Manfred Fischedick
unter Mitarbeit von Ines Stelk und Marvin Ewert

Inhalt

Wuppertal Institut

1. Was erfordern die Ziele des Pariser Klimaabkommens? 3
2. Vergleich ausgewählter Klimaschutzszenarien für Deutschland 13
3. Energiewirtschaft 57
4. Industriesektor 108
5. Verkehrssektor 146
6. Gebäudesektor 181

Wuppertal Institut

Was erfordern die Ziele des Pariser Klimaabkommens?

Jenny Kurwan und Annika Tönjes

Die Pariser Klimaziele und der Budget-Ansatz

Paris-kompatible Klimaziele sollten sich an einem CO_2-Budget orientieren und eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C anstreben

Wuppertal Institut

- Die Vertragsparteien des **Pariser Abkommens** einigten sich darauf, dass „der Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau gehalten wird und Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, da erkannt wurde, dass dies die Risiken und Auswirkungen der Klimaänderungen erheblich verringern würde “ (UNFCCC Art 2, Abs. 1a).
- So könnte eine **Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C** statt auf 2 °C beispielsweise “die Anzahl der Menschen, die sowohl klimabedingten Risiken ausgesetzt als auch armutsgefährdet sind, bis zum Jahr 2050 um mehrere hundert Millionen senken“ (IPCC 2018a, B.5.1, S. 13).
- Politische Klimaschutzziele werden häufig als Minderungsziel zu einem bestimmten Zeitpunkt formuliert. Für das Ausmaß der Erderwärmung und die Einhaltung des Pariser Klimaziels ist jedoch die Höhe der Emissionen zu einem bestimmten Zeitpunkt weniger wichtig als die Höhe der Emissionen, die über den gesamten Zeitraum bis zum Zieljahr hinweg insgesamt ausgestoßen werden. Expert*innen sprechen deshalb von einem **THG- bzw. CO_2-Emissionsbudget**, das noch zur Verfügung steht, um das Pariser Klimaziel zu erreichen.

Wie werden CO_2-Budgets berechnet?

Die Bestimmung eines globalen CO_2-Budgets basiert auf Annahmen und ist mit Unsicherheiten verbunden

Wuppertal Institut

Was erfordert Paris?

- **Für die Berechnung sind verschiedene methodische und normative Annahmen notwendig. Beispielsweise:**
  - Auf welches Startjahr und welches Ambitionsniveau (1,5 °C, 1,75 °C, 2 °C) bezieht sich das Budget?
  - Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird das Niveau erreicht? Der IPCC untersucht Wahrscheinlichkeiten von 33, 50 und 67 %.
  - Werden zukünftig möglicherweise realisierbare negative Emissionen berücksichtigt, falls ja, in welchem Umfang?
  - Werden Feedback-Systeme im Erdsystem (z.B. Veränderung des Permafrosts) bei der Bestimmung des Budgets (angemessen) berücksichtigt?

- **Die Berechnung eines CO_2-Budgets ist mit Unsicherheiten verbunden**
  - Deshalb geben Wissenschaftler*innen Wahrscheinlichkeiten für die Einhaltung eines Temperaturanstiegs an. Das heißt, auch wenn ein Budget eingehalten wird, bleibt ein Risiko, dass die angestrebte Temperaturgrenze überschritten wird.

Quelle: SRU 2020, Kap. 2

Wie groß ist das globale Paris-kompatible CO_2-Budget?

Um die Erderwärmung mit 50 % Wahrscheinlichkeit auf 1,5 °C zu beschränken, dürften ab 2018 noch 420 Gt CO_2 ausgestoßen werden

Wuppertal Institut

Globale CO_2-Budgets nach IPCC-Sonderbericht 2018

		Erderwärmung von 1,75 °C	Erderwärmung von 1,5 °C
Verbleibendes globales CO_2-Budget in Gt CO_2 ab 01.01.2018	67 % Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung	800	420
	50 % Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung	1 040	580

- Die Budgets berücksichtigen keine zusätzlichen Rückkopplungs- und Verstärkungseffekte im Erdsystem (z.B. durch das Tauen der Permafrostböden der Tundra und Taiga). Ihre Einbeziehung könnte die Budgets um ca. 100 Gt CO2 mindern (IPCC 2018b, Tabelle 2.2, S. 108).
- Die Budgets berücksichtigen keine zukünftig potenziell realisierbaren negativen Emissionen, da deren großvolumige Realisierung aus heutiger Sicht als sehr unsicher angesehen werden muss (Smith et al. 2015, Lenzi et al. 2018, Low & Schäfer 2020).
- Aktuelle globale Emissionsrate: ca. 42 Gt CO_2 pro Jahr (Friedlingstein et al. 2019)

Quelle der Abbildung: Eigene Darstellung, basierend auf IPCC 2018b, Tabelle. 2.2, S. 108

Wie groß ist das Paris-kompatible CO_2-Budget für Deutschland? (I)

Der SRU hat auf Basis der globalen CO_2-Budgets des IPCC nationale CO_2-Budgets für Deutschland berechnet

- Die Höhe des Emissionsbudgets, das ein einzelnes Land noch ausstoßen darf, um dem Pariser Klimaziel gerecht zu werden, lässt sich nicht objektiv ermitteln, sondern hängt von Annahmen der Verteilungsgerechtigkeit ab.

Ableitung von Paris-kompatiblen nationalen CO_2-Budgets nach SRU 2020

- *Grundlage:* Globale CO_2-Budgets des IPCC Sonderberichts 2018 zum 1,5 °C-Ziel, ohne Berücksichtigung von Rückwirkungen im Erdsystem
- *Annahmen:*
  - Berechnungsbeginn 2016 (Referenzzeitpunkt: Pariser Klimaabkommen von Ende 2015)
  - Keine Berücksichtigung der historischen Emissionen
  - Gleiches Pro-Kopf-Emissionsrecht aller Bewohner*innen der Erde - > Sinkt der deutsche Anteil an der Weltbevölkerung, müsste das Budget sinken. Der SRU wies das Budget allerdings auf Grundlage des Bevölkerungsanteils im Jahr 2016 zu und berücksichtigte dabei keine zukünftigen Veränderungen.
    - Die Zuteilung des globalen CO_2-Budgets nach Bevölkerungsanteil stellt eine von mehreren Möglichkeiten dar, Emissionsrechte auf Länder zu verteilen. Weitere Möglichkeiten sind z. B. die Zuteilung anhand von relativen Emissionen (Mehr Demokratie e. V. und BürgerBegehren Klimaschutz e. V. 2020) oder die Einbeziehung von historischen Emissionen (Robiou du Pont et al. 2017).

Quelle: SRU 2020, Kapitel 2

Wie groß ist das Paris-kompatible CO_2-Budget für Deutschland? (II)

Für einen adäquaten Beitrag Deutschlands zum 1,5 °C-Ziel dürften in Deutschland noch maximal 4,2 Gt CO_2 ausgestoßen werden

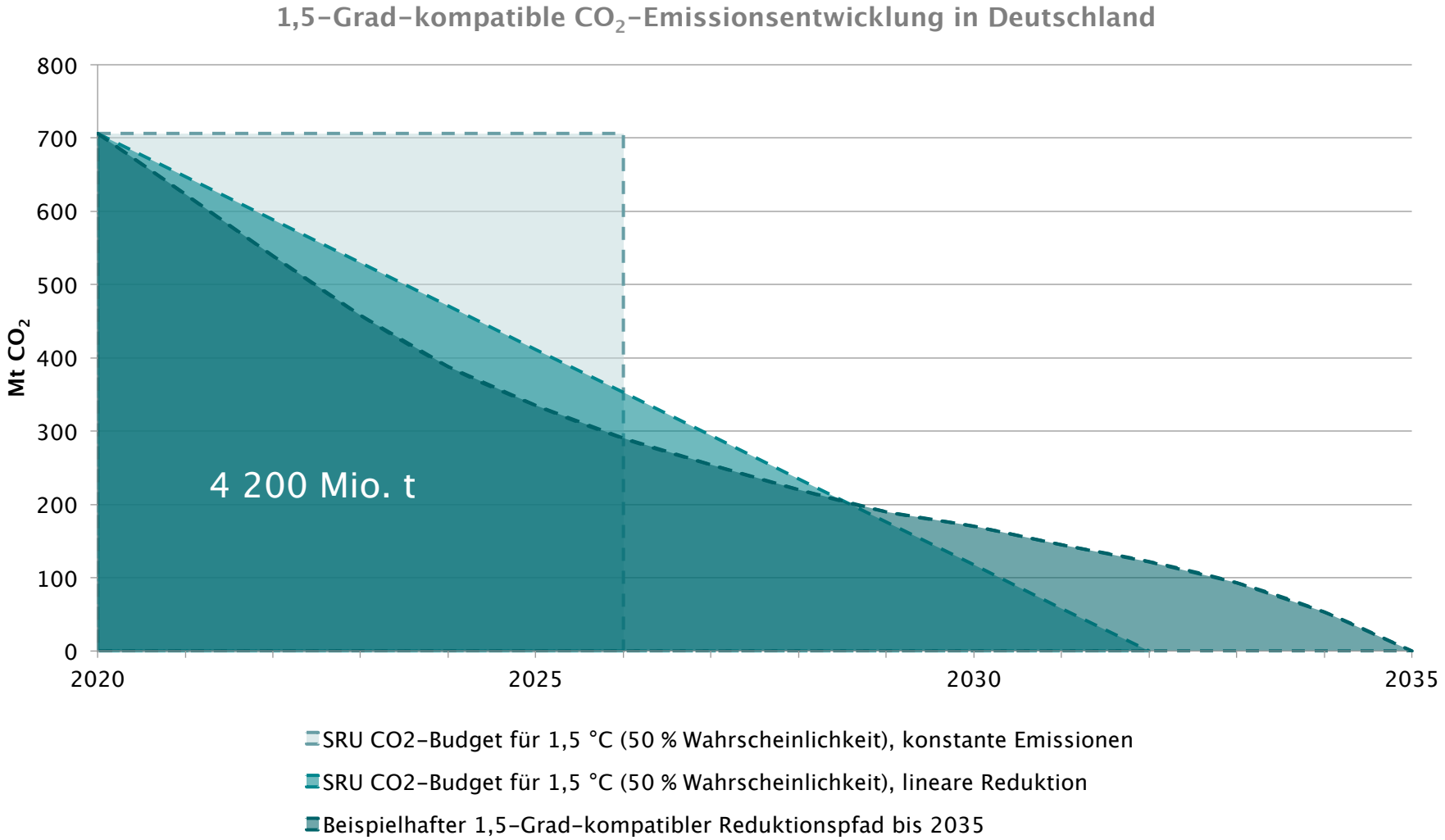
nationales CO_2-Budget für **1,75 °C** mit **67 %iger** Wahrscheinlichkeit:	nationales CO_2-Budget für **1,5 °C** mit **50%iger** Wahrscheinlichkeit:
6,7 Gt CO_2 ab 2020	**4,2 Gt CO_2 ab 2020**
Bei gleichbleibenden Emissionen wäre das Budget im Jahr 2029 aufgebraucht, bei linearer Reduktion im Jahr 2038.	Bei gleichbleibenden Emissionen wäre das Budget im Jahr 2026 aufgebraucht, bei linearer Reduktion im Jahr 2032.

Es kann argumentiert werden, dass Deutschland anstreben muss, das auf die 1,5-Grad-Grenze zielende CO_2-Budget einzuhalten. Erstens wurden in der Berechnung der nationalen Budgets Rückkopplungen im Erdsystem, die überdurchschnittlichen deutschen historischen Emissionen und die voraussichtliche zukünftige Abnahme des Anteils Deutschlands an der Weltbevölkerung nicht berücksichtigt. Zweitens zeigt der IPCC Sonderbericht von 2018 deutlich, dass die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C die negativen Folgen und Risiken des Klimawandels gegenüber einer stärkeren Erwärmung erheblich verringern kann.

Quelle: SRU 2020, Kapitel 2

Beispielhafter Emissionspfad zur Einhaltung des 1,5-Grad-kompatiblen CO_2-Budgets

Bei linearer Reduktion wäre das deutsche Budget 2032 aufgebraucht – früher mehr einzusparen schafft später mehr Spielraum



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf SRU 2020

Was erfordert Paris?

Erläuterungen zur Graphik „1,5-Grad-kompatible CO_2-Emissionsentwicklung in Deutschland“

Wenn zu Anfang etwas schneller reduziert wird, müsste Deutschland etwa um 2035 Netto-Null-Emissionen erreichen

Wuppertal Institut

Was erfordert Paris?

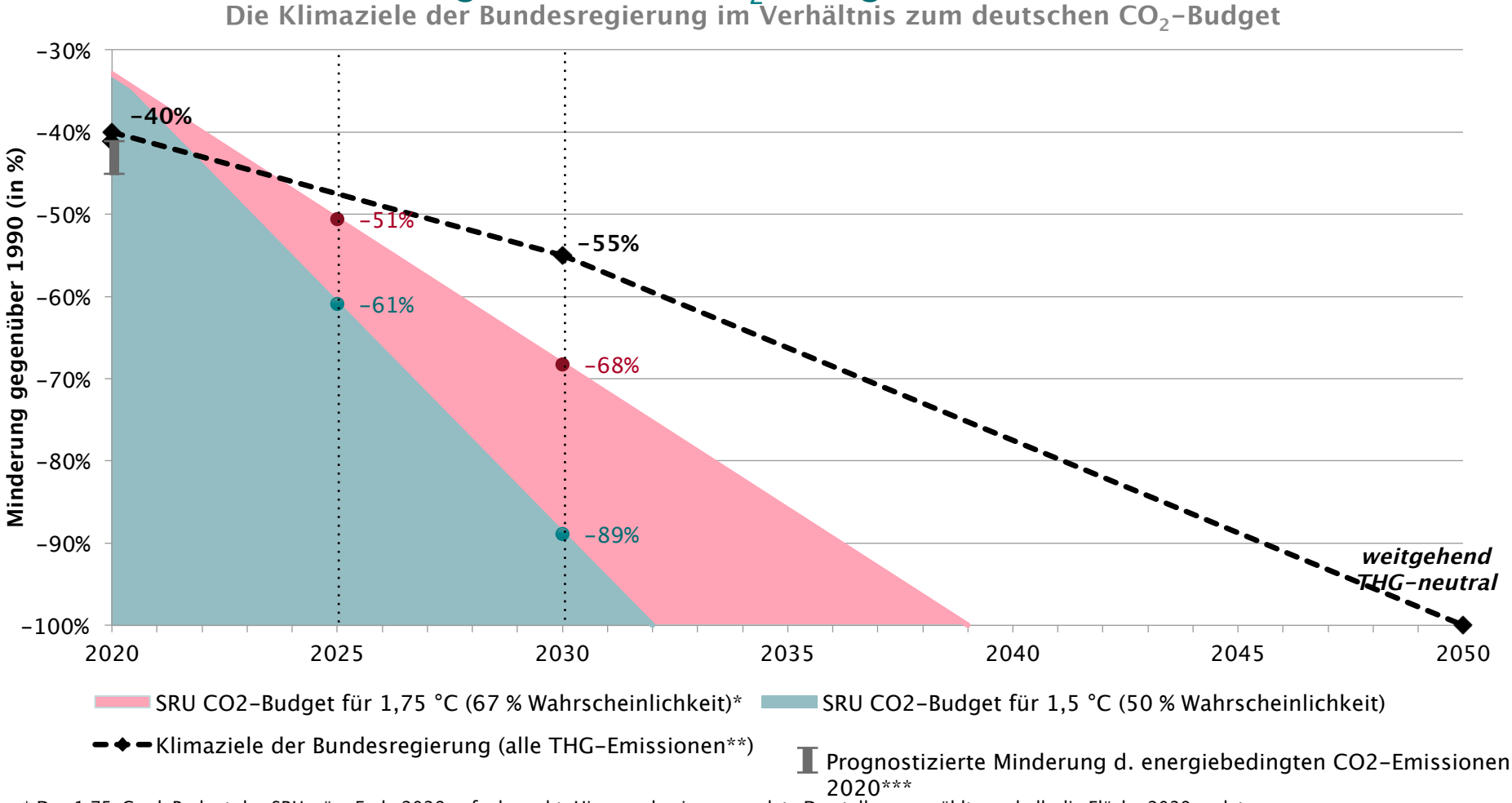
- Die Flächen stellen die vom SRU berechnete Menge an CO_2 dar, die Deutschland noch ausstoßen darf, wenn die Erderwärmung mit einer 50%igen Wahrscheinlichkeit auf 1,5 °C begrenzt werden soll und Deutschland einen hierfür angemessenen Beitrag leisten soll. Bleiben die Emissionen konstant auf dem Niveau von 2019, ist das Budget bereits 2026 aufgebraucht (rechteckige Fläche). Reduziert Deutschland seine Emissionen jedes Jahr um den gleichen Betrag, das heißt linear, ist das CO_2-Budget bereits im Jahr 2032 aufgebraucht (dreieckige Fläche). Werden die Emissionen jedoch zu Beginn stärker reduziert, wie anhand der dunkelgrünen Fläche dargestellt, kann der Zeitpunkt, an dem THG-Neutralität erreicht werden muss, weiter nach hinten geschoben werden, zum Beispiel bis 2035.
- Die Abbildung verdeutlicht, dass der Reduktionspfad entscheidender ist als der Zeitpunkt, zu dem Treibhausgasneutralität erreicht wird: Das CO_2-Budget kann sowohl durch eine lineare als auch durch eine zunächst stärkere und anschließend geringere Reduktion eingehalten werden. Letzteres eröffnet Spielräume in der Zukunft.

Warum die Klimaziele der Bundesregierung nicht Paris-kompatibel sind

THG-Reduktionsziele von 55 % bis 2030 sowie CO_2-Neutralität bis 2050 sind zur Einhaltung deutscher CO_2-Budgets nicht ausreichend

Wuppertal Institut

Was erfordert Paris?



* Das 1,75-Grad-Budget des SRU wäre Ende 2038 aufgebraucht. Hier wurde eine gerundete Darstellung gewählt, weshalb die Fläche 2039 endet.

** Die Klimaziele umfassen alle THG-Emissionen, die Budgets nur CO_2, was zu einer Ungenauigkeit im Vergleich führt. Da CO_2 ca. 88 % der deutschen THG-Emissionen ausmacht (Stand 2018, UBA 2020), ist diese Ungenauigkeit vernachlässigbar. Wird davon ausgegangen, dass die Sektorziele 2030 durch eine jeweils gleichstarke Reduktion der für den Sektor relevanten Treibhausgase erreicht werden sollen, beträgt die Minderung der CO_2-Emissionen ebenfalls um die 55 %.

*** Die CO_2-Budgets wurden vom SRU Anfang 2020 auf Basis vorläufiger Emissionswerte für 2019 berechnet (SRU 2020). Die AG Energiebilanzen erwartet nach Ablauf der ersten Jahreshälfte für 2020 einen Pandemie-bedingten Rückgang in einer Spanne zwischen 10 und 17 % bei den energiebedingten CO_2-Emissionen (AGEB 2020). Sollte die tatsächliche Minderung am oberen Ende dieser Spanne liegen, wäre das 1,5-Grad-Budget bei gleichbleibenden Emissionen 2027 aufgebraucht, bei linearer Reduktion 2033, d.-h. jeweils ein Jahr später als vom SRU berechnet.

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf SRU 2020

Erläuterungen zur Graphik „Warum die Klimaziele der Bundesregierung nicht Paris-kompatibel sind“

Die SRU-Budgets legen bis 2030 eine Minderung um ca. 70 – 90% gegenüber 1990 nahe.

- Die Graphik zeigt eine deutliche Diskrepanz zwischen den aktuellen Klimazielen der Bundesregierung (55 % Reduktion bis 2030 gegenüber 1990, weitgehende THG-Neutralität bis 2050) und dem vom SRU ermittelten 1,5-Grad-Budget (türkise Fläche), das bei linearer Reduktion für 2030 eine Minderung um etwa 90 % nahelegt. Auch das auf 1,75 °C zielende CO_2-Budget (rosa Fläche) wird mit den aktuellen Klimazielen noch deutlich überschritten und erfordert bei linearer Reduktion bis 2030 bereits eine Minderung um 70 %.
- Die Einhaltung des 1,5-Grad-Budget legt bei linearer Reduktion bereits bis 2025 eine Minderung um ca. 60 % nahe, das 1,75 °C-Budget um ca. 50 %. Im Gegensatz dazu hat Deutschland für 2025 derzeit kein Klimaziel definiert.

Hinweise:

- Eine Ungenauigkeit im Vergleich ergibt sich dadurch, dass die Klimaziele sich auf alle THG-Emissionen beziehen, das CO_2-Budget hingegen nur auf die CO_2-Emissionen. Da CO_2 allerdings 88 % der deutschen THG-Emissionen ausmacht (Stand 2017, UBA 2020), wäre das gesamte THG-Budget nur geringfügig größer.
- Abgebildet ist hier eine lineare Reduktion. Wie bereits erwähnt, könnte für eine anfangs stärkere Reduktion plädiert werden, um schwer vermeidbare Restemissionen auch über 2032 hinaus noch emittieren zu können.

Wuppertal Institut

Vergleich ausgewählter Klimaschutzszenarien für Deutschland

Jenny Kurwan und Annika Tönjes

Einführung in die Szenarienbetrachtung 14
Ergebnisse der Szenarienanalyse 23
Entwicklung der THG-Emissionen 31
Entwicklung des Energiesystems 38
Literaturverzeichnis 53

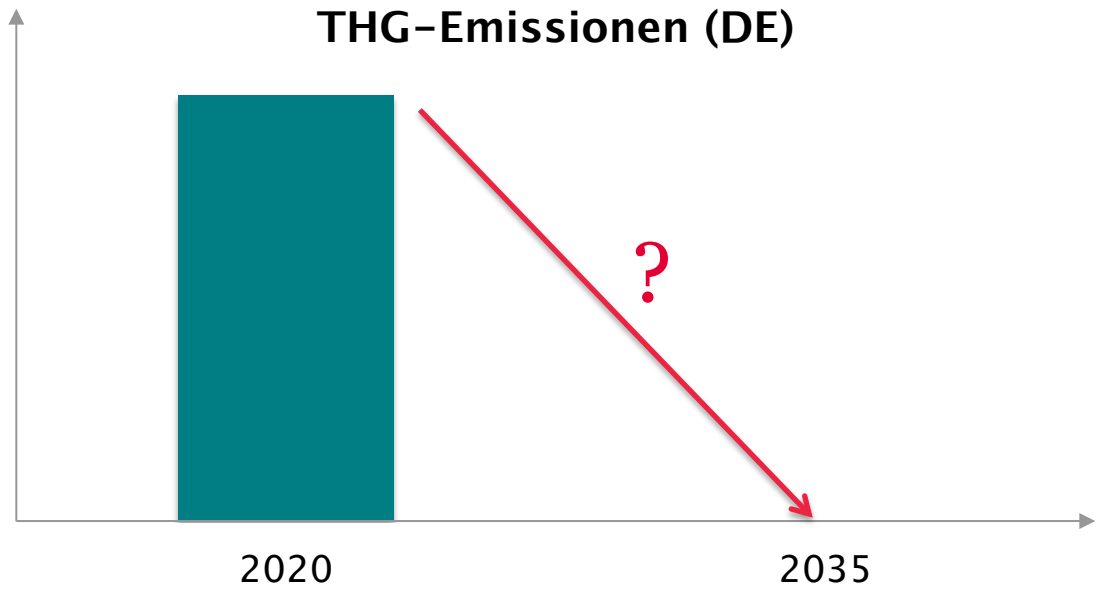
Einführung in die Szenarienbetrachtung

Was sind Szenarien? (I)

Szenarien bilden mögliche Wege in die Zukunft ab

- Szenarien zeigen mögliche Wege aus der **heutigen** Situation in eine mögliche (angestrebte) **zukünftige** Situation.

- *Wie kann Deutschland ausgehend von der heutigen Situation bis 2035 treibhausgasneutral werden?*

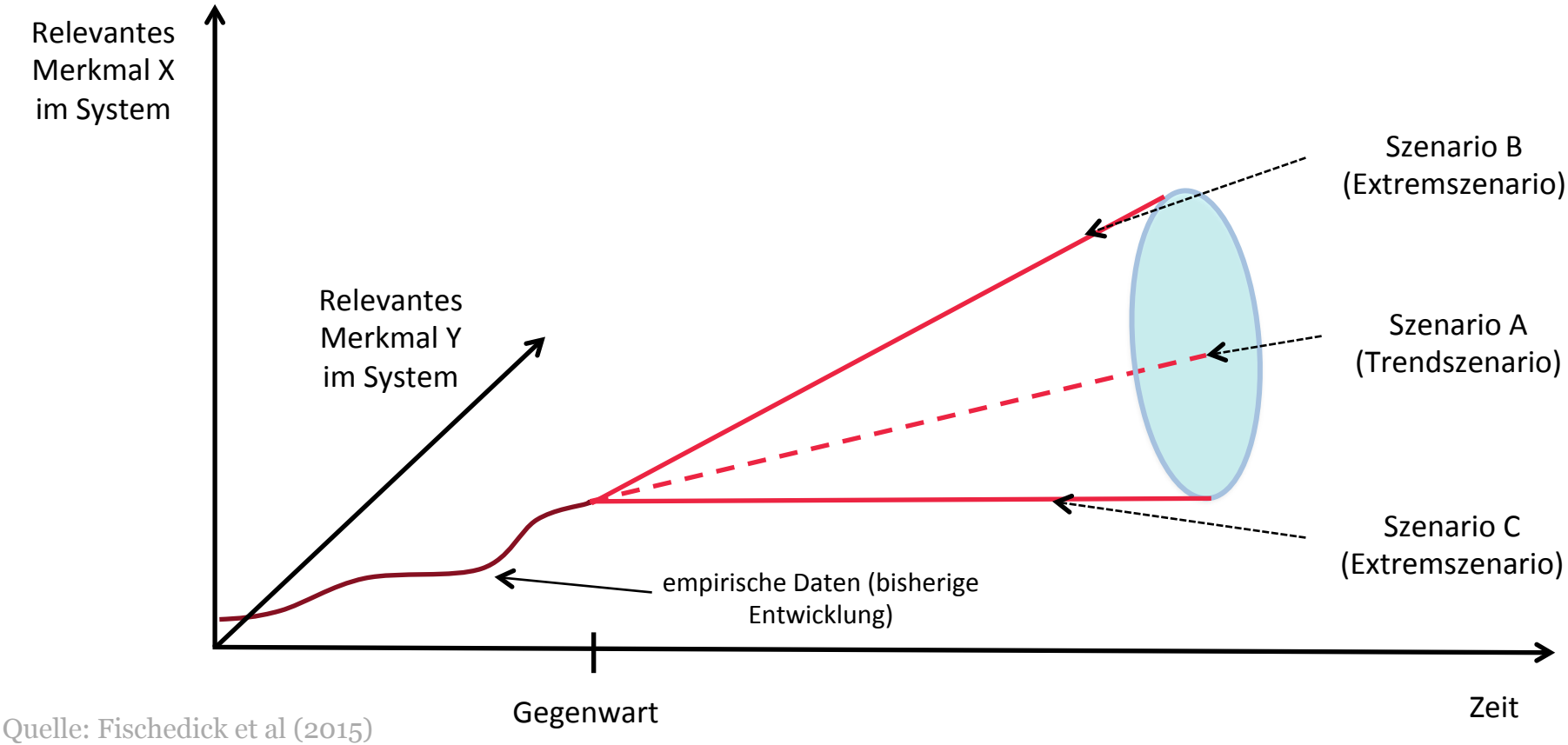


Quelle: Eigene Darstellung

Was sind Szenarien? (II)

Auf Basis von Annahmen werden verschiedene Zukunftspfade beschrieben

- Szenarien beschreiben mögliche Veränderungen eines Systems unter bestimmten **Annahmen** zu wesentlichen Parametern
- Durch Variation der getroffenen Annahmen kann der Einfluss dieser Parameter identifiziert und **unterschiedliche Zukunftspfade** beschrieben werden



Quelle: Fischedick et al (2015)

Was können Szenarien leisten? (I)

Szenarien stellen keine Zukunftsprognosen dar

Wuppertal Institut

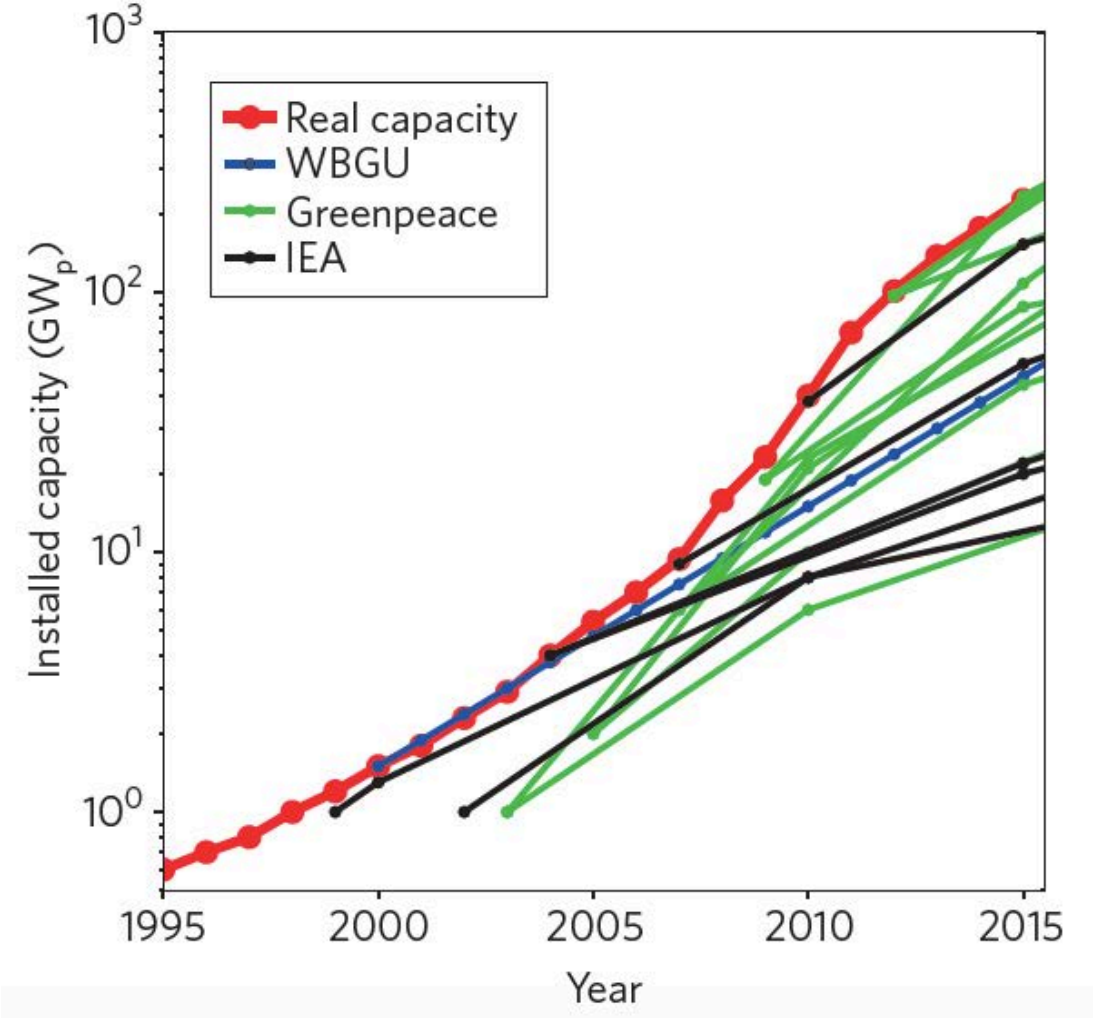
S z e n a r i e n ≠ P r o g n o s e n

- Szenarien stellen **„Wenn-Dann-Beziehungen“** dar
- Sie treffen *keine* Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten
- Sie sind somit *keine* Zukunftsprognosen

Was können Szenarien leisten? (II)

Ältere Szenarien haben das Potenzial der PV-Kapazität durchweg unterschätzt

Vergleich der historischen kumulierten installierten PV-Leistung mit Szenarien von IEA, Greenpeace und WBGU



Quelle: Creutzig et al. (2017)

Erläuterungen zur Graphik „Vergleich der historischen kumulierten installierten PV-Leistung mit Szenarien von IEA, Greenpeace und WBGU“

Szenarien können nur das gerade Denkbare abbilden

- In der Studie von Creutzig et al. (2017) wurde die tatsächliche Entwicklung der installierten Photovoltaik-Kapazität mit verschiedenen Szenarien seit den 90er Jahren verglichen.
- Die Abbildung macht deutlich, dass alle Szenarien (selbst die ambitioniertesten Greenpeace-Szenarien) das Potenzial der Solarenergie durchweg unterschätzt haben.
- Szenarien können immer nur das abbilden, was gerade denkbar ist.

Energie- & Emissionsszenarien (I)

Im Energie- und Umweltbereich sind insbesondere quantitative Klimaschutzszenarien mit backcasting relevant

Wuppertal Institut

- Im Energie- und Umweltbereich wird häufig mit **quantitativen Szenarien** gearbeitet, die mithilfe von Modellen berechnet werden
- **Referenzszenario** (explorativ): *Wie sieht die Zukunft aus, wenn sich die Rahmenbedingungen nicht ändern? Wie entwickeln sich Energieverbrauch und THG-Emissionen?*
- **Klimaschutzszenarien** (normativ):
  - **Rückwärtsszenarien** (backcasting): *Welche Schritte sind notwendig, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen? Wie können X% Emissionsreduktion bis zum Jahr 20XX erreicht werden?*
  - **Vorwärtsszenarien** (forecasting): *Wie sieht die Zukunft aus, wenn wir die Rahmenbedingungen verändern? Wie wirken sich spezifische politische Vorgaben auf die Entwicklung der THG-Emissionen aus?*

Erläuterungen zur Folie „Energie- und Emissionsszenarien (I)“

Klimaschutzszenarien werden meist Referenzszenarien gegenübergestellt, in denen sich aktuelle Trends fortsetzen

- Um quantitative Klimaschutzszenarien zu entwickeln, wird häufig zunächst ein Referenz- oder Business-as-usual-Szenario erstellt, bei dem aktuelle Trends in die Zukunft fortgeschrieben werden („exploratives“ Szenario). Dadurch wird zunächst ein Bezugsrahmen geschaffen: Was ist unsere Baseline? Wie sieht die Zukunft aus, wenn sich die heutigen Rahmenbedingungen kaum oder gar nicht ändern?
- Dann folgt die Entwicklung der eigentlichen Klimaschutzszenarien. Hier gibt es zwei verschiedene Richtungen:
  (1) Rückwärtsszenarien, die mittels „backcasting“ entwickelt werden, zeigen auf welche Schritte notwendig sein könnten, um ein bestimmtes Ziel (z. B. Treibhausgasneutralität im Jahr 2035) zu erreichen.
  (2) Vorwärtsszenarien zeigen hingegen, wie die zukünftige Situation aussehen könnte, wenn Rahmenbedingungen (also z. B. politische Vorgaben) verändert werden.
- Im Rahmen dieser Szenarienanalyse konzentrieren wir uns auf Rückwärtsszenarien.

Energie- & Emissionsszenarien (II)

Szenarien unterscheiden sich u. a. je nach Betrachtungszeitrau, räumlicher Differenzierung, Ambitionsniveau und Ausrichtung

- **Betrachtungszeitraum:** häufig bis 2050, i. d. R. mit weiteren Stützjahren
- **Räumliche Differenzierung**: häufig Betrachtung auf National- oder EU-Ebene
- **Ambitionsniveau:** in den letzten Jahren häufig nur 80 % bis 95 % Emissionsminderung (gegenüber 1990), THG-Neutralität erst seit kurzem
- **Ausrichtung/Storyline:** je nach Schwerpunktsetzung bei der Szenario-Entwicklung werden den Modellierer*innen bestimmte Vorgaben gemacht

Wuppertal Institut

Ergebnisse der Szenarienanalyse

1 Charakteristiken der untersuchten Szenarien und allgemeine Annahmen

2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

3 Entwicklung des Energiesystems

Szenariostudien für Klimaneutralität 2035?

Überlegungen zur Klimaneutralität 2035 stecken in Deutschland noch in den Anfängen

Wuppertal Institut

- Für Deutschland gibt es bisher keine fundierten, wissenschaftlichen Studien, die Szenarien für Klimaneutralität bis 2035 entwickeln.
- Erste Ansatzpunkte liefern:
  - German Zero, 2019 (oder 2. Aufl. 2020): „Der 1,5-Grad-Klimaplan für Deutschland: Gemeinsamer Aufbruch gegen die Klimakrise“
    -> bisher keine differenzierte wissenschaftliche Szenarioentwicklung, sondern eher Plausibilitätsüberlegungen
  - Das Szenario „Suffizienz2035“ aus der Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontextgesellschaftlicher Verhaltensweisen“ des Fraunhofer ISE von 2020
    -> keine ausführlich dokumentierte Szenarioentwicklung
- Die derzeit ambitioniertesten, wissenschaftlichen Klimaschutzszenarien zielen auf eine Reduktion der THG-Emissionen um 95 bis 100 % bis 2050 ab. Obgleich sie das Paris-Abkommen nach der SRU Definition nicht erfüllen, lassen sich aus ihnen Rückschlüsse hinsichtlich der Struktur eines klimaneutralen Energiesystems ziehen. Deshalb haben wir vier Szenarien analysiert, die als ambitioniert gelten und von unterschiedlichen Institutionen herausgegeben wurden.

Untersuchte Szenariostudien für Klimaneutralität bis 2050

Wir betrachten Szenarien aus drei Studien, die als besonders ambitioniert gelten

Umweltbundesamt (UBA), 2019

Deutsche Energieagentur (dena), 2018

Bundesverband der deutschen Industrie (BDI, Auftraggeber) 2018

Erstellt von BCG & Prognos

Betrachtete Szenarien

Untersuchte Szenarien

Die betrachteten Szenarien streben 95–100 % Reduktion bis 2050 an

Wuppertal Institut

Umwelt Bundesamt

GreenEe1
(= Energy efficiency)
- Fokus auf Energieeffizienz

GreenSupreme
- ambitioniertestes Szenario, steiler Minderungspfad
- Kombiniert hohe technische Innovationen mit starker Veränderung von Lebensweisen

Beide:
- THG-Neutralität bis 2050
- Fokus auf THG-Neutralität UND Ressourcen-schonung

dena
Deutsche Energie-Agentur

TM95

(= Technologie Mix)
- breite Variation von Technologien & Energieträgern
- 95 % THG-Reduktion bis 2050

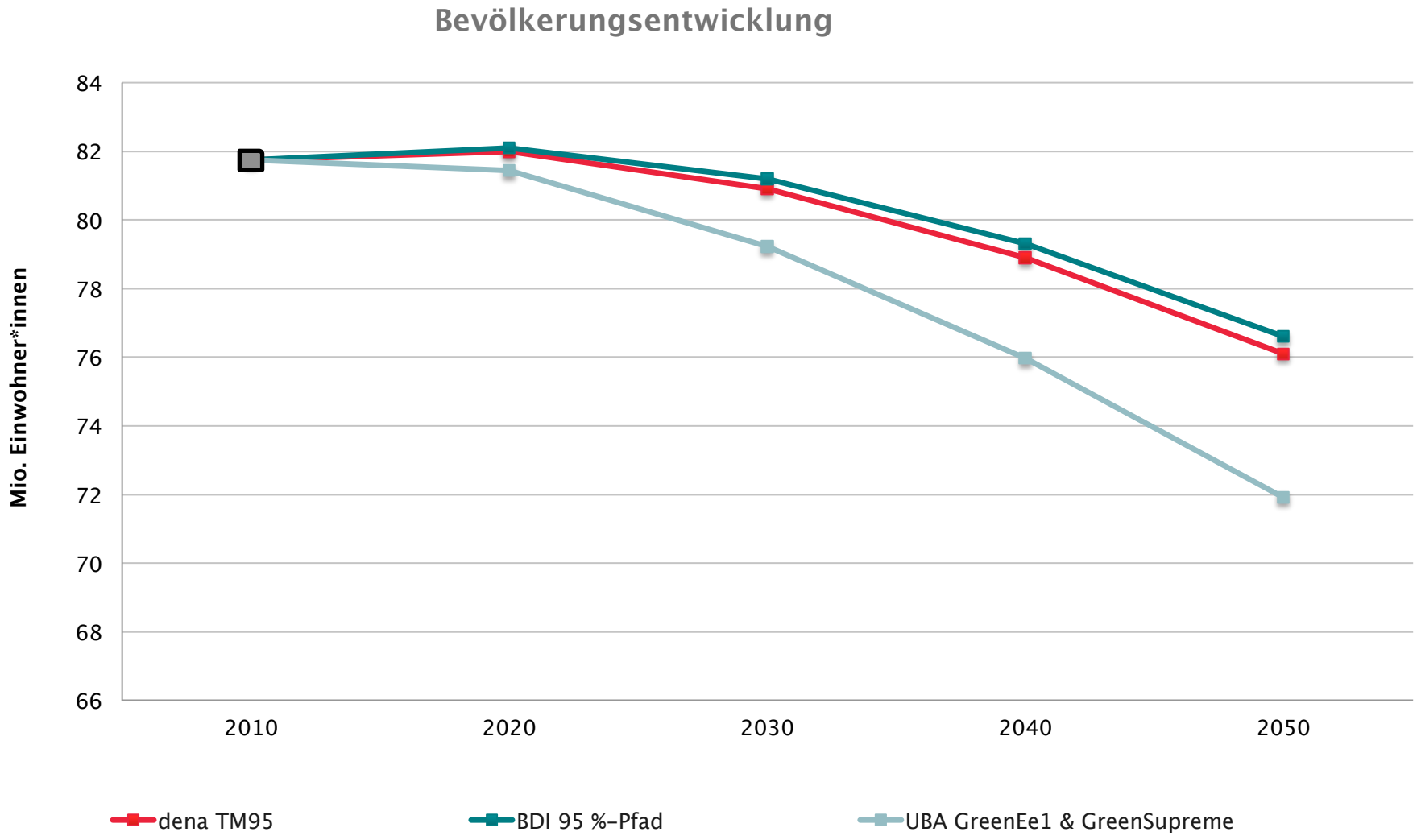
BDI

BDI 95 %
- Eher struktur-konservatives Szenario
- Fokus auf Kosteneffizienz und CCS
- Untersucht Auswirkungen der Klimaschutzpfade auf das BIP
- 95 % THG-Reduktion bis 2050

Betrachtete Szenarien

Allgemeine Annahmen: Bevölkerungsentwicklung

Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung beeinflussen den Energiebedarf in den Szenarien



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG & Prognos 2018, dena 2018, UBA 2019

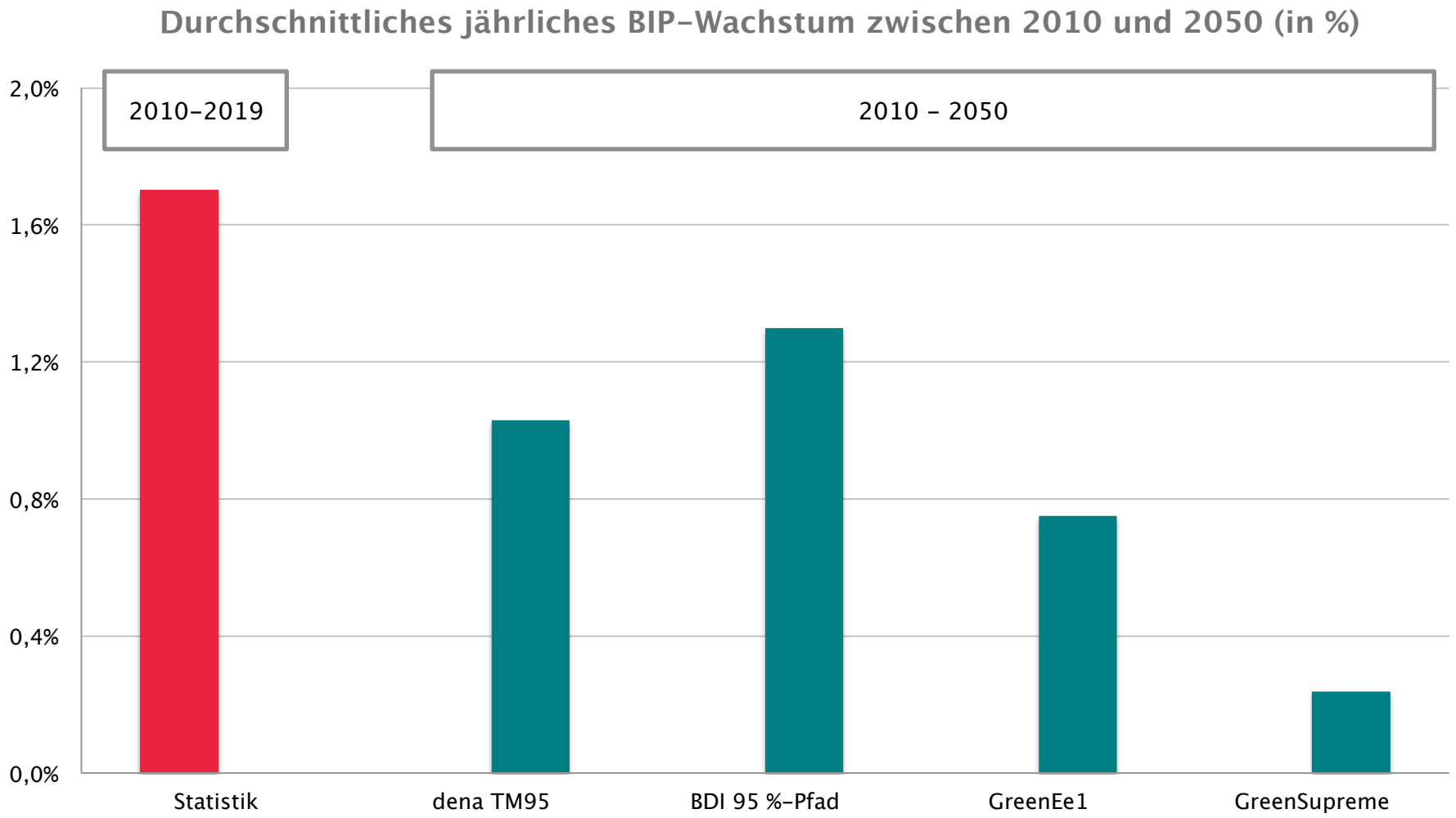
Erläuterungen zur Graphik „Bevölkerungsentwicklung“

Niedrige Bevölkerungsprognosen reduzieren den Energieverbrauch in den Szenarien

- Da in Szenarien Energieverbräuche in der Regel u. a. davon abhängig sind, wie viele Menschen Energie nutzen (z.B. um Auto zu fahren, ihre Wohnung zu heizen, etc.), ist die Annahme zur Bevölkerungsentwicklung ein wesentlicher Einflussparameter.
- Hier ist auffällig, dass die UBA-Szenarien von einer sehr viel größeren Abnahme der Bevölkerung ausgehen als die anderen beiden Szenariostudien.
- Ein Vergleich der angenommenen Bevölkerungsentwicklung in den UBA-Szenarien mit Prognosen des Statistischen Bundesamtes zeigt, dass die UBA-Studie sich an den niedrigsten Prognosen orientiert hat, die von einer geringen Zuwanderung ausgehen. (Statistisches Bundesamt 2017)

Allgemeine Annahmen: Entwicklung des BIPs

Da Energieverbrauch auch von der Wirtschaftsleistung abhängt, spielen Annahmen zum BIP-Wachstum in den Szenarien eine Rolle



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG & Prognos 2018, dena 2018, UBA 2019

Erläuterungen zur Graphik „Entwicklung des BIPs“

Szenarien nehmen für Deutschland ein in Zukunft weiterhin sinkendes BIP-Wachstum an

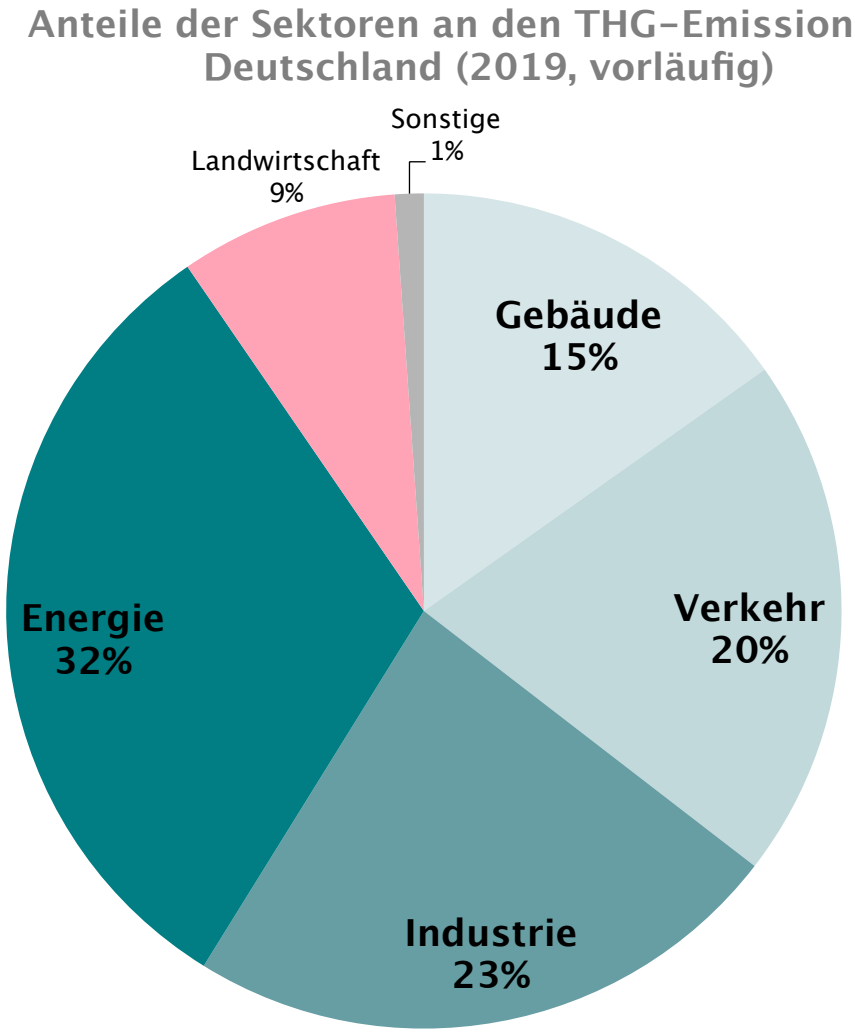
Wuppertal Institut

- Eine weitere zentrale Annahme, die in Szenarien getroffen wird, ist die zur Entwicklung der Wirtschaftsleistung.
- Da das BIP-Wachstum über die letzten Jahrzehnte kontinuierlich gesunken ist, gehen alle Szenarien davon aus, dass dies auch in Zukunft der Fall sein wird. Allerdings unterscheiden sie sich darin, wie stark das BIP-Wachstum sinkt bzw. sinken soll.
- Hervorzuheben ist das GreenSupreme-Szenario: Es geht von einer zukünftigen „Wachstumsbefreiung“ der Gesamtwirtschaft aus: Für den Zeitraum von 2010 bis 2030 wird noch ein durchschnittliches BIP-Wachstum von 0,5 % angenommen, ab 2030 erfolgt ein durchschnittliches Null-Wachstum der Gesamtwirtschaft. Da allerdings gleichzeitig von einer sinkenden Bevölkerungszahl ausgegangen wird, steigt das *Pro-Kopf*-Bruttoinlandsprodukt auch in diesem Szenario weiter an.

Entwicklung der THG-Emissionen

Untersuchte Sektoren

In verschiedenen Szenariostudien werden unterschiedliche Sektoren getrennt voneinander betrachtet und modelliert



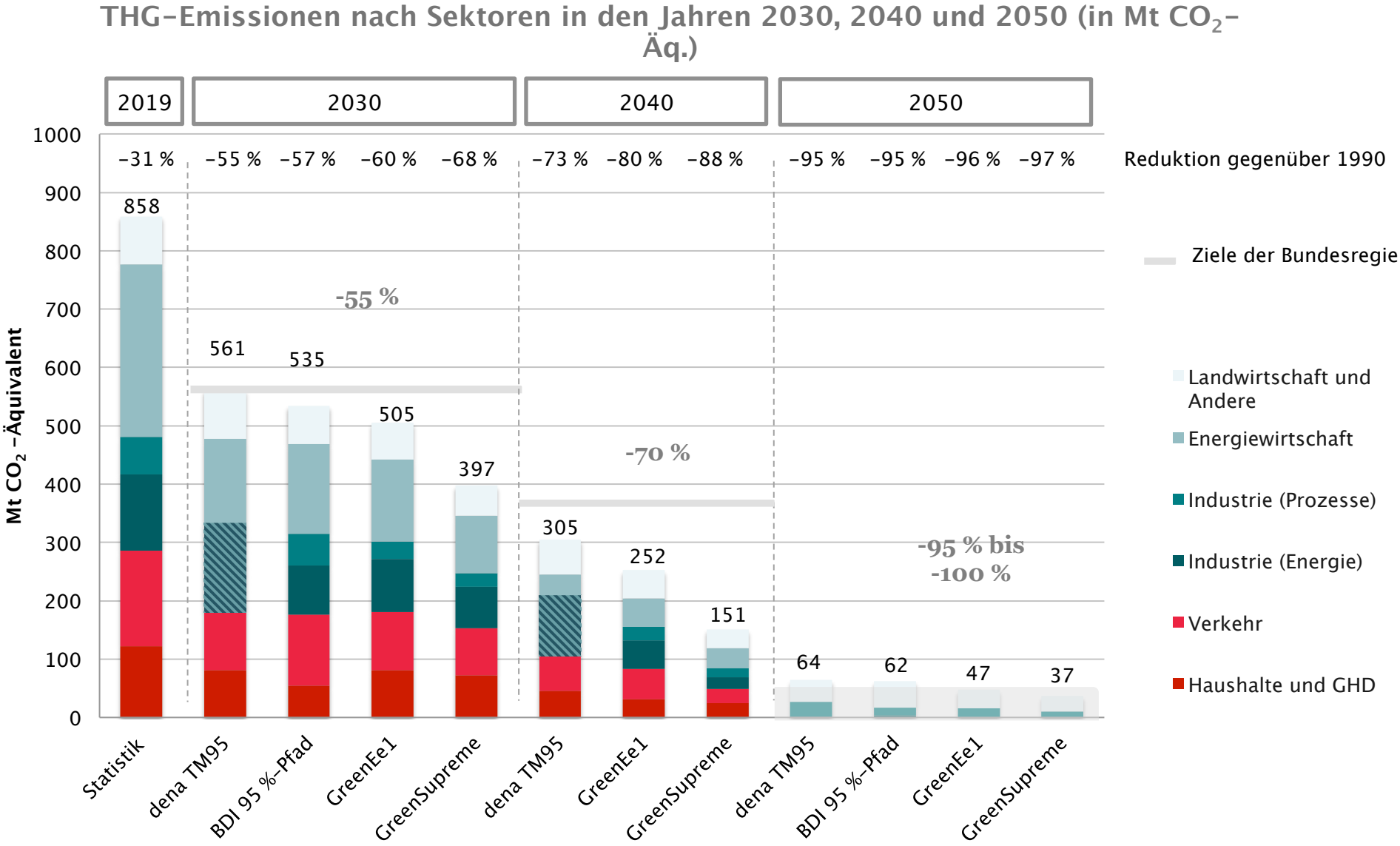
- Gesamtemissionen 2019 (vorläufig): 805 Mt CO_2-Äquivalent
- Der Sektor Landwirtschaft wird nur in den Szenarien der UBA-Studie modelliert
- Unter „Sonstige“ fällt vor allem die Abfallwirtschaft

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf UBA 2020

THG-Entwicklung

Entwicklung der THG-Emissionen nach Sektoren

Die Klimaziele der Bundesregierung werden in allen Szenarien erreicht und in großen Teilen überschritten



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG & Prognos 2018, dena 2018, UBA 2019

THG-Entwicklung

Erläuterungen zur Graphik „Entwicklung der THG-Emissionen nach Sektoren“

Energiewirtschaft, Verkehr und Gebäude sind im Jahr 2050 in allen Szenarien THG-neutral

Anmerkungen zum Diagramm:

- Die BDI-Studie enthält keine Angaben für das Zieljahr 2040.
- Die dena-Studie unterscheidet nicht zwischen energie- und prozessbedingten Emissionen.

Blick auf 2050:

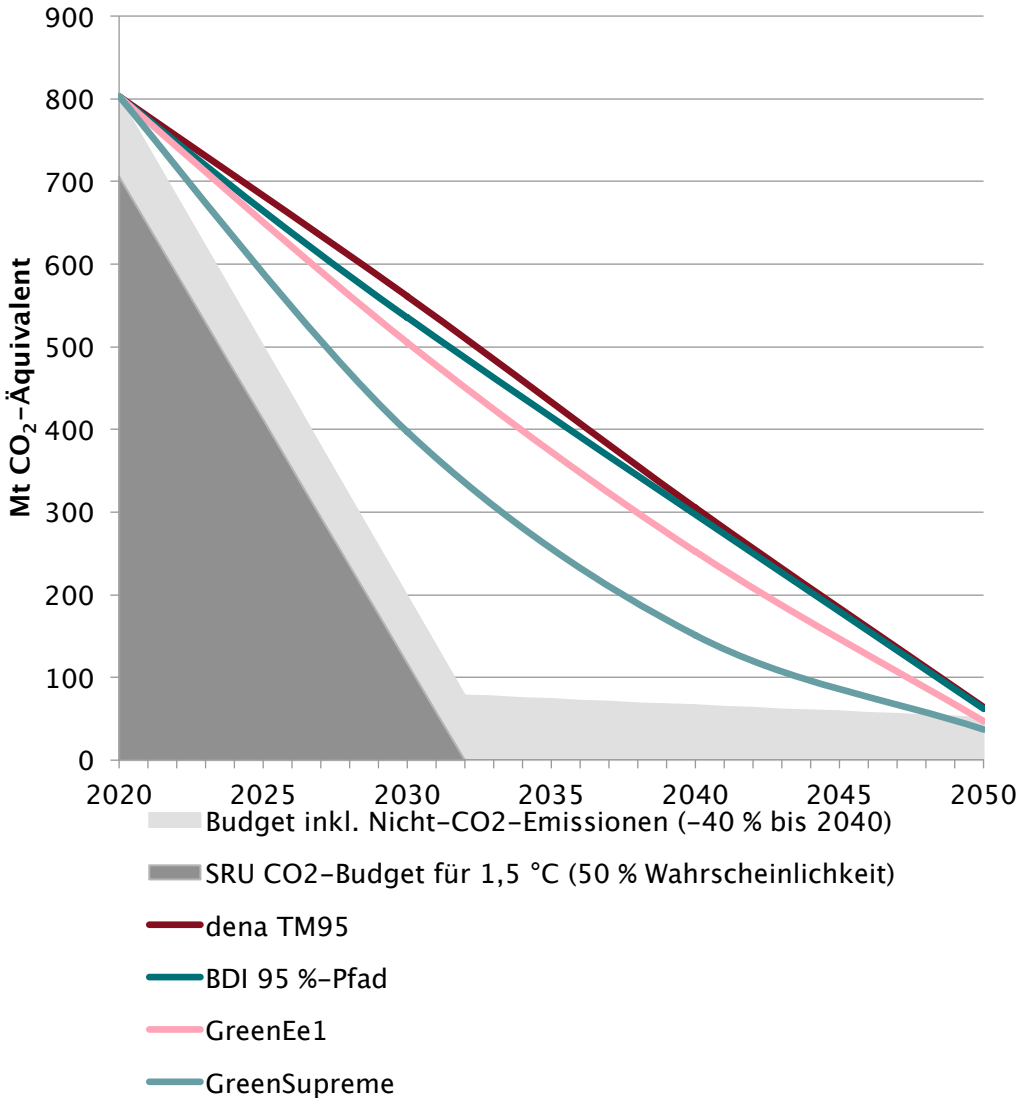
- In allen Szenarien sind die Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr und Gebäude 2050 vollständig THG-neutral.
- Es bleiben auch nach 2050 Emissionen aus der Landwirtschaft (Methanausstoß durch Rinderhaltung) und der Industrie. Nach heutigem Kenntnisstand können nicht alle prozessbedingten Emissionen in der Industrie vermieden werden. Dies betrifft insbesondere die Zement-, Kalk- und Glasindustrie.
- Die UBA-Szenarien nehmen an, dass die natürlichen Kohlenstoffsenken in Deutschland durch eine nachhaltige Waldwirtschaft, die Wiedervernässung von Mooren und die nachhaltige Nutzung von frei werdenden landwirtschaftlichen Flächen gestärkt werden und so die 2050 noch verbleibenden Emissionen ausgeglichen werden können (Stichwort „negative Emissionen“). Damit erreichen die UBA-Szenarien bis 2050 Treibhausgasneutralität. Das dena- und das BDI-Szenario hingegen gehen lediglich von einer Emissionsreduktion um 95 % aus.
- Das dena- und das BDI-Szenario erreichen die im Diagramm gezeigte Emissionsminderung auch durch den Einsatz von CCS in der Industrie. Die UBA-Szenarien verzichten auf den Einsatz von CCS.

Entwicklung der THG-Emissionen: Paris-Kompatibilität

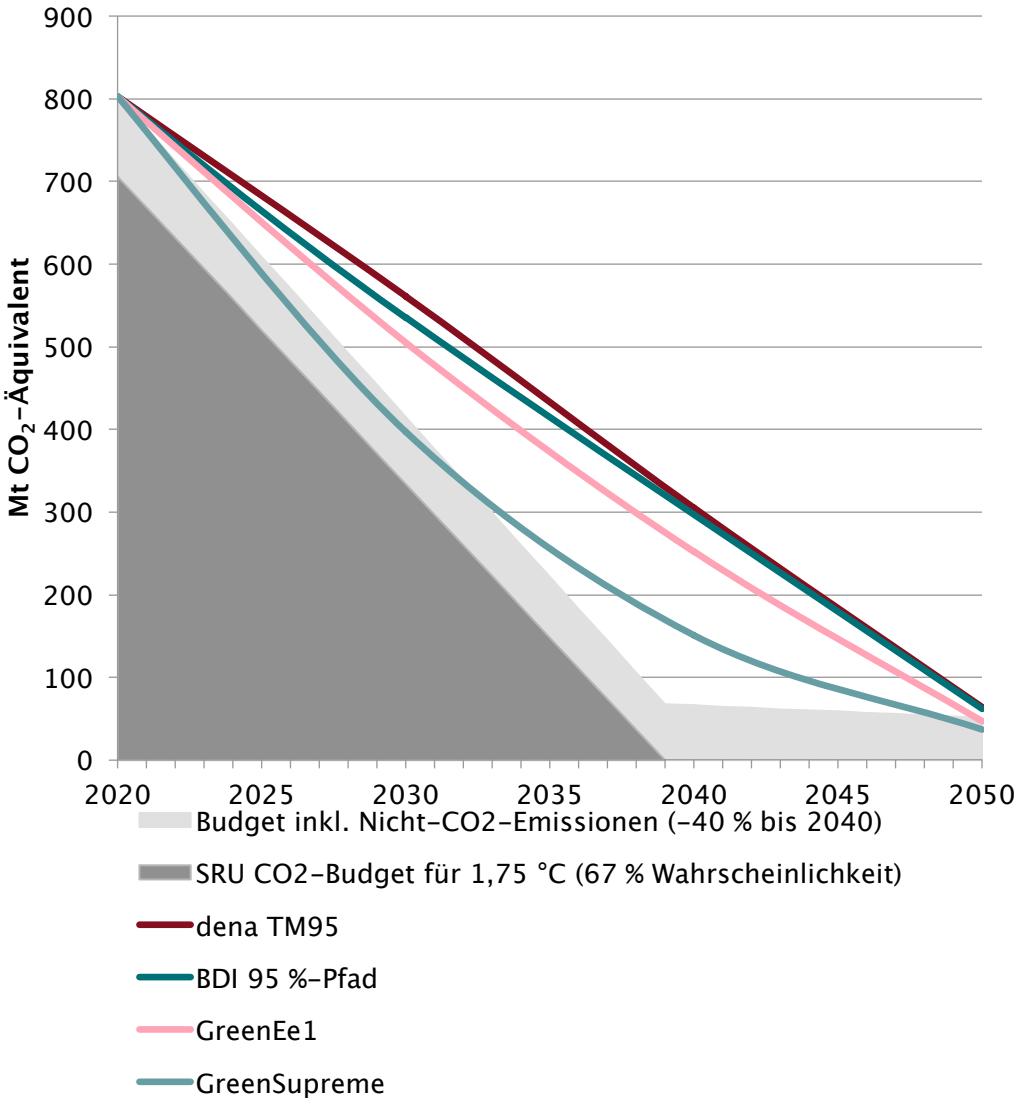
Die vom SRU berechneten Paris-kompatiblen deutschen CO_2-Budgets werden von allen Szenarien überschritten

Wuppertal Institut

A – Vergleich der Gesamtemissionen der Szenarien mit dem 1,5-Grad-Budget



B – Vergleich der Gesamtemissionen der Szenarien mit dem 1,75-Grad-Budget



Quelle für CO_2-Budget: SRU 2020, S. 54; Quelle für Reduktion von Nicht-CO_2-Emissionen: IPCC 2018a, Abb. SPM.3a, S. 17

Erläuterungen zur Graphik „Entwicklung der THG-Emissionen: Paris-Kompatibilität“ (I)

Erweitert man die CO_2-Budgets um Nicht-CO_2-Emissionen, werden sie dennoch von allen Szenarien überschritten

Wuppertal Institut

THG-Entwicklung

Anmerkungen zum Diagramm

- In beiden Graphiken zeigen die dunkelgrauen Flächen das vom SRU berechnete CO_2-Budget für Deutschland an, das noch zur Verfügung steht, wenn die Erderwärmung mit einer 50%igen Wahrscheinlichkeit auf 1,5 °C, beziehungsweise mit einer 75%igen Wahrscheinlichkeit auf 1,75 °C, begrenzt werden soll.
- Die dunkel- und die hellgraue Fläche zusammen zeigen das Budget inkl. der Nicht-CO_2-Emissionen an (vor allem Methan und Lachgas). Hierfür wurde sowohl beim 1,5-Grad- als auch beim 1,75-Grad-Budget eine Minderung um 40 % bis 2040 angenommen (mit anschließender Trendfortsetzung). Diese Annahme orientiert sich grob am 1,5 °C Bericht des IPCC (2018a, Abb. SPM.3a. S. 17).

Erläuterungen zur Graphik „Entwicklung der THG-Emissionen: Paris-Kompatibilität“ (II)

Die Reduktionspfade unterscheiden sich in den Szenarien trotz ähnlicher Zielwerte für 2050 deutlich

Wuppertal Institut

THG-Entwicklung

Vergleich der Szenarien

- Während der Unterschied zwischen der Höhe der THG-Emissionen, die im Jahr 2050 noch ausgestoßen werden, zwischen den untersuchten Szenarien nicht sehr groß ist, unterscheidet sich ihr Reduktionspfad bis 2050 und damit die Höhe ihrer kumulierten Emissionen (Fläche unter den Kurven) deutlich. Die geringsten kumulierten Emissionen werden im GreenSupreme Szenario verursacht.

Vergleich der Szenarien mit dem Paris-kompatiblen THG-Budget

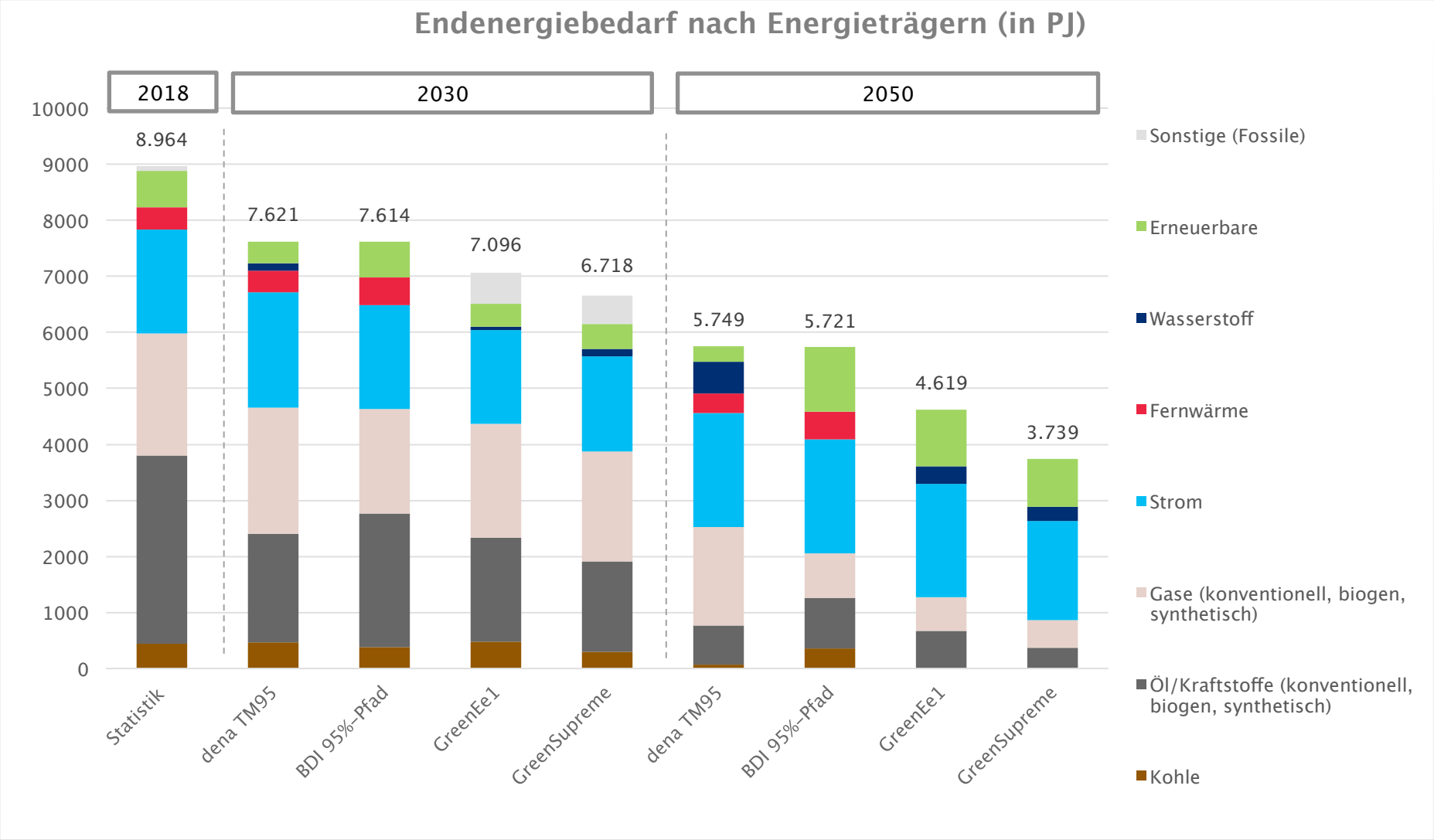
- Ein Vergleich der in den jeweiligen Szenarien bis 2050 insgesamt ausgestoßenen THG-Emissionen mit dem Paris-kompatiblen Budget zur Einhaltung der 1,5-Grad-Grenze (CO_2 und Nicht-CO_2-Emissionen), zeigt, dass alle Szenarien das Budget deutlich überschreiten – obwohl sie als ambitioniert gelten.
- Selbst das 1,75-Grad-Budget wird von allen Szenarien noch überschritten, mit Ausnahme von GreenSupreme sogar erheblich.

Wuppertal Institut

Entwicklung des Energiesystems

Entwicklung des Endenergiebedarfs

Alle Szenarien sehen eine starke Reduktion des Endenergiebedarfes vor



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG & Prognos 2018, dena 2018, UBA 2019

Energiesystem

Erläuterungen zur Graphik „Entwicklung des Endenergiebedarfs“ (I)

Der Strombedarf in den Szenarien steigt aufgrund von Sektorkopplung deutlich an

- Die vorliegenden Szenarien legen nahe, dass eine deutliche Minderung des Endenergiebedarfs eine wichtige Voraussetzung für ambitionierten Klimaschutz ist. Der Endenergiebedarf im Jahr 2050 liegt in den Szenarien zwischen 36 und 58 % niedriger als heute.
- Der Strombedarf hingegen steigt sogar. Das ist hier zwar nicht für alle Szenarien gut erkennbar – hinter dem Wasserstoffverbrauch z.B. verbirgt sich aber ein weiterer Strombedarf für die Elektrolyse zur Wasserstoffherstellung (ebenso bei synthetischen Gasen).
- Der Grund für den auch endenergetisch in den meisten Szenarien erhöhten Bedarf an Strom ist die Sektorkopplung, das heißt der weiteren Elektrifizierung der Wärme- und Kälteerzeugung in Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie des Verkehrs (z. B. Elektroautos) und der Industrie (z. B. Hochtemperaturwärmepumpen).
- Eine THG-neutrale Energieversorgung beinhaltet also, dass Strom als Energieträger an Bedeutung gewinnt, da Strom mittels erneuerbarer Energie sehr viel leichter CO_2-arm hergestellt werden kann als andere Energieträger.

Erläuterungen zur Graphik „Entwicklung des Endenergiebedarf“ (II)

Eine 100-%-ige Vergleichbarkeit der Szenarien ist aufgrund unterschiedlicher Berechnungsansätze und Datenlagen nicht gegeben

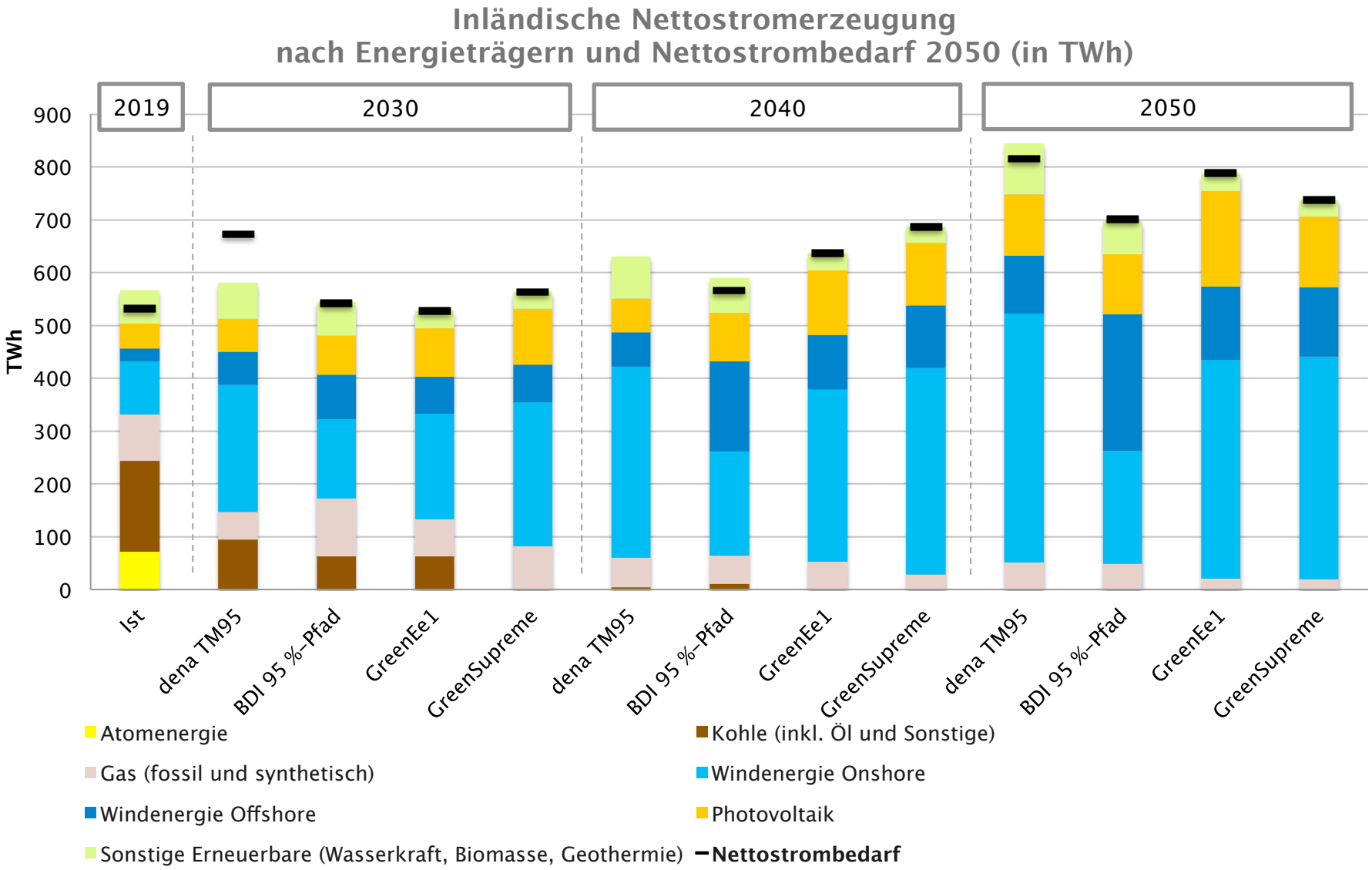
Anmerkungen zum Diagramm:

- Es gibt keine 100-%-ige Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien. In der UBA-Studie wird z. B. Fernwärme nicht gesondert ausgewiesen.
- In den Szenarien der UBA- und der dena-Studie wird beim Endenergiebedarf nicht explizit zwischen konventionellen, biogenen und synthetischen Gasen und Kraftstoffen differenziert, sondern innerhalb eines aggregierten Wertes eine schrittweise Substitution angenommen.

Entwicklung der Stromerzeugung und des Strombedarfs

Der erhöhte Strombedarf wird in den Szenarien zu großen Teilen durch einen Ausbau der Windenergie gedeckt

Wuppertal Institut



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG & Prognos 2018, dena 2018, UBA 2019

Energiesystem

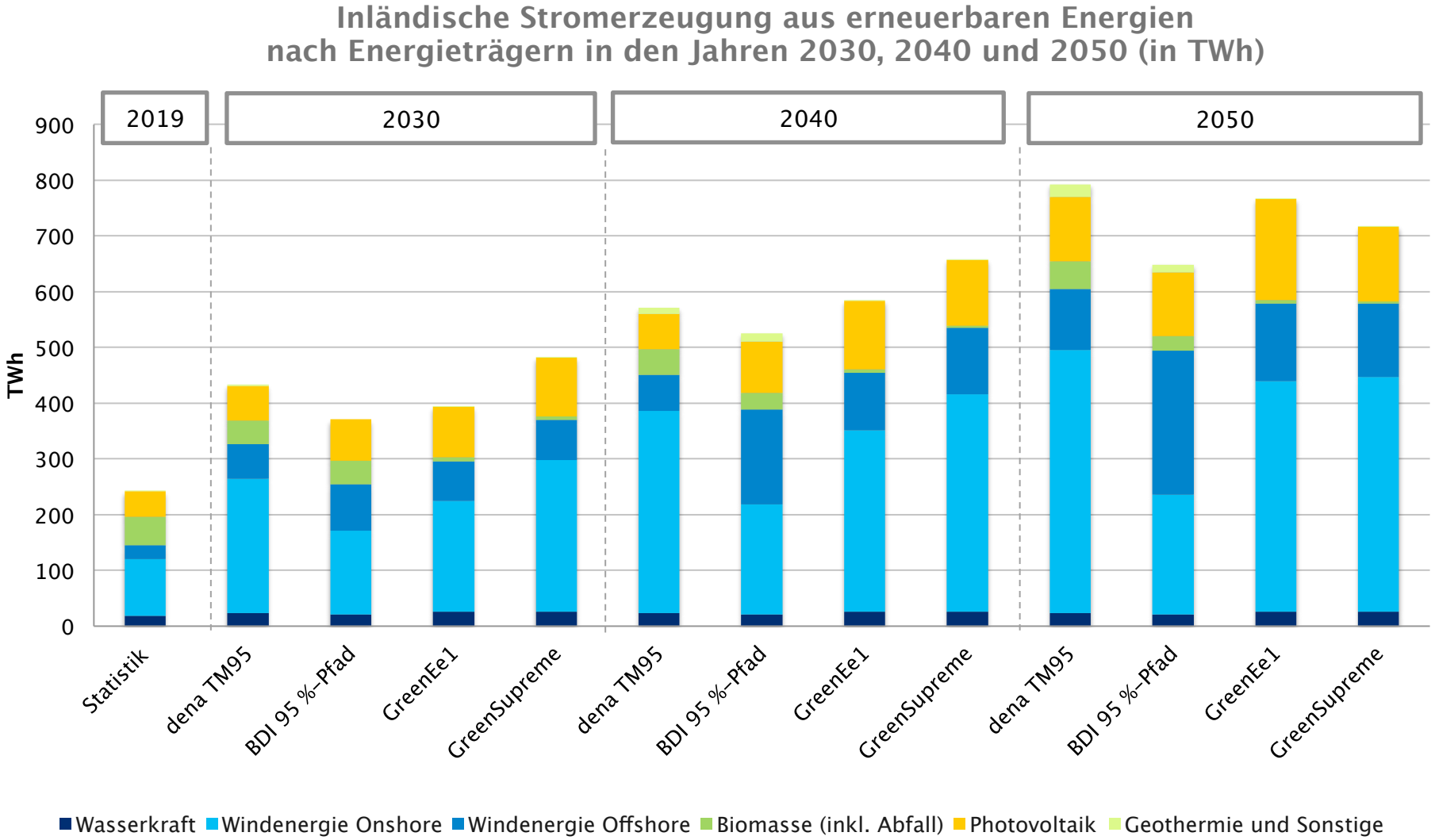
Erläuterungen zur Graphik „Entwicklung der Stromerzeugung und des Strombedarfs“

Die Szenarien unterscheiden sich unter anderem durch den Zeitpunkt des Kohleausstiegs und vorübergehende Nettostromimporte

- Auf dieser Darstellung wird die wachsende Bedeutung von Strom nochmal deutlicher: Der Nettostrombedarf (inkl. Strom für die Elektrolyse) steigt in den Szenarien bis 2050 gegenüber 2019 um ca. 30 bis 50 Prozent an.
- Ein paar wesentliche Unterschiede zwischen den Szenarien lassen sich hier gut erkennen:
  - So erfolgt im GreenSupreme-Szenario des UBA ein Ausstieg aus der Kohlestromerzeugung bis 2030. dena und BDI haben hingegen auch 2040 noch geringe Mengen Kohle im Strommix. Da selbst GreenSupreme noch nicht Paris-kompatibel ist, liefert dies einen Hinweis dafür, dass der Kohleausstieg bei einer 1,5 °C kompatiblen Klimapolitik bereits vor 2030 erfolgen müsste.
  - In den UBA-Szenarien gibt es keine Nettostromimporte, es wird also genauso viel Strom importiert wie exportiert. Im dena-Szenario kann der erhöhte Strombedarf 2030 nicht durch inländische Stromerzeugung gedeckt werden, sodass Deutschland vorübergehend zum Nettostromimporteur wird.
  - In allen Szenarien spielt die Windenergie eine übergeordnete Rolle. Im Gegensatz zu den anderen Szenarien setzt der BDI 2050 überwiegend auf Offshore-Wind.
- Auch hier unterscheidet die UBA-Studie nicht zwischen konventionellem und synthetischem Gas. Da aber in allen Szenarien der Energiesektor im Jahr 2050 klimaneutral ist, ist bis dahin kein konventionelles Gas mehr im Strommix vorhanden.

Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien müsste sich je nach Szenario bis 2050 mehr als verdreifachen



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG & Prognos 2018, dena 2018, UBA 2019

Energiesystem

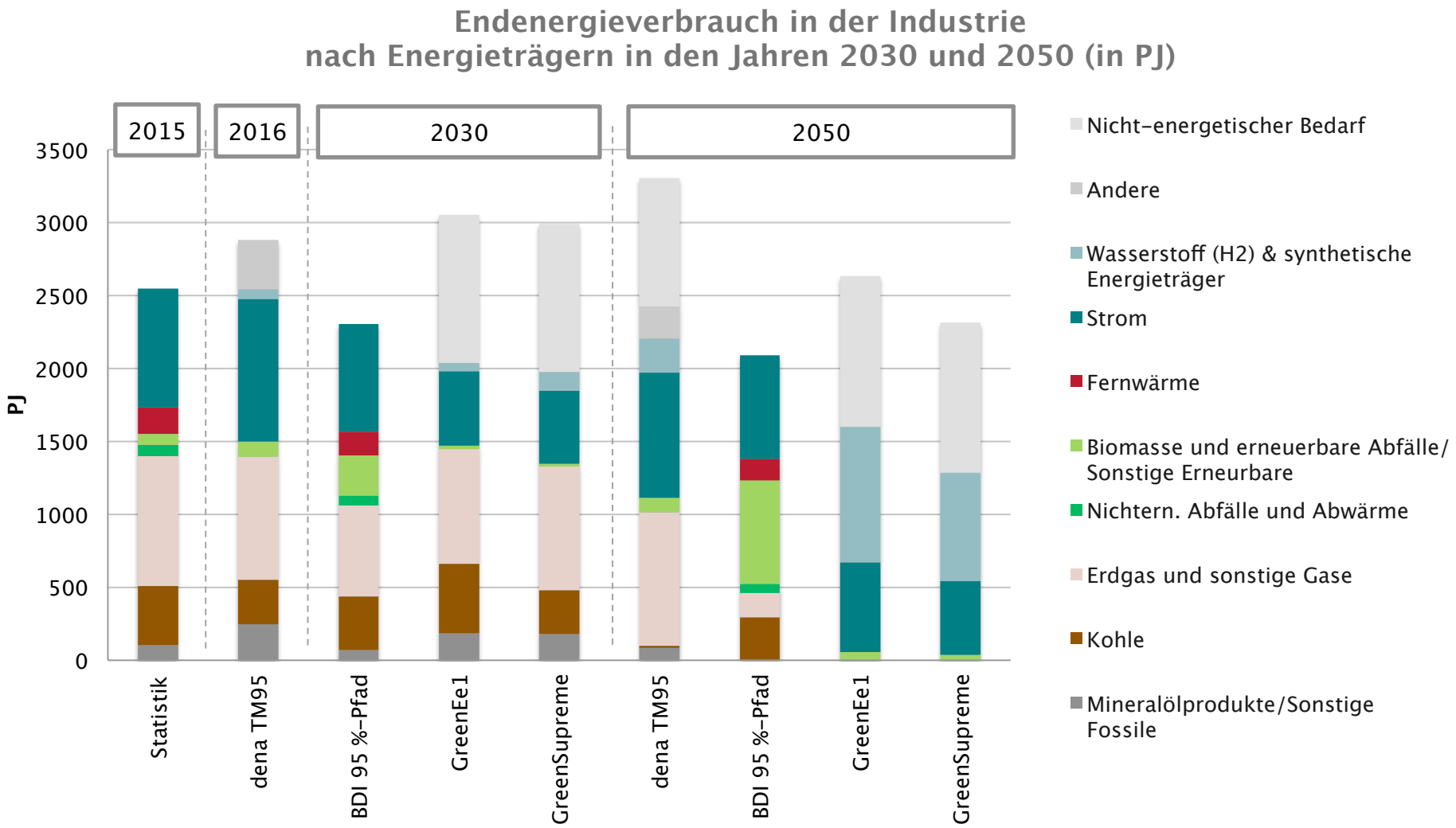
Erläuterungen zur Graphik „Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien“

Neben einem massiven Ausbau der Windenergie wächst auch die Stromerzeugung aus Photovoltaik weiter stark an

- Um den stark erhöhten Strombedarf zu decken und die Sektorkopplung sinnvoll voranzubringen, muss der Erneuerbaren-Ausbau massiv vorangebracht werden. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien müsste sich gegenüber 2019 je nach Szenario bis 2050 mehr als verdreifachen.
- Ein massiver Ausbau der Windenergie ist in allen Szenarien zentral. Windräder an Land produzieren 2050 demnach bis zu viereinhalb mal so viel Strom wie heute.
- Auch die Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen wächst weiter stark an, wobei ihr Anteil an der Stromerzeugung deutlich geringer ist als der von Wind. Die Szenarien gehen bis 2050 von einem etwa zwei- bis vierfachen Anstieg gegenüber 2019 aus.
- Der Einsatz von Biomasse zur Stromerzeugung wird in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich gehandhabt: Die UBA-Szenarien, die einen Schwerpunkt auf Ressourcenschonung legen, setzen z. B. gar keine Anbaubiomasse ein.
- Keine wesentlichen Unterschiede gibt es hingegen z. B. in der Wasserkraft, deren Potenzial in allen Szenarien in etwa gleich gering bleibt.

Endenergieverbrauch im Industriesektor

Fossile Energieträger in der Industrieproduktion werden zunehmend durch Strom und Wasserstoff ersetzt



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG & Prognos 2018, dena 2018, UBA 2019

Verbrauchssektoren

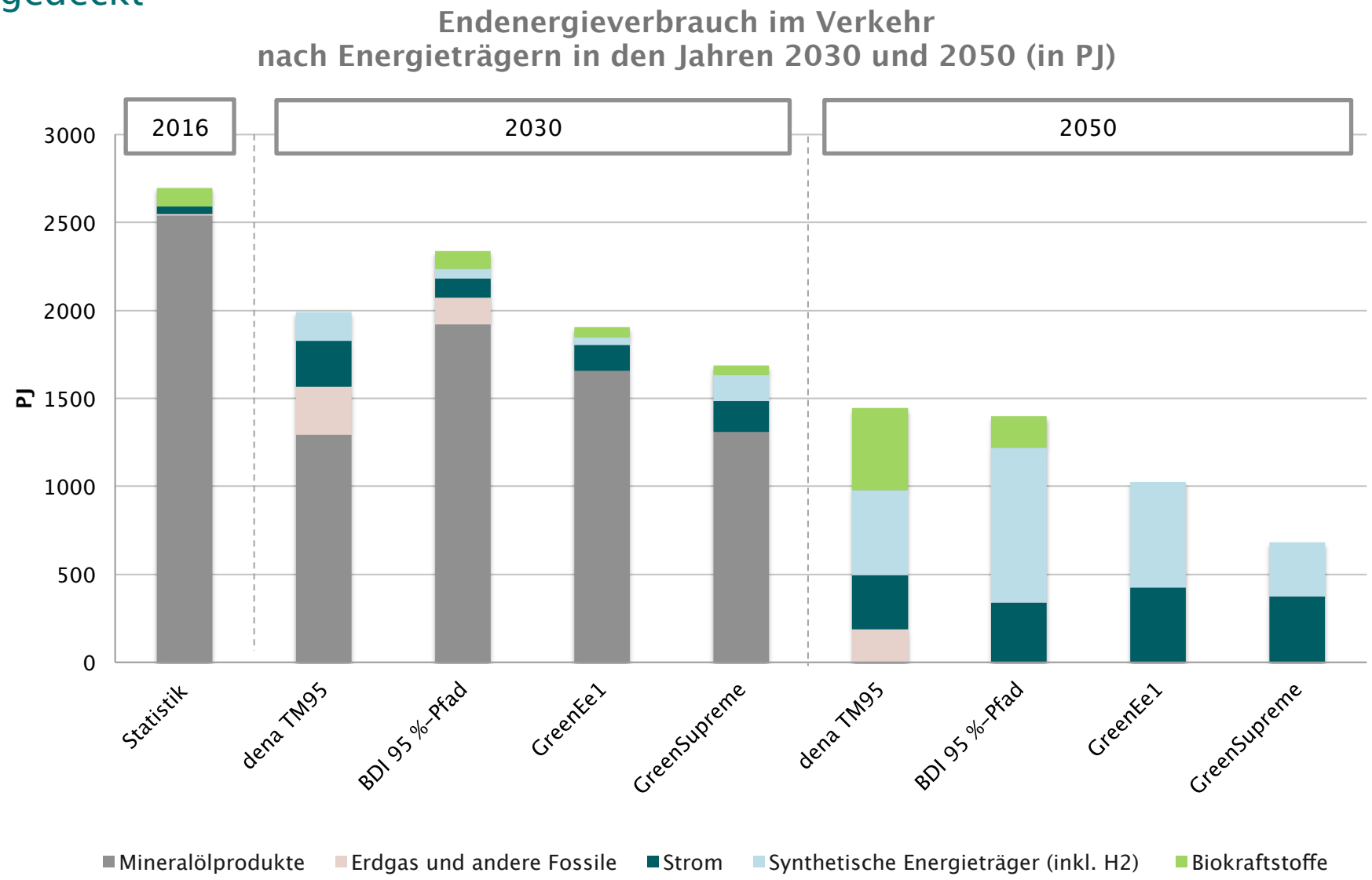
Erläuterungen zur Graphik „Endenergieverbrauch im Industriesektor“

Die Szenarien unterscheiden sich im Industriesektor insbesondere hinsichtlich der Verwendung von CCS

- Im Industriesektor gibt es eine starke Verschiebung von fossilen Energieträgern insbesondere hin zu Strom und Wasserstoff.
- Das dena-Szenario setzt bis 2050 außerdem vermehrt auf synthetische Gase, während der BDI den Einsatz großer Mengen an Biomasse vorsieht, die den Ersatz fossiler Energieträger mit möglichst geringen Eingriffen in bestehende Anlagenparks ermöglichen soll. Die Biomasse spielt in den UBA-Szenarien wiederum aus Gründen der Ressourcenschonung keine nennenswerte Rolle.
- Um ein Bild von den Größenverhältnissen zu bekommen, ist für einige Szenarien außerdem der nicht-energetische Bedarf ausgewiesen, d. h. die stoffliche Verwendung von z. B. Rohöl oder Erdgas (überwiegend in der Chemieproduktion), die ebenfalls nach und nach durch Erneuerbare (z. B. synthetisches Gas) ersetzt werden müssen.
- Diese unterschiedlichen Strategien im Industriesektor gehen einher mit unterschiedlichen Strategien zur Verwendung von CCS. Im BDI-Szenario ist – im Sinne einer Erhaltung bestehender Produktionstechnologien – die Abscheidung und Speicherung großer CO_2-Mengen notwendig. Im dena-Szenario sind es hingegen geringere Mengen und die UBA-Szenarien verzichten gänzlich auf CCS.

Endenergieverbrauch im Verkehrssektor

Im Jahr 2050 wird der stark reduzierte Endenergiebedarf von einer Mischung aus Strom, synthetischen Kraftstoffen und Biokraftstoffen gedeckt



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG & Prognos 2018, dena 2018, UBA 2019

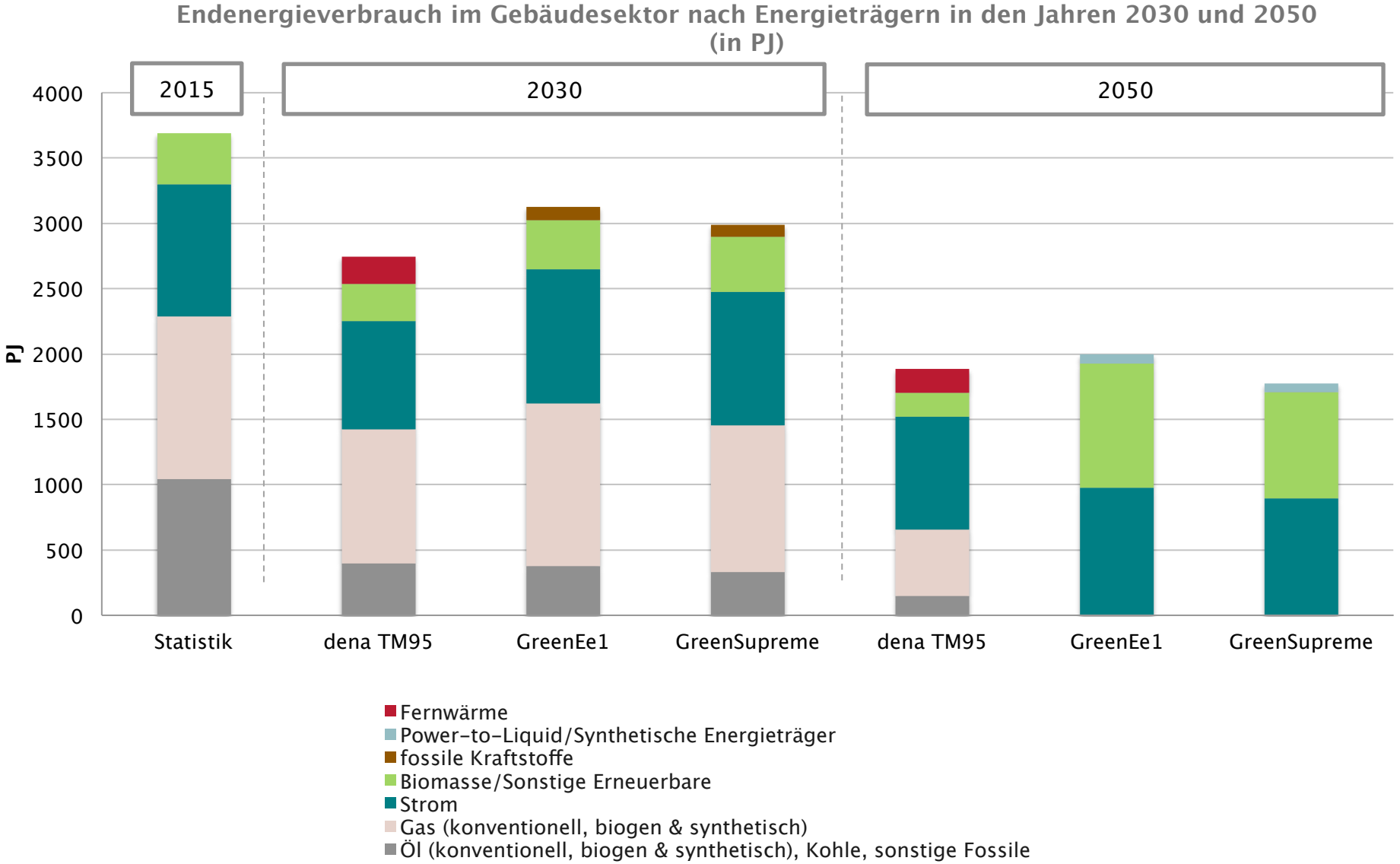
Erläuterungen zur Graphik „Endenergieverbrauch im Verkehrssektor“

Bis 2030 wird der Energiebedarf des Verkehrssektors weiterhin größtenteils durch Mineralölprodukte gedeckt

- Derzeit wird der Energiebedarf des Verkehrssektors vor allem durch Mineralölprodukte gedeckt. Dies ändert sich in allen untersuchten Szenarien bis 2030 nicht wesentlich. Wird eine Dekarbonisierung bis 2035 statt bis 2050 angestrebt, müsste hier aber vermutlich eine frühere Veränderung erfolgen.
- Bis 2050 wird die THG-Minderung im Verkehrssektor zum einen durch die starke Reduktion des Endenergieverbrauchs (stärkste Reduktion im GreenSupreme-Szenario) und zum anderen ab 2030 durch den Ersatz von Mineralölprodukten durch Strom, synthetische Energieträger (größtenteils Import) und teilweise Biokraftstoffe (dena, BDI) erreicht.
- In den UBA-Szenarien wird angenommen, dass die energetische Nutzung von Anbaubiomasse bis etwa 2030 aus ökologischen und sozialen Gründen beendet wird. Biokraftstoffe spielen in diesen Szenarien daher 2050 keine Rolle.

Endenergieverbrauch im Gebäudesektor

Bis 2050 werden fossile Energieträger v. a. durch Strom und erneuerbare Energieträger wie Geothermie, Solarthermie und Biomasse ersetzt



Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG & Prognos 2018, dena 2018, UBA 2019

Verbrauchssektoren

Erläuterungen zur Graphik „Endenergieverbrauch im Gebäudesektor“

Neben dem Ersetz fossiler Energieträger ist auch eine Reduktion des Endenergieverbrauchs von Bedeutung

- Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor wird im Diagramm nur für die UBA-Szenarien und das dena-Szenario gezeigt. Dies liegt daran, dass die BDI-Studie den Endenergieverbrauch im Gebäudesektor nicht nach Energieträgern, sondern nach Anwendungen (z.B. Klimatisierung, Warmwasser) aufschlüsselt und deshalb keine Vergleichbarkeit mit den anderen Szenarien gegeben ist.
- Bis 2050 wird die THG-Minderung im Gebäudesektor erstens durch die Reduktion des Endenergieverbrauchs und zweitens durch die deutliche Reduktion (dena) beziehungsweise den Ausstieg (UBA) aus der Nutzung von Öl, Kohle und fossilem Gas erreicht. Entscheidend sind stattdessen Strom und erneuerbare Energieträger wie Geothermie, Solarthermie und Biomasse, wobei die UBA-Szenarien ab 2030 keine energetische Nutzung von Anbaubiomasse mehr annehmen.

Landwirtschaft

In der Landwirtschaft spielt vor allem die Reduktion von Methanemissionen aus der Tierhaltung eine wichtige Rolle

Wuppertal Institut

Tierhaltung ist mit ca. 60 % die größte landwirtschaftliche THG-Emissionsquelle*

- Emissionen entstehen in der Tierhaltung vor allem in Form von Methan durch Verdauung in Rindermägen und in Form von Lachgas durch die Ausbringung von Wirtschaftsdünger (z.B. Gülle)
- Damit eine Reduktion der Tierbestände nicht einfach zu höheren Fleischimporten führt, setzt sie die Veränderung der Ernährungsgewohnheiten voraus.

UBA-Szenarien:

- Reduktion des Fleischverzehrs bis 2050 um 70 % (GreenEe1) bzw. 75 % (GreenSupreme) gegenüber heute

BDI 95 %-Pfad:

- Vorschlag zur Reduktion der Methanemissionen durch den Einsatz von methanausstoß-hemmenden Futtermittelzusätzen (ca. -30 %)
- Reduzierung des Rinderbestands als letztes Mittel

Verbrauchssektoren

* Quelle: UBA 2019, S. 308

Wuppertal Institut

Literaturverzeichnis

Untersuchte Szenariostudien

- UBA – Umweltbundesamt (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: Rescue Studie.* Dessau-Roßlau. Unter: https://www.umweltbundesamt.de/rescue (16.03.2020).
  - Verständliche Kurzfassung unter: https://www.umweltbundesamt.de/rescue/kurzfassung
- dena – Deutsche Energieagentur (2018). *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050*. Berlin. Unter: https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/dena-leitstudie-integrierte-energiewende/ (16.03.2020).
- BCG & Prognos – The Boston Consulting Group & Prognos (2018). *Klimapfade für Deutschland.* Studie im Auftrag des Bundesverband der deutschen Industrie. Unter: https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland (16.03.2020).

Quellenverzeichnis (I)

AGEB – AG Energiebilanzen e.V. (2020). Pandemie schrumpft Energieverbrauch. Pressedienst Nr. 04 | 2020. Unter: https://www.ag-energiebilanzen.de/

Creutzig, F. et al. (2017). The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. Nat. Energy 2, 17140

Fischedick, M., Friege, J., Höller, S., Samadi, S. (2015). Energie- und Emissions-Szenarien. In: Fischedick, M., Görner, K., Thomeczek, M.: CO_2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, S. 701-751. Unter: https://doi.org/10.1007/978-3-642-19528-0_15

Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, et al. (2019). Global Carbon Budget 2019. Earth System Science Data 11 (4), S. 1783-1838.

IPCC (2018). Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva. Unter: http://www.ipcc.ch/report/sr15/

IPCC (2018a). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Ein IPCC Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. Bonn, Wien, Bern: Deutsche IPCC? Koordinierungsstelle – DLR Projektträger, ProClim, Umweltbundesamt. Unter: https://www.de?ipcc.de/128.php
IPCC (2018b). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva. Unter: https://www.ipcc.ch/sr15/

Quellenverzeichnis (II)

Lenzi, D., Lamb, W. F., Hilaire, et al. (2018). Don‘t deploy negative emissions technologies without ethical analysis. Nature. Unter: https://www.nature.com/articles/d41586-018-06695-5

Low, S., Schäfer, S. (2020). Is bio-energy carbon capture and storage (BECCS) feasible? The contested authority of integrated assessment modeling. Energy Research & Social Science 60. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101326

Mehr Demokratie e.V, & BürgerBegehren Klimaschutz e.V. (Hrsg.) (2020). Handbuch Klimaschutz: Wie Deutschland das 1,5-Grad-Ziel einhalten kann. Basiswissen, Daten, Maßnahmen. Oekom Verlag, München.

Robiou du Pont, Y., Jeffery, M., Gütschow, J. et al. (2017). Equitable mitigation to achieve the Paris Agreement goals. Nature Climate Change 7, 38–43. https://doi.org/10.1038/nclimate3186

Smith, P., Davis, S., Creutzig, F. et al. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. Nature Climate Change 6, 42–50. https://doi.org/10.1038/nclimate2870

SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen (2020). Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa: Umweltgutachten 2020. Berlin. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.html

Statistisches Bundesamt (2017). Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Aktualisierte Rechnung auf Basis 2015. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html#sprg233474 .

UBA – Umweltbundesamt (2020). Treibhausgas-Emissionen. Unter: https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen

UNFCCC (2015). Übereinkommen von Paris. Paris, Bonn. https://www.bmu.de/gesetz/uebereinkommen-von-paris/

Wuppertal Institut

Energiewirtschaft

Sascha Samadi

Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft	58
Zentrale Klimaschutzstrategien in der Energiewirtschaft	66
Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien	69
Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern	83
Mögliche Kosten für das Erreichen von THG-Neutralität	92
Skizzierung möglicher politischer Instrumente	96
Zusammenfassung wichtiger „Must Dos“	100
Literaturverzeichnis	103

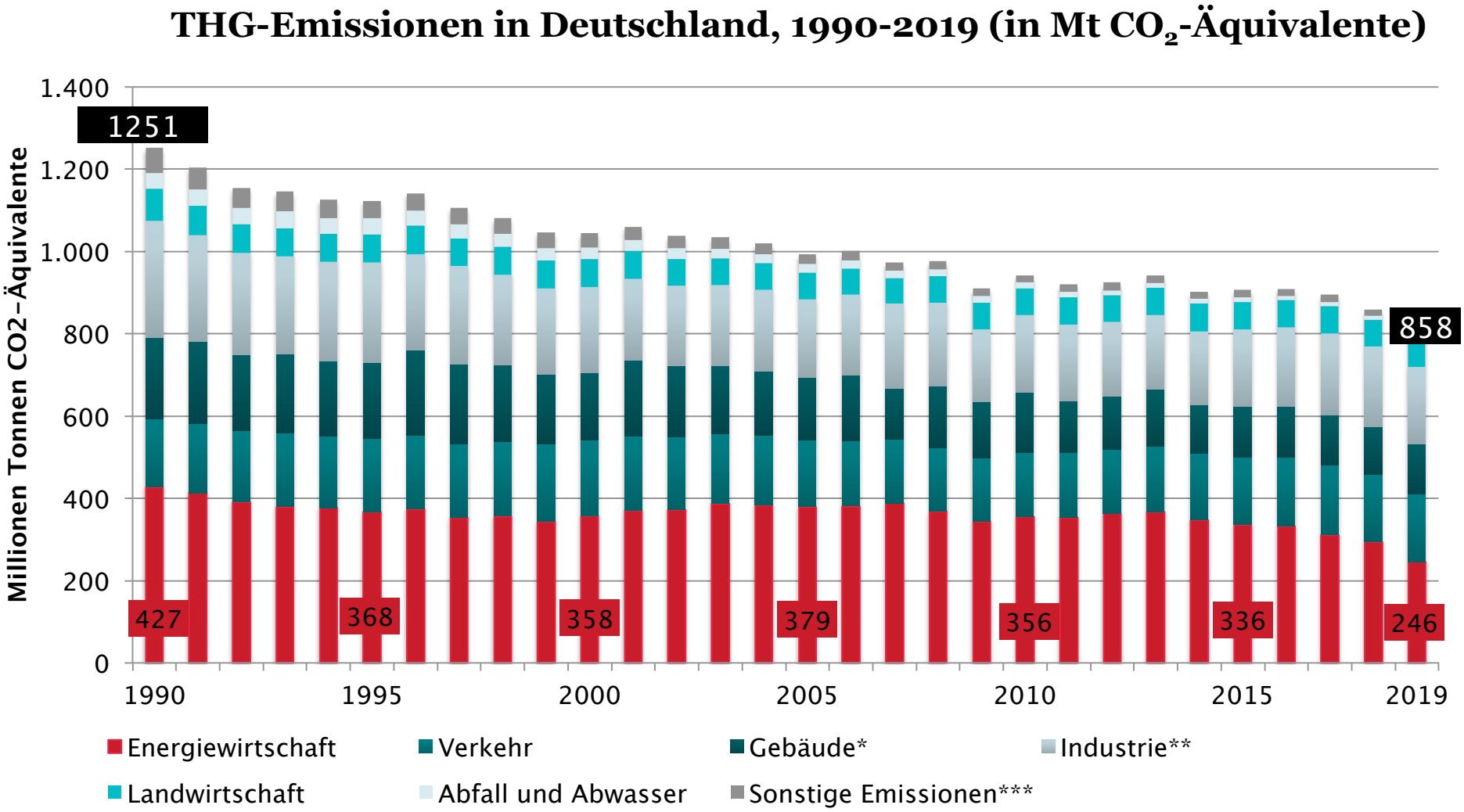
Wuppertal Institut

Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft

Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft

Die Energiewirtschaft verursachte 2019 mit ~30 % den größten Anteil aller Sektoren an den deutschen THG-Emissionen

Wuppertal Institut



* umfasst Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und private Haushalte
** umfasst energie- und prozessbedingte Emissionen der Industrie
*** umfasst sonstige Feuerungen (u.a. Militär) & diffuse Emissionen aus Brennstoffe

Quelle: Daten nach UBA (2020b).

Sektorübersicht

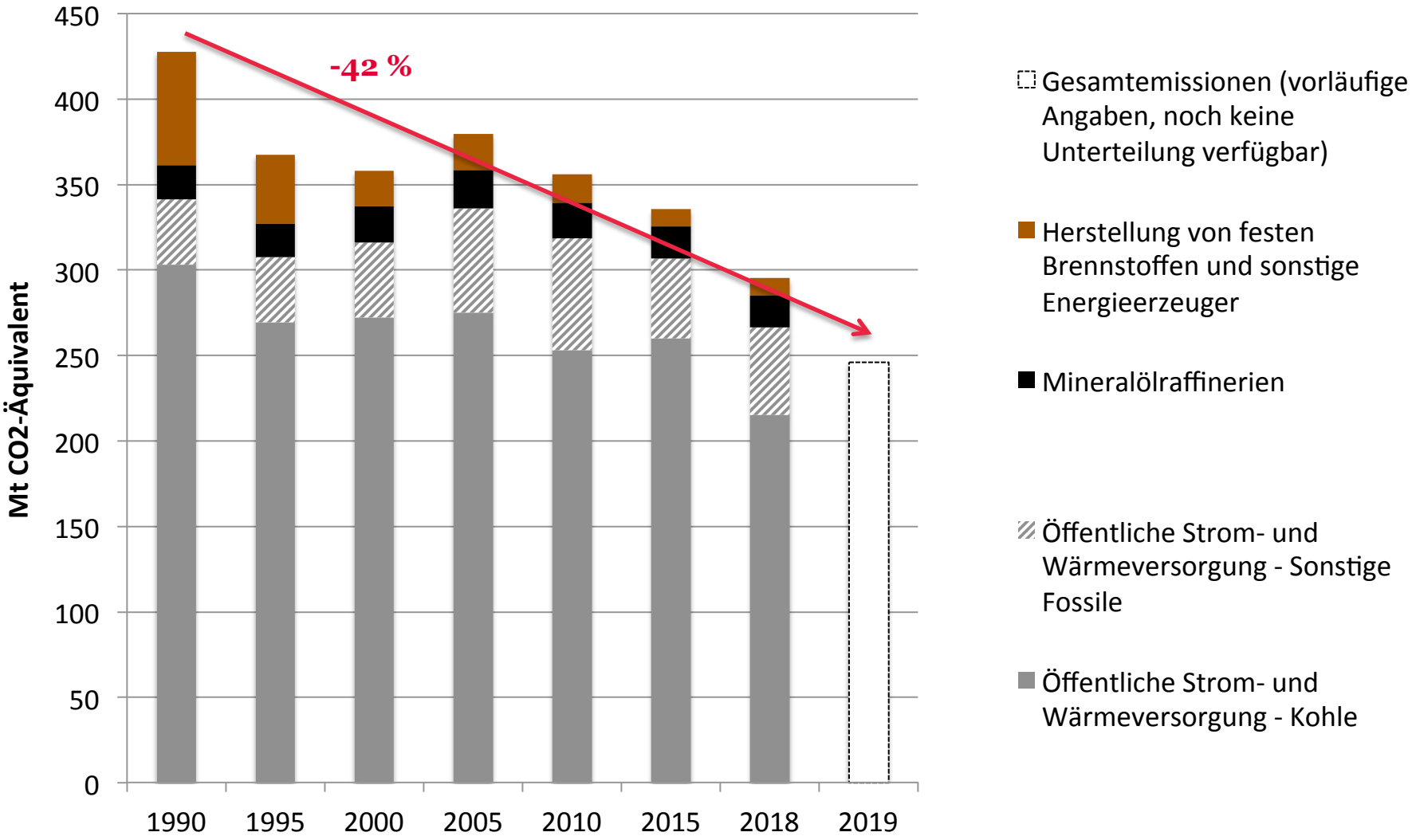
Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft

Die THG-Emissionen der Energiewirtschafts sind zwischen 1990 und 2019 um 42 % gesunken

Wuppertal Institut

Sektorübersicht

THG-Emissionen der Energiewirtschaft nach Quellen (in Mt CO_2-Äquivalent)



Quellen: Daten nach UBA (2020a, 2020b).

Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft

Die Emissionen aus Kohlekraftwerken dominieren, sind zuletzt aber aus verschiedenen Gründen deutlich gesunken

Wuppertal Institut

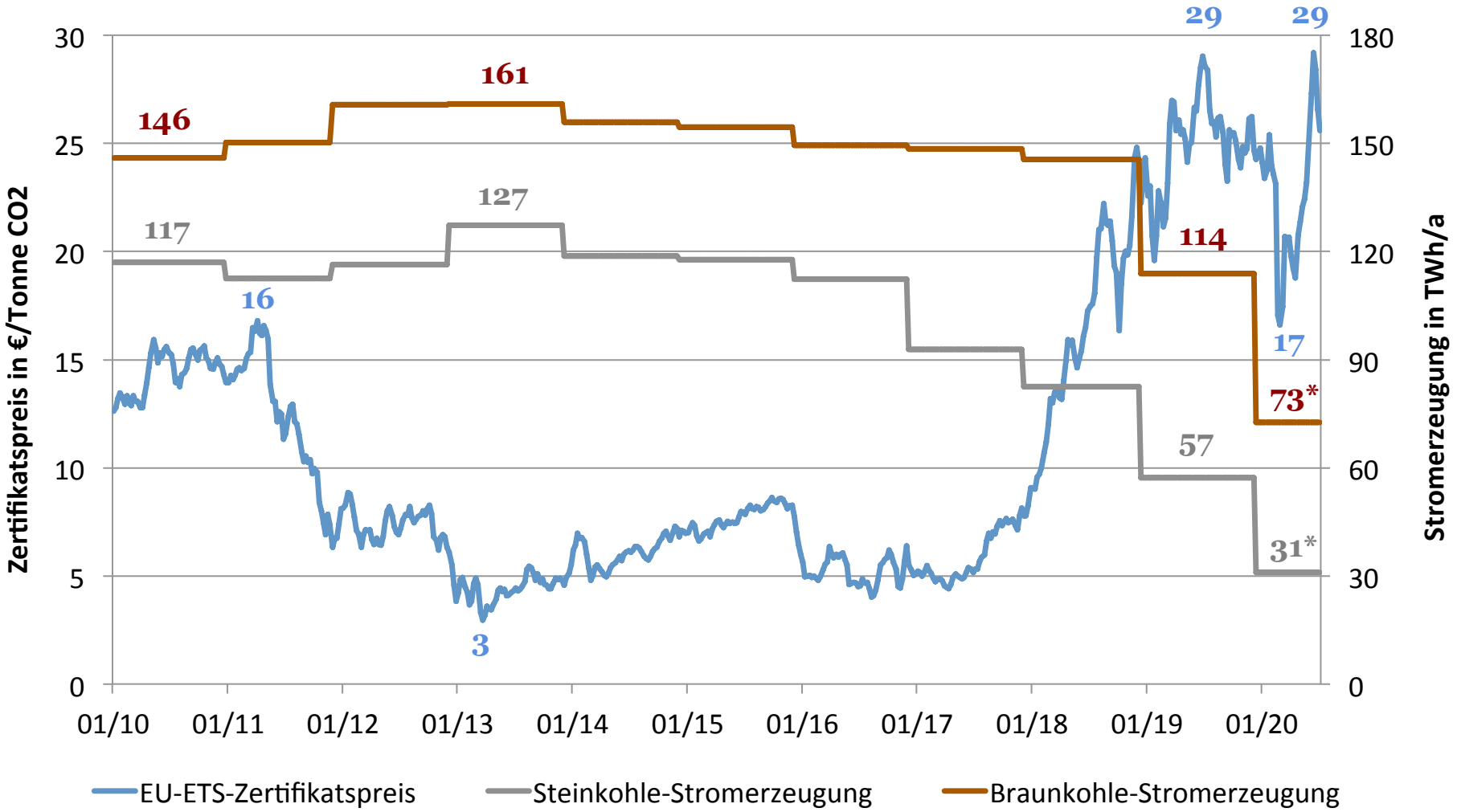
- Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft werden dominiert von den Emissionen der öffentlichen Strom- und Wärmeerzeugung (90 % im Jahr 2018), insbesondere von den Emissionen der Braun- und Steinkohle(heiz)kraftwerke (73 % im Jahr 2018).
- Weitere THG-Emissionen der Energiewirtschaft entstehen v. a. durch die Herstellung von Kraftstoffen in Raffinerien.
- Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft sind zwischen 1990 und 2019 – trotz eines Anstiegs der Bruttostromerzeugung um 10 % (AG Energiebilanzen 2020a) – um 42 % zurückgegangen. Die wesentlichen Gründe hierfür waren:
  - Ausbau der erneuerbaren Energien (Anstieg von 4 % auf 42 % des Bruttostromverbrauchs, AG Energiebilanzen 2020a)
  - Sinkende Wirtschaftlichkeit der Kohlekraftwerke (v. a. Steinkohlekraftwerke) infolge des Erneuerbaren-Ausbaus, des eingeführten/steigenden CO_2-Preises und eines gegenwärtig relativ geringen Preis-Spreads zwischen Steinkohle und Erdgas (Agora Energiewende 2020)

Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft

Unter anderem infolge steigender CO_2-Zertifikatspreise ist die Kohle-Stromerzeugung in den letzten Jahren gesunken

Wuppertal Institut

Entwicklung des EU-ETS-Zertifikatspreises und der Stromerzeugung in deutschen Braun- und Steinkohlekraftwerken, 2010 bis Juni 2020



Quellen: Daten nach AG Energiebilanzen (2020a), Fraunhofer ISE (2020a), Ember (2020).

* Kohle-Stromerzeugung 2020: Hochrechnung basierend auf der Entwicklung bis Ende des 1. HJ 2020.

Sektorübersicht

Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft

Infolge steigender CO_2-Preise haben Kohlekraftwerke zuletzt gegenüber Erdgaskraftwerken an Wirtschaftlichkeit verloren

Wuppertal Institut

- Die Stromerzeugung in deutschen Braun- und Steinkohlekraftwerken ist insbesondere seit 2016 deutlich zurückgegangen. 2019 lag sie bei der Braunkohle 24 % und bei der Steinkohle sogar 49 % niedriger als 2016 (AG Energiebilanzen 2020a). In der ersten Hälfte 2020 hat sich dieser Trend stark fortgesetzt. So lag die Stromerzeugung aus Braunkohle weitere 36 %, die der Steinkohle sogar 46 % niedriger als im 1. Halbjahr 2019 (ISE 2020a).
- Neben dem Erneuerbaren-Zubau, dem insbesondere im 1. HJ 2020 zurückgegangenen Strombedarf und dem derzeit niedrigen Gaspreis ist der relativ hohe CO_2-Preis im EU-Emissionshandel ein wesentlicher Grund für den starken Rückgang der Stromerzeugung.
- Denn mit steigendem CO_2-Preis verlieren Kohlekraftwerke an Wirtschaftlichkeit gegenüber erdgasbetriebenen Gas- und Damp- (GuD-) Kraftwerken, die deutlich niedrigere spezifische CO_2-Emissionen aufweisen. Ab einem Preis von etwa 10 €/t CO_2 werden GuD-Kraftwerke zunehmend wirtschaftlicher gegenüber Steinkohlekraftwerken. Bei einem Preis von 20 bis 30 €/t CO_2 beginnen zudem GuD-Kraftwerke wirtschaftlicher zu werden als bestimmte (weniger effiziente) Braunkohlkraftwerke (Energy Brainpool 2017a). Dieses CO_2-Preisniveau ist seit etwa Mitte 2018 die meiste Zeit zu beobachten.

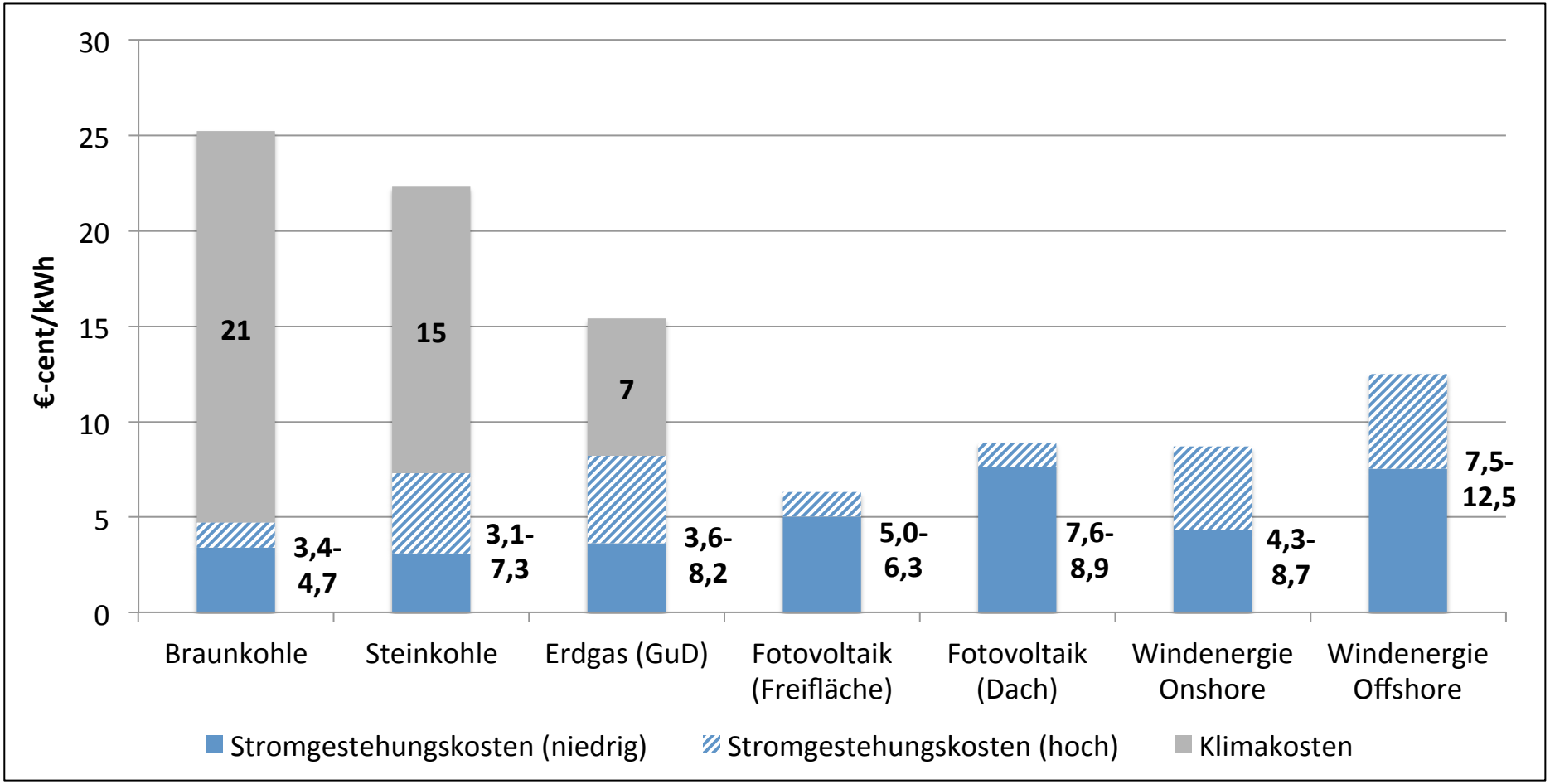
Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft

Unter Berücksichtigung geschätzter Klimakosten weisen Wind und PV niedrigere Stromgestehungskosten auf als fossile Kraftwerke

Wuppertal Institut

Sektorübersicht

Aktuelle Stromgestehungskosten verschiedener neu errichteter Anlagentypen in Deutschland, inkl. Klimakosten bei 180 €/t CO_2 (in €-cent/kWh)



Quellen: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Daten in ISE (2020b), ISE (2018), FÖS (2018), UBA (2020c).

Hinweise: Aufgrund hoher Unsicherheiten sind nicht alle externen Kostenarten (z. B. Luftschadstoffkosten) und Systemkosten (z. B. Kosten von Back-up-Kraftwerken für fluktuierende Erneuerbare) mit aufgeführt; die Stromgestehungskosten variieren hier u. a. aufgrund einer angenommenen Volllaststunden-Spanne.

Die THG-Emissionen der Energiewirtschaft

Ohne flankierende Maßnahmen bleibt es unsicher, ob die Kohle-Stromerzeugung in den nächsten Jahren weiter sinken wird

Wuppertal Institut

- Allerdings war die Volatilität des EU-ETS-Preises in den letzten Jahren hoch. Ein möglicher starker zukünftiger Preisrückgang würde die Kohlestromerzeugung schnell wieder wirtschaftlicher machen und wieder ansteigen lassen.
- Folglich kann nicht sicher davon ausgegangen werden, dass die Stromerzeugung aus Braun- und Steinkohle alleine marktgetrieben auch in den nächsten Jahren weiter sinken wird.
- Für ambitionierten Klimaschutz ist der aktuelle Kohleausstiegsbeschluss Deutschlands, der eine Ende der Kohleverstromung bis spätestens 2038 vorsieht, daher unzureichend bzw. riskant.
- Verschiedene Studien legen nahe, dass ein vollständiger Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2030 möglich und für eine Paris-kompatible Entwicklung der deutschen THG-Emissionen von großer Bedeutung wäre (z. B. DIW 2020).
- Ein weiterer kontinuierlicher Rückgang der Kohleverstromung und eine Beendigung z. B. bis zum Jahr 2030 könnte u. a. durch die Einführung eines stetig steigenden CO_2-Mindestpreises auf europäischer Ebene erreicht werden. Ein solcher Mindestpreis würde die Volatilität der CO_2-Zertifikatspreise im EU-Emissionshandel absichern.

Wuppertal Institut

Zentrale Klimaschutzstrategien in der Energiewirtschaft

Zentrale Klimaschutzstrategien in der Energiewirtschaft

Zentral sind der Ausbau der Erneuerbaren-Stromerzeugung sowie ein Wechsel zu klimaneutralen Brenn- und Kraftstoffen

- Weiterer Erneuerbaren-Ausbau hin zu 100 % erneuerbaren Energien
  - Ausbau der Stromerzeugungsanlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien
  - Aus- und Umbau des Transport- und Verteilnetzes für Strom
  - Ausbau der Speicherkapazitäten (v. a. Batterien und Anlagen zur Rückverstromung von Wasserstoff (H_2) oder synthetischem Gas)
  - Erhöhung der nachfrageseitigen Flexibilitäten
  - Digitalisierung zur Optimierung der Nutzung fluktuierender erneuerbarer Energien sowie zur Stärkung des europäischen Stromaustauschs
  - Nutzung der Potenziale der Sektorenkopplung, u. a. auf Grundlage einer integrierten Analyse der Ausbauerfordernisse des Strom- und Gasnetzes

- Wechsel zu H_2 oder synthetisch erzeugten Energieträgern zur Deckung des verbleibenden Bedarfs an gasförmigen und flüssigen Energieträgern
  - Ausbau von Elektrolyseur-Kapazitäten
  - Aufbau von Partnerschaften mit potenziellen Export-Ländern
  - Aufbau entsprechender Infrastruktur (inländische und grenzüberschreitende H_2-Pipelines, ggf. Hafeninfrastruktur)

Hintergrund: Im Folgenden betrachtete Szenarien

Wuppertal Institut

Szenario	Studie	Energiebedingte CO_2-Emissionen, 1990-2050	Wesentliches Ziel des Szenarios
TM95	dena (2018)	-100 %	Darstellung eines kostengünstigen und robusten Transformationspfads zur Erreichung des -95 %-Ziels.
95 %-Pfad	BDI (2018)	-100 %	Aufzeigen eines kosteneffizienten Weges zur Erreichung des -95 %-Ziels.
GreenEe1	UBA (2019)	-100 %	Aufzeigen der Möglichkeit von THG-Neutralität bis 2050, v. a. mit technischen Lösungen, aber ohne CCS, unter Berücksichtigung des Ressourcenverbrauchs.
Green Supreme	UBA (2019)	-100 %	Wie bei GreenEe1, aber mit geringeren kumulativen Emissionen, u. a. durch Verhaltensänderungen und Nullwachstum nach 2030.
Szenario 95	FZJ (2019)	etwa -97 %	Identifikation der kosteneffizientesten CO_2-Minderungsstrategie zur Erreichung des -95 %-Ziels
Referenz	ISE (2020)	etwa -95 %	Identifikation einer kostenoptimalen Transformation des Energiesystems für eine Minderung der energiebed. Emissionen um 95 % bis 2050 (gegenüber 1990)
Suffizienz	ISE (2020)	etwa -95 %	Untersuchung des möglichen Beitrags weitreichender Lebensstiländerungen für die Transformation des Energiesystems

Wuppertal Institut

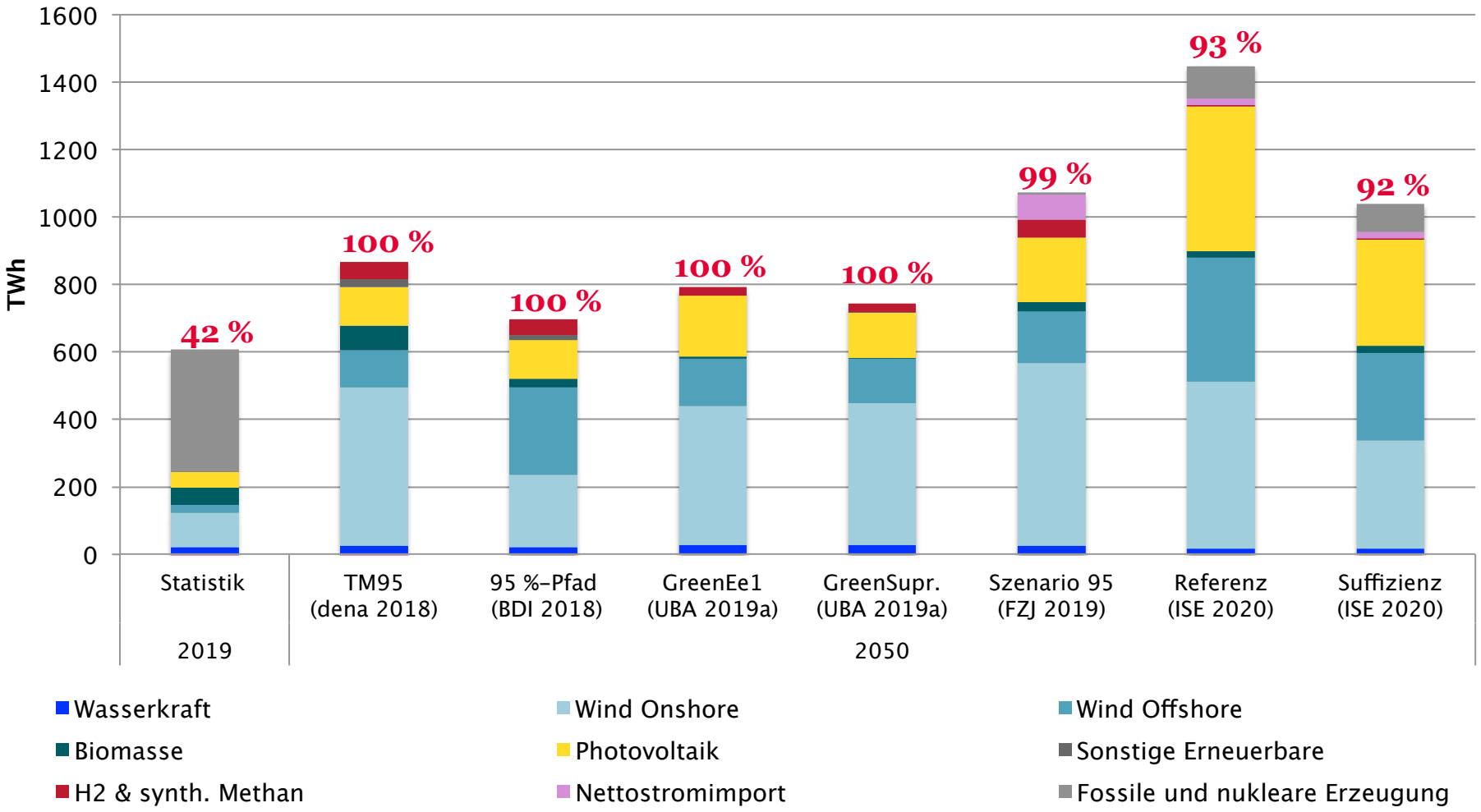
Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Wind- und Solarenergie werden den zukünftigen Strommix dominieren

Wuppertal Institut

Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2019 und in Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 (in TWh) (rot: Erneuerbaren-Anteil am Bruttostromverbrauch)



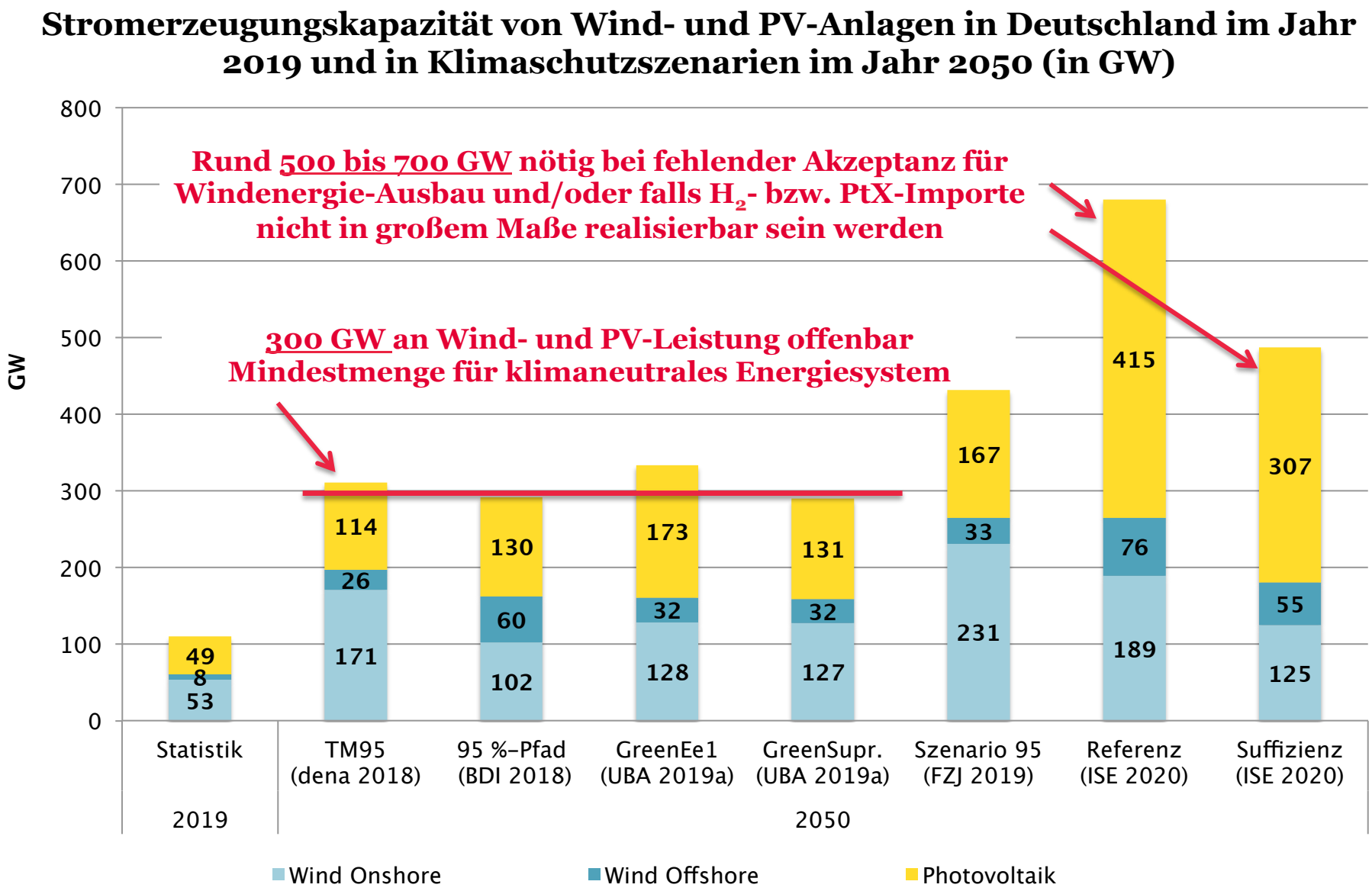
Quelle: Statistik-Daten nach AG Energiebilanzen (2020a).

Hinweise: Nettostromexporte nicht dargestellt; Werte für Szenario „Suffizienz“ sind ungefähre Werte.

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Ein klimaneutrales Energiesystem wird wohl mindestens 300 und bis zu 700 GW an Wind- und PV-Kapazitäten benötigen

Wuppertal Institut



Quelle: Statistik-Daten nach BMWi (2020).

Erneuerbaren-Ausbau

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Trotz Unsicherheiten im Detail ist klar, dass ein massiver weiterer Wind- und PV-Ausbau für Klimaneutralität unerlässlich ist

Wuppertal Institut

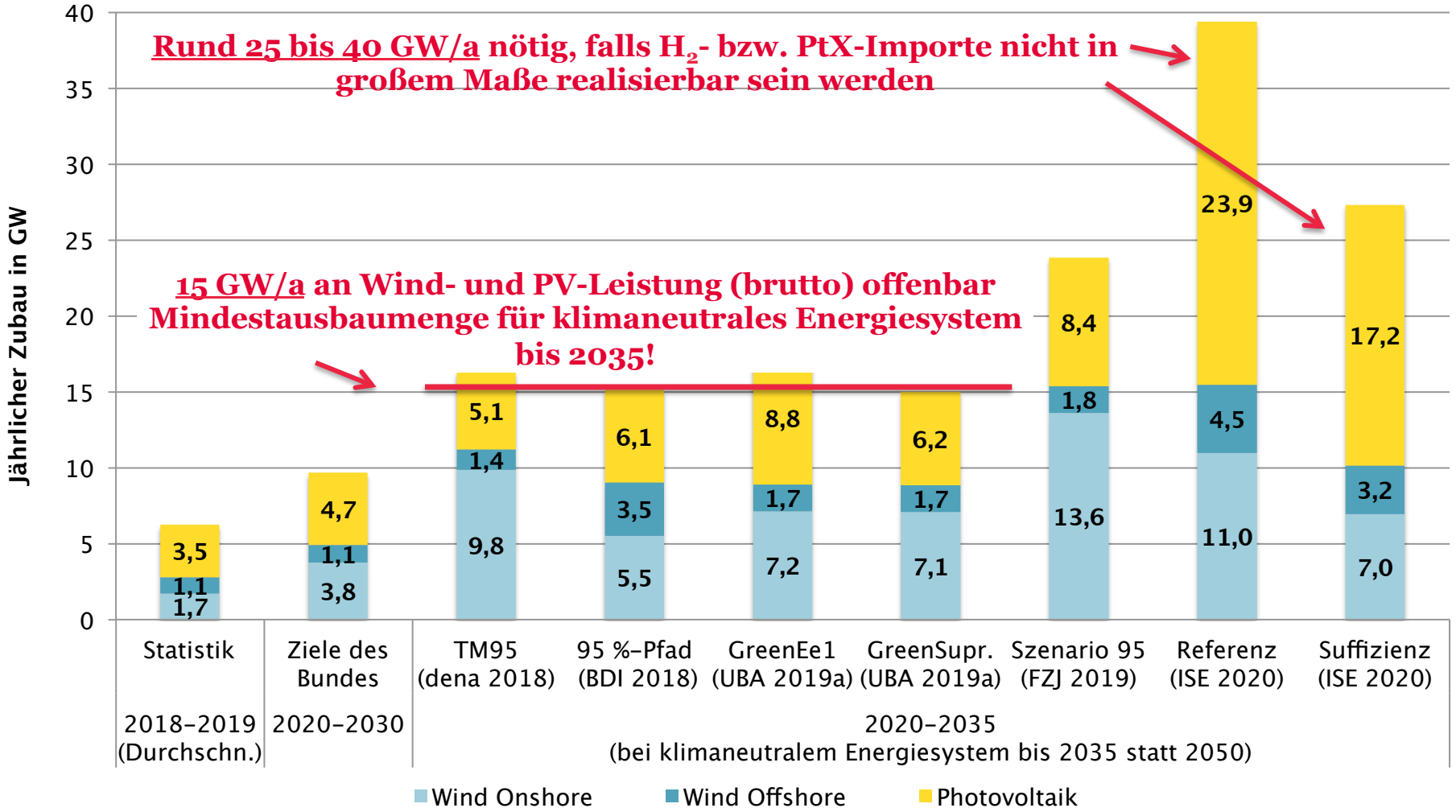
- Für ein klimaneutrales Energiesystem sollten pro Jahr wohl mind. ca. 700 bis 1.000 TWh Strom aus Erneuerbaren erzeugt werden. Einzelne Studien halten sogar eine Erzeugung von bis zu 1.500 TWh/a für nötig (LBST 2019, ISE 2020b): Dies könnte den zukünftigen Bedarf an Importen von H_2 bzw. H_2-Derivaten deutlich senken und könnte auch notwendig werden, wenn die Strategie der Direktelektrifizierung in den Endenergiesektoren nicht in ausreichendem Maß umsetzbar sein wird.
- Aufgrund der relativ großen Potenziale in Deutschland und der mittlerweile geringen Gestehungskosten wird die Erzeugung aus Wind und PV klar dominieren.
- Das genaue Verhältnis zwischen Wind und PV ist innerhalb eines gewissen Rahmens flexibel. Das Verhältnis zwischen Wind- und PV-Erzeugung bei ~100 % erneuerbarer Erzeugung liegt in den meisten Szenarien zwischen 3:1 und 5:1, in einzelnen Szenarien aber auch deutlich niedriger – bei 2:1 („Referenz“) bzw. sogar bei 0,6:1, d. h. hier wird mehr PV- als Windstrom erzeugt („Inakzeptanz“).
- Die hier analysierten Szenarien legen nahe, dass in einem klimaneutralen Energiesystem Wind- und PV-Anlagen in Höhe von mind. ca. 300 GW installiert sein müssen, bei einem infolge einer mangelnden Akzeptanz des Windenergieausbaus nötigen starken Fokus auf PV und/oder einem hohen inländischen Erzeugungsbedarf müssten es – auch aufgrund der gegenüber Windenergie niedrigeren PV-Volllaststunden – deutlich mehr GW sein.

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Klimaneutralität bis zum Jahr 2035 benötigt offenbar einen Ausbau von Wind und PV von *mindestens* 15 GW pro Jahr

Wuppertal Institut

Jährlicher Brutto-Zubau von Wind- und PV-Anlagen 2018/19, nach 2030-Bundesziel und in Klimaschutzszenarien bei auf 2035 vorgezogener Klimaneutralität (in GW/a)



Quellen: Statistik & Ziele nach BWE (2020a), pv-magazine (2019, 2020), BMWi (2020), Bundesregierung (2019).

Annahme: Anlagen-Lebensdauern von 20 Jahren (Wind) bzw. 25 Jahren (PV).

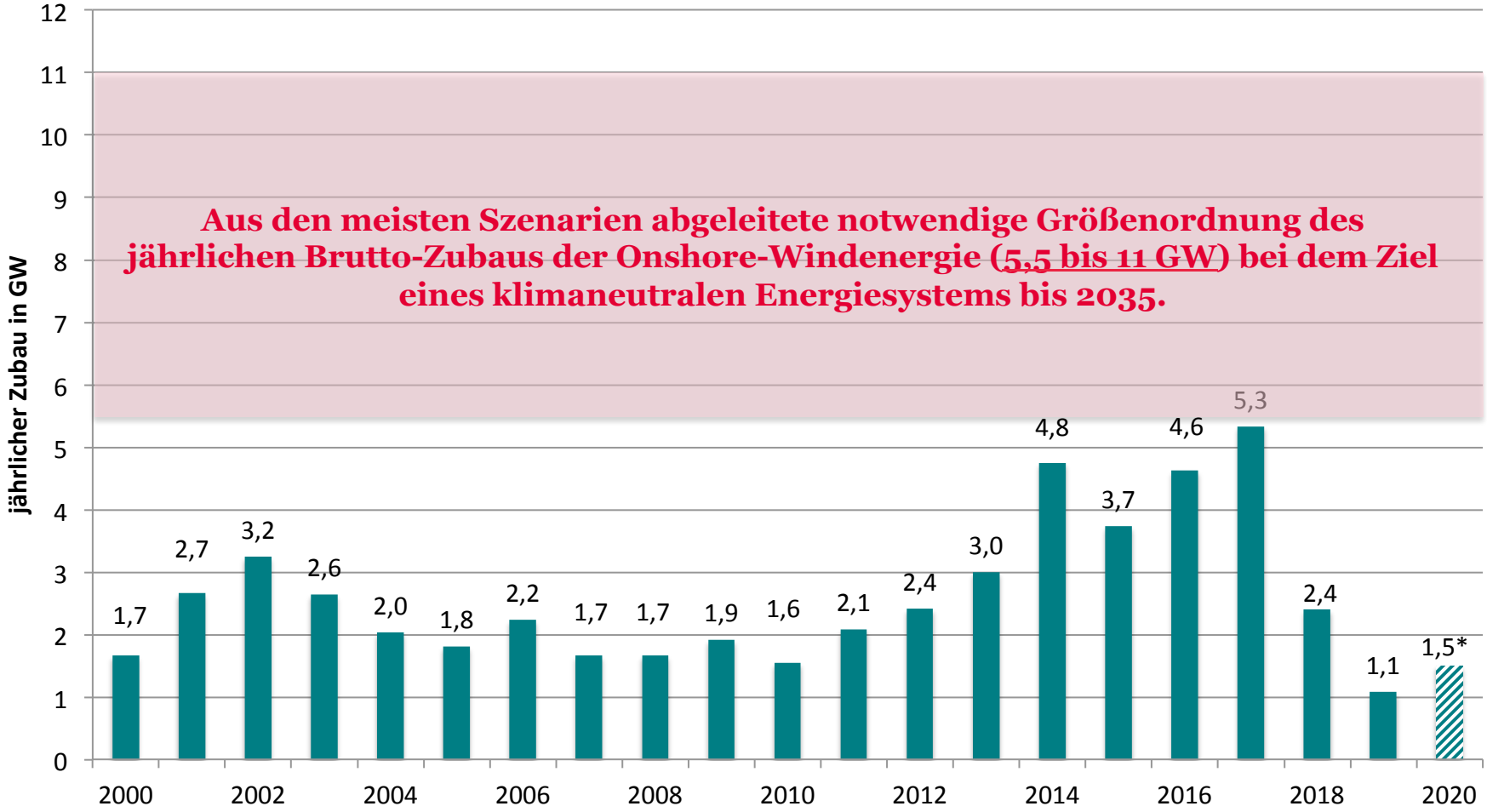
Erneuerbaren-Ausbau

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Riesige Lücke zwischen aktuellem und für Klimaneutralität bis 2035 notwendigem Wind-Onshore-Zubau

Wuppertal Institut

Jährlicher Zubau an Onshore-Windenergie in Deutschland seit 2000 im Vergleich zu dem für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2035 nötigen Zubau (in GW)



Quelle: Ausbauzahlen bis 2019 nach BWE (2020a).

* Prognose von Juli 2020 für das gesamte Jahr 2020 nach BWE & VDMA Power Systems (BWE 2020b).

Erneuerbaren-Ausbau

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Für das Erreichen von THG-Neutralität bis 2035 ist eine Steigerung des PV- und Wind-Ausbaus um ein Vielfaches nötig

Wuppertal Institut

- Um eine 100 % erneuerbare Stromerzeugung bereits 2035 realisieren zu können, müssten pro Jahr wohl mind. 15 GW an Wind- und PV-Kapazität zugebaut werden (brutto), bei stärkerem PV-Fokus und/oder höherem Strombedarf mind. 25-40 GW.
- Um den Mindestzubau von ca. 15 GW erreichen zu können, müsste der Ausbau von Wind und PV zukünftig etwa 2,5 mal so hoch sein wie in den letzten zwei Jahren. Insbesondere die Windenergie an Land müsste sehr viel stärker wachsen.
- Bezüglich des reinen Anlagen-Ausbaus scheint ein solcher Zubau realisierbar zu sein, wie auch der Ausbau in einzelnen Jahren der Vergangenheit nahelegt (die damals realisierten Zubaumaxima müssten erneut erreicht und verstetigt werden).
- Aber: Sollten andere Länder einen ähnlichen Weg gehen (aus Klimaschutzsicht nötig), ist zunächst mit Engpässen bei der Anlagenproduktion zu rechnen. Bei glaubhafter Klimapolitik sollten Engpässe aber auf wenige Jahre begrenzt sein und einer Kapazität von (über) 300 GW bis 2035 nicht grundsätzlich im Wege stehen.
- Die in Deutschland vorhandenen Potenziale für Wind- und Solarenergie stellen kein grundsätzliches Hindernis für einen solch starken Zubau bzw. eine installierte Gesamtmenge von 300 GW oder auch deutlich mehr dar (UBA 2013, Fath 2018).
- Für die Realisierung eines solch schnellen Ausbaus ist eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz zentral, dies müssten energiepolitische Maßnahmen dringend beachten.

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Die Investitionsaufwendungen für den Erneuerbaren-Ausbau müssten mindestens auf das Niveau von 2010 & 2011 steigen

Wuppertal Institut

- Die Investitionskosten für einen Ausbau von 15 GW pro Jahr lägen (bei einer angenommenen Aufteilung von 6 GW PV, 2 GW Offshore-Wind und 7 GW Onshore-Wind) schätzungsweise bei derzeit 23 Mrd. € pro Jahr und – infolge der erwarteten weiteren Kostensenkungen – bei 19 Mrd. € pro Jahr im Jahr 2035.
- Damit müssten in diese Technologien in den kommenden 15 Jahren pro Jahr rund drei mal mehr investiert werden als im Jahr 2019, allerdings ähnlich viel wie bereits in den Jahren 2010 und 2011 (s. folgende Abbildung).
- Gegenüber diesen Jahren könnten mit der gleichen Summe aufgrund der deutlich gesunkenen spezifischen Kosten allerdings rund 75 % mehr Leistung errichtet werden und die errichteten Anlagen würden rund 150 % mehr Strom erzeugen als die 2010 errichteten Anlagen. (Die Differenz der Steigerungsraten zwischen der Leistung und der Stromerzeugung ist auf die höheren Volllaststunden von Windenergieanlagen gegenüber PV-Anlagen zurückzuführen – und 2010 wurden v. a. PV-Anlagen zugebaut.)
- Sollte der Ausbau bis 2035 deutlich höher liegen, weil eine höhere Erzeugung benötigt wird, so lägen die Investitionskosten (bei einem jährlichen Zubau von 17 GW PV, 3 GW Offshore-Wind und 7 GW Onshore-Wind) bei derzeit 38 Mrd. € pro Jahr und bei 28 Mrd. € im Jahr 2035 (nicht in der folgenden Abbildung dargestellt).

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Der beschleunigte Aus- & Umbau des Stromnetzes stellt eine zentrale Herausforderung für 100 % Erneuerbaren dar

Wuppertal Institut

- Parallel zum starken Ausbau der Wind- und PV-Anlagen muss auch das Stromnetz aus- und umgebaut werden, um mit veränderten Stromflüssen zurechtzukommen.
- Viele Szenariostudien betonen, dass der Ausbau der Erneuerbaren mind. einen Aus- und Umbau des Übertragungsnetzes erfordert, wie er in den aktuellen Netzentwicklungsplänen (NEP) bis 2030/2035 beschrieben wird (z. B. ÜNB 2019).
- Dies erfordert gegenüber den letzten Jahren eine Beschleunigung des Aus- und Umbaus des Transportnetzes und eine ausreichende gesellschaftliche Akzeptanz.
- Das Ziel 100 % Erneuerbare bis 2035 dürfte die Herausforderung noch vergrößern.
- Der letztlich nötige Netzausbaubedarf hängt von vielen Faktoren ab, u. a. der zusätzlichen Flexibilitäten im System sowie dem regionalen Erneuerbaren-Zubau (ein stärkerer Zubau in Bayern würde z. B. den Netzausbau-Druck verringern).
- Ein Beispiel für den zu langsamen Netzausbau: Im Energieleitungsausbaugesetz (ursprünglich von 2009) sind 22 Projekte mit einer Gesamtlänge von ca. 1.800 km festgelegt. Sie sollten ursprünglich 2015 fertig sein. Nach dem 2. Quartal 2020 war aber mit 953 km erst knapp über die Hälfte realisiert (BNetzA 2020, BMWi 2019).
- Genauere Analysen der spezifischen Herausforderungen für den Aus- und Umbau des deutschen Stromnetzes bei Erreichung von 100 % erneuerbaren Energien bereits bis 2035 liegen unseres Wissens nach bisher nicht vor.

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Höhere Investitionen und insbesondere Sicherstellung ausreichender Akzeptanz sind für den Netzausbau zentral

Wuppertal Institut

- Auch die Verteilnetze müssen aus- und umgebaut werden, um die dezentralen Erneuerbaren-Anlagen sowie die neuen Stromanwendungen einbinden zu können.
- Für die gesamten jährlichen Kosten des deutschen Stromnetzes geht die Studie der dena (2018) von einem Anstieg bis 2050 (gegenüber heute) von ca. 50 % aus, die Studie für den BDI (2018) von einem Anstieg um 85 %. Allerdings steigen auch im Referenzszenario der BDI-Studie die Netzkosten in dem Zeitraum um 50 %.
- Konkret beziffert die Studie für den BDI (2018) die gesamten Stromnetzkosten für 2015 mit 20 Mrd. €. Dieser Wert steigt im 95 %-Pfad kontinuierlich auf 37 Mrd. € im Jahr 2050. Gegenüber der Referenz entstehen im Schnitt bis 2050 ca. 3 bis 4 Mrd. €/a an zusätzlichen Netzkosten. (Bei einer Beschleunigung der Transformation in Richtung 2035 wäre sicherlich mit höheren jährlichen Differenzkosten zu rechnen.)
- Die dena-Studie gibt die Netzkosten für 2015 mit 21 Mrd. € an. In TM95 steigen die Kosten bis 2050 auf 32 Mrd. €, in der Referenz auf 24 Mrd. € pro Jahr. Laut Studie liegen die Differenzkosten (vs. Referenz) bis 2050 bei ca. 7 Mrd. € pro Jahr.
- Es gibt wohl keine grundsätzlichen technischen oder ökonomischen Hürden beim Aufbau eines 100 %-Erneuerbaren-kompatiblen Stromnetzes bis 2035, vielmehr dürfte die Herausforderung darin liegen, planungsrechtliche Schritte zu beschleunigen und ausreichend Akzeptanz für den Netzausbau zu schaffen.

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Schaffung ausreichender Speicherkapazitäten stellt eine weitere zentrale Herausforderung für 100 % Erneuerbare dar

Wuppertal Institut

- Parallel zum beschleunigten Ausbau der Wind- und PV-Anlagen müssen auch zusätzliche Stromspeicher errichtet werden, um sicherzustellen, dass das Stromangebot jederzeit mit der Stromnachfrage in Deckung gebracht werden kann.
- Dabei ist zwischen unterschiedlichen Speicherbedarfen zu unterscheiden. Für den kurzfristigen Ausgleich von Angebot und Nachfrage (etwa Minuten bis Stunden) eignen sich neben Pumpspeicherkraftwerken auch Batterien, für den längerfristigen Ausgleich (Tage bis Monaten) eigenen sich chemische Speicher wie H_2-Speicher. Der tatsächliche zukünftige Speicherbedarf und die Aufteilung auf verschiedene Speicherarten sollte unter Beachtung der Wechselwirkungen im Gesamtsystem bestimmt werden (z. B. kann H_2 nicht nur als Langzeitspeicher dienen sondern zugleich auch als Endenergieträger in Verkehr und Industrie).
- In TM95 sind bis 2050 15 GW an stationären Batteriespeichern installiert, die über den Tag entstehende Ungleichgewichte zw. Angebot & Nachfrage ausgleichen. Im 95 %-Pfad (BDI 2018) ist die Batteriekapazität 2050 mit 20 GW etwas höher.
- Die FZJ-Studie (2019) stellt hingegen im Szenario 95 fest, dass dank eines hohen Anteils batterieelektrischer Fahrzeuge im Verkehr und unter der Annahme, dass sich 10 % von deren verfügbarer Speicherkapazität systemdienlich nutzen lassen, „kein nennenswerter Ausbaubedarf“ an zusätzlichen Batteriespeichern existiert.

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Stromspeicher: Insbesondere werden mit klimaneutralen Gasen betriebene Back-up-Kraftwerke sowie Batteriespeicher benötigt

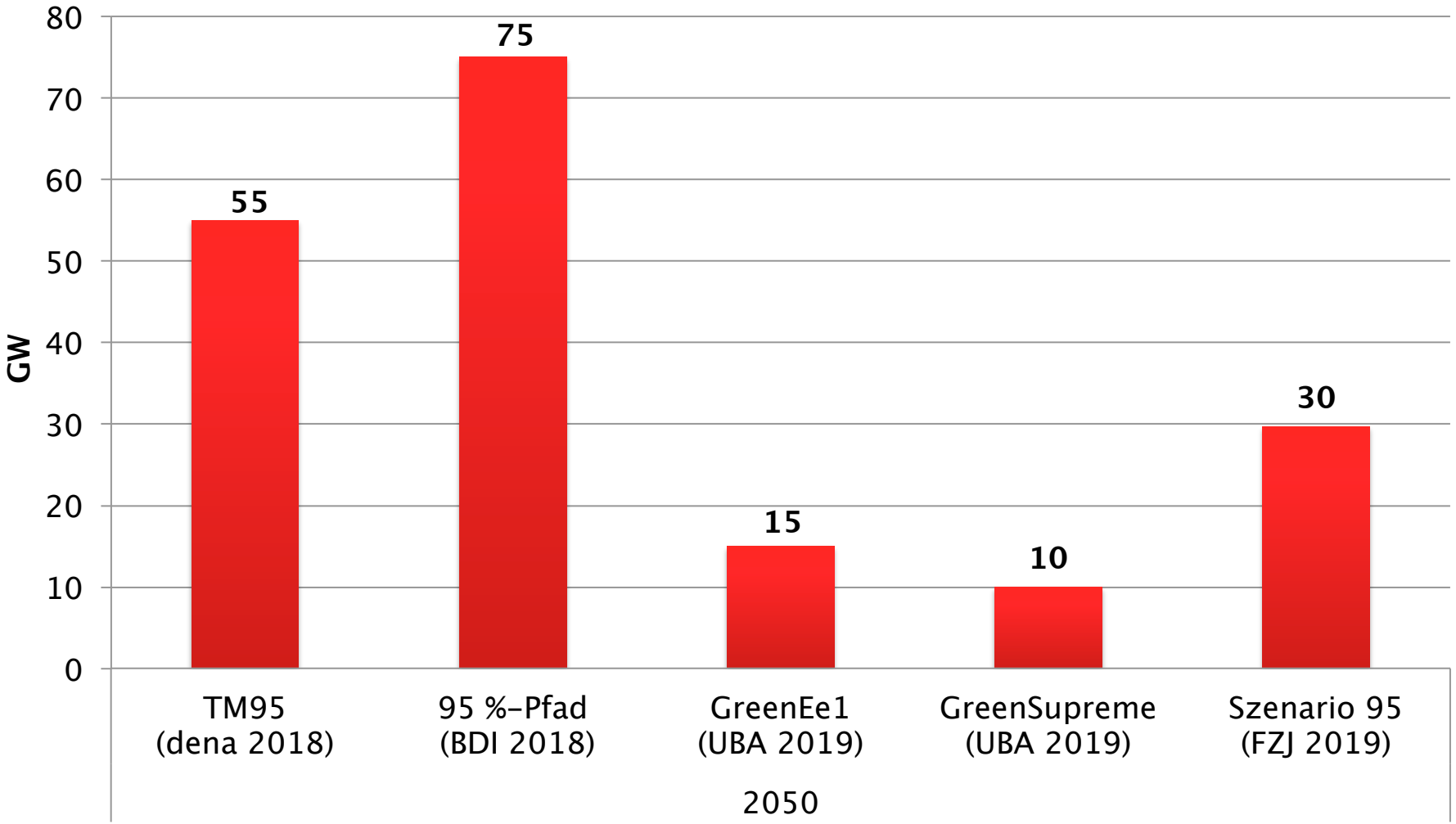
- Aufgrund der Möglichkeit der Massenherstellung von Batterien scheint ein evtl. notwendiger Zubau stationärer Batteriekapazitäten kein grundsätzliches Hemmnis darzustellen. Allerdings sollten mögliche (vorübergehende aber auch längerfristige) Engpässe bei der Bereitstellung der für Batterien benötigten Rohstoffe im Blick behalten werden (Pehlken/Albach/Vogt 2017). (Das UBA (2019) nimmt an, dass für stationäre Batterien nur ausrangierte Batterien aus E-Autos zum Einsatz kommen („second-life"-Ansatz) und somit kein zusätzlicher Ressourcenbedarf entsteht.)
- Zusätzlich werden in den betrachteten Szenarien zur Sicherstellung einer jederzeit ausreichenden Stromerzeugung Gaskraftwerkskapazitäten in Höhe von 10 bis 75 GW vorgesehen (s. nächste Abbildung), die bis 2050 ausschließlich mit Biogas, H_2 oder synthetischem Methan laufen, also mit klimaneutralen Gasen auf Basis von erneuerbaren Energien. (Gegenüber dem Einsatz von synthetischem Methan ist ein Einsatz von H_2 aufgrund niedrigerer Umwandlungsverluste bei der Erzeugung des Sekundärenergieträger energieeffizienter.) Der deutliche Unterschied zwischen den Szenarien bezüglich der benötigten Gaskraftwerkskapazität (10 bis 75 GW) kann an dieser Stelle ohne genauere Untersuchung nicht erklärt werden. Eine Studie von Energy Brainpool (2017b) kommt zu dem Schluss, dass für 100 % erneuerbare Energien 67 GW an Gaskraftwerken (betrieben mit klimaneutralem Gas) für eine sichere Stromversorgung nötig seien.

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Szenarien unterscheiden sich deutlich bezüglich der benötigten Back-up-Kraftwerkskapazitäten

Wuppertal Institut

Installierte Kapazität von Back-up-Kraftwerken für den Einsatz von klimaneutralem Gas in Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 (in GW)



Erneuerbaren-Ausbau

Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Investitionen in Back-up-Kraftwerke stellen einen relativ kleinen Kostenblock der Transformation dar

- Werden 450 €/kW für Gasturbinen für die H_2-Rückverstromung angenommen (s. ISE 2020b), so entstünden für eine angenommene benötigte Kapazität von 35 GW bis 2035 durchschnittliche jährliche Investitionskosten von rund 1 Mrd. €. Sollten 70 GW benötigt werden, stiege der jährliche Investitionsbedarf auf 2 Mrd. €. Dabei wird in dieser Rechnung unterstellt, dass die gesamte Kraftwerkskapazität bis 2035 neu errichtet werden müsste. Tatsächlich sind aber auch Umrüstungen bestehender Gaskraftwerke denkbar und günstiger (Siemens 2020).

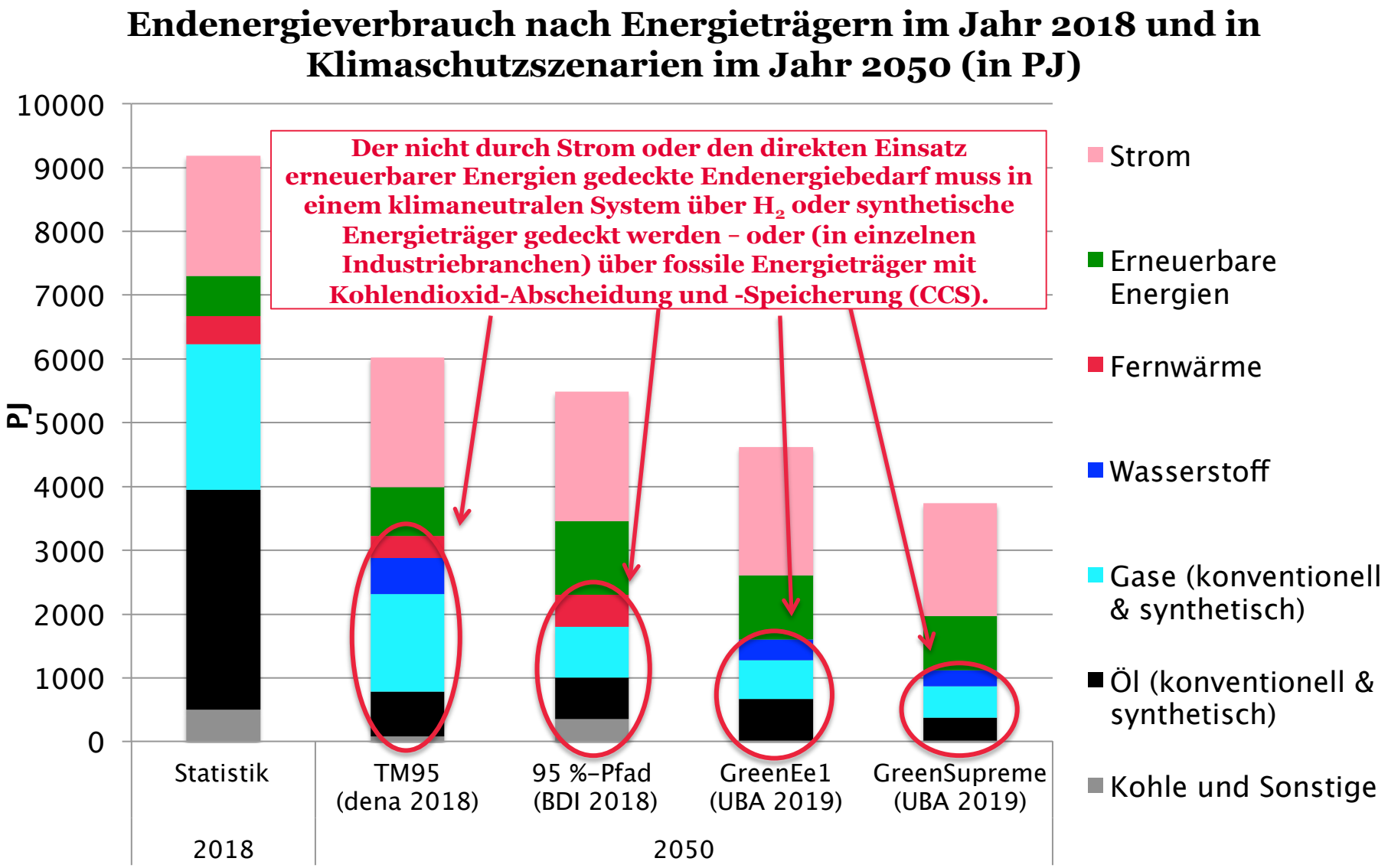
Wuppertal Institut

Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern

Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern

Für ein klimaneutrales Energiesystem ist die Verfügbarkeit von H_2 und/oder synthetischen Energieträger unerlässlich

Wuppertal Institut



Quelle: Statistik-Daten nach AG Energiebilanzen (2020b).

H_2 und Synfuels

Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern

Der genaue zukünftige Bedarf an H_2 und synthetischen Energieträgern hängt von vielen Faktoren ab

Wuppertal Institut

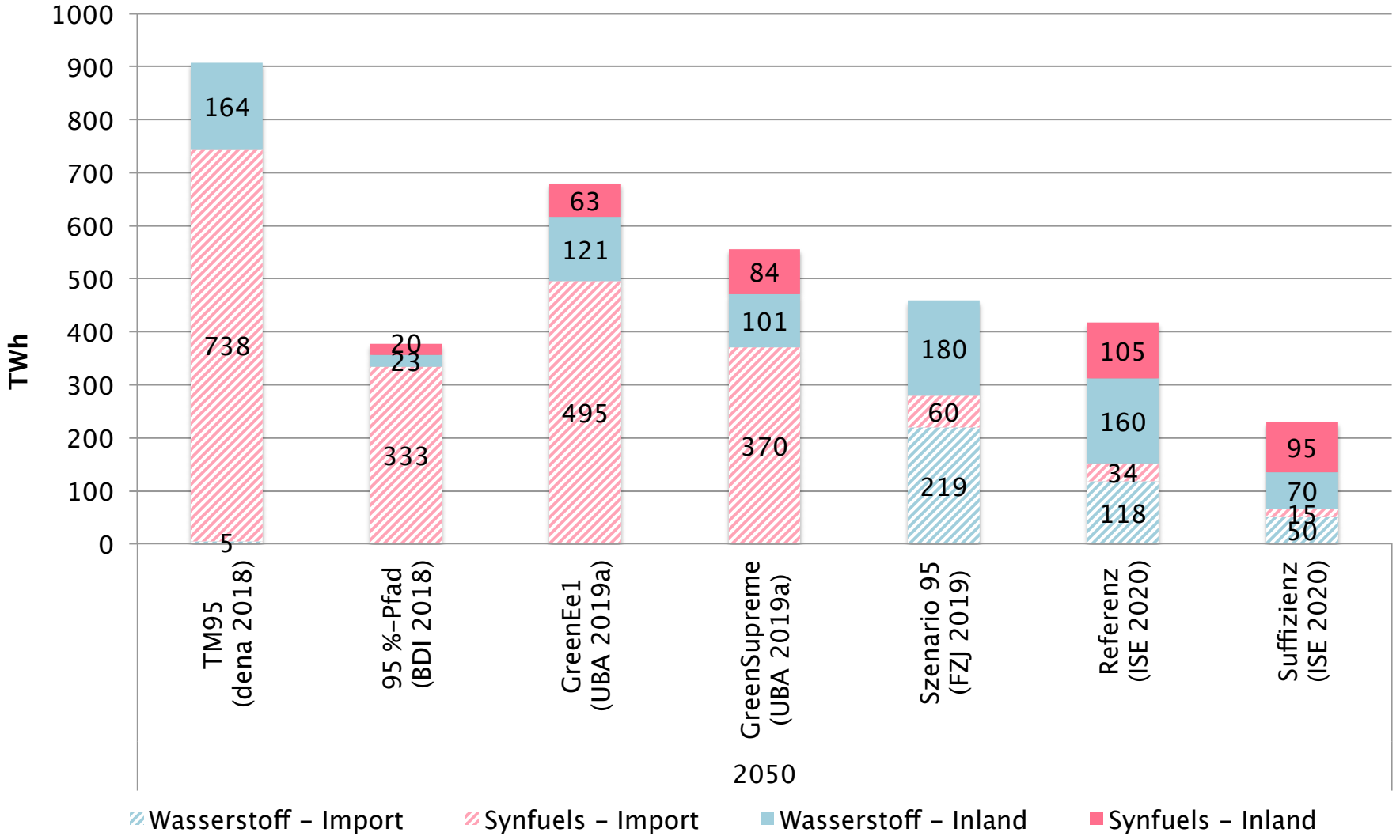
- Der Endenergiebedarf sinkt in den betrachteten Szenarien bis 2050 gegenüber 2018 um 30 bis 60 % (Effizienz und Suffizienz, s. Endenergiesektoren).
- Der Großteil des Endenergiebedarfs wird 2050 in den Szenarien direkt über Strom oder über die direkte Nutzung von erneuerbaren Energien gedeckt (z. B. Solarthermie, Umweltwärme, Biomasse für Wärme, Biokraftstoffe im Verkehr).
- Zieht man vom restlichen Endenergiebedarf die fossilen Energieträger ab, die in den Szenarien TM95 sowie 95 %-Pfad in industriellen CCS-Anlagen (z. B. für die Herstellung chemischer Produkte oder von Zement, je nach Szenario auch Stahl) genutzt werden, verbleibt 2050 ein Bedarf an klimaneutralen gasförmigen und flüssigen Energieträgern in Höhe von ca. 300 bis 650 TWh. Hinzu könnte ein Bedarf an Feedstock für die Chemieindustrie kommen (ca. 280 TWh, UBA 2019).
- Die Szenarien erwarten 2050 in der Summe einen Bedarf an H_2 und gasförmigen/ flüssigen synthetischen Energieträgern von ca. 400 bis 900 TWh (s. nächste Abb.). Nur bei starker Suffizienz könnte diese Menge auf gut 200 TWh reduziert werden.
- Die genaue Höhe ist u. a. abhängig vom jeweiligen Umfang in den Szenarien von Effizienz, Suffizienz, CCS-Nutzung im Industriesektor und Direktelektrifizierung.

Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern

In einem klimaneutralen Energiesystem könnte der Bedarf nach diesen Energieträgern zwischen 400 und 900 TWh/a liegen

Wuppertal Institut

Bedarf an H_2 und synthetischen Energieträgern nach ihrer Herkunft in Klimaschutzszenarien im Jahr 2050 (in TWh)



H_2 und Synfuels

Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern

Der Bedarf wird durch eine Mischung aus Importen und inländischer Erzeugung gedeckt (jeweilige Anteile noch unklar)

Wuppertal Institut

- Der Bedarf an H_2 und synthetischen Energieträgern muss entweder inländisch oder durch Importe gedeckt werden. In den meisten betrachteten Szenarien wird der Großteil dieses Bedarfs importiert (zumeist rund 280 bis 740 TWh). Überwiegend wird ein Import v. a. von synthetischen Energieträgern angenommen (niedrigere Transportkosten, leichter Ersatz fossiler Brenn- und Kraftstoffe), einige (v. a. neuere) Szenarien (FZJ 2019, ISE 2020b), nehmen aber auch einen höheren Import von H_2 gegenüber Synfuels an (geringerer Strombedarf, kein Bedarf an klimaneutralem CO_2).
- In den meisten Szenarien werden 2050 aber auch ca. 160 bis 265 TWh H_2 und/oder synthetische Energieträger innerhalb Deutschlands erzeugt (Strombedarf: ca. 220 bis 400 TWh), da dies zumindest beim H_2 als kostengünstiger angesehen wird (Schwierigkeit: Gesellschaftliche Akzeptanz für die entsprechende zusätzliche Stromerzeugung aus Erneuerbaren).
- Bei üblicherweise angenommenen ca. 3.000 VLS (s. dena 2018, FZJ 2019) würde dies einen Bedarf an Elektrolyseuren in Höhe von mindestens 70 bis 90 GW bedeuten (Ziel der Bundesregierung (2020): 10 GW bis frühestens 2035).

Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern

Die zukünftige Rolle von „blauem“ H_2 als mögliche Übergangslösung ist umstritten

- Für eine Übergangsphase wird auch die Nutzung von „blauem“ H_2 diskutiert, in den hier betrachteten Szenarien jedoch nicht angenommen. Dieser blaue H_2 wird – wie heute überwiegend – mit Erdgas erzeugt, ein Großteil des entstehenden CO_2 wird allerdings – anders als heute – abgeschieden und gespeichert (CCS). BefürworterInnen dieser Option verweisen auf die nach aktuellen Schätzungen zumindest bis etwa 2030 niedrigeren Produktionskosten gegenüber „grünem“ H_2 (BNEF 2020) und auf das Potenzial, als Ergänzung zu grünem H_2 schneller größere Mengen an klimafreundlichem H_2 bereitstellen und damit den Wandel auf der Nachfrageseite hin zu H_2 beschleunigen zu können.
- Die Kosten des Imports von synthetischen Energieträgern (und geringer Mengen an H_2) werden für das TM95-Szenario (dena 2018) für das Jahr 2050 mit 77 Mrd. € angegeben. Für den 95 %-Pfad (BDI 2018) lassen sich aus den Angaben in der Studie PtX-Importkosten im Jahr 2050 in Höhe von ca. 50 Mrd. € errechnen. Im Szenario 95 (FZJ 2019) liegen die Importkosten 2050 bei nur rund 40 Mrd. € (hier werden gegenüber den anderen beiden Szenarien geringere Importmengen angenommen sowie ein höherer Anteil an H_2 gegenüber Synfuels).
- Damit könnten die Importkosten für ein klimaneutrales Energiesystem etwa den heutigen Kosten für Energieträgerimporte entsprechen (63 Mrd. € im Jahr 2018, nach FZJ 2019).

Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern

Mind. 60 GW an Elektrolyseuren könnten benötigt werden, um den zukünftigen Bedarf an inländisch erzeugtem H_2 sicherzustellen

- Für die inländische H_2-Erzeugung werden 2050 in den Szenarien TM95 und Szenario 95 jeweils knapp über 60 GW an Elektrolysekapazitäten angenommen. Im Szenario 95 %-Pfad (BDI 2018) sind es hingegen nur 11 GW. Eine geringere H_2-Erzeugung kann prinzipiell durch höhere Importe kompensiert werden.
- Um mögliche Kostenvorteile der inländischen H_2-Erzeugung (infolge geringer Kapitalkosten und der fehlenden Notwendigkeit eines relativ teuren H_2-Transports, s. Schindler 2019) zu nutzen und die Unsicherheit über Importverfügbarkeit im Jahr 2035 zu berücksichtigen, scheint ein deutlicher Elektrolyseur-Zubau angebracht. Dies erfordert aber gleichzeitig einen starken heimischen Erneuerbaren-Ausbau.
- Grundsätzlich erscheint ein möglicherweise sinnvoller Zubau von Elektrolyseuren in Höhe von 60 bis 90 GW auch bis 2035 machbar, wenn in den nächsten Jahren diese Technologie erfolgreich hochgefahren wird (Massenherstellung möglich). Aufgrund des frühen Entwicklungsstands und der derzeit wenigen Hersteller ist hierfür aber ein schneller und entschiedener Einstieg notwendig (da das Hochfahren bis zur Massenherstellung in großen Zahlen einige Jahre dauern wird).
- Sollten z. B. ab 2025 jährlich 6 GW an Elektrolyseuren in Deutschland errichtet werden, so betrügen die Investitionskosten hierfür jährlich rund 3,5 bis 4,1 Mrd. € (angesetzt sind hierbei die angenommenen Kosten nach ISE 2020b).

Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern

Ein Großteil des Bedarfs an H_2 & synthetischen Energieträgern wird zukünftig wohl aus verschiedenen Ländern importiert

Wuppertal Institut

- Ebenso erfordert der Import von H_2 oder synthetischen Energieträgern eine frühzeitige Kooperation mit anderen Ländern und Unterstützung beim Aufbau der Anlagen (Erneuerbare und Elektrolyseure) sowie bei der Errichtung der notwendigen Import-/Export-Infrastruktur.
- Für den zukünftigen Import von grünem H_2 oder synthetischen Energieträgern kommen unter anderem Großbritannien, Skandinavien oder auch die Ukraine in Frage (v. a. große Windenergiepotenziale) sowie außerdem die Länder am Mittelmeer, inkl. der MENA-Region (Naher Osten und Nordafrika), z. B. Marokko oder Tunesien (große Solar- und Windenergiepotenziale). Aus diesen Ländern/ Regionen könnte ein H_2-Import über die günstige Pipeline-Option realisierbar sein. Aus anderen Ländern mit teils noch besseren Wind- und PV-Potenzialen (z. B. Australien, Chile, Argentinien) könnte perspektivisch auch ein H_2-Import per Schiff möglich sein, hier wären die Transportkosten (und mit dem Transport verbundenen energetischen Umwandlungsverluste) allerdings höher als bei einer Pipeline.
- Aufgrund der vielen unterschiedlichen Möglichkeiten, H_2 zu erzeugen, wird zukünftig insbesondere im Fall eines bedeutenden Imports von H_2 oder aus H_2 erzeugter synthetischer Energieträger ein zuverlässiges Zertifizierungssystem wichtig sein, um Klimaneutralität und andere Nachhaltigkeitsstandards gewährleisten zu können.

Versorgung mit H_2 und synthetischen Energieträgern

Durch Pipeline-Neubauten sowie Umwidmungen muss ein deutschlandweites H_2-Pipeline-Netz errichtet werden

- Neben der Erzeugung bzw. dem Import ausreichender Mengen an H_2 stellt die Umsetzung des notwendigen H_2-Pipeline-Netzes eine zentrale Herausforderung für einen schnellen Umstieg auf H_2 in den Endenergiesektoren dar.
- Der Aufbau dieses Netzes könnte mit Verbindungen großer industrieller Nachfragezentren (z. B. in NRW) und den wahrscheinlichen Hauptquellen von H_2 (Norddeutschland, ggf. auch Rotterdamer Hafen) starten (Lechtenböhmer et al. 2019).
- Teilweise wird eine Umwidmung nicht mehr benötigter Erdgas-Pipelines möglich sein (geringe Kosten, relativ schnelle Realisierung), Teile des Transport- und Verteilnetzes werden aber auch neu zu errichten sein.

Wuppertal Institut

Mögliche Kosten für das Erreichen von THG-Neutralität

Mögliche Kosten für das Erreichen von THG-Neutralität

Die höchsten Mehrinvestitionen (gegenüber Business-as-Usual) werden durch Erneuerbaren-Anlagen und Stromnetz erwartet

Wuppertal Institut

Kosten

- Für einige Bereiche wurden in den vorherigen Folien Investitionskosten für das Erreichen von THG-Neutralität bis 2035 abgeschätzt. Auf Grundlage dieser Zahlen lässt sich ableiten, wie viel höher (gegenüber einer BaU-Entwicklung ohne bzw. mit sehr wenig Klimaschutz) die Investitionen in die Energiebereitstellung im Zeitraum 2021 bis 2035 ausfallen müssten, wenn bis 2035 THG-Neutralität erreicht werden soll. So lassen sich näherungsweise die folgenden (durchschnittlichen) jährlichen Mehrinvestitionen (gegenüber der Referenz) für wichtige Bereiche abschätzen:
  - Wind- & PV-Anlagen: +15 bis +25 Mrd. €/a (Annahme: BaU-Zubau wie 2019)
  - Stromnetzausbau: +6 bis +14 Mrd. €/a (vereinfachte Annahme: Doppelt so hohe jährliche Zusatzkosten wie bei Klimaneutralität bis 2050)
  - Elektrolyseure: +3 bis +4 Mrd. €/a (Annahme: Kein Zubau in BaU)
  - Stationäre Batterien: +1 bis +6 Mrd. €/a (abgeleitet aus ISE 2020b)
  - Back-up-Kraftwerke: +1 bis +2 Mrd. €/a
- In Summe ergibt sich ein jährlicher Mehrinvestitionsbedarf von ca. 25 – 50 Mrd. €.
- Einzelne weitere Elemente (z. B. H_2-Infrastruktur) sowie Kosten auf Seiten der Nachfrage sind darin nicht enthalten. Auch ist zu beachten, dass in der Betrachtung noch keine Betriebskosten berücksichtigt sind, bei denen allerdings auch massive Ersparnisse durch den (weitgehenden) Verzicht fossiler Energieimporte auftreten.

Mögliche Kosten für das Erreichen von THG-Neutralität

Fürs gesamte Energiesystem wird für THG-Neutralität bis 2050 mit Mehrinvestitionen von rund 50 – 70 Mrd. € pro Jahr gerechnet

Wuppertal Institut

- Einige Studien haben in den letzten Jahren die Kosten für das gesamte Energiesystem (d. h. sowohl für die Umstellungen der Energieangebotsseite als auch für die Anpassungen in den Endenergiesektoren, z. B. Kosten für energetische Gebäudesanierungen) abgeschätzt, die für das Erreichen eines treibhausgasneutralen Energiesystems anfallen würden. Diese Kostenabschätzungen enthalten i. d. R. sowohl Investitionsausgaben (CAPEX) als auch Betriebskosten (OPEX) (Ausnahme: BDI (2018), dort nur CAPEX):

Studie	Szenario	Bezugsgröße	Betrachtungs-zeitraum	Zusätzliche Kosten/ Investitionen pro Jahr
dena (2018)	TM95	Differenzkosten gegenüber BaU*	2018-2050	+52 Mrd. €
ISE (2020b)	Referenz100	Differenzkosten gegenüber BaU*	2020-2050	+70 Mrd. €
	Suffizienz2035			+110 Mrd. €
BDI (2018)	95 %-Pfad	Mehrinvestitionen gegenüber BaU*	2015-2050	+50 Mrd. €
FZJ (2019)	Szenario 95	Differenzkosten gegenüber heute	2020-2050	+62 Mrd. €

*BaU = Business-as-Usual-Entwicklung (Szenario ohne ambitionierten Klimaschutz)

Mögliche Kosten für das Erreichen von THG-Neutralität

Die Mehrkosten für Klimaneutralität bis 2035 (vs. BaU) können vorsichtig auf knapp 3 % des BIP von 2019 geschätzt werden

Wuppertal Institut

- Die Mehrkosten für ein THG-neutrales Energiesystem bis 2050 (gegenüber einer Entwicklung, in der kein ambitionierter Klimaschutz betrieben wird) können auf Basis der vorliegenden Literatur vorsichtig (wegen Unsicherheiten bezüglich der Kostenentwicklungen sowie Schwierigkeit, eine angemessen BaU-Entwicklung zu definieren) auf durchschnittlich ca. 50 bis 70 Mrd. € pro Jahr geschätzt werden.
- Es ist davon auszugehen, dass die jährlichen Mehrkosten bis 2050 (und v. a. im Zeitraum bis 2035) höher liegen würden, wenn THG-Neutralität bereits bis 2035 realisiert werden soll. ISE (2020b) schätzt die jährlichen Mehrkosten bis 2050 für einen solchen Fall auf ca. 110 Mrd. €, vs. 70 Mrd. € für THG-Neutralität bis 2050. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Szenarien dieser Studie eine relativ hohe inländische Stromerzeugung und einen geringen H_2-/Synfuel-Import vorsehen. Dies dürfte ein Grund für die gegenüber anderen Studien höheren Kosten sein.
- Auch ist zu berücksichtigen, dass diese Kosten den Nutzen der Transformation nicht berücksichtigen. So werden v. a. die vermiedenen Klimaschäden – aber auch weitere Vorteile wie geringere Schadstoffemissionen, positive Arbeitsplatzeffekte und ausgelöste Innovationsdynamiken – nicht gegengerechnet.
- Werden 100 Mrd. € pro Jahr zusätzlich für das Erreichen von Klimaneutralität bis 2035 angenommen, so würde dies knapp 3 % des deutschen BIP und knapp 6 % der privaten Konsumausgaben von 2019 darstellen (Destatis 2020).

Wuppertal Institut

Skizzierung möglicher politischer Instrumente

Skizzierung möglicher politischer Instrumente

Änderungen an Höhe und Design der Ausschreibungen könnten den Erneuerbaren-Ausbau wieder deutlich beschleunigen

Wuppertal Institut

Politik-Instrumente

- Deutliche Anhebung der Ausschreibungsmengen von PV und Wind.
- Allerdings ist eine solche Anhebung der Ausschreibungsmenge zumindest bei der Onshore-Windenergie nicht ausreichend, da es dort derzeit eine Knappheit genehmigungsfähiger Projekte gibt. Im September 2019 haben Verbände der Energiewirtschaft gemeinsam mit Umweltverbänden verschiedene Maßnahmen vorgeschlagen, um den Onshore-Windenergieausbau wieder zu beleben (BDEW et al. 2019). Auch das Bundeswirtschaftsministerium hat einen Monat später einen 18-Punkte umfassenden Maßnahmenplan für eine Stärkung des Onshore-Ausbaus vorgelegt. Eine wichtige Maßnahme ist dabei eine stärkere Beteiligung der Kommunen am Betrieb von Windenergieanlagen.
- Eine höhere Akzeptanz könnte wahrscheinlich durch eine wieder stärkere Nutzung von – ausreichend hohen – Einspeisevergütungen erreicht werden (z. B. bei mittelgroßen PV-Anlagen sowie bei Onshore-Projekten mit wenigen Anlagen („De-minimis-Regelung")).

Skizzierung möglicher politischer Instrumente

Evtl. Diskussion über „radikale“ energiepolitische Maßnahmen notwendig, um THG-Neutralität bis 2035 realisieren zu können

Wuppertal Institut

- Nicht nur auf neuen, sondern auch auf bestehenden Gebäuden könnte (bei guter Eignung) eine Pflicht zur Installation von PV-Dachanlagen bis zu einem bestimmten Jahr eingeführt werden (bzw. Pflicht zur Bereitstellung dieser Flächen für die Installation von Anlagen durch Dritte/den Staat); eine solche Maßnahme sollte zunächst juristisch und bezüglich ihrer Auswirkungen auf die gesellschaftliche Akzeptanz untersucht werden.
- Ebenfalls denkbar: Aufbau einer staatlichen Gesellschaft, die (mit hoher Ausstattung) in Erneuerbare-Energien-Anlagen investiert, neue Vorhaben mit hoher Transparenz und der Beteiligung von Bürgerinnen und Bürger aussucht und umsetzt und deren Tätigkeit regelmäßig von einem wissenschaftlichen Beirat evaluiert wird.
- Beimischungsquote: Ab z. B. 2026 wird für die Gas- und Ölwirtschaft eine Beimischungsquote für CO_2-neutrale Kraftstoffe und Gase verpflichtend (sinnvollerweise auf europäischer Ebene). Diese Quote könnte z. B. um 10 %-Punkte pro Jahr ansteigen, so dass im Jahr 2035 dann 100 % der auf den Markt gebrachten gasförmigen und flüssigen Energieträger klimaneutral sind. Sie könnte sich auf die gesamte Öl- und Gasbereitstellung beziehen, also z. B. auch das Gas für Kraftwerke einschließen. Einhergehen müsste eine solche Quote mit der Definition und Prüfung von Nachhaltigkeitsstandards.

Skizzierung möglicher politischer Instrumente

Frühzeitige internationale Zusammenarbeit als wichtige Voraussetzung für erfolgreichen Klimaschutz

- Stärkung der europäischen Zusammenarbeit beim Ausbau der erneuerbaren Energien und Sicherstellung einer sicheren Stromversorgung; Deutschland sollte hier insbesondere mit Skandinavien, den Niederlanden, Frankreich und Polen eng zusammenarbeiten und nach gemeinschaftlichen Lösungen suchen, isoliertes Vorgehen vermeiden.
- Frühzeitige und intensive Kooperation mit in Frage kommenden Exportländern von H_2 und synthetischen Energieträgern (z. B. Marokko), weitgehende Finanzierung von Erneuerbaren-Anlagen und Elektrolyseuren in diesen Ländern sowie frühzeitige Umsetzung von Infrastruktur (z. B. H_2-Fernleitungspipelines).

Zusammenfassung wichtiger „Must Dos“

Zusammenfassung wichtiger „Must-Dos“

Wuppertal Institut

- Ein treibhausgasneutrales Energiesystem wird zu großen Teilen auf einem vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromsystem fußen.
- Für eine vollständige Deckung des zukünftigen Strombedarfs werden wohl mind. 700 bis 900 TWh pro Jahr aus erneuerbaren Energien erzeugt werden müssen; falls in Deutschland eine großmaßstäbliche H_2-Erzeugung stattfinden soll, könnte der Bedarf auch bei über 1.000 TWh pro Jahr liegen.
- Eine Erzeugung von 700 bis 900 TWh/a wird voraussichtlich eine installierte Kapazität an Wind-Onshore-, Wind-Offshore- und PV-Anlagen von in der Summe mindestens 300 GW notwendig machen.
- Eine Kapazität von deutlich über 300 GW wäre nötig (evtl. 500 bis 700 GW), falls stärker auf PV als auf Wind gesetzt werden soll und falls Importe von H_2 und/oder synthetischen Energieträgern nicht in großem Umfang möglich sein sollten bzw. minimiert werden sollen.
- Gleichzeitig müssen Speicherkapazitäten ausgebaut, das Stromnetz um- und ausgebaut und Back-up-Kraftwerke für die Verstromung von klimaneutralem Gas in einer Größenordnung von bis zu 60 bis 70 GW sichergestellt werden.

Must-Dos

Ausgewählte „key takeaways“ (II)

- Ein Import von Strom in großem Umfang wird gegenwärtig überwiegend nicht als plausibel eingeschätzt. Stattdessen wird in einer klimaneutralen Zukunft aller Voraussicht nach ein großer Teil der Endenergienachfrage nach flüssigen und gasförmigen Energieträgern durch den Import selbiger gedeckt werden.
- Bei einem ausreichenden inländischen Ausbau erneuerbarer Energien könnten aber auch rund 150 bis 200 TWh H_2 erzeugt werden. Dies könnte rund 70 bis 90 GW an inländischen Elektrolyseuren erfordern (weniger, falls höhere Volllaststunden der Elektrolyseure als rund 3.000 realisierbar sein sollten).
- Zusätzlich wird es wohl Importe von H_2 und synthetischen Energieträgern (inkl. Feedstock für die chemische Industrie) aus dem europäischen und evtl. auch außereuropäischen Ausland geben. Dieser PtX-Importbedarf könnte zwischen ca. 200 und 750 TWh liegen. Die entsprechenden Kooperationen und notwendigen Infrastrukturen gilt es frühzeitig aufzubauen.

Must-Dos

Wuppertal Institut

Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis (I)

AG Energiebilanzen (2020a): Bruttostromerzeugung, https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausdruck_strerz_abgabe_20200217.pdf

AG Energiebilanzen (2020b): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland, https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=awt_2018_d.pdf

Agora Energiewende (2020): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf

BDEW et al. (2019): 10 Punkte für den Ausbau der Windenergie, https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20190903_10-Punktefuer-Ausbau-Windenergie-Verbaende.pdf

BDI (2018): Klimapfade für Deutschland, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf

BMWi (2019): Netzausbau geht voran, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2019/08/kapitel-1-5-netzausbau-geht-voran.html

BMWi (2020): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland, https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=26

BNEF (2020): Hydrogen Economy Outlook – Key messages, https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf

BNetzA (2020): Leitungsvorhaben, https://www.netzausbau.de/leitungsvorhaben/de.html?cms_map=2

Bunderegierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1

Literaturverzeichnis (II)

Bundesregierung (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16

BWE (2020a): Windenergie in Deutschland – Zahlen und Fakten, https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/

BWE (2020b): Halbjahreszahlen Windenergie an Land: Zubau trotz deutlichem Anstieg zu gering – Knoten bei Genehmigung lösen, Repowering-Strategie umsetzen!, https://www.wind-energie.de/presse/pressemitteilungen/detail/halbjahreszahlen-windenergie-an-land-zubau-trotz-deutlichem-anstieg-zu-gering-knoten-bei-genehmig/

dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf

Destatis (2020): Bruttoinlandsprodukt für Deutschland 2019, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressekonferenzen/2020/BIP2019/pressebroschuere-bip.pdf?__blob=publicationFile

DIW (2020): Klimaschutz statt Kohleschmutz: Woran es beim Kohleausstieg hakt und was zu tun ist, https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.725608.de/diwkompakt_2020-148.pdf

Ember (2020): EUA price, https://ember-climate.org/carbon-price-viewer/

Energy Brainpool (2017a): Wie hoch muss ein wirkungsvoller CO_2-Preis sein?, https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Whitepapers/2017-09-27_Energy-Brainpool_White_Paper_Hoehe-CO2-Preis.pdf

Energy Brainpool (2017b): Kalte Dunkelflaute – Robustheit des Stromsystems bei Extremwetter, https://www.greenpeace-energy.de/blog/wp-content/uploads/2017/06/170629_GPE_Studie_Kalte-Dunkelflaute_Energy-Brainpool.pdf

Fath (2018): Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings, https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000081498/14534279

FÖS (2018): Was Braunkohlestrom wirklich kostet, https://foes.de/pdf/2018-06-25-GPE-Studie-Braunkohle.pdf

Literaturverzeichnis (III)

FZJ (2019): Wege für die Energiewende,
https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/_Documents/Downloads/transformationStrategies2050_studySummary_2019-10-31.pdf.pdf?__blob=publicationFile

ISE (2018): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien,
https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf

ISE (2020a): Nettostromerzeugung im 1. Halbjahr 2020: Rekordanteil erneuerbarer Energien von 55,8 Prozent,
https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2020/nettostromerzeugung-im-ersten-halbjahr-2020-rekordanteil-erneuerbarer-energien.html

ISE (2020b): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem,
https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf

LBST (2019): Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen,
https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/bericht_wasserstoffstudie_nrw-2019-04-09_komp.pdf

Lechtenböhmer et al. 2019: Grüner Wasserstoff, das dritte Standbein der Energiewende?
https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7409/file/7409_Lechtenboehmer.pdf

Pehlken/Albach/Vogt (2017):Is there a resource constraint related to lithium ion batteries in cars?,
https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11367-015-0925-4.pdf

pv-magazine (2019): Photovoltaik-Zubau in Deutschland erreicht nach Jahresendrallye knapp drei Gigawatt 2018,
https://www.pv-magazine.de/2019/01/31/photovoltaik-zubau-in-deutschland-erreicht-nach-jahresendrallye-knapp-drei-gigawatt-2018/

pv-magazine (2020): Photovoltaik-Zubau in Deutschland schrammt 2019 knapp an Vier-Gigawatt-Marke vorbei,
https://www.pv-magazine.de/2020/01/31/photovoltaik-zubau-in-deutschland-schrammt-2019-knapp-an-vier-gigawatt-marke-vorbei/

Schindler (2019): Gestehungskosten von PtX-Produkten im Vergleich zwischen Deutschland und Nordafrika,
https://www.energieagentur.nrw/content/anlagen/EA_paper_17_final.pdf

Literaturverzeichnis (IV)

Siemens (2020): „Im Wasserstoff liegt unsere Zukunft“, https://new.siemens.com/global/de/unternehmen/stories/energie/im-wasserstoff-liegt-unsere-zukunft.html

UBA (2013): Potenzial der Windenergie an Land, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf

UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf

UBA (2020a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_22-2020_nir_2020_de_0.pdf

UBA (2020b): Indikator: Emissionen von Treibhausgasen, https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten

UBA (2020c): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2019. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-01_climate-change_13-2020_strommix_2020_fin.pdf

ÜNB (2019): Netzentwicklungsplan Strom 2030, Version 2019, https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2030_V2019_2_Entwurf_Teil1.pdf

WWF (2018): Zukunft Stromsystem II – Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung, https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-II-Regionalisierung-der-erneuerbaren-Stromerzeugung.pdf

Industriesektor

Georg Kobiela

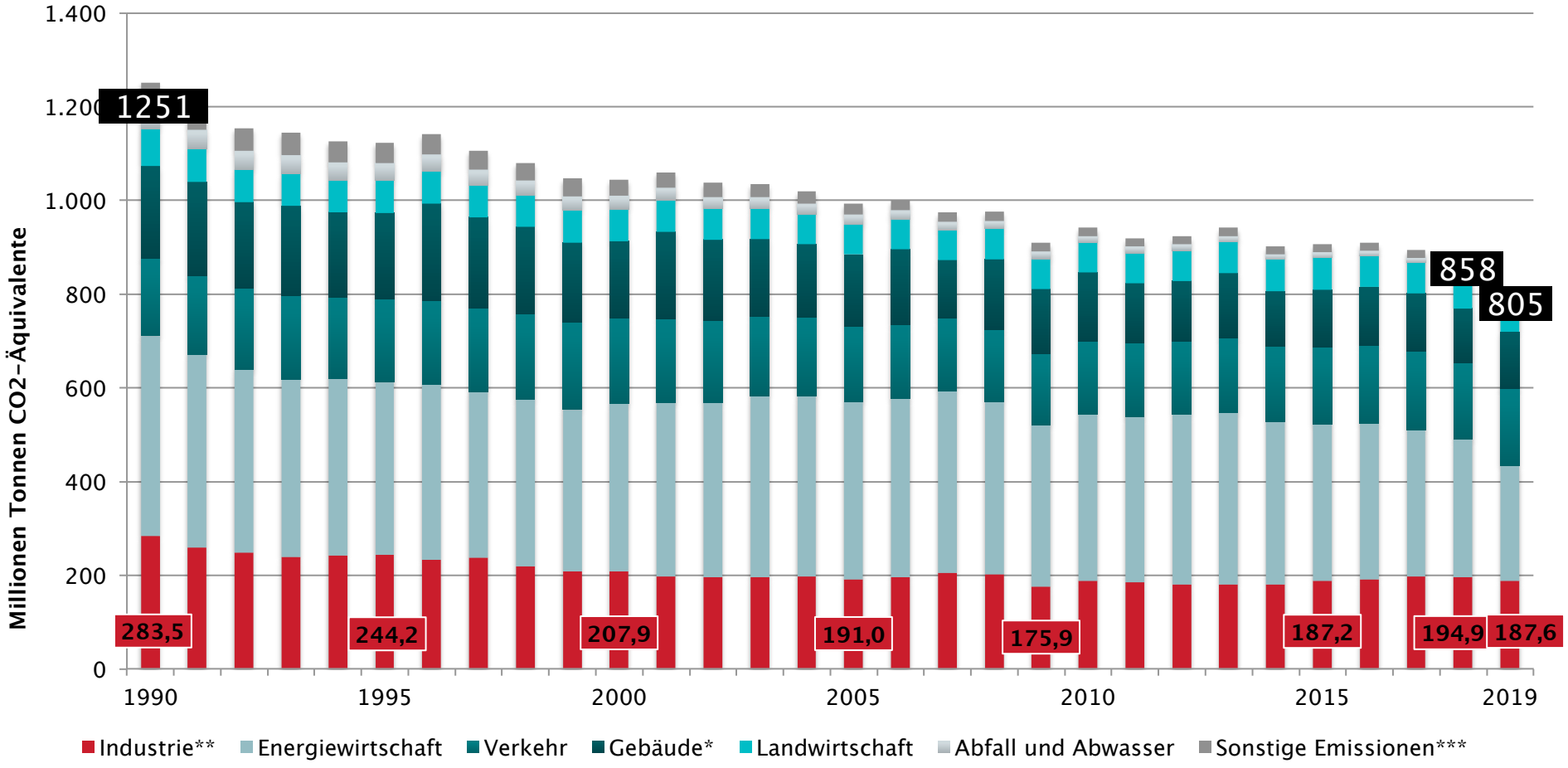
Die THG-Emissionen der Industrie	109
Zentrale Herausforderungen der Industrietransformation	112
Eisen- und Stahlerzeugung	116
Chemieindustrie	122
Zementindustrie	126
Zentrale Klimaschutzstrategien in der Grundstoffindustrie	129
Zusammenfassung wichtiger „Must Dos“	136
Skizzierung möglicher politischer Instrumente	142
Literaturverzeichnis	144

Wuppertal Institut

Die THG-Emissionen der Industrie

Bedeutung des Industriesektors für die deutschen Treibhausgasemissionen

Der Industriesektor verursacht ca. 22 % der deutschen THG-Emissionen



* umfasst Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und private Haushalte
** umfasst energie- und prozessbedingte Emissionen der Industrie
*** umfasst sonstige Feuerungen (u.a. Militär) & diffuse Emissionen aus Brennstoffe

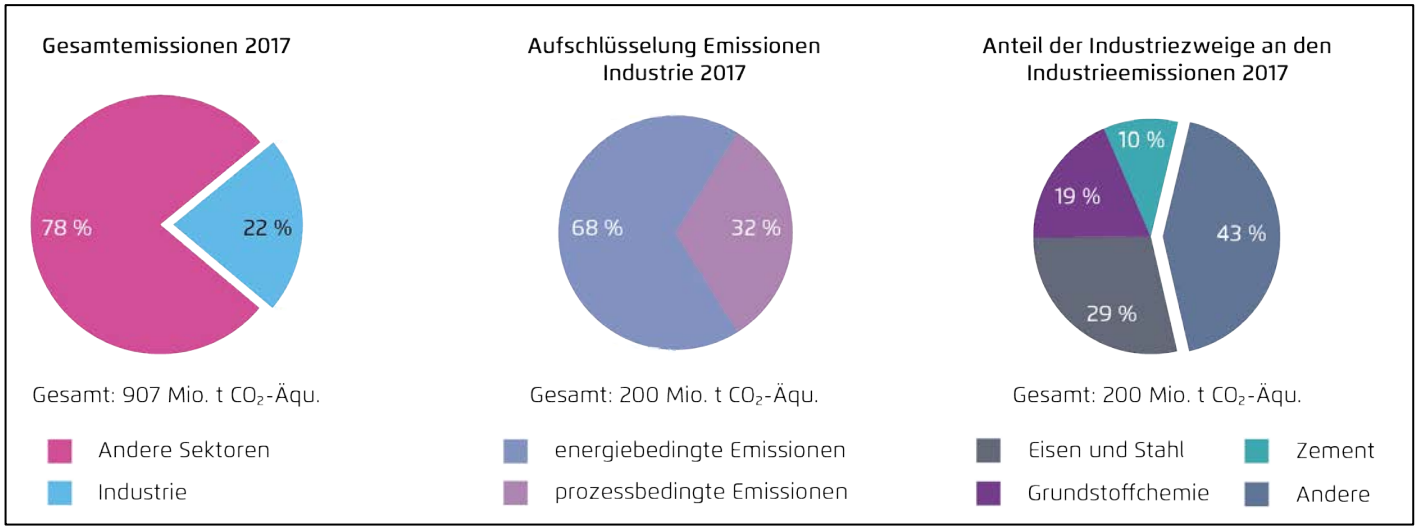
Quelle: eigene Darstellung nach UBA (2020): Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase. Unter: https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten (01.07.2020)

Sektorübersicht

Charakterisierung des Industriesektors

1/3 der Emissionen sind prozessbedingt. Stahl und Eisen, Grundstoffchemie sowie Zement verursachen die meisten Emissionen.

- Emissionen und Energiebedarfe des Industriesektors in Deutschland im Jahr 2017 in Mt CO_2-Äqu. (nach Quellenbilanz)



Branche	Direkte Emissionen in Mt CO_2-Äq	Davon prozessbedingte Emissionen in Mt CO_2-Äq	Endenergiebedarf in TWh
Eisen und Stahl	57,0	18,1	150
Nichteisen-Metalle und Gießereien	3,1	1,1	36
Grundstoffchemie	37,2	6,8	160
Zement	20,5	13,4	28
Kalk und Gips	7,4	4,8	8
Glas und Keramik	6,4	2,0	24
Zellstoff, Papier und Pappe	9,4	–	62
Hier aufgeführte Branchen der Grundstoffindustrie	**141,0**	**46,2**	**470**
Industrie gesamt (verarbeitendes Gewerbe)	**200**	**64,5**	**740**

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)

Wuppertal Institut

Zentrale Herausforderungen der Industrietransformation

Wuppertal Institut

GKV: Großskalige Kommerzielle Verfügbarkeit

Wesentliche zu überkommende Hindernisse & Risiken (1)

- Schlüsseltechnologien sind derzeit technisch noch nicht vollständig ausgereift
  - In aktuellen Prognosen nur teilweise bis 2035 verfügbar und aufgebaut
  - drastische Beschleunigungen hinsichtlich Entwicklung & Aufbau nötig, grundsätzlich (technisch) möglich

Stahl	Mögliche GKV
Direktreduktion mit Wasserstoff und Einschmelzen im Elektrolichtbogenofen	2025–2030 (evtl. Einstieg mit Erdgas)
Chemie	**Mögliche GKV**
Wärme- und Dampferzeugung aus Power-to-Heat (Wärmepumpen und Heizkessel)	Ab 2020
Grüner Wasserstoff aus Elektrolyse	2025–2035
Methanolsynthese aus Wasserstoff und CO/CO_2	2025–2030
Methanol-to-Olefin/-Aromaten-Route	2025–2030
Chemisches Recycling	2020–2030
Ammoniaksynthese aus Wasserstoff	Ab 2020
Zement	**Mögliche GKV**
CO_2-Abscheidung mit Oxyfuel-Verfahren (CCS)	2025–2030
CO_2-Abscheidung und Elektrifizierung der Hochtemperaturwärme am Kalzinator	2030–2035
Alternative Bindemittel	2020–2030 (je nach Produkt)

Weitere Verfahren

- **Stahl**
  - Hisarna®-Verfahren in Kombination mit CCS (2035-2040)
  - CCU von Hüttengasen aus integrierten Hochofenwerken (2025-2030)
  - Alkalische Eisenelektrolyse (nach 2050)
- **Chemie**
  - Elektrische Steamcracker (2035-2045)
  - Alternativ können benötigte Cracker-Kapazitäten über synthetische Energieträger (v.a. Wasserstoff) versorgt werden(ab ca. 2025)

Sektorbeschreibung

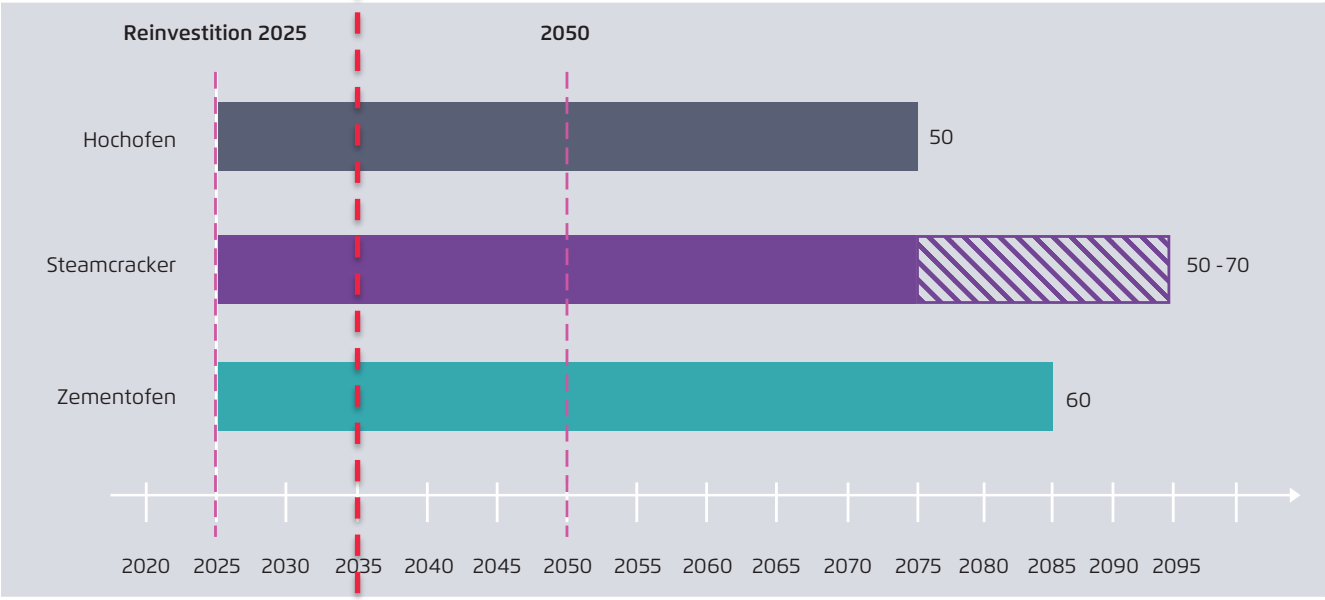
Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a); mit Daten von DLR, ifeu, LBST & DBFZ (2016)

Wuppertal Institut

Wesentliche zu überkommende Hindernisse & Risiken (2)

Lange Anlagenlebensdauern und (Re)investitionszyklen (50+ Jahre)

- Wichtiges Reinvestitionsfenster in den nächsten 10 Jahren
- Lebensdauer bestehender Anlagen reicht z.T. bis weit nach 2035



Unklare technologische Entwicklung inkl. Pfadabhängigkeiten

- Veränderungen müssen ausreichend tiefgehend erfolgen, um einen 100%-Minderungspfad zu ermöglichen
- vergleichsweise schnell umsetzbare Minderungspfade mit zu geringer Veränderungstiefe können Lock-Ins auf ungünstigere Pfade verursachen, z.B. der Bau von fossilbasierten Anlagen erhöhter Effizienz (z.B. hocheffiziente fossile Steam Cracker) und verstärkter Einsatz von CCS

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a); weitere Daten von Rootzén, J. & Johnsson, F. (2013)

Wuppertal Institut

EE: Erneuerbare Energien

Wesentliche zu überkommende Hindernisse & Risiken (3)

- Bislang keine ausreichenden Infrastrukturen für grünen Strom, Wasserstoff und CO_2
  - Zeit- und Kapital-aufwändiger Aufbau erfordert Koordination
- Gefahr des Carbon Leakage:
  - Herausforderung globaler Konkurrenz (nahezu) identischer Grundstoffe bei ggf. unterschiedlichen Kosten, falls die jeweiligen anderen Länder nicht ähnlich ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen umsetzen
  - Mögliche Lösungen: CO_2-Grenzausgleich (z.B. Border Adjustment Tax), Kompensation klimaschutzbedingter Mehrkosten (z.B. Carbon Contracts for Difference)
- Bislang keine ausreichende Verfügbarkeit von grünem Strom
  - THG-Neutralität zusätzlicher stromverbrauchender Anlagen nur gewährleistet, wenn für diese dann zusätzliche Kapazitäten an Erneuerbaren Energien aufgebaut werden
  - Große Bedarfssteigerung an elektrischer Energie, die ohne erhebliche Effizienzgewinne in allen Sektoren und massiven EE-Ausbau nicht über inländische EE-Kapazitäten allein zu decken ist und entsprechende Importe erfordern dürfte
  - Alternativ zum Strom- oder Wasserstoffimport könnten auch energieintensiv produzierte Grundmaterialien wie Methanol, Olefine und Eisenschwamm importiert werden, dies impliziert allerdings eine teilweise Verlagerung der Wertschöpfung
- Starke Abhängigkeit von Energie- und Rohstoffpreisen
  - Gefahr von Standortnachteilen, falls es zu begrenzter inländische Verfügbarkeit von (günstigem) Strom aus Erneuerbaren Energien kommen sollte. Entsprechend müssen diese Zusatzbedarfe in EE-Ausbaupfaden Berücksichtigung finden und Wasserstoff mindestens vorübergehend importiert werden.

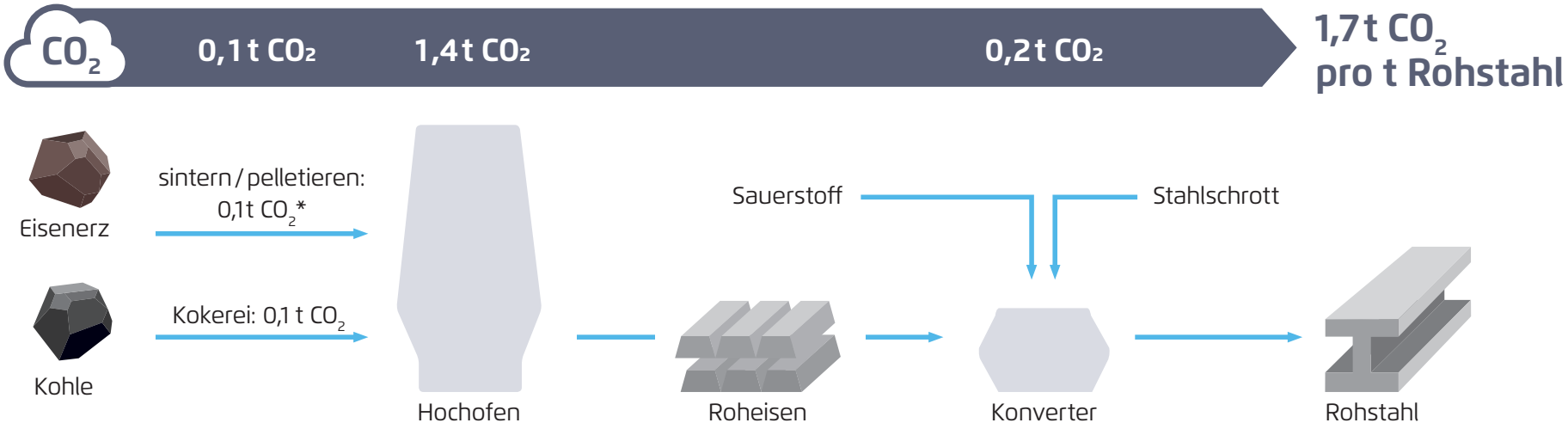
Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)

Eisen- und Stahlerzeugung

Wuppertal Institut

Charakteristik der Stahlbranche

Prozessschritte und CO_2-Emissionen der Rohstahlproduktion (Schema der derzeit dominierenden Hochofen-Konverter-Route)



*Annahme: Nutzung von Gichtgas aus dem Hochofen; daher keine zusätzliche Bilanzierung der CO_2-Emissionen

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)

Wuppertal Institut

Charakteristik der Stahlbranche

Direkte CO_2-Emissionen der Stahlindustrie 2017: ca. 57 Mio. t CO_2

Stahlproduktion 2017: 42,1 Mio. t Rohstahl (davon: Export von 21,7 Mio. t Walzstahl in Halbfertigprodukten)

Stahlnachfrage 2017: 41,0 Mio. t Walzstahl (davon: Import von 22,4 Mio. t Walzstahl in Halbfertigprodukten)

Reinvestitionsbedarf der Hochöfen bis 2030: 53 % der gesamten Primärerzeugungskapazität*

Direkt Beschäftigte 2017: 75.000

Verschiedene Stahlherstellungverfahren im Vergleich (Deutschland 2016)

Stahlherstellungs-route	Anteil an Stahlpro-duktion	Jährliche Produktion von Rohstahl	Vorwiegend genutzter Energieträger	Energie-bedarf pro t Rohstahl	Direkte CO_2-Emissionen pro t Rohstahl	Direkte CO_2-Emissionen gesamt
Hochofen-Konverter-Route**	70 %	29,5 Mio. t	Kohle	14 GJ**	1,7 t**	50 Mio. t
Elektrolichtbogen-ofen-Route***	29 %	12 Mio. t	Strom	2 GJ	0,13 t	2 Mio. t
Erdgasbasierte Direktreduktion**	1 %	0,6 Mio. t	Erdgas, Strom	13 GJ**	0,5 t**	0,3 Mio. t

Quellen: World Steel 2018, Mantzos et al. 2019 und eigene Berechnungen des Wuppertal Instituts, 2019
*Primärstahlrouten, jeweils 12 % Schrott angenommen **Sekundärstahlroute, > 95 % Schrottverwendung

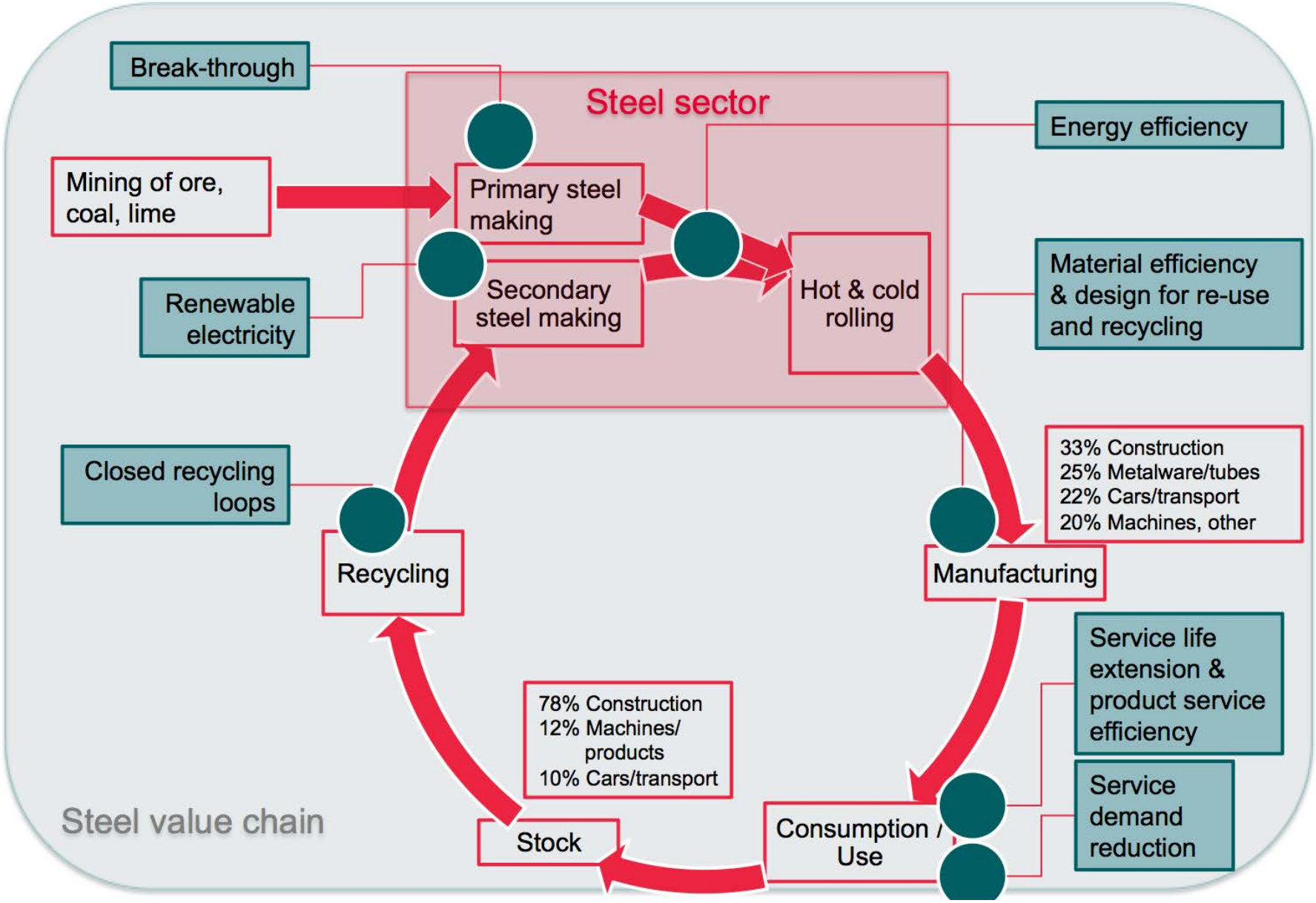
* Zur Erreichung von Klimaneutralität 2035 müssen sämtliche dieser Kapazitäten klimaneutralitätskompatibel ersetzt werden, auch wenn sie zunächst im Betrieb noch Treibhausgase ausstoßen würden (z.B. sofern zur Überbrückung bei der Direktreduktion zunächst Erdgas eingesetzt wird, mit Einsparung von 2/3 der THG-Emissionen und anschließend steigender Beimischung von H_2).

** Primärstahlrouten, jeweils 12 % Schrott angenommen *** Sekundärstahlroute, > 95 % Schrottverwendung

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a), Mantzos et al. (2019); World Steel (2018)

Transformation der Grundstoffindustrie

Die Stahl-Transformation kann durch verstärkte Kreislaufwirtschaft erleichtert werden



Quelle: Material Economics & Wuppertal Institut (2019)

Wuppertal Institut

DRI: Direct Reduced Iron, direktreduziertes Eisen
GKV: Großskalige Kommerzielle Verfügbarkeit

CO_2-arme Schlüsseltechnologien für eine (weitgehend) treibhausgasneutrale Stahlproduktion (1/2):

- Direktreduktion mit Wasserstoff und Einschmelzen im Elektrolichtbogenofen (CO_2 -97%, GKV 2025-2030)
  - **Einzige schon 2035 verfügbare Option für klimaneutralen Stahl ohne größere CCS-Aktivitäten**
  - Bereitstellung der benötigte Mengen grünen Wasserstoffs inländisch herausfordernd, zusätzlicher Strombedarf* wäre ca. 100-125 TWh** (für Lichtbogenöfen und für Wasserstoffelektrolyse für DRI bei heutiger Primärstahlproduktionsmenge, Biomethan dabei nur in dem Maß genutzt, wie es als Kohlenstoffquelle erforderlich ist, d.h. ca. 10% im DRI-Prozess)
  - Ca. 20 Mrd. € Capex für Ersatz d. deutschen Hochofenkapazitäten (DRI-Anlage, EAF-Ofen)***, + Opex
  - Ggf. (partieller) DRI-Import (Import von Eisenschwamm) und anschließende inländische Weiterverarbeitung im Elektrolichtbogenofen möglich – dies würde den inländischen Energiebedarf reduzieren, allerdings Wertschöpfung verlagern
  - Pipelines für Wasserstoff und Erdgas:
    - Wasserstoffversorgung ist zeitnah erforderlich (paralleler Aufbau mit Direktreduktionsanlagen)
    - Erdgas-Transportkapazitäten sind ausreichend vorhanden, Anschlussleistung der Standorte ist zu überprüfen, besonders für die ggf. benötigte Doppelversorgung (Erdgas und Wasserstoff) während der weiteren Umstellung
    - Lösung könnte eine von einem nahegelegenen Verteilerpunkt ausgehende, speziell für den jeweiligen Stahl-Standort ausgelegte Pipeline sein, in der Wasserstoff und Erdgas beliebig gemischt sein können
    - Finanzierung v. Erdgas-Übergangsprojekten bei gleichzeitigem fossilen Divestment ggf. fraglich, Roadmap nötig

* Für die DRI-Technologie sind große Mengen an CO_2-freiem Strom für die Produktion von *grünem* Wasserstoff notwendig (3,3 MWh/t Rohstahl bzw. 2,5 MWh bei teilweiser Nutzung von Methan). Ein Einstieg mit Erdgas ab 2025 ist daher wahrscheinlicher. Für eine Umstellung der heutigen Hochofenkapazitäten auf H2-DRI würde ein zusätzlicher Strombedarf von 74 TWh entstehen.
** Entspricht ca. 50% der aktuellen jährlichen EE-Energiebereitstellung in Deutschland
***bei DRI-Investitionskosten von ca. 750 € pro Tonne Produktionskapazität (Mantzos et al. 2019)

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a); Mantzos et al. (2019)

Wuppertal Institut

DRI: Direct Reduced Iron, direktreduziertes Eisen
GKV: Großskalige Kommerzielle Verfügbarkeit

CO_2-arme Schlüsseltechnologien für eine (weitgehend) treibhausgasneutrale Stahlproduktion (2/2):

- (kohlebasiertes) HIsarna®-Verfahren in Kombination mit CO_2-Abscheidung und Speicherung (CO_2 -86%, GKV 2035-2040)
  - zeitlich kritisch & nicht ausreichend für baldige Klimaneutralität
- CO_2-Abscheidung und Nutzung (CCU) von Hüttengasen aus integrierten Hochofenwerken (CO_2 -63%, GKV 2025-2030)
  - nicht ausreichend für baldige Klimaneutralität
  - CO_2 -63% bei Abscheideverfahren ohne Umrüstung bestehender Hochöfen; bei (kostenaufwändiger, den Lock-In verstärkender) Umrüstung sind auch höhere CO_2- Abscheidungsraten (bis zu 78 %) in der Hochofenroute technisch grundsätzlich möglich
  - Möglicher Lock-In der fossilen Hochofenroute
  - nicht ausreichend für baldige Klimaneutralität
- Alkalische Eisenelektrolyse (CO_2 -87%, GKV erst nach 2050)
  - Eisenerze werden in Natronlauge zu Roheisen reduziert und anschließend im Elektrolichtbogenofen zu Rohstahl geschmolzen, auf ein kohlenstoffhaltiges Reduktionsmittel kann verzichtet werden
  - könnte bei der ausschließlichen Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien weitgehend CO2-frei sein
  - Marktreife der Technologie wird erst nach 2050 erwartet. Ein signifikanter Beitrag zur Emissionsminderung bis 2035 oder 2050 in Deutschland ist somit aus heutiger Sicht nicht zu erwarten

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)

Wuppertal Institut

Chemieindustrie

Transformation der Grundstoffindustrie

Die Herausforderungen der Chemiebranche sind komplexer, zugleich existieren aber mehr Optionen

Wuppertal Institut

Charakteristik der Chemiebranche

Direkte CO_2-Emissionen der Grundstoffchemie 2017: 37,2 Mio. t CO_2

Chemieproduktion 2017: 12,3 Mio. t ***High Value Chemicals*** (HVC) (davon: 2,8 Mio. t HVC exportiert)

Chemienachfrage 2017: 11,9 Mio. t HVC (davon: 2,5 Mio. t HVC importiert)

Reinvestitionsbedarf in der Grundstoffchemie bis 2030: ca. 59 % der Gesamtkapazität (Steam Cracker, Ges.Kapazität von 6,9 Mio. t HVC pro Jahr)

Direkt Beschäftigte 2017: 350.000 Beschäftige (197.000 in der Grundstoffchemie)

- viele Prozessrouten und Produkte; besonders relevante Grundstoffchemikalien: Chlor, Olefine (v.a. Ethylen, Propylen), Aromaten/BTX (Benzol, Toluol, Xylole), Ammoniak; künftig zunehmend auch Methanol
- Integrierte Chemieparks, stark europäisch vernetzt inkl. Häfen und Pipeline-Systemen
- hoher Bedarf an (Hochtemperatur)Prozesswärme & Dampf
- stoffliche Nutzung von Kohlenstoff und Wasserstoff
- Bislang: Energiebedarf wird weitgehend über (auch stofflich genutzte) fossile Feedstocks mitgedeckt (v.a. Erdölfraktionen und Erdgas)
  - so dass für die Umwandlung in die gewünschten Produkte z.T. bislang sogar Energie frei wird
  - Bei Wechsel zu erneuerbaren Feedstocks muss diese Energie z.T. zusätzlich bereitgestellt werden (z.B. wenn CO_2 als Kohlenstoffquelle eingesetzt wird)

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)

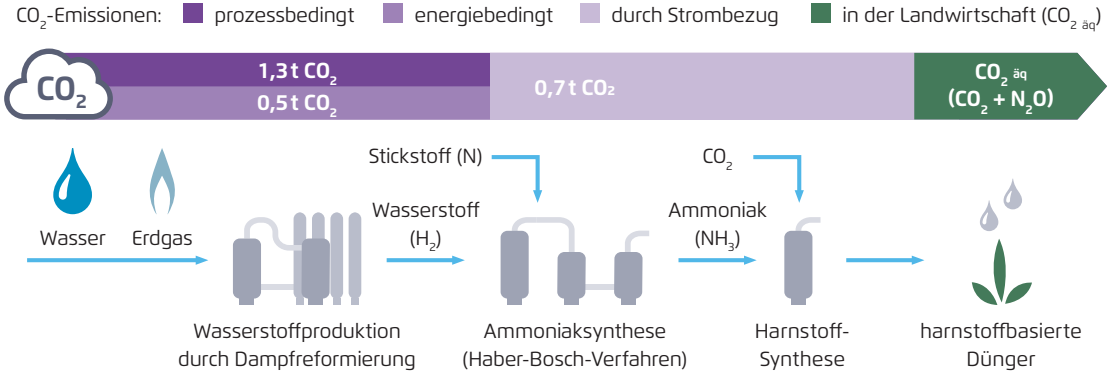
Transformation der Grundstoffindustrie

Während manche Routen v.a. grünen Wasserstoff benötigen, ist bei anderen eine tiefere Umgestaltung zur Kreislaufwirtschaft erforderlich

Wuppertal Institut

Charakteristik der Chemiebranche

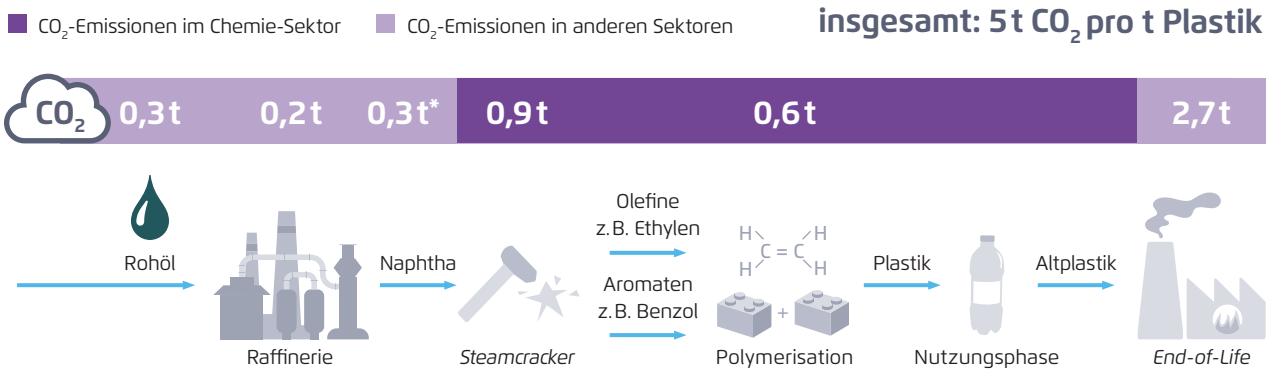
- Prozessschritte & CO_2-Emissionen der Ammoniaksynthese als Teil der Dünger-Wertschöpfungskette



Reduktion:
- *Agrarwende*

Defossilisierung:
- *EE-Wasserstoff*

- Prozessschritte und CO_2-Emissionen der Plastik-/Kunststoff-Wertschöpfungskette



* CO_2-Emissionen durch den Strombezug, der in diversen Prozessschritten der Plastikwertschöpfungskette benötigt wird.

Reduktion:
- *(Verpackungs)vermeidung,*
- *Kreislaufwirtschaft,*
- *chemisches Recycling*

Defossilisierung:
- *EE-Wasserstoff,*
- *(DAC)CCU*

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)

Wuppertal Institut

BTX: Benzol, Toluol, Xylole
GKV: Großskalige Kommerzielle Verfügbarkeit
MTA: Methanol-to-Aromates
MTO: Methanol-to-Olefine

CO_2-arme Schlüsseltechnologien für eine (weitgehend) treibhausgasneutrale Chemieproduktion

(Direkte CO_2-Emissionen der Grundstoffchemie 2017: 37,2 Mio. t CO_2)

- Wärme- und Dampferzeugung aus *Power-to-Heat* mit Elektrodenkesseln und Wärmepumpen (CO_2 -100%, GKV 2020), bei Anteil 65 %/35 % zusätzlicher Strombedarf ca. 55 Twh_{el}*
- Wasserstoffproduktion aus Erneuerbaren Energien (CO_2 -100%, GKV 2025-2035)
- Methanolsynthese aus Wasserstoff und CO (GKV 2025-2030) bzw. CO_2 (GKV 2030-2035),
  - Negativemissionen von -0,8 bis -1,4 t CO_2 pro t Methanol
- Alternative Verfahren wie die Methanol-to-Olefin/-Aromaten-Route (MTO/MTA) oder elektrochemische Prozesse zur Olefin- und Aromaten-Produktion (CO_2 -100%, GKV 2025-2030)
  - bei 100 % der heutigen Kunststoffproduktion (9,4 Mt Olefine und 2,9 Mt BTX in 2017) mittels MTO/MTA-Route, würde ein Strombedarf von ca. 319 TWh** (davon 302 TWh für *grünen* H_2, ggf. aus Import) entstehen.***
- Chemisches Recycling: Pyrolyse oder Gasifizierung von Altplastik für die stoffliche Nutzung (CO_2 -93%, GKV 2025-2030)
  - Bei aus heutiger Sicht möglicher (idealer) Kombination div. Verfahren könnte der EE-Strombedarf für eine weitgehend klimaneutrale Petrochemie auf heutigem Produktionsniveau ca. 104 TWh betragen
- Elektrifizierung der Hochtemperaturwärme an *Steamcrackern* (CO_2 -100%, GKV 2035-2045****)
  - Würde Effizienzverbesserungen gegenüber der energetischen Nutzung von Wassersoff / Synfuels zur Wärmeerzeugung bieten

* Entspricht ca. einem Viertel der aktuellen deutschen EE-Erzeugung
** ca. 150% der aktuellen deutschen EE-Erzeugung
*** Allerdings ist das unter der Annahme, dass keine synthetischen Kohlenwasserstoffe für die Chemieindustrie importiert, sondern diese inländisch aus Wasserstoff synthetisiert werden.
**** Technologien mit angenommener GKV nach 2035 werden als nicht für das 2035-Ziel relevant erachtet. Jedoch kann es ggf. zu stärker beschleunigten Entwicklungen kommen als angenommen.

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a; b); DLR, ifeu, LBST & DBFZ (2016); DECHEMA (2017)

Wuppertal Institut

Zementindustrie

Wuppertal Institut

Charakteristik der Zement- und Baustoffbranche

Direkte CO_2-Emissionen der Zementindustrie 2017: 20,5 Mio. t CO_2

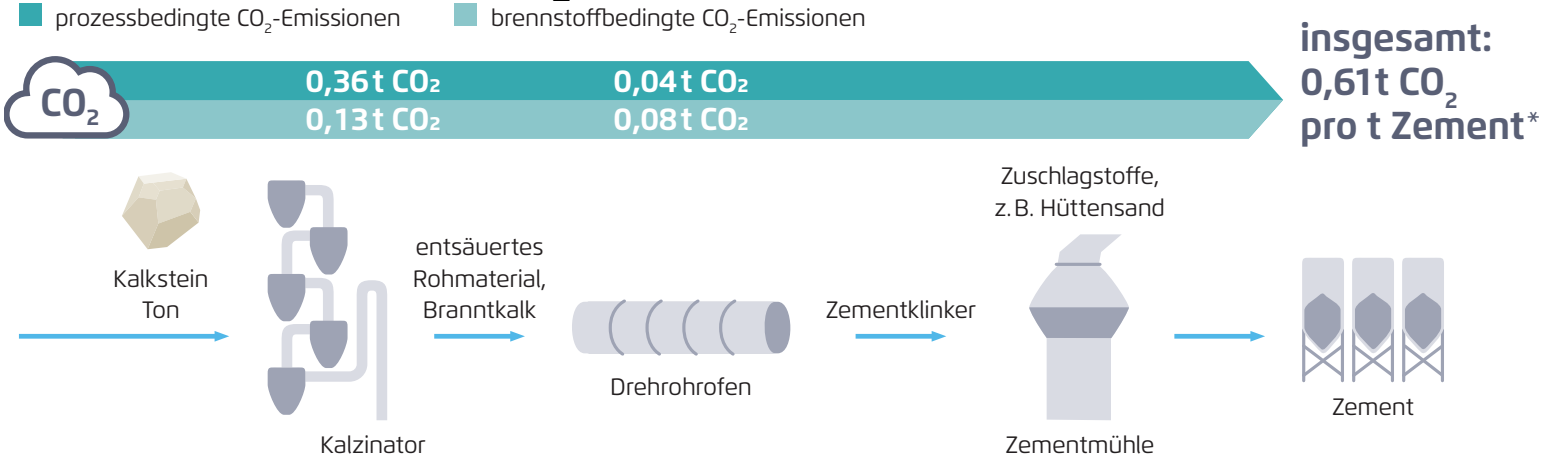
Zementproduktion 2017: 34 Mio. t Zement (davon 6,2 Mio. t Zement exportiert)

Zementnachfrage 2017: 28,8 Mio. t Zement (davon 1,6 Mio. t Zement importiert)

Reinvestitionsbedarf der Zementindustrie bis 2030: ca. 30 % der Gesamtkapazität (Öfen mit einer Kapazität von 10,5 Mio. t Zementklinker pro Jahr)

Direkt Beschäftigte 2017: rund 8.000 Beschäftigte

- Prozessschritte und direkte CO_2-Emissionen der Zementproduktion



*Annahme: Alle Angaben beziehen sich auf Zement mit einem Klinkeranteil von 74%.

- z.T. rel. dezentral im Vgl. mit Stahl und Chemie

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)

Wuppertal Institut

GKV: Großskalige Kommerzielle Verfügbarkeit

Schlüsseltechnologien für die Vermeidung der Emissionen bei der Zementproduktion

(ca. 2/3 der CO_2-Emissionen sind prozessbedingt, 1/3 energiebedingt)

- **Alternative Bindemittel (GKV 2020–30)**
  - Vermindern den Bedarf an CO_2-intensivem Zement bzw. Zementklinker bis ca. -20% und weisen um bis zu ca. 50 % geringere CO_2-Emissionen auf; dadurch könnten 10 % der aktuellen Emissionen der Zementproduktion vermieden werden
- **Alternativen im Baubereich:**
  - In einigen Anwendungen kann Beton auch vollständig durch klimaneutrale Baustoffe ersetzt werden (was zu einer weiteren Reduktion des Zementbedarfs führt), der Gesamtanteil am Baubereich ist allerdings unklar
  - Beispiele: Holzbau, Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen und Lehmbau; Zement-leichtere Bauweisen: Carbonbeton, Bauen ohne Keller, …

Verbleibende Emissionen durch die Herstellung von klassischem Zement können durch CCS stark reduziert werden:

- **Brennstoff-basierte Route: CO_2-Abscheidung mit dem Oxyfuel-Verfahren (CCS), (CO_2 bis zu -90 %, GKV 2025–2030)**
  - Fossile Brennstoffe könnten teilweise durch Wasserstoff, teilweise durch nachhaltige Biomasse ersetzt werden, CO_2 würde endgelagert
  - Ein Teil des Prozesses lässt sich voraussichtlich nur hierüber weitgehend klimaneutral gestalten (Sintern im Drehrohrofen)
  - höheres CO_2-Aufkommen als bei Elektrifizierung, dafür ggf. über nachhaltige Biomasse + CCS Negativemissionen möglich
- **(Teil)Elektrifizierung der Hochtemperaturwärme am Kalizinator + CCS (als Add-on: CO_2 bis zu -93 %, GKV 2030–35)**
  - Bietet zusätzlich zum Oxyfuel-Verfahren die Möglichkeit, einen Teil der Brennstoffe und damit verbundenen CO_2-Emissionen ganz zu vermeiden

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a), Cembureau (2020)

Wuppertal Institut

Zentrale Klimaschutzstrategien in der Grundstoffindustrie

Wuppertal Institut

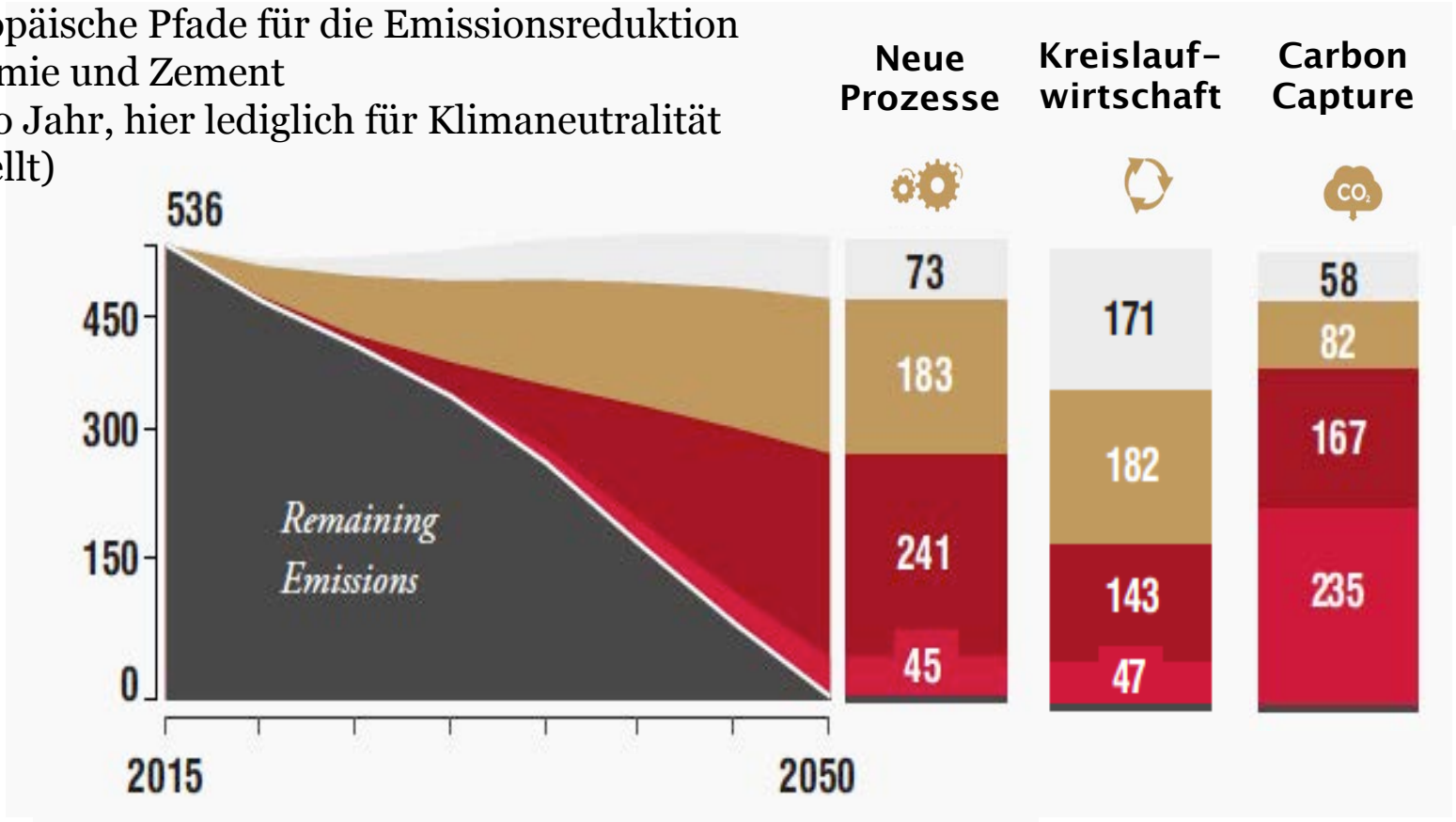
zentrale Strategien im Bereich der emissionsintensiven Industrien

- Verstärkte Kreislaufführung (Circular Economy)
- Substitution emissionsintensiver Güter
- möglichst weitgehende Minderung der Treibhausgasemissionen bei der Produktion aktuell emissionsintensiver Güter, u.a. durch:
  - Optimierung von Prozessketten
  - Umstellung der Verfahren auf den Einsatz erneuerbarer Energieträger und Rohstoffe
  - Technologien zur Umwandlung von Wasserstoff in Grundstoffchemikalien und synthetische (v.a. flüssige) Energieträger
  - Technologien zur Verwendung von CO_2
  - Technologien zum Auffangen von CO_2-Prozessemissionen für CCS und CCU

Transformation der Grundstoffindustrie

Emissionsreduktion in der Grundstoffindustrie hängt maßgeblich von Kreislaufwirtschaft ab

Mögliche europäische Pfade für die Emissionsreduktion für Stahl, Chemie und Zement
(in Mt CO_2 pro Jahr, hier lediglich für Klimaneutralität 2050 dargestellt)



- Unterschiedliche Ansätze können sich gegenseitig unterstützen
- Ein Fokus auf Kreislaufwirtschaft birgt die größten Minderungspotenziale mit dem geringsten Bedarf an neuen Prozessen und CCS

Materialeffizienz und zirkuläre Wirtschaftsmodelle
Materialkreisläufe und Substitution
Neue Prozesse
Carbon capture and storage
Restemissionen

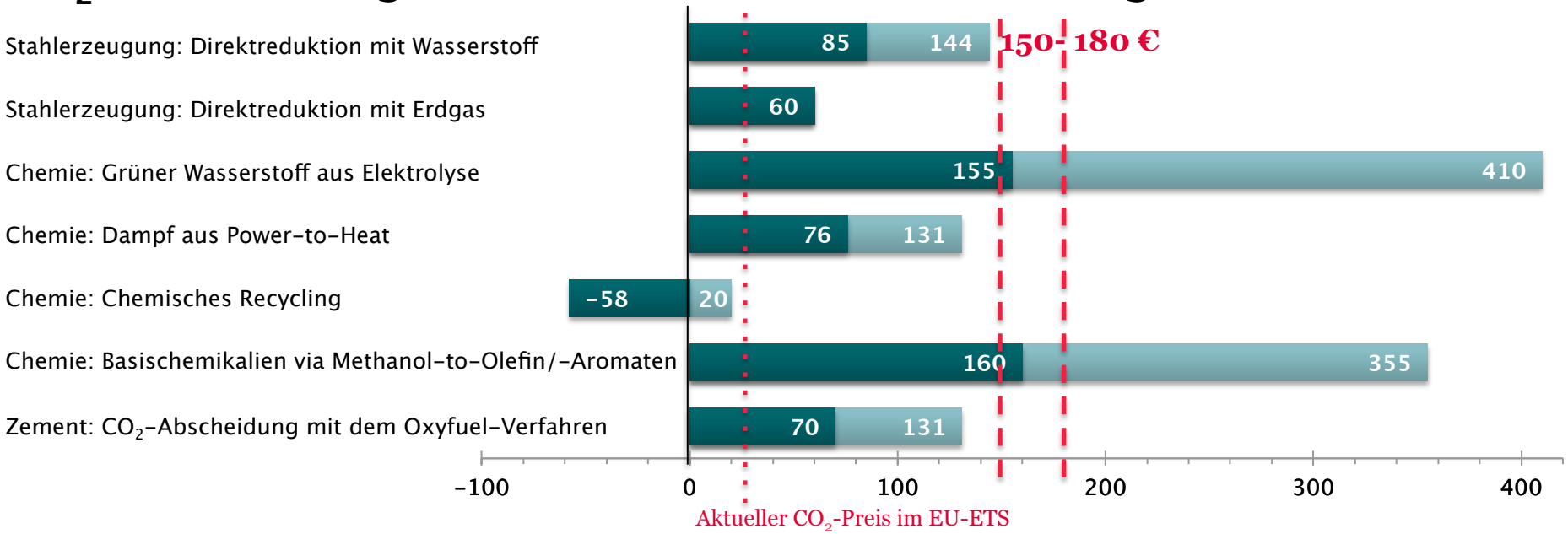
Quelle: Material Economics & Wuppertal Institut (2019)

Kreislaufwirtschaft

Transformation der Grundstoffindustrie

Ein langfristig klarer und hoher CO_2-Preis genügt noch nicht, der niedere Preis verhindert aber die Transformation

CO_2-Vermeidungskosten wesentlicher Technologien*



- Aktuelle CO_2-Bepreisung ist nicht ausreichend zum Anstoßen weitreichender Transformationen, benötigt flankierende Instrumente und langfristig-klare Kostenentwicklung
- Ein CO_2-Preis von ca. 150-180 € würde bei den getroffenen optimistischen Annahmen sämtlichen klimaneutralen Prozessen einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen, wobei damit noch nicht notwendigerweise alle Hürden für Aufbau und Betrieb der entsprechenden Anlagen überwunden sind.
- Ein wirksamer Schutz vor Carbon Leakage ist dabei essenziell

* Die CO_2-Vermeidungskosten sind jeweils gegenüber einer konventionellen Referenztechnologie berechnet und stark von den Annahmen zu Stromkosten abhängig, Details in den Erläuterungen auf der nächsten Folie. Die hier dargestellten Werte bilden das optimistische Szenario ab, während auch höhere Kosten anfallen können. Für weitere in dieser Studie behandelte Technologien ist eine großtechnische Anwendung bis 2030 nicht zu erwarten, da sie sich noch in einem frühen Stadium der Technologieentwicklung befinden. Für diese Technologien wurden wegen der hohen Unsicherheiten keine CO_2-Vermeidungskosten für das Jahr 2030 abgeschätzt. Ebenso sind keine Technologien berücksichtigt, die weniger als 90 %-ige Reduktion ermöglichen.
Die in der Grafik angegebenen Werte stellen Maximal- und Minimalwerte auf Grundlage der auf der nächsten Seite angegeben Annahmen dar.

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)

Kosten

Wuppertal Institut

Erläuterung zu den Vermeidungskosten (1/2)

- Aufgrund der erheblichen Unsicherheiten über die zukünftigen CO_2-Vermeidungskosten werden jeweils plausible Spannweiten angegeben, dabei wird das gegenwärtige (d.h. inflationsbereinigte) Preisniveau angesetzt.
- Die CO_2-Vermeidungskosten sind jeweils gegenüber einer konventionellen Referenztechnologie berechnet und stark von den Annahmen zu Stromkosten abhängig; für die Berechnung dieser Werte wurde eine Stromkostenspanne von 50 bis 60 Euro pro MWh angenommen. Ein Strompreis von 40 € pro MWh würde die Vermeidungskosten je nach Technologie und Energieintensität weiter verringern. Durch die hohe Anzahl von Volllaststunden (bis 8000 h / Jahr) verringert sich der Anteil der Anlagenkosten, jedoch können keine Niedrigpreisphasen für den Strombedarf genutzt werden.
- Folgende Referenztechnologien wurden betrachtet:

Neue Technologie	Referenztechnologie
Direktreduktion mit Wasserstoff bzw. Erdgas	konventionelle kohlebasierte Hochofen-Route
Grüner Wasserstoff aus Elektrolyse	Dampfmethanreformierung zur Aufspaltung von Methan in Wasserstoff und (emittiertes) Kohlendioxid
Dampf aus Power-to-Heat	erdgasbasierte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)
Basischemikalien via Methanol-to-Olefin/-Aromaten	bestehende (fossil betriebene) Naphtha-Steamcracker zur Olefinproduktion
Chemisches Recycling	weitgehend lineare, erdölbasierte Produktion inkl. angenommener Reinvestition in konventionelle Steamcracker, sowie heutiger Recyclingrate und End-of-Life-Verbrennung der nicht recycelten Kunststoffe („thermische Verwertung“)
CO_2-Abscheidung mit dem Oxyfuel-Verfahren	konventionelle Zementproduktion

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a; b)

Wuppertal Institut

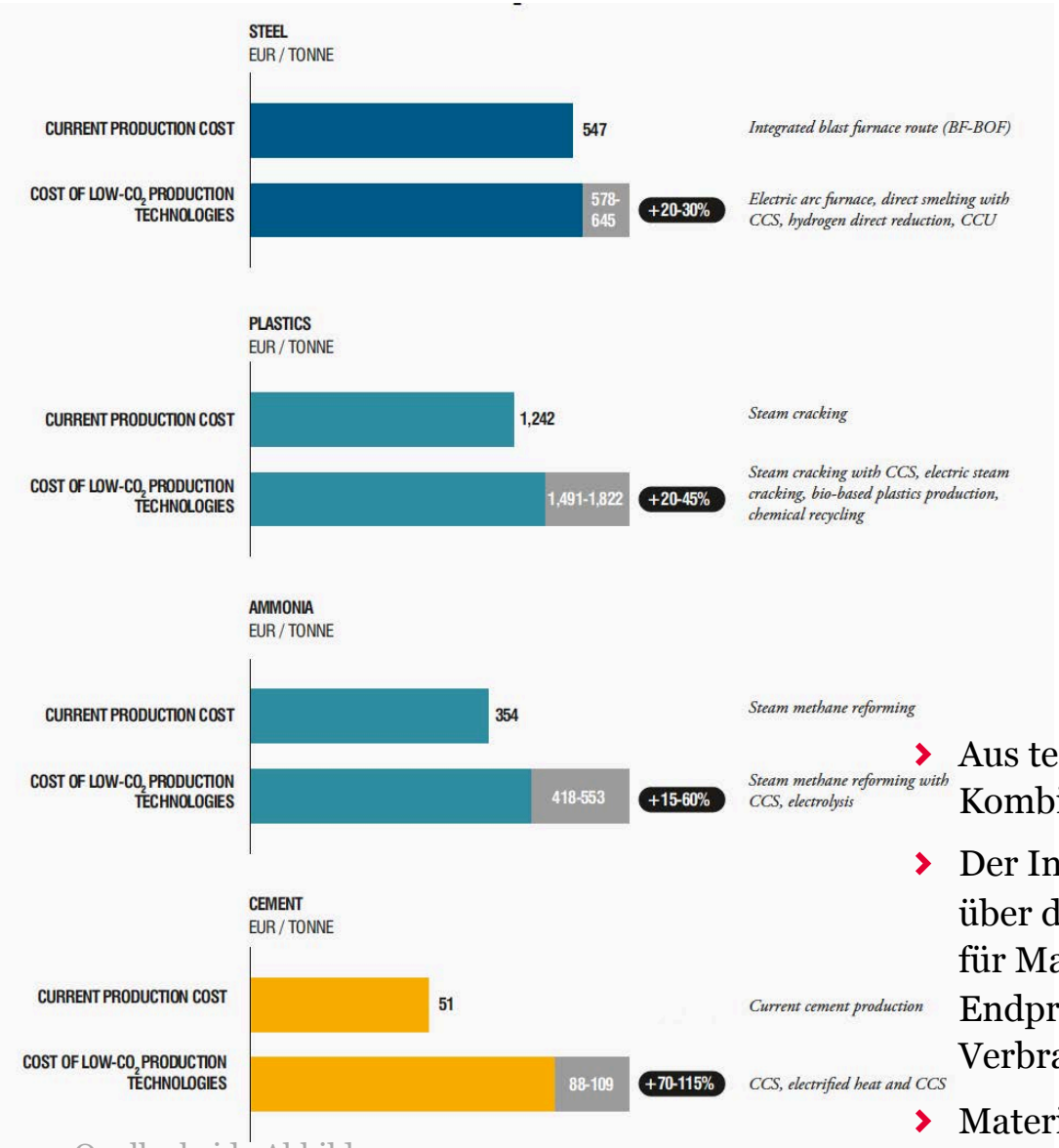
Erläuterung zu den Vermeidungskosten (2/2)

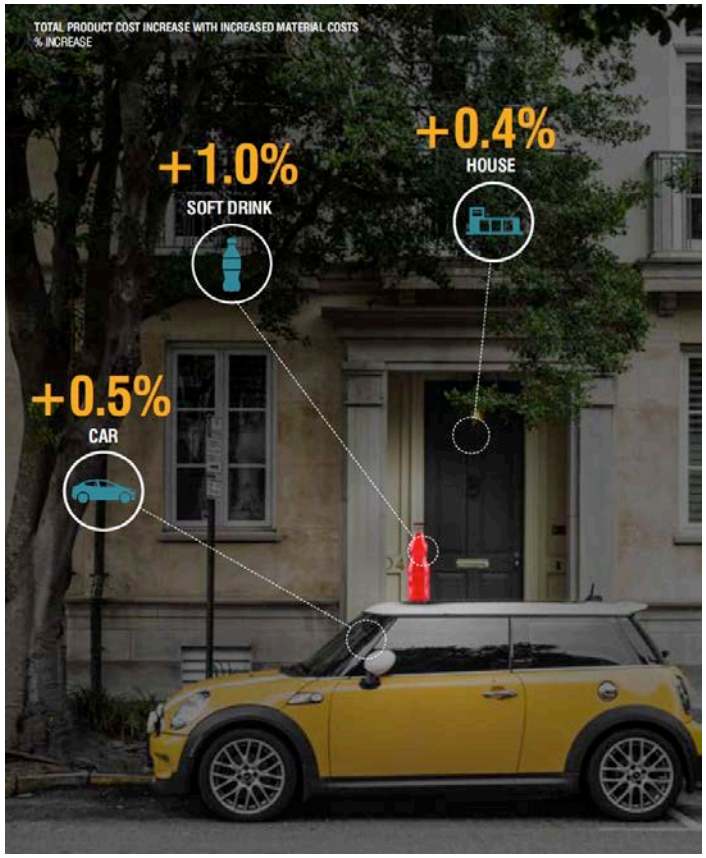
- Es wird davon ausgegangen, dass die derzeitigen Verteilungsregelungen wichtiger Strompreiskomponenten (insbesondere Netzentgelte und Umlagen für die Finanzierung von Erneuerbaren-Energien-Anlagen) zwischen verschiedenen Verbrauchergruppen sowie gegebenenfalls eine Strompreiskompensation für energieintensive Unternehmen der Grundstoffindustrie erhalten bleiben. Bestimmte Fördertatbestände, deren Beibehaltung mittel- bis langfristig nicht gesichert erscheint (wie zum Beispiel der derzeitige Bonus für die KWK-Erzeugung) fließen nicht in die Kostenberechnungen ein.
- Es werden lediglich die – in der Regel klar dominierenden - direkten Emissionen berücksichtigt, vorgelagerte Emissionen (die zum Beispiel bei der Förderung fossiler Energieträger oder bei dem Bau beziehungsweise der Errichtung der unterschiedlichen Anlagen anfallen) und nachgelagerte Emissionen – sofern nicht explizit aufgeführt – werden nicht berücksichtigt.
- Für die Darstellung einer möglichen zukünftigen Kohlenstoffkreislaufwirtschaft in der chemischen Industrie ist es teilweise sinnvoll, bestimmte Schlüsseltechnologien wie chemisches Recycling und methanolbasierte Verfahren gemeinsam zu betrachten.
- Vor 2035 ist mit höheren CO_2-Vermeidungskosten zu rechnen, da die Technologien bis dahin noch Lernkurven für Kostensenkungen zu durchlaufen haben.

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a; b)

Transformation der Grundstoffindustrie

Materialkosten steigen, Produktkosten bleiben weitgehend konstant





- Aus technischer und energiewirtschaftlicher Sicht ist eine Kombination von Strategien attraktiv
- Der Investitionsbedarf der Grundstoffindustrie steigt auf über das Doppelte des Bisherigen, die Produktionskosten für Materialien steigen erheblich, nicht aber die der Endprodukte (d.h. Kosten für Gesellschaft und Verbraucher sind relativ gering)
- Materialeffizienz und Zirkularität scheinen potenziell starke (und kosteneffiziente) Hebel zu sein, implizieren aber neue Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle.

Quelle: beide Abbildungen aus Material Economics & Wuppertal Institut (2019)

Kosten

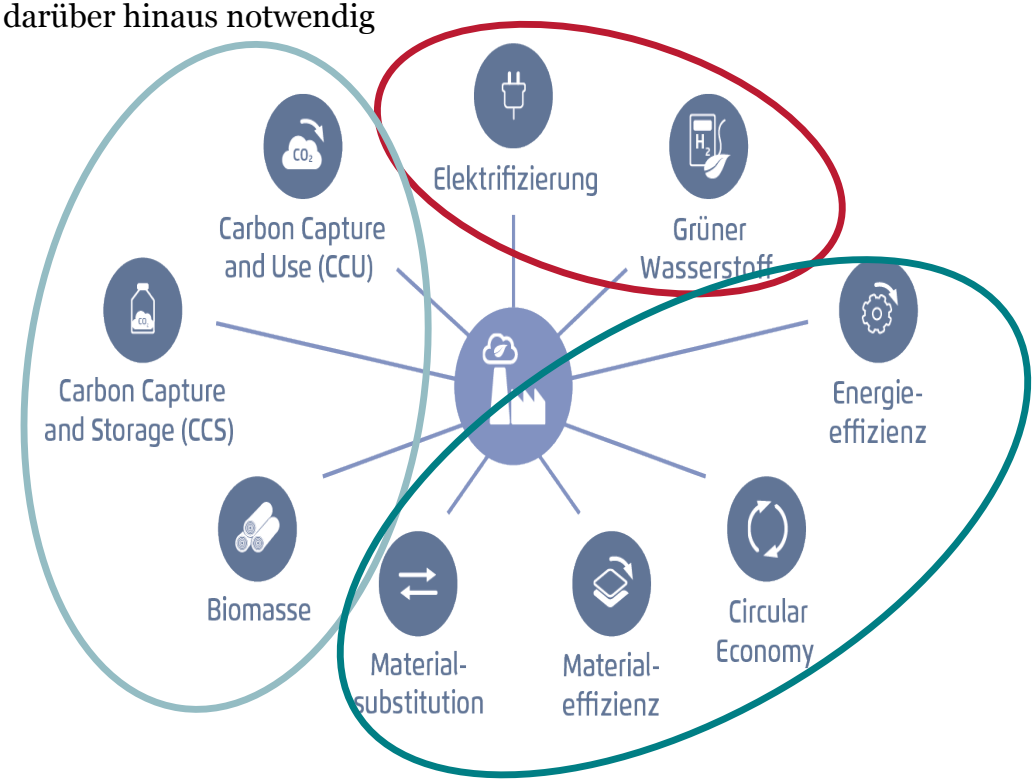
Zusammenfassung wichtiger „Must Dos“

Pfade der Industrietransformation, Must-Dos

Kreislaufwirtschaft etablieren, erneuerbare Energien ausbauen, Kohlenstoffkreisläufe schließen

Wuppertal Institut

- Eine Kombination unterschiedlicher Strategien ermöglicht eine klimaneutrale Industrie
- je weniger auf direkte und indirekte Elektrifizierung gesetzt wird, desto mehr Kreislaufwirtschaft und CCS wird benötigt
- Bislang diskutiert Optionen (z.B. in Agora Energiewende, Wuppertal Institut (2019)) stellen einen sehr ambitionierten Fahrplan dar, für THG-Neutralität 2035 wäre aber eine deutliche Beschleunigung darüber hinaus notwendig



1. Strategie: Kreislaufwirtschaft etablieren, Effizienz verbessern

- Circular Economy
- Energieeffizienz
- Materialeffizienz
- Materialsubstitution

2. Strategie: Direkte und indirekte Nutzung von Erneuerbarem Strom

- Direkte Nutzung mit Grünstrom
- Indirekte Nutzung von Strom durch grünen Wasserstoff

3. Strategie: Kohlenstoffkreislauf schließen

- Carbon Capture and Storage (CCS)
- Carbon Capture and Utilization (CCU)
- Biomasse

Must-Do

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a)

Pfade der Industrietransformation, Must-Dos

Defossilisierung, Anlagenbestandsumbau, Kreislaufwirtschaft und klimaneutrale Technologien

Wuppertal Institut

Must-Do

- **Defossilisierung der Industrie bzgl. Rohstoffen und Energieerzeugung**
  - Elektrifizierung von Industrie-Heizsystemen für Dampf und Wärme (besonders herausfordernd für Hochtemperaturwärme bis über 500°C)
  - Einstieg in Wasserstoffwirtschaft inkl. Infrastrukturaufbau (Elektrolyseure, Pipelines),
    - so dass schon spätestens 2025 erste technologisch reife H_2-basierte Prozesse großskalig betrieben werden können, inkl. anschließendem weiteren Ausbau
  - Ersatz der Industriekraftwerke (Kohle) durch Erneuerbare Energien und Power-to-Heat
  - CO_2-Transportnetz

- **Ausschließlich THG-neutralitäts-kompatible Neuinstallationen ab heute**
  - wegen langen Anlagen-Lebensdauern
  - auch wenn anfangs noch fossil betrieben

- **Kreislaufwirtschaft zur Reduktion der energieaufwändigen Primärmaterial-Produktion**
  - Reduce (Vermeidung & Effizienz, alternative Materialien), Reuse (Komponenten-Weiternutzung), Recycle (mechanisches Recycling durch Trennen und Aufbereiten & chemisches Recycling auf Molekülebene)
    - THG-Einsparungspotenziale bis 50% diskutiert (Material Economics & Wuppertal Institut, 2019)

- **Entwicklung & Einsatz von treibhausgasneutralen bzw. -leichten Technologien vorantreiben**
  - Entwicklung (Demo- und Pilotanlagen) fördern
  - Markteinführung & flächendeckender Aufbau -- > Markteinführungsmechanismen

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a); Material Economics & Wuppertal Institut (2019)

Pfade der Industrietransformation, Notwendigkeiten

Der Endergiebedarf steigt zwar nicht, es sind aber andere, erneuerbare Quellen in großem Maß nötig

Wuppertal Institut

WAS müsste darüber hinaus geschehen um 2035-Ziel zu erreichen

- Fokus auf Kreislaufwirtschaft, um Produktion von Primärmaterialien zu minimieren (Energie-Einsparungspotenzial von 20-50% je nach Branche)
- Wasserstoffbasierte Primärstahlproduktion, mit Biomethan-Beimischung für den benötigten Kohlenstoff
- Vollständig EE-synthetische Grundstoffchemie mit Wasserstoff, elektrischer Wärme/Dampferzeugung und CCU, sowie z.T. biogenen Rohstoffen (v.a. als Kohlenstoff-Feedstock)
- Zementvermeidung und CCU/S an restlichen Zementöfen

Übersicht über den Energiebedarf der Industrietransformation

	Strom absolut (in TWh)	H_2 absolut (in TWh)	Biomasse absolut (in TWh)	Endenergiebedarf (inkl. Umwandlungs-verlust) in TWh
Zement	22–28 // 9	4 // 12	5 // 14	33–40
Stahl	27	74	2–20 (Biomethan als Kohlenstoffquelle)	125
Chemie	100	100–300	1–50 (v.a. stofflich genutzt)	230–500
Industrie gesamt, inkl. Rest	200–300	320–400	100–134 (ohne BDI, 2018)	600–750

Basierend auf vorab dargestellten Szenarien, sowie Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a; b); Material Economics (2019)

- Sofern der Zusatzbedarf über Elektrizität bereitgestellt wird (für direkte Stromnutzung und zur Elektrolyse), ist dieser Zusatzbedarf damit vergleichbar mit dem aktuellen deutschen Elektrizitätsbedarf von ca. 600 TWh
- Sofern ein Teil der energieintensiven Grundmaterialien wie Methanol, Olefine oder Eisenschwamm importiert wird, sinkt der Elektrizitätsbedarf entsprechend

Pfade der Industrietransformation, Notwendigkeiten

Fokus auf Kreislaufwirtschaft bietet in allen Industriebranchen starke Möglichkeiten zur Energieeinsparung

Wuppertal Institut

Zusätzliche Maßnahmen

- **Wasserstoffbasierte Primärstahlproduktion**
  - ca. 75 TWh Wasserstoff für Direktreduktion zur Eisenerzeugung (entspräche ca. 100 TWh Elektrizitätsbedarf, sofern nicht importiert),
  - und 27 TWh Elektrizität (Für Direktreduktion und Weiterverarbeitung in Lichtbogenöfen) erforderlich
  - Durch starke Kreislaufwirtschaft ggf. um 1/3 reduzierbar
- **Vollständig EE-synthetische Grundstoffchemie mit Wasserstoff, elektrischer Wärme/Dampferzeugung und CCU, sowie z.T. biogenen Rohstoffen (v.a. als Kohlenstoff-Feedstock)**
  - bis zu ca. 300 TWh Wasserstoff (entspräche ca. 400 TWh Elektrizitätsbedarf, sofern nicht importiert), und 100 TWh Elektrizität erforderlich
  - ggf. durch starke Kreislaufwirtschaft und z.T. biogene Kunststoffrouten reduzierbar auf ca. 100 TWh Wasserstoff, d.h. Reduktion um 2/3 im Wasserstoffbedarf
- **CCU/S an Zementöfen**
  - Entweder weitgehende Elektrifizierung der Öfen, oder Wärmeerzeugung primär über Biomasse und Wasserstoff. Prozessemissionen über CCU/S aufzufangen, mit entsprechendem Energieaufwand
  - Erforderlich: ca. 17–24 TWh Elektrizität (inkl. CCS), dabei müssten ca. 11–19 Mt CO_2 endgelagert werden (direkt oder nach CCU);
  - alternativ ggf. bis 7 TWh Wasserstoff und bis 24 TWh Biomasse, dafür stark verringerter Elektrizitätsbedarf
- **„restliche“ Grundstoffindustrie und weiterverarbeitende Industrie:**
  - Elektrifizierung (ggf. auch über Wasserstoff) des Wärme- und Dampfbedarfs,
  - Ausrichtung auf Kreislaufwirtschaft
  - Effizienzmaßnahmen (zur Entlastung der Stromerzeugung)
- **Besonders Herausfordernd:**
- Erreichung der benötigten technologischen Reife von Schlüsseltechnologien (z.T. erst auf 2030er geschätzt)
- Aufbau der benötigten neuen Anlagen sowie Stilllegung der bestehenden noch funktionsfähigen Anlagen vor technoökonomischem End-of-Life
- Massiver Infrastrukturaufbau, v. a. die notwendigen H_2- und CO_2-Pipelines

Basierend auf vorab dargestellten Szenarien, sowie Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a; b)

Pfade der Industrietransformation, Implikationen

Die Ambitionssteigerung kann gelingen, birgt aber Risiken und erfordert aktive Gestaltung

Wuppertal Institut

Zusätzliche Maßnahmen

Implikationen und Risiken

- Hoher Bedarf an erneuerbar erzeugter Elektrizität und an Wasserstoff, welcher zumindest teilweise durch Importe gedeckt werden müsste
- Reinvestitionszyklen zu lange für THG-Neutralität 2035, manche aktuelle Anlagen müssten vor dem Ende ihrer Lebensdauer abgeschrieben werden
- Beschleunigung auf 2035-Ziel impliziert stärkere Eingriffe und Lenkungen, Einsatz teilweise nicht großskalig erprobter Technologien
- Erkundung durch technologieoffenen Markt zeitlich nicht möglich, d.h. Technologieoffenheit nicht umsetzbar
- Risiken technologischer Fehlentscheidungen, Risikoübernahme/absicherung notwendig
- Aufbau der Infrastruktur wird realen Bedarfen vorausgehen müssen (kann nicht „mitwachsen“)

- **Förderungsbedingte Produktionsausweitungen vermeiden, d.h. neben Einstiegen in klimaschonende Prozesse müssen auch Ausstiege aus klimaschädlichen Prozessen mit entsprechenden Stilllegungen erfolgen**
- **Komplexer Werkzeugkasten mit vielen einzelnen Ansätzen erforderlich, u.a. Carbon Contracts for Difference (Übernahme eines Teils der Mehrkosten in der Produktion durch eine Umlage) und Förderung von Nischenmärkten z.B. durch öffentliches Beschaffungswesen, soziale Flankierung von Stilllegungen**

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a; b)

Wuppertal Institut

Skizzierung möglicher politischer Instrumente

Transformation der Grundstoffindustrie

Wird eine Vielzahl von passgenauen Werkzeugen genutzt, wird der Umbau erleichtert

Wuppertal Institut

Politik-Instrumente

Wesentliche Markt-Werkzeuge zur Umsetzung der Maßnahmen

- **Einstieg in Breakthrough-Technologien beginnt unter günstigen Bedingungen ökonomisch attraktiv zu werden ab einem CO_2-Preis von 60-120 € (je nach Branche), 150-180 € erscheinen zielführend.**
- **Komplexer Werkzeugkasten mit vielen einzelnen Ansätzen erforderlich,**
- **CO_2-Preis allein nicht hinreichend wg. langsamen & komplexen Strukturen,**
- **auch Ausstiege aus klimaschädlichen Prozessen gestalten, mit entsprechenden (auch hinsichtlich technischer Lebensdauer vorzeitigen) Stilllegungen**
- **Mögliche Ansätze und Instrumente:**
- Externe Kosten internalisieren (z.B. über den CO_2-Zertifikatepreis (EU-ETS), kombiniert mit teilweise kostenloser Zuteilung, CO_2-Preis oder Klima-Umlage auf Endprodukte)
- Finanzielle Unterstützung (z.B. über Carbon Contract for Difference (= Weitgehende Übernahme der Mehrkosten in der Produktion durch eine Umlage) und grüne Finanzierungsinstrumente)
- Sicherung von Absatzmärkten für klimaschonende Produkte (z.B. durch Quoten für grünen Wasserstoff, Quoten für CO_2-arme Materialien, und nachhaltige öffentliche Beschaffung)
- Förderung der Kreislaufwirtschaft durch Standards (z.B. Änderungen in Bau- und Produktnormen und Standards für recyclebare Produkte)
- Regional/sozial flankierter bzw. ggf. sogar gesteuerter Ausstieg aus einzelnen bestehenden Technologien erforderlich

Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut (2019 a); Agora Energiewende & Becker Büttner Held. (2019)

Wuppertal Institut

Literaturverzeichnis

Literatur

Agora Energiewende, & Wuppertal Institut. (2019 a). Klimaneutrale Industrie. Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement (S. 236) [Studie]. Agora Energiewende, IKEM, BBH, Navigant, Wuppertal Institut. https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie/

Agora Energiewende, & Wuppertal Institut. (2019 b). Klimaneutrale Industrie. Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement (S. 76) [Studie]. Agora Energiewende, Wuppertal Institut. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/166_A-EW_Klimaneutrale_Industrie_Ausfuehrliche-Darstellung_WEB.pdf

Agora Energiewende, & Becker Büttner Held. (2019). Klimaneutrale Industrie. Juristische Kurzbewertung der Politikoptionen (S. 44) [Studie]. Agora Energiewende, IKEM, BBH, Navigant, Wuppertal Institut. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/165_A-EW_Klimaneutrale_Industrie_Juristische-Kurzbewertung_WEB.pdf

BDI (2018). Klimapfade für Deutschland. The Boston Consulting Group (BCG), Prognos, für den Bundesverband der Deutschen Industrie.

Cembureau. (2020). Cementing the European Green Deal. Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050 (S. 38). CEMBUREAU - The European Cement Association.

DECHEMA (2017). Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry [Technologiestudie]. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., for cefic The European Chemical Industry Council. http://www.cefic.org/Documents/RESOURCES/Reports-and-Brochure/DECHEMA-Report-Low-carbon-energy-and-feedstock-for-the-chemical-industry.pdf

DLR, ifeu, LBST, DBFZ (2016). Biokerosin und EE-Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft - von der Theorie zu Pilotvorhaben (Studie im Rahmen des Auftrags Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffe und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40; S. 193).

Mantzos, L., Wiesenthal, T., Neuwahl, F., & Rózsai, M. (2019). The POTEnCIA Central scenario: an EU energy outlook to 2050 (S. 346) [EUR - Scientific and Technical Research Reports]. Europäische Kommission. https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/potencia-central-scenario-eu-energy-outlook-2050

Material Economics & Wuppertal Institut (2019). Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry. Material Economics; Wuppertal Institut; Institute of European Studies, Vrije Universiteit Brussel.

Rootzén, J.; Johnsson, F. (2013): Exploring the limits for CO2 emission abatement in the EU power and industry sectors—Awaiting a breakthrough. Energy Policy 59443–458. doi: 10.1016/j.enpol.2013.03.057.

UBA (2020): Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase. https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten

Verkehrssektor

Thorsten Koska

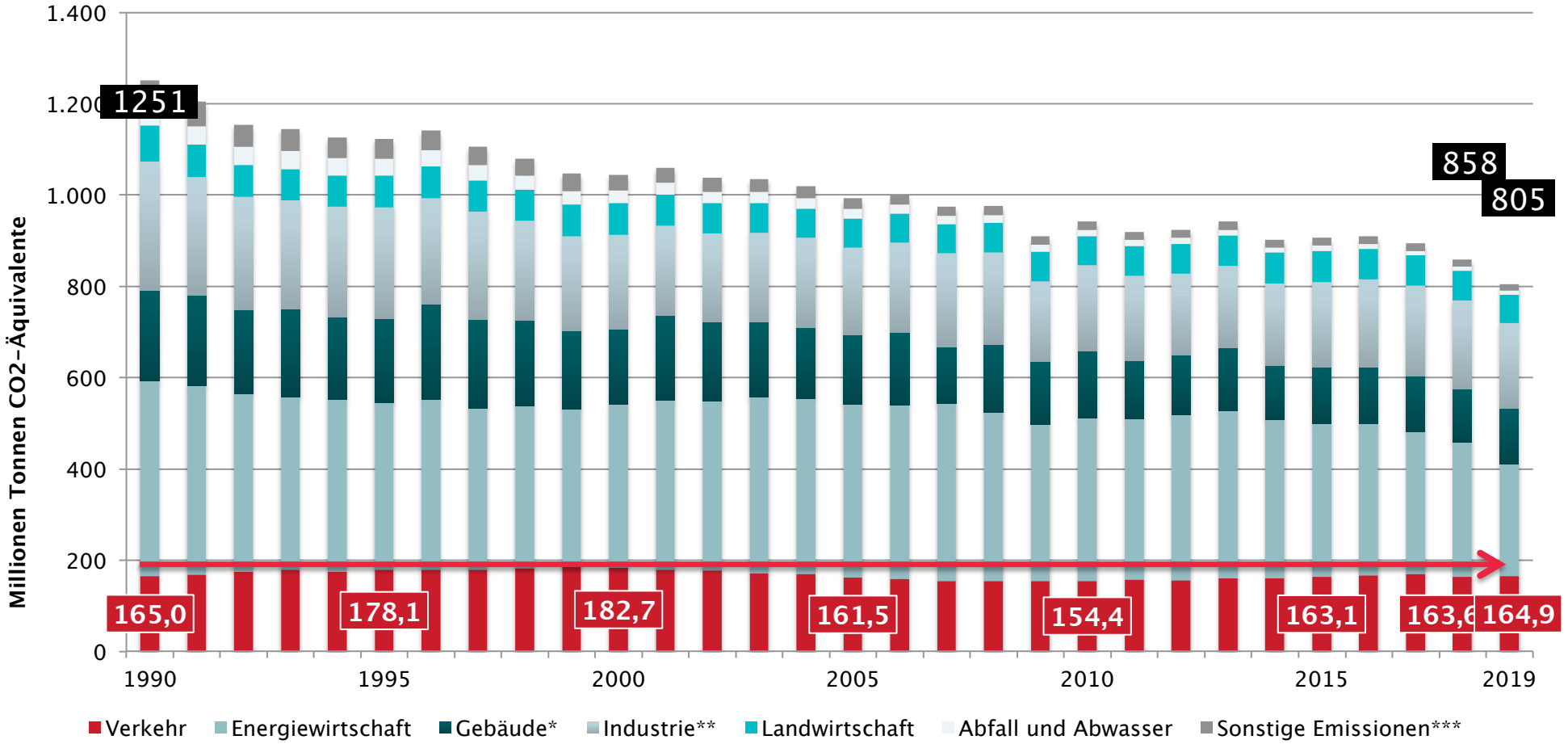
Die THG-Emissionen des Verkehrs 147
Zentrale Herausforderungen der Verkehrswende 149
Zentrale Klimaschutzstrategien im Verkehrssektor 158
„Must Dos“ und mögliche Politikinstrumente für die Mobilitätswende im Verkehr 172
„Must Dos“ und mögliche Politikinstrumente für die Antriebs- bzw. Energiewende im Verkehr 175
Literaturverzeichnis 178

Wuppertal Institut

Die THG-Emissionen des Verkehrs

Bedeutung des Verkehrssektors für die deutschen Treibhausgasemissionen

Die Emissionen des Verkehrssektors stagnieren auf hohem Niveau – während alle anderen Sektoren Emissionen einsparen



* umfasst Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und private Haushalte
** umfasst energie- und prozessbedingte Emissionen der Industrie
*** umfasst sonstige Feuerungen (u.a. Militär) & diffuse Emissionen aus Brennstoffe

Quelle: eigene Darstellung nach UBA, 2020: Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase. https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten (01.07.2020)

Wuppertal Institut

Zentrale Herausforderungen der Verkehrswende

Wuppertal Institut

Dominante Strukturen im Verkehrssektor

- Wachsende Verkehrsaufwände im Personen- und Güterverkehr
- fossil betriebener Straßenverkehr dominant (über 90% der THG-Emissionen)
- keine Reduzierung der THG-Emissionen von 1990 bis heute

Treiber für Entwicklungen der Verkehrswende und Energiewende im Verkehr

- Antriebstechnik: Batterieelektrische Fahrzeuge, H2-Brennstoffzelle, Oberleitung für LKW
- Organisation: Integrierte Mobilitätssysteme mit Sharing-Mobilität
- Verkehrswende in Städten: Transformation von autogerechten Städten hin zur Förderung von Nahmobilität; Luftqualität, Lärm und Lebensqualität als wichtige Treiber

Wuppertal Institut

Herausforderungen einer Transformation

- Entwicklungsstand der Alternativen
  - ÖV-Abdeckung ausbaufähig: hohe, langfristige Investitionen wichtig
  - Fahrradinfrastruktur lückenhaft – Flächenkonkurrenzen zugunsten Nahmobilität auflösen
  - Alternative Antriebe z.T. noch nicht konkurrenzfähig, Infrastrukturausbau erforderlich: Anreize und öffentliche Investitionen

- Kapazitätsgrenzen der bestehenden Schieneninfrastruktur
  - Im Personen- als auch Güterverkehr sind Kapazitätsgrenzen vielfach erreicht, Erweiterung ist zeit- und kostenintensiv: rechtzeitig Investitionen anstoßen

- Lösungen für den ländlichen Raum
  - Verkehrswende in großen Städten auf dem Weg – disperse Raumstruktur, fehlender ÖPNV, dünne Besiedlung erschweren dies auf dem Land: ergänzende Lösungen wie On-Demand-Systeme einführen

Wuppertal Institut

Hemmnisse einer Transformation

- Marktinstrumente nur bedingt wirksam
  - Geringe Preissensitivität, weil Grundbedürfnis nach Alltagsverkehr
  - motorisierter Individualverkehr: Hohe emotionale / symbolische Bedeutung
  - Angebotsausweitung im öffentlichen Verkehr durch knappe öffentliche Mittel schwierig

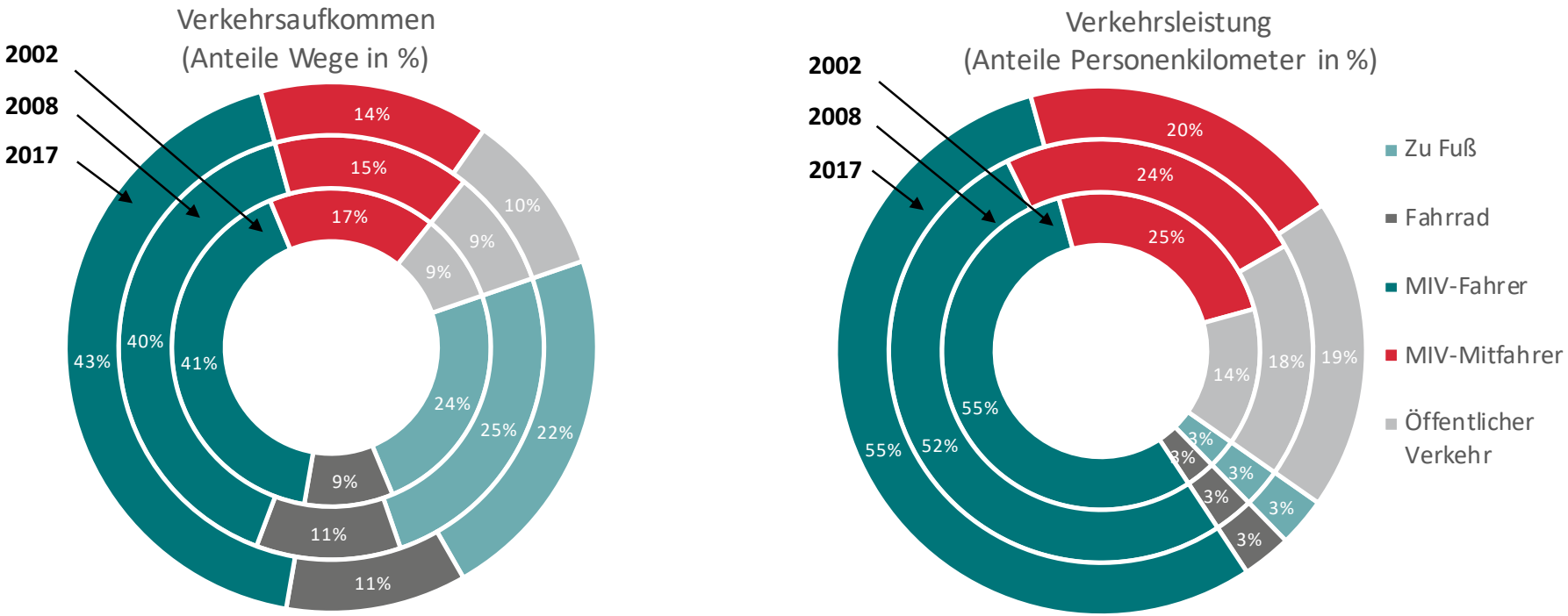
- hohe Bedeutung individueller Verhaltensänderungen
  - Mobilitätsroutinen erschweren Änderung des Mobilitätsverhaltens: Anreize für Änderung von Routinen setzen
- Pfadabhängige Entwicklungen
  - autoorientierte Entwicklungspfade in Stadt- und Verkehrsplanung und anderen Bereichen müssen aufgebrochen werden, um eine Verkehrsverlagerung zu ermöglichen

Charakteristik des Verkehrssektors

Anteile der Verkehrsmittel variieren nur wenig – bei gestiegenem Verkehrsaufwand

Personenverkehr: Modal Split

- nur geringfügige Änderungen der Verkehrsmittelwahl in den letzten 2 Jahrzehnten



Modal Split des Personenverkehrs in Deutschland: Verkehrsaufkommen (Wege) und Verkehrsaufwand (Personenkilometer) im zeitlichen Vergleich

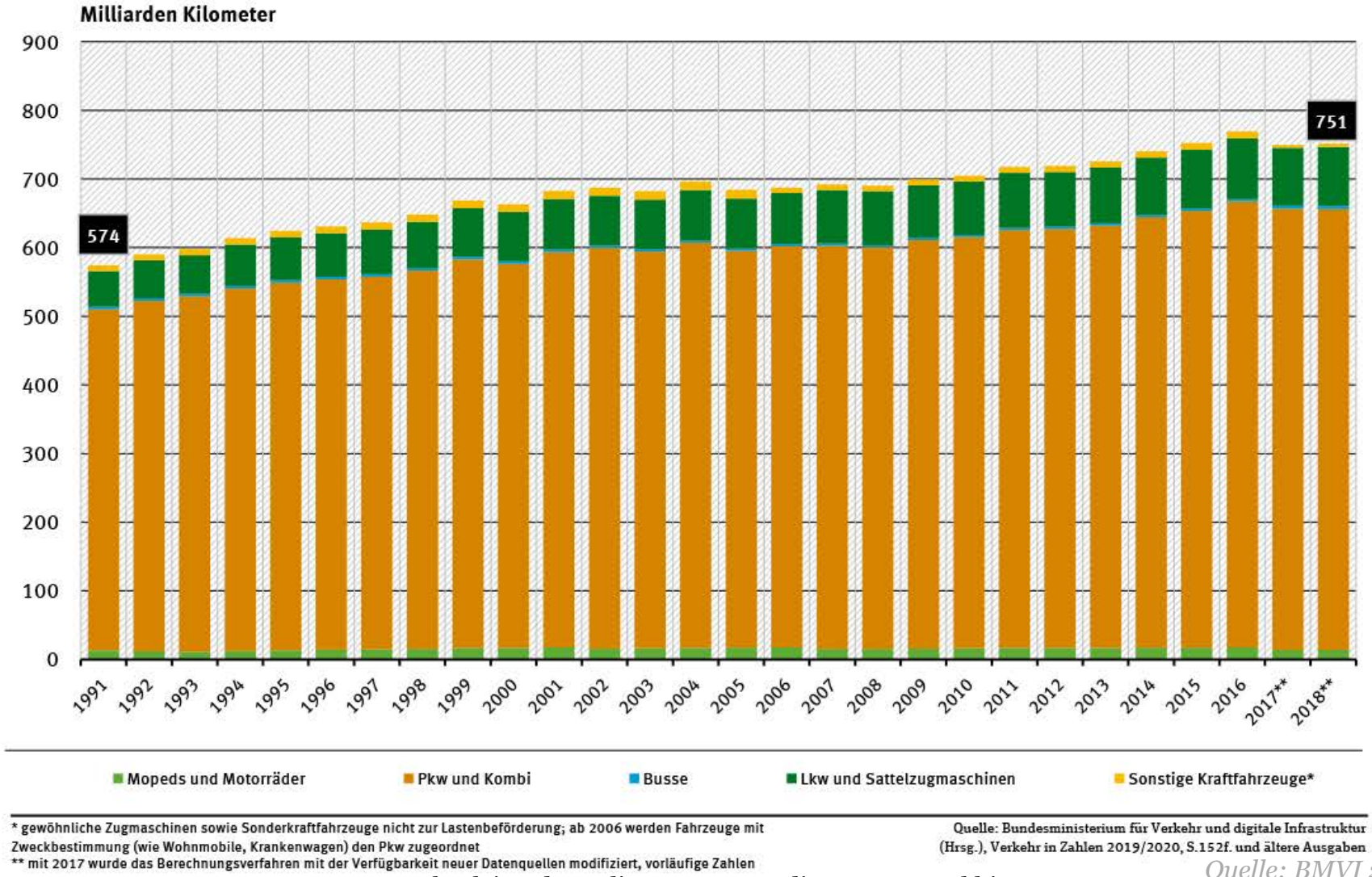
Quelle: Basierend auf Nobis & Kuhnimhof (2018).

Sektorbeschreibung

Wuppertal Institut

Straßenverkehr: Gesamtfahrleistung

- Fahrleistung von Pkw und Lkw seit 1990 um 30% gestiegen



* gewöhnliche Zugmaschinen sowie Sonderkraftfahrzeuge nicht zur Lastenbeförderung; ab 2006 werden Fahrzeuge mit Zweckbestimmung (wie Wohnmobile, Krankenwagen) den Pkw zugeordnet
** mit 2017 wurde das Berechnungsverfahren mit der Verfügbarkeit neuer Datenquellen modifiziert, vorläufige Zahlen

Quelle: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Verkehr in Zahlen 2019/2020, S.152f. und ältere Ausgaben

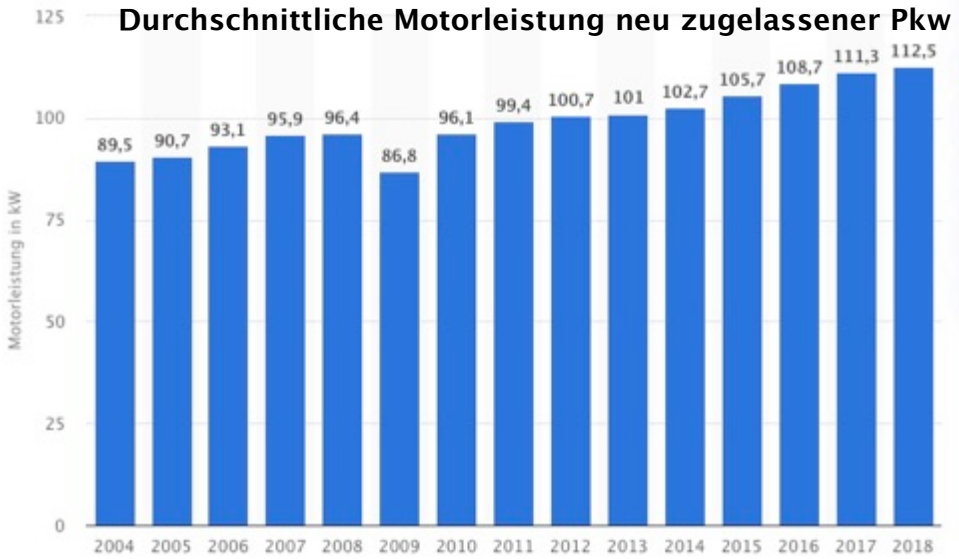
Quelle: BMVI 2019

Sektorbeschreibung

Charakteristik des Verkehrssektors

Pkw-Neuzulassungen: stärker motorisiert, öfter gewerblich zugelassen

- Motorleistung von Neufahrzeugen in den letzten 15 Jahren um 25% gestiegen
- immer größere Rolle von Dienstwagen (gewerblich zugelassen, privat genutzt) ist ein wichtiger Treiber



Quelle: KBA (2019), statista (2014)

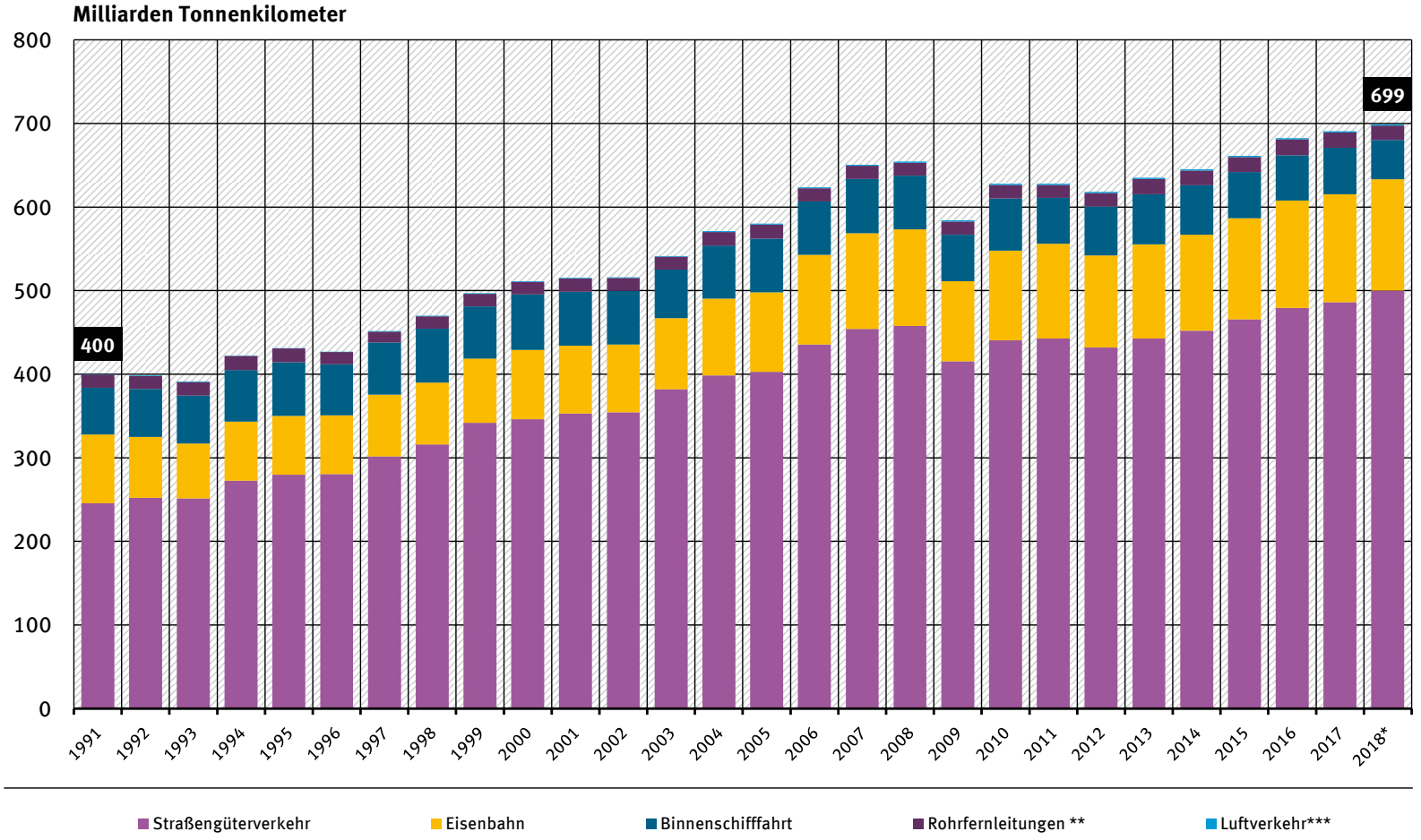
Sektorbeschreibung

Charakteristik des Verkehrssektors

Güterverkehr wächst– besonders auf der Straße

- bedingt durch wachsende Güterproduktion und Handel sowie stärker regional, EU- und weltweit verflochtene Ökonomie
- überlastetes Schienennetz aktuell unattraktiv für schnellen Transport

Güterverkehrsaufwand nach Verkehrsträgern



* zum Teil vorläufige Werte
** ab 1996 nur Rohöl

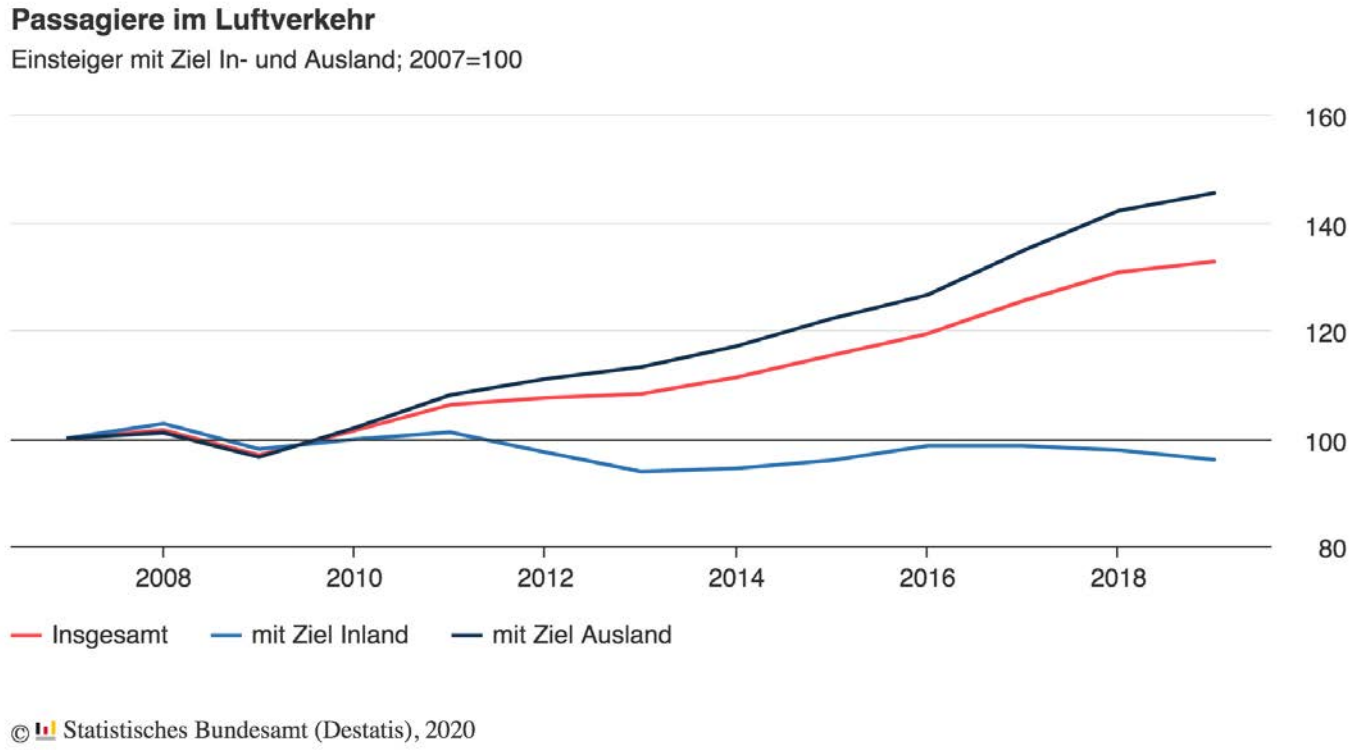
Quelle: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.), Verkehr in Zahlen 2019/2020, S. 244f. und vorherige Jahrgänge

Quelle: UBA (2020b) nach DIW et al. (2019).

Sektorbeschreibung

Charakteristik des Verkehrssektors
Luftverkehr wächst besonders stark

- Zunahme des Passagieraufkommens im dt. Luftverkehr um 40% binnen 10 Jahren
- Prognosen gehen von einem weitern Wachstum um rund 4-5% p.a. aus
- Treiber für die Entwicklung sind: wachsender Tourismusmarkt, Globalisierung, internationale Steuerbefreiung von Flugbenzin; Marktliberalisierung, Preiskonkurrenz von Low-cost-Airlines, Subventionierung von Regionalflughäfen
- Coronabedingt wird es 2020 zwar einen starken Rückgang geben, dieser wird aber ohne weitere Maßahmen voraussichtlich wieder in ein starkes Wachstum übergehen.



Quelle: Destatis (2020)

Sektorbeschreibung

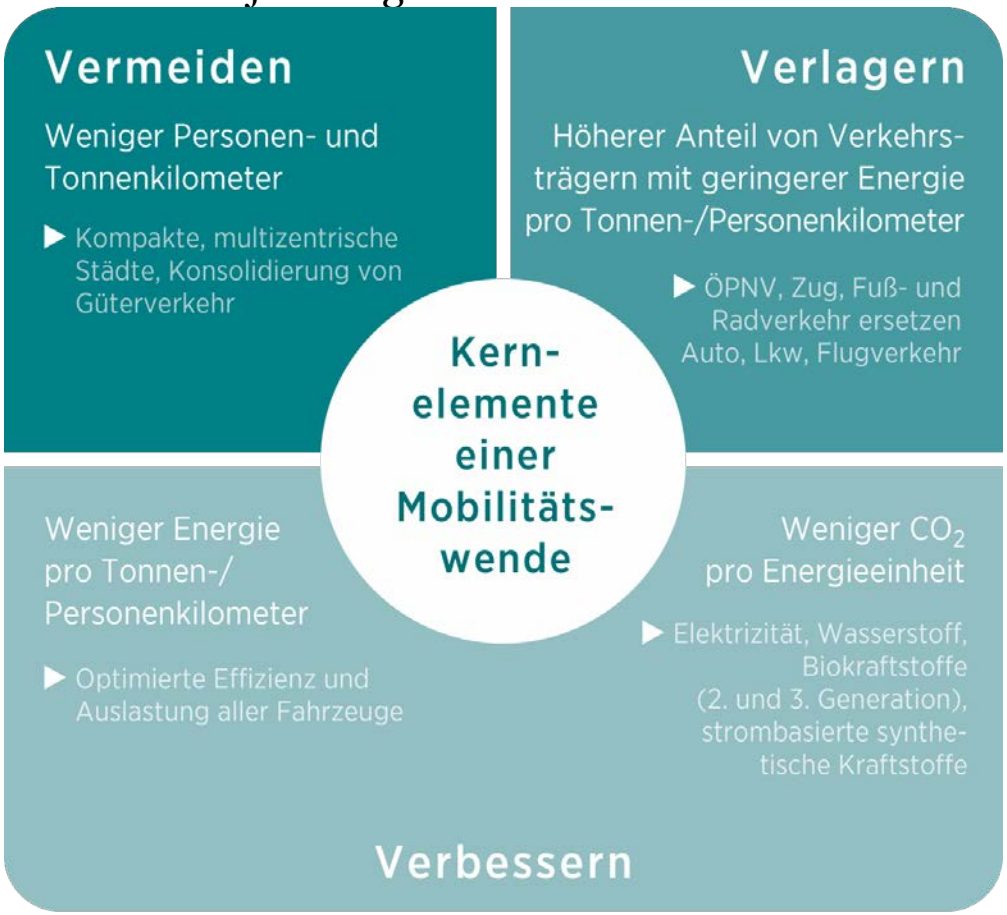
Wuppertal Institut

Zentrale Klimaschutzstrategien im Verkehrssektor

Verkehrswende: Strategien

Verkehrswende und Energiewende im Verkehr kombinieren

- Die **Verkehrswende** basiert auf drei Strategieansätzen: 1. Verkehr vermeiden oder reduzieren, 2. den übrigen Verkehr auf möglichst klimafreundliche Verkehrsmittel (Fuß, Rad, ÖV, Sharing) verlagern und 3. die Effizienz der Verkehrsmittel verbessern. Insgesamt wird dadurch der Energieverbrauch im Verkehr reduziert
- Die **Energiewende im Verkehr** ermöglicht durch den Umstieg auf E-Mobilität und aus erneuerbarem Strom erzeugte synthetische Kraftstoffe eine Reduzierung der THG-Emissionen je Energieeinheit.

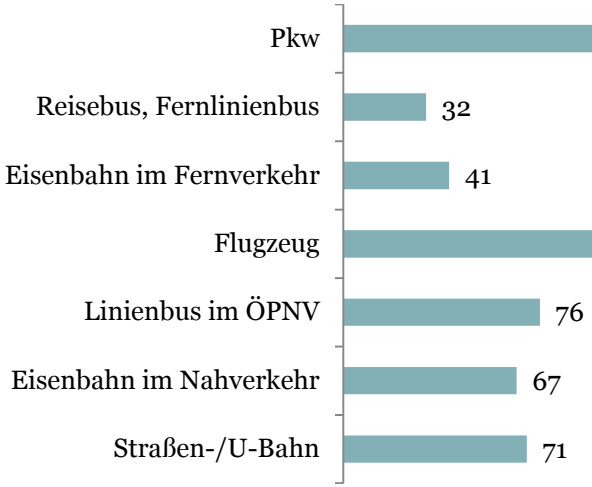


Strategien der Verkehrswende und der Energiewende im Verkehr
Quelle: Schneidewind (2018).

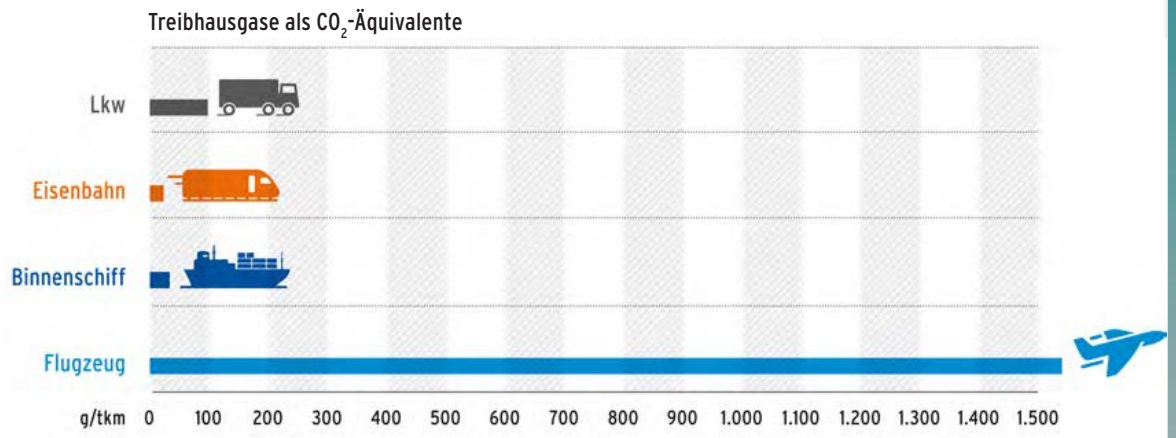
Verkehrswende: Strategien

hohe Relevanz der Verkehrswende für klimaneutrale Mobilität

- Verkehrsverlagerung ermöglicht eine deutlich höhere Effizienz und CO2-Einsparung (siehe Abbildung)
- großes Potenzial der Effizienzverbesserung u.a. durch kleinere, leichtere Fahrzeuge
- Fokussierung nur auf eine Energiewende im Verkehr ist daher nicht zielführend, weil daraus ein weiterhin hoher Energiebedarf im Verkehrssektor resultiert
- Mix aus beiden Strategien – Verkehrswende und Energiewende im Verkehr – ist also wichtig



Spezifische CO_2-Emissionen im Personenverkehr (g/Pkm) in Deutschland 2014.
Quelle: Rudolph et al. (2017)



Vergleich der Emissionen einzelner Verkehrsträger im Güterverkehr, 2010
Quelle: UBA (2012)

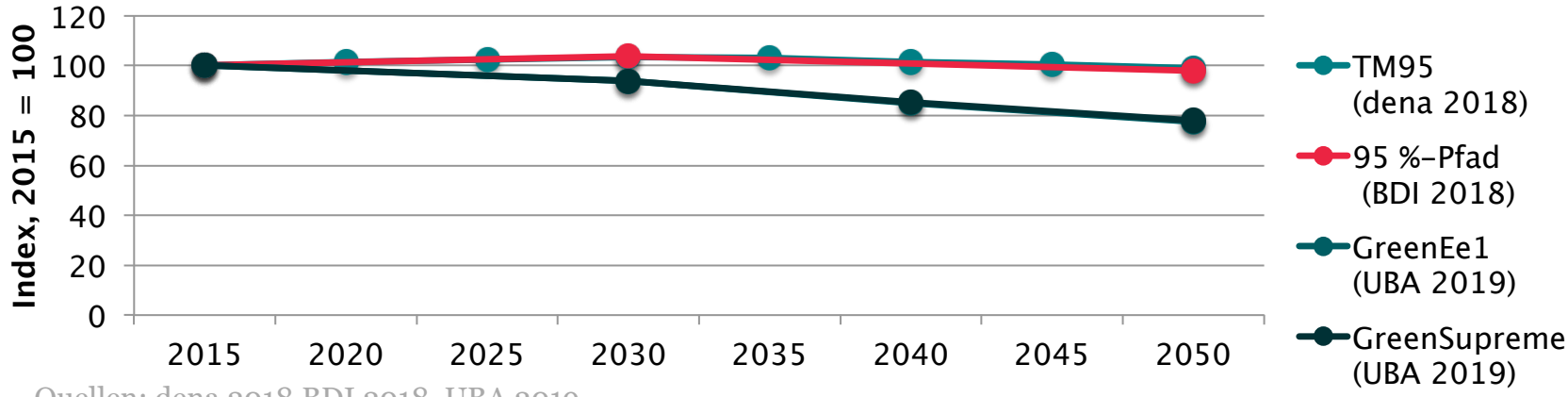
Sektorbeschreibung

Personenverkehr: Szenarienvergleich

Verkehrswende im Personenverkehr: Reduzierung des Verkehrsaufwands

- Der Reduzierung des Verkehrsaufwands (= Verkehrsleistung; in Personenkilometern, pkm) stehen starke Wachstumstreiber entgegen: So wird z.B. durch Aus- und Neubau von Straßen der Raumwiderstand verringert, so dass längere Strecken in gleicher Zeit zurückgelegt werden können Der Bundesverkehrswegeplan 2030 (BMVI 2016) sieht u.a. den Ausbau von 2000 Autobahnkilometern vor. Im Ergebnis werden dadurch etwa Pendlerdistanzen länger.
- Die betrachteten Szenarien gehen davon aus, dass weiteres Wachstum gestoppt wird (anders als in aktuellen Prognosen), einzelne Szenarien (UBA GreenSupreme) sehen die Möglichkeit einer Verringerung des Verkehrsaufwands um rund 20% bis 2050.
- Notwendig dafür sind verschiedene Maßnahmen: Neben dem deutlichen Reduzierung von Neu- und Ausbau von Straßen ermöglicht eine Siedlungsverdichtung und stärkere Nutzungsmischung kürzere Wege, insbesondere in Städten. Aufgrund langer Planungs- und Umsetzungszeiten in der Stadtentwicklung ist hier eine frühere Realisierung des für 2050 anvisierten Potenzials nur durch zusätzliche Maßnahmen möglich – etwa die verstärkte Umsetzung von Homeoffice. Wenn 30% der Beschäftigten an jedem zweiten Arbeitstag im Homeoffice arbeiten, können rund 5 % des Verkehrsaufwands eingespart werden. (Eigene Berechnung nach Nobis et al 2018).

Szenarienvergleich: Verkehrsaufwand im Personenverkehr



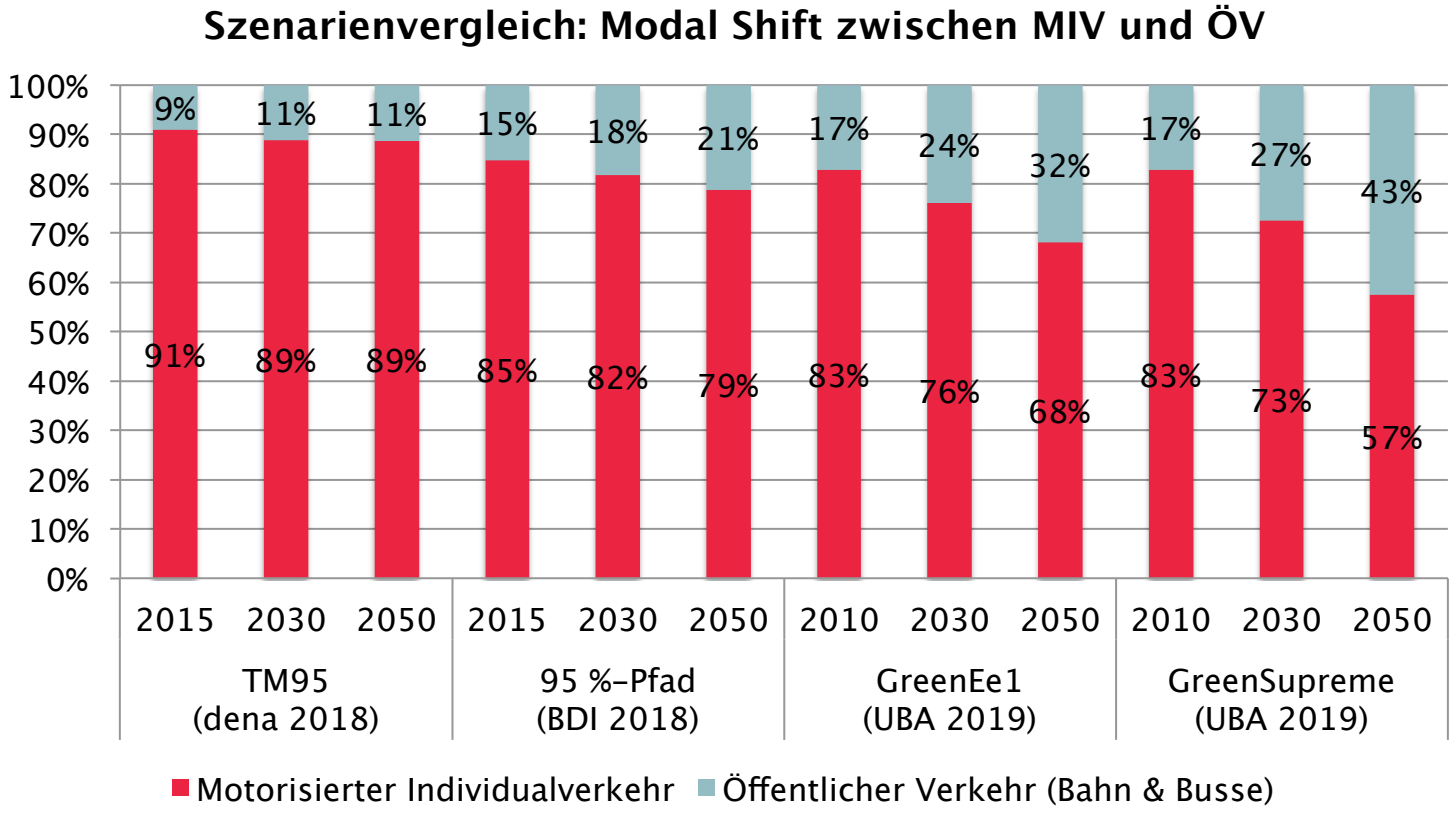
Quellen: dena 2018,BDI 2018, UBA 2019

Sektorbeschreibung

Personenverkehr: Szenarienvergleich

Verkehrswende im Personenverkehr: Verkehrsverlagerung

- Ein wesentliches Potenzial für einen THG-neutralen Verkehr liegt in der Verlagerung vom Motorisierten Individualverkehr (insb. Pkw) auf den Umweltverbund aus Öffentlichem Verkehr, Rad- und Fußverkehr sowie Sharing-Angeboten.
- Die Annahmen über die Umsetzung dieses Potenzial variieren stark zwischen den betrachteten Szenarien: Verlagerte Verkehrsanteile von Pkw auf den Umweltverbund bis 2050 zwischen 7 % (BDI 95%) und 47% (UBA GreenSupreme)



Quellen: dena 2018,BDI 2018, UBA 2019

Verkehrswende im Personenverkehr: Verkehrsverlagerung

- Notwendig für eine starke Verlagerung ist ein massiver Ausbau des Öffentlichen Verkehrs (sowohl im Nah- und Regionalverkehr als auch im Fernverkehr), um zum einen hinreichende Kapazitäten bereitzustellen, zum anderen durch ein dichteres Netz und einen höheren Takt die Attraktivität des ÖV zu erhöhen. Um die für 2050 angestrebte Verlagerung bereits 2030 zu erreichen, ist eine Beschleunigung der Planung und Umsetzung notwendig. Notwendig ist zudem die Umsetzung aller Schienenverkehrsprojekte aus dem Bundesverkehrswegeplan aus den Kategorien vordringlicher Bedarf und vordringlicher Bedarf mit Engpassbeseitigung. (vgl. Agora Verkehrswende 2019)
- Daneben geht das in Bezug auf Verlagerung ambitionierteste Szenario GreenSupreme davon aus, dass Ridesharing-Dienste im (sub)urbanen Raum Fahrten mit privaten Pkw ab 2025 sukzessive ersetzen können; bis 2050 wird rund ein Drittel des Verkehrsaufwands von Pkw durch Ridesharing erbracht. Für eine Attraktivierung der Nutzung dieser Sharing-Dienste, die durch hohen Besetzungsgrad annähernd die Effizienz des öffentlichen Verkehrs erreichen, ist es notwendig, sie mit dem Öffentlichen Verkehr zu verknüpfen (räumlich sowie tariflich).
- Zugleich muss hierfür die Nutzung von privaten Pkw in Städten deattraktiviert werden, etwa durch höhere Parkgebühren (stärkere Bepreisung von Anwohnerparken), Reduzierung von Fahrspuren für Kfz und von Parkraum, Citymaut (vgl. London, Stockholm) sowie Tempo 30 innerorts. Damit könnte in Städten die Anzahl der Pkw je 1000 Einwohner auf rund ein Drittel des heutigen 150 Fahrzeuge (einschließlich Ride-/Carsharing und Taxi) sinken. (UBA 2019)
- Um eine Reduzierung des Flugverkehrs zu erreichen, gehen die UBA-Szenarien von einer vollständigen Einstellung des innerdeutschen Flugverkehrs bis 2050 aus – das Vorziehen dieser Verlagerung wäre möglich, wenn der Ausbau von Schnellfahrtrassen im Schienenfernverkehr bis 2030 verstärkt wird. Internationaler Flugverkehr wird in den Szenarien um 25% reduziert. Die reduzierte Verkehrsleistung wird weitgehend durch Schienenverkehr ersetzt.“

Personenverkehr: Szenarienvergleich

Verkehrswende im Personenverkehr: Verbesserung der Effizienz

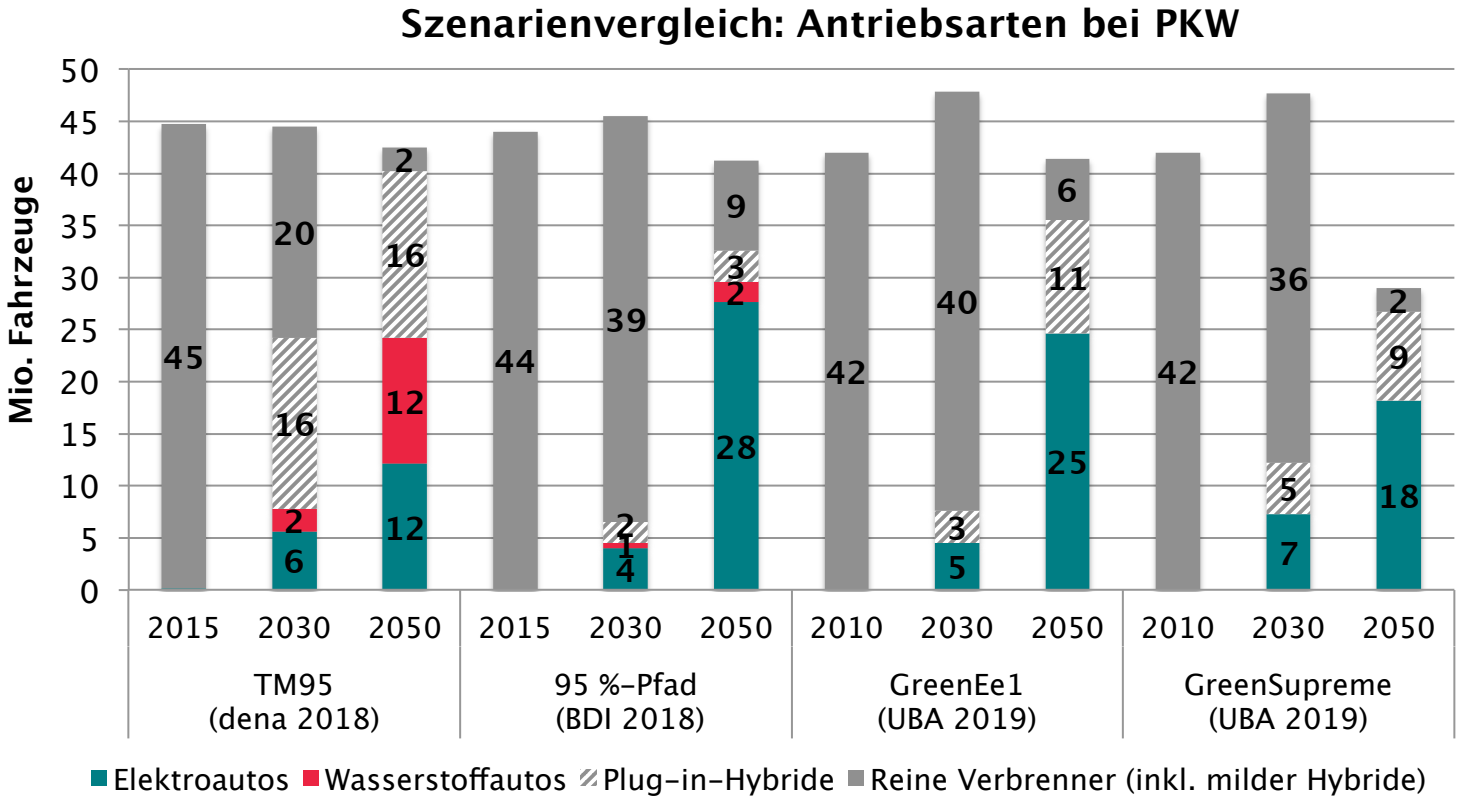
Wuppertal Institut

- Unabhängig vom Energieträgerwechsel ist auch eine Effizienzverbesserung wichtig, um möglichst wenig Strom/H2/synthetische Energieträger zu benötigen
- Für alle Antriebstypen gehen die Szenarien von großem Potenzial für Effizienzverbesserungen aus.
- Für konventionelle Pkw werden etwa bis 2050 Effizienzverbesserungen um 25% (dena) bis 37% (BDI) angenommen, UBA Green Supreme sieht bis 2040 ein Effizienzpotenzial von 31% (danach keine Verbrennerzulassungen mehr); die Potenziale für E-Fahrzeuge wurden hier nicht quantifiziert.
- Neben technischen Effizienzmaßnahmen (Motor, Getriebe und Reduzierung von Fahrwiderständen) erfordert eine Ausschöpfung der Potenziale eine deutliche Trendwende bei Fahrzeuggewicht und –leistung. Durch Leichtbau, verstärkten Einsatz aktiver Sicherheitssysteme und Downsizing in Verbindung mit reduzierten Geschwindigkeiten ist dies erreichbar.
- Hierfür müssen allerdings die bestehenden CO2-Flottengrenzwert-Regulierungen auf EU-Ebene entsprechende Anreize bieten – während heute aufgrund weniger strenge Grenzwerte für Fahrzeuge mit hohem Gewicht nur ein minimaler Anreiz zur Gewichtsreduktion besteht.
- Bei E-Fahrzeugen bestehen derzeit keine regulatorischen Effizienzanreize, da sie in den CO2-Flottengrenzwerten als Nullemissionsfahrzeuge gerechnet werden. Hier sind zusätzliche Anreize für kleine, energieeffiziente Fahrzeuge zu schaffen.
- Ein weiteres Instrument für eine Attraktivierung effizienter Fahrzeuge ist eine stark gespreizte Kfz-Steuer, die als Bonus-Malus-System ausgestaltet wird. Frankreich erhebt z.B. für Fahrzeuge, die mehr als 185 g CO2/km ausstoßen, eine einmalige Zulassungssteuer von 20.000 Euro, darunter sind die Aufschläge gestaffelt bis zum Schwellenwert von 110g CO2/km. Verbrennungsfahrzeuge unterhalb dieses Werts sind steuerfrei, für E-Fahrzeuge wird ein Bonus gezahlt. Neben dieser hohen Zulassungsteuer gilt ein Anreizsystem auch für die jährliche Kfz-Steuer.

Personenverkehr: Szenarienvergleich

Energiewende im Personenverkehr

- Zur Umstellung der Fahrzeugflotten auf alternative Antriebe Hier gehen alle Szenarien von einer fast vollständigen Umstellung der Pkw-Flotten bis 2050 aus – für eine Erreichung der Klimaneutralität bis 2035 ist ein ähnliches Niveau notwendig. Bis 2030 nehmen die Szenarien sehr unterschiedliche, aber deutlich niedrigere Potenziale an – abhängig von der unterstellten Preisentwicklung der Fahrzeuge, der Produktionskapazitäten und der Rahmenbedingungen, insb. der Ladeinfrastruktur.
- Die Szenarien unterscheiden sich zudem stark hinsichtlich der Anteile batterieelektrischer, Hybrid- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge.



Quellen: dena 2018,BDI 2018, UBA 2019

Sektorbeschreibung

Personenverkehr: Szenarienvergleich

Wuppertal Institut

Energiewende im Personenverkehr

- Sinnvoll ist dabei ein starker Fokus auf batterieelektrische Fahrzeuge, da diese mit Abstand am energieeffizientesten sind – rund 3-4 mal effizienter als Brennstoffzellenfahrzeuge und rund 6 mal effizienter als synthetische Kraftstoffe für Verbrennungsfahrzeuge.
- Wenn ein weitgehender Flottenaustausch hin zu alternativen Antrieben bis 2035 umgesetzt werden soll, müssen – bei gleichzeitiger Verkleinerung der Flotte - 47 Mio. konventionelle Pkw innerhalb von 15 Jahren durch 28 Mio. BEV, PHEV und H2-Fahrzeuge ersetzt werden – dies entspricht ab heute bis 2035 jährlich rund 2 Mio neuer Fahrzeuge mit alternativen Antrieben.
- Dies ist nur erreichbar, wenn zusätzliche Fertigungskapazitäten aufgebaut, der Ausbau der Ladeinfrastruktur beschleunigt und weitere Preisanreize gesetzt werden.
- Das Beispiel Norwegen zeigt, wie durch hohe Preisanreize ein schneller Flottenumbau gelingen kann: Elektroautos sind befreit von der Mehrwertsteuer (25%), der dort bestehenden Importsteuer und Kfz-Steuer; insgesamt machen die Steuern je nach Fahrzeug etwa die Hälfte des Kaufpreises aus, so dass E-Fahrzeuge dort einen deutlichen Preisvorteil haben. Dies hat zu einem starken Anstieg der zugelassenen E-Fahrzeuge geführt, 2019 machten diese über 42 Prozent der Neuzulassungen aus.
- Ausgehend von einer durchschnittlichen Lebensdauer eines Pkw von 12 Jahren ist aber davon auszugehen, dass selbst bei forcierten Anreizen für E-Fahrzeuge 2035 noch ein relevanter Anteil von Verbrennungsfahrzeugen auf den Straßen ist.
- Flankierend wäre daher ein Phase-out der Zulassung von Verbrennerfahrzeugen durch Quoten für alternative Antriebe sowie ein Phase-out von fossilen Kraftstoffen durch eine Beimischungsquote für Synfuels denkbar. Für verbleibende Verbrennerfahrzeuge werden dann 2035 zu 100% Synfuels eingesetzt. Durch deren hohe Kosten kann auf ein früheres Ausscheiden dieser Fahrzeuge aus dem Bestand hingewirkt werden.Im Green Supreme Szenario werden für 2050 26 TWh synthetische Kraftstoffe im Personenverkehr benötigt, was sich bei forcierter Umsetzung der dort vorgesehenen Maßnahmen auf 2035 übertragen lässt.

Personenverkehr: Zielerreichung bis 2035

Kombination der Strategien der Verkehrswende und Energiewende im Verkehr

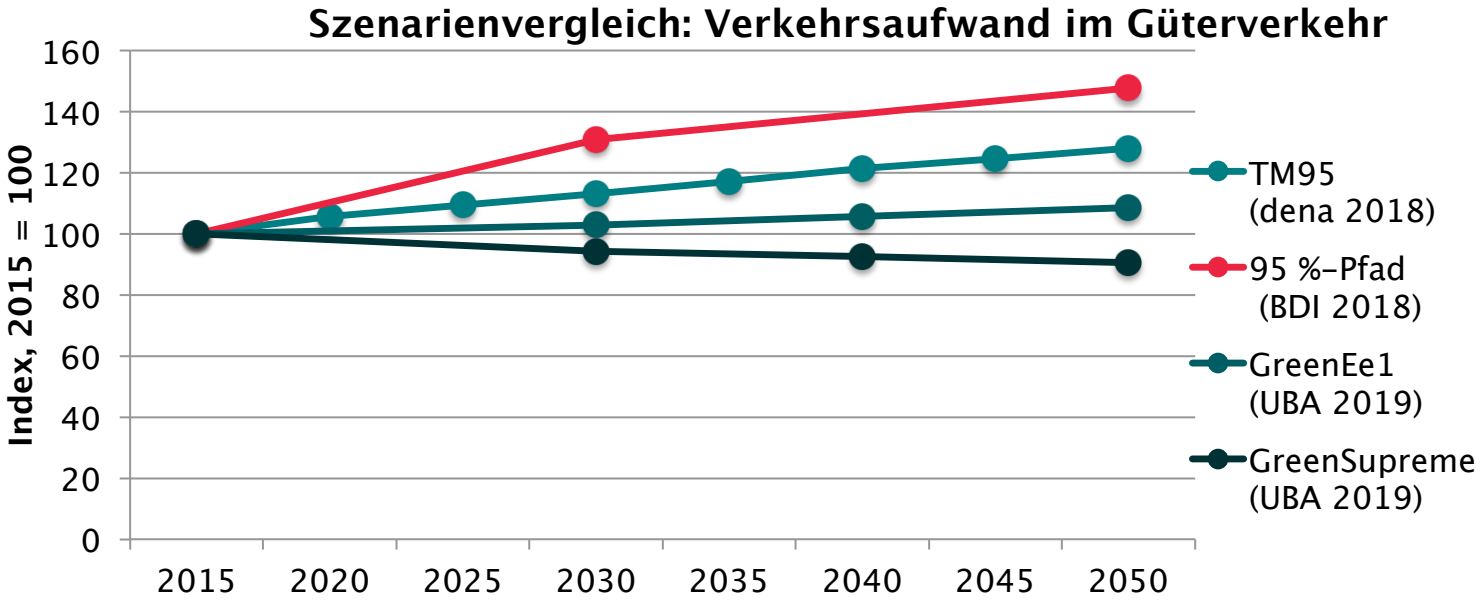
- Die oben beschriebenen Strategien müssen jeweils in ihrer ambitioniertesten Ausprägung kombiniert werden, damit das Ziel der Klimaneutralität bereits 2035 statt 2050 erreichbar ist. Hier ist UBA Green Supreme mit Blick auf Verkehrsvermeidung und –verlagerung das weitestgehende Szenario. Zur Effizienzverbesserung wären die ambitionierteren Zielgrößen des BDI 95%-Szenarios anzustreben.
- Während die Verkehrsverlagerung durch eine beschleunigte Planung und Umsetzung neuer Verkehrsinfrastrukturen sowie Regulierung und Anreize zugunsten der Nutzung des Umweltverbundes bis 2035 durchaus erreichbar ist, könnte der Umfang der Verkehrsvermeidung bis 2035 aufgrund der langfristigen raumstrukturellen Änderungen schwer zu erreichen sein.
- Deshalb ist es für eine Dekarbonisierung bis 2035 notwendig, die Energiewende im Verkehr gegenüber den Szenarien nicht nur zu beschleunigen, sondern auch im Ziel konsequenter umzusetzen. Hier wäre der Fokus auf E-Mobilität wie in den UBA-Szenarien und dem BDI 95%-Pfad einzuschlagen, mit dem Ziel noch höherer Anteile für BEV. Dies ist nicht nur durch deren höhere Effizienz begründet, sondern auch dadurch, dass in den für eine Beschleunigung der Verkehrswende entscheidenden Jahren 2020-2030 H2-Fahrzeuge noch zu teuer sind. (zu den Investitionskosten vgl. etwa Dena-Leitstudie)

Quellen: dena 2018,BDI 2018, UBA 2019

Güterverkehr: Szenarienvergleich

Verkehrswende im Güterverkehr: Reduzierung des Verkehrsaufwands

- Der Wachstumstrend im Güterverkehr ist noch stärker ausgeprägt als im Personenverkehr. Global arbeitsteilige und damit verkehrsaufwändige Produktion und Handel bei gleichzeitigem Wachstum von Produktion und Konsum bedingen dieses Wachstum auf hohem Niveau ebenso wie verstärkter Online-Handel, durch individuelle Warenlieferungen Verkehr erzeugt. Die meisten Szenarien sehen hier nur die Möglichkeit geringer Trendabschwächungen, bei denen der Güterverkehr bis 2050 weiterhin ansteigt: um 48% (BDI 95%) 28% (dena TM95) bzw 9 % (UBA GreenEe1) gegenüber 2015; allein GreenSupreme geht von einem leichten Rückgang um 9% aus.
- Erreicht wird dieser Rückgang des Güterverkehrs zum einen durch eine Reduzierung der Gütermengen, was durch eine Erhöhung der Ressourceneffizienz erreicht wird. Zum anderen werden verstärkt regionale Wirtschaftskreisläufe insbesondere in der Nahrungsmittelproduktion angenommen.



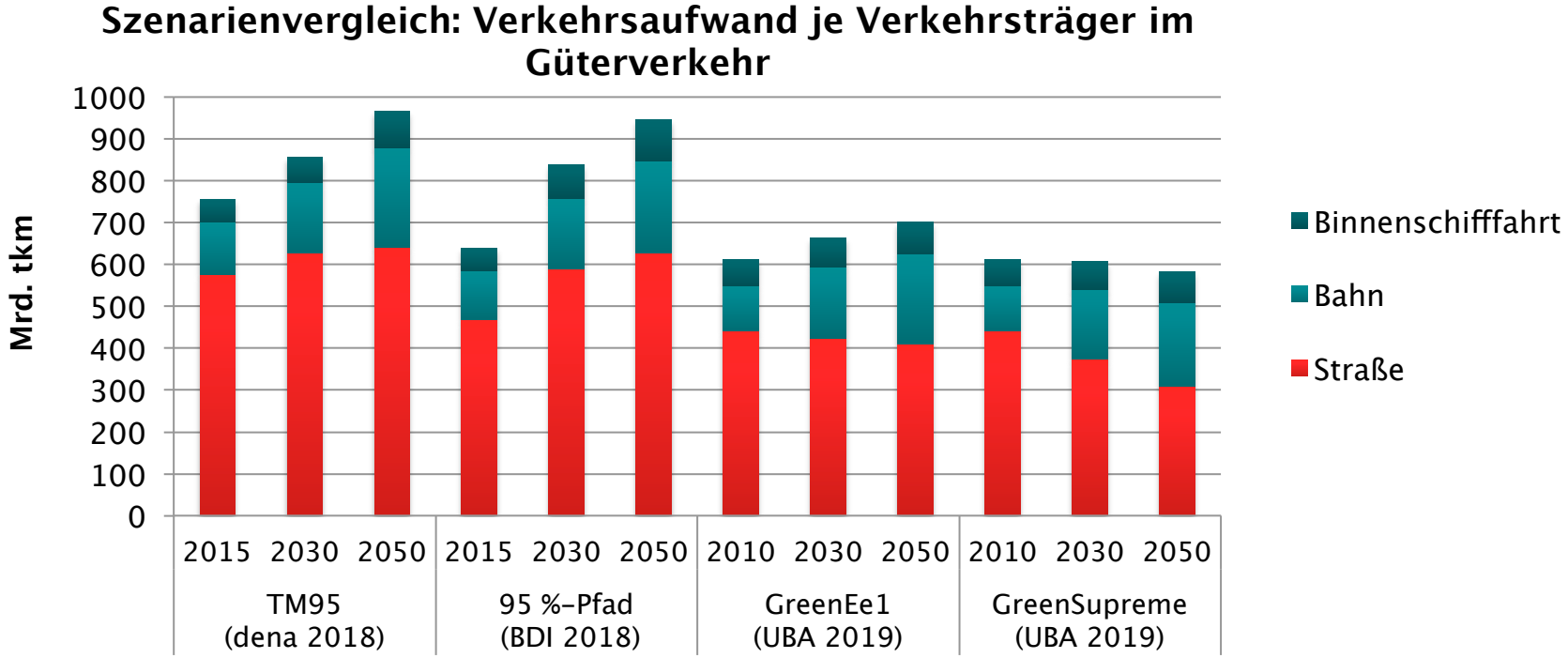
Quellen: dena 2018,BDI 2018, UBA 2019

Sektorbeschreibung

Güterverkehr: Szenarienvergleich

Verkehrswende im Güterverkehr: Verkehrsverlagerung

- Mit Blick auf eine mögliche Verlagerung des Güterverkehrs reichen die Szenarioergebnisse von 10% (BDI 95%-Pfad) bis 30% (UBA GreenSupreme) der Güterverkehrsleistung des LKW, die bis 2050 auf Schiene und Binnenschiff verlagert werden.
- Für die ambitionierte Verlagerung insbesondere auf die Schiene geht das GreenSupreme-Szenario von massiven Investitionen in das Schienennetz für den Güterverkehr aus, die das Netz nicht nur erweitern, sondern auch die Abläufe beschleunigen und vereinfachen. Notwendig sind hierfür u.a. Netzlückenschlüsse, die Digitalisierung des Schienennetzes durch ETCS, die Herstellung internationaler Interoperabilität, eine Reaktivierung von Gleisanschlüssen, der Ausbau von Schnittstellen des kombinierten Verkehrs, Automatisierung bei Verladung und Zugbildung.



Quellen: dena 2018,BDI 2018, UBA 2019

Güterverkehr: Szenarienvergleich

Verkehrswende im Güterverkehr: Verkehrsverlagerung

- Da der Güterverkehr stärker als der Personenverkehr durch monetäre Anreizen steuerbar ist, sind zur Erreichung der Verlagerungsziele eine Senkung von Trassenpreisen im Schienenverkehr, eine Subventionierung von kombiniertem Verkehr sowie eine Erhöhung der Lkw-Maut zielführend.
- Zudem kann ein gesetztliches Verlagerungsziel dazu beitragen, die Priorisierung des Infrastrukturausbaus der Schiene und die preisliche Attraktivierung des Güterverkehrs auf der Schiene zu harmonisieren, wie das Beispiel der Schweiz zeigt: Das Ziel der Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene wurde 1994 in der Verfassung verankert. Darauf basierend wurden Güterbahnstrecken massiv ausgebaut und der Lkw-Verkehr stark verteuert – die Mauteinnahmen werden zu zwei Dritteln für den Ausbau der Schiene verwendet. Der hohe Anteil des Schienengüterverkehr von 42% der Verkehrsleistung konnte damit gehalten werden.

Effizienz im Güterverkehr

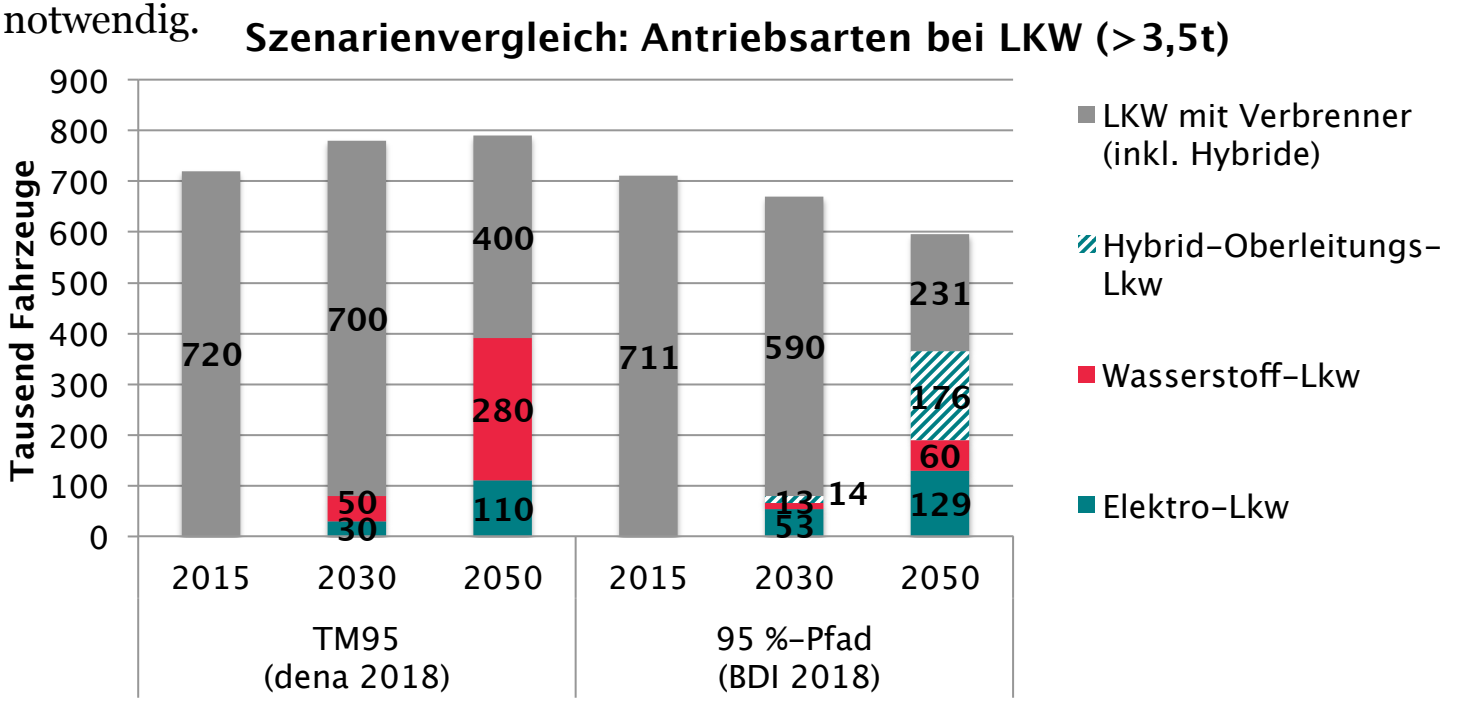
- Für eine Übergangszeit bis zur vollständigen Umstellung des Güterverkehrs auf erneuerbare Antriebe ist die Verbesserung der Effizienz der Verbrennungsantriebe notwendig. Bei der Fahrzeugeffizienz konventioneller Lkw sehen die Szenarien geringeres Optimierungspotenzial im Vergleich mit Pkw, da hier Fahrzeuggröße und –Leistung bereits aus betriebswirtschaftlicher Perspektive optimiert werden. Die UBA-Szenarien sehen für Diesel-Sattelzüge bis 2040 (ab dann keine reinen Verbrenner mehr) ein Effizienzsteigerungspotenzial von 25%, das durch EU-Effizienzvorgaben forciert wird. Daneben bietet eine tarke emissionsabhängige Spreizung der Lkw-Maut weitere Anreize.

Quellen: dena 2018,BDI 2018, UBA 2019

Güterverkehr: Szenarienvergleich

Energiewende im Güterverkehr

- Alle Szenarien sehen eine Diversifizierung der Lkw-Flotten – bei kleineren Lkw sind eher BEV und PHEV sinnvoll, bei größeren Fahrzeugen Oberleitungs-BEV oder Oberleitungs-Diesel-Hybrid-LKW; in BDI-Szenario zudem Erdgas (mit geringerer THG-Minderungswirkung) und H2-Brennstoffzelle
- Sowohl in einer dena-Szenarienvariante als auch im BDI 95%-Pfad wird als energie- und kosteneffizienteste Option der Einsatz von Oberleitungs-Diesel-Hybrid Lkw vorgeschlagen; Hierfür wird bis 2050 eine Elektrifizierung von bis zu 8.000 km Autobahn angenommen; diese wäre bei einer beschleunigten Planung und Umsetzung auch bis 2035 umsetzbar.
- Da eine vollständige Elektrifizierung im Lkw-Verkehr nicht umsetzbar ist, synthetischer Kraftstoffe benötigt. Im UBA GreenSupreme Szenario (mit den geringsten Güterverkehrsaufwänden) werden 60% des Energiebedarfs des Güterverkehrs elektrisch abgewickelt, für die restlichen 40% sind 26 TWh Synfuels notwendig.



Quellen: dena 2018,BDI 2018, UBA 2019

Sektorbeschreibung

Wuppertal Institut

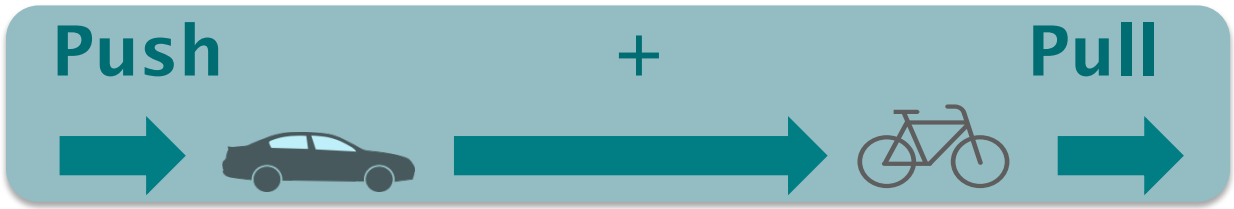
„Must Dos“ und mögliche Politikinstrumente für die Mobilitätswende im Verkehr

Verkehrswende: Strategien und Maßnahmen, um Klimaneutralität bis 2035 erreichen zu können

Wuppertal Institut

Mobilitätswende im Personen- und Güterverkehr

- Verkehr vermeiden
  - Kompakte Stadt- und Raumentwicklung: Stadt der kurzen Wege, dichtere Versorgungsangebote im ländlichen Raum
  - Regionale Wirtschaft, kurze Lieferketten, geringere Rohstofftransporte
  - Digitalisierung von Mobilität: Homeoffice, Online-Konferenzen, Digitale Ämter
  - Reduzierung des Verkehrsaufwands im Personenverkehr gegenüber 2015 um ca 10 – 20 %, Güterverkehr um 5%
- Verkehr verlagern: Push & Pull
  - Massiver Ausbau und Attraktivierung des Umweltverbunds und Schienengüterverkehr
    - Verdopplung der Verkehrsleistung von Radverkehr, Öffentlichem Nah- und Fernverkehr und Car-Sharing, (im urbanen und ländlichen Raum)
    - Aufbau von Ride-Sharing in Städten und Umland: jede 2. Autofahrt als Ride-Sharing-Fahrt (vgl. UBA Green Supreme)
    - Schienennetz: Engpassbeseitigung, Gleisanschlüsse reaktivieren, kombinierter Güterverkehr
  - kombiniert mit De-Attraktivierung & Steuerung des PKW- und LKW-Verkehrs: Halbierung PKW-Verkehr, Reduzierung LKW-Verkehr um 30% (vgl. UBA Green Supreme)
  - Flugverkehr innerhalb D vollständig und in EU z.T. durch Bahn substituieren



Eigene Darstellung

Must-Do

Verkehrswende: Werkzeuge

Instrumentenmix für die Mobilitätswende im Personen- und Güterverkehr

Wuppertal Institut

Stadt- und Verkehrsplanung

- Anreize für dichte Siedlungsstrukturen, Umwidmung von Straßenraum zugunsten Rad- & Fuß
- Öffentlichen Nah- und Fernverkehr ausbauen - Kapazität verdoppeln bis 2035, Deutschlandtakt, Digitalisierung: Während durch den Bund aktuell rund 6 Mrd. € jährlich in Schieneninfrastruktur investiert wird und der Betrieb von Nah- & Regionalverkehr mit 12 Mrd. öffentlichen Mitteln jährlich bezuschusst wird, ist für den Ausbau eines leistungsfähigen öffentlichen Verkehrs bis 2030 ca. eine Verdopplung nötig.
- City-Logistik, Mikro-Hubs für Kurier-, Express- & Paketdienste, Terminals im Kombinierten Verkehr fördern
- Umsetzungszeit: min. 10 Jahre, daher Weichenstellungen sofort notwendig

Ordnungsrecht

- Tempo 30 in Städten, Tempolimit auf Autobahnen
- Zufahrtbeschränkungen (autofreie Innenstädte, Umweltzonen für Nullemissionsfahrzeuge)
- Umsetzungszeit: unmittelbar möglich, aber zeitliche Koordination der ordnungsrechtlichen „Push"-Faktoren mit Angebotsseitigen „Pull"-Maßnahmen wichtig, um Akzeptanz zu sichern

Organisation

- Nahtlose intermodale Mobilität: Car-/Bike-/Ridesharing mit ÖV vernetzen (tariflich durch gemeinsame Angebote, durch einheitliche digitale Schnittstellen, räumlich durch Mobilstationen), Kombinierter Güterverkehr (automatisierte Verladung, digitale Steuerung)
- Mobilität neu organisieren: Routinen verändern durch Mobilitätsmanagement
- Umsetzungszeit: ca. 5 Jahre, wichtig ist dabei koordiniertes Vorgehen, sonst „Flickenteppich"

Preisanreize

- Parkraumbewirtschaftung ausweiten und verteuern, City-Maut, starke Erhöhung LKW-Maut
- Abbau aller nicht-nachhaltigen Subventionen: Kraftstoffe (Diesel, Flugbenzin), Infrastruktur (Straßen, Flughäfen), Fahrzeuge (Dienstwagen), Pendlerpauschale
- Umsetzungszeit: unmittelbar, aber koordiniert mit Pull-Faktoren

Instrumente

Wuppertal Institut

„Must Dos“ und mögliche Politikinstrumente für die Antriebs- bzw. Energiewende im Verkehr

Verkehrswende: Strategien und Maßnahmen

Energiewende im Personen- und Güterverkehr: neue, effizientere Antriebe und THG-neutrale Kraftstoffe

- bei umfassendem Ausbau des Umweltverbundes bleiben relevante Verkehrsanteile im MIV und im Straßengüterverkehr
  - Je Szenario mindestens die Hälfte des Verkehrs
  - Daher sind effizientere Fahrzeuge und erneuerbare Antriebe; sie können allerdings nicht die alleinige Lösung sein, da auch E-Fahrzeuge auch dann noch deutlich mehr Energie benötigen als der öffentliche Verkehr oder der Schienengüterverkehr
- Fahrzeuge energieeffizienter und erneuerbar betrieben
  - Elektrifizierung der Pkw-Flotte: Ab 2030 Neuzulassungen nur noch als Elektro- oder H_2-Fahrzeuge – bei gleichzeitiger Verkleinerung der Pkw-Flotte entspricht das im Schnitt ca. 2 Mio. neuer BEV und PHEV pro Jahr.
- Güterverkehr: Ausbau Oberleitung für LKW bis 2035 auf 8000 Autobahn-km (ca. 550 km jährlich)
  - Downsizing: Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs konventioneller Antriebe um 30 % durch Reduzierung von Fahrzeuggewicht und Motorisierung
- Phase-out verbleibender fossiler Kraftstoffe
  - Beimischung erneuerbar erzeugter synthetischer Kraftstoffe (Import); schrittweise steigende Quote verbunden mit einem schrittweisen Ausstieg aus fossilem Benzin und Diesel bis 2035
  - flankiert durch Regulierung und Preisanreize (Steuern), um Lock-In auf Verbrennungsmotoren zu verhindern

Must-Do

Wuppertal Institut

Instrumentenmix für die Energiewende im Personen- und Güterverkehr

- EU-Flottenemissionslimits für Pkw weiterentwickeln: Anreize zur Gewichtsreduktion, realistische Anrechnung E-Mobilität - nicht als Null-Emissionsfahrzeuge, sondern realverbrauchsorientierte Life-Cycle-Emissionen; die explizite Förderung von E-Mobilität sollte über andere Instrumente erfolgen, um die Zielerreichung von Flottenemissionslimits nicht zu konterkarieren.
- Lkw-Effizienzstandards einführen
- Kfz-Steuer als CO_2-orientiertes Bonus-Malus-System mit starker Spreizung zwischen Nullemissionsfahrzeugen und hochemittierenden Verbrennern (Beispiel: Frankreich), Ausgestaltung als Zulassungsteuer kann subjektiv den Preisanreiz verstärken (Beispiel: Norwegen)
- höhere Energiesteuer für fossile Kraftstoffe entsprechend signifikant höherem CO2-Preis
- Dienstfahrzeug-Besteuerung nach CO_2-Emissionen
- Quoten für Neuzulassungen alternativer Antriebe, Phase-out Verbrennerfahrzeuge, um Richtungssicherheit für Antriebswende zu gewährleisten
- Beimischungsquote für erneuerbar erzeugte Kraftstoffe, Phase-out fossile Kraftstoffe

Wuppertal Institut

Literaturverzeichnis

Quellen und Literatur

BDI (2018): Klimapfade für Deutschland. The Boston Consulting Group (BCG), Prognos, für den Bundesverband der Deutschen Industrie.
https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf

BMVI (Hg.) (2019): Verkehr in Zahlen 2019 / 2020, 48. Jahrgang. Bearbeitet von: Sabine Radke, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2019-pdf.pdf?__blob=publicationFile

dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin.
_https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/dena-leitstudie-integrierte-energiewende/

Destatis (2020). Passagiere im Luftverkehr.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/_Grafik/_Interaktiv/passagiere-luftverkehr.html

EEA – European Environmental Agency (2020): Monitoring of CO2 emissions from passenger cars – Regulation (EU) 2019/631
https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-18

ICCT – International Council on Clean Transport (2018): Adjusting for vehicle mass and size in European post-2020 CO2 targets for passenger cars. By Peter Mock, Uwe Tietge, and Jan Dornoff.
https://theicct.org/publications/eu-ldv-co2-utility-parameter-20180808

KBA – Kraftfahrtbundesamt (2020): Neuzulassungen nach Motorisierung.
https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Motorisierung/n_motorisierung_inhalt.html?nn=2601598

Quellen und Literatur

Nobis, Claudia und Kuhnimhof, Tobias (2018): Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Bonn, Berlin.
http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf

OECD / ITF 2016: Shared Mobility. Innovation for Livable Cities. Corporate Partnership Board Report. Paris.
https://www.itf-oecd.org/shared-mobility-innovation-liveable-cities

Rudolph, Frederic; Koska, Thorsten; Schneider, Clemens (2017): Verkehrswende für Deutschland : der Weg zu CO2-freier Mobilität bis 2035. Im Auftrag von Greenpeace, Hamburg.
https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6812/file/6812_Verkehrswende.pdf

Schneidewind (2018): Die Große Transformation – Eine Einführung in die Kunst gesellschaftlichen Wandels. Frankfurt am Main.

Statista (2014). Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland.
https://de.statista.com/infografik/3031/entwicklung-der-pkw-neuzulassungen-in-deutschland/

UBA – Umweltbundesamt (2012). Daten zum Verkehr. Ausgabe 2012 (Ratgeber 1. Auflage; S. 72).
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4364.pdf

UBA – Umweltbundesamt (2019). Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: Rescue Studie. Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/rescue

UBA – Umweltbundesamt (2020): Indikator: Emissionen von Treibhausgasen. Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase,
https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten

UBA – Umweltbundesamt (2020b). Fahrleistungen, Verkehrsaufwand und „Modal Split“.
https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterverkehr

Gebäudesektor

Dietmar Schüwer und Steven März
unter Mitarbeit von Ines Stelk

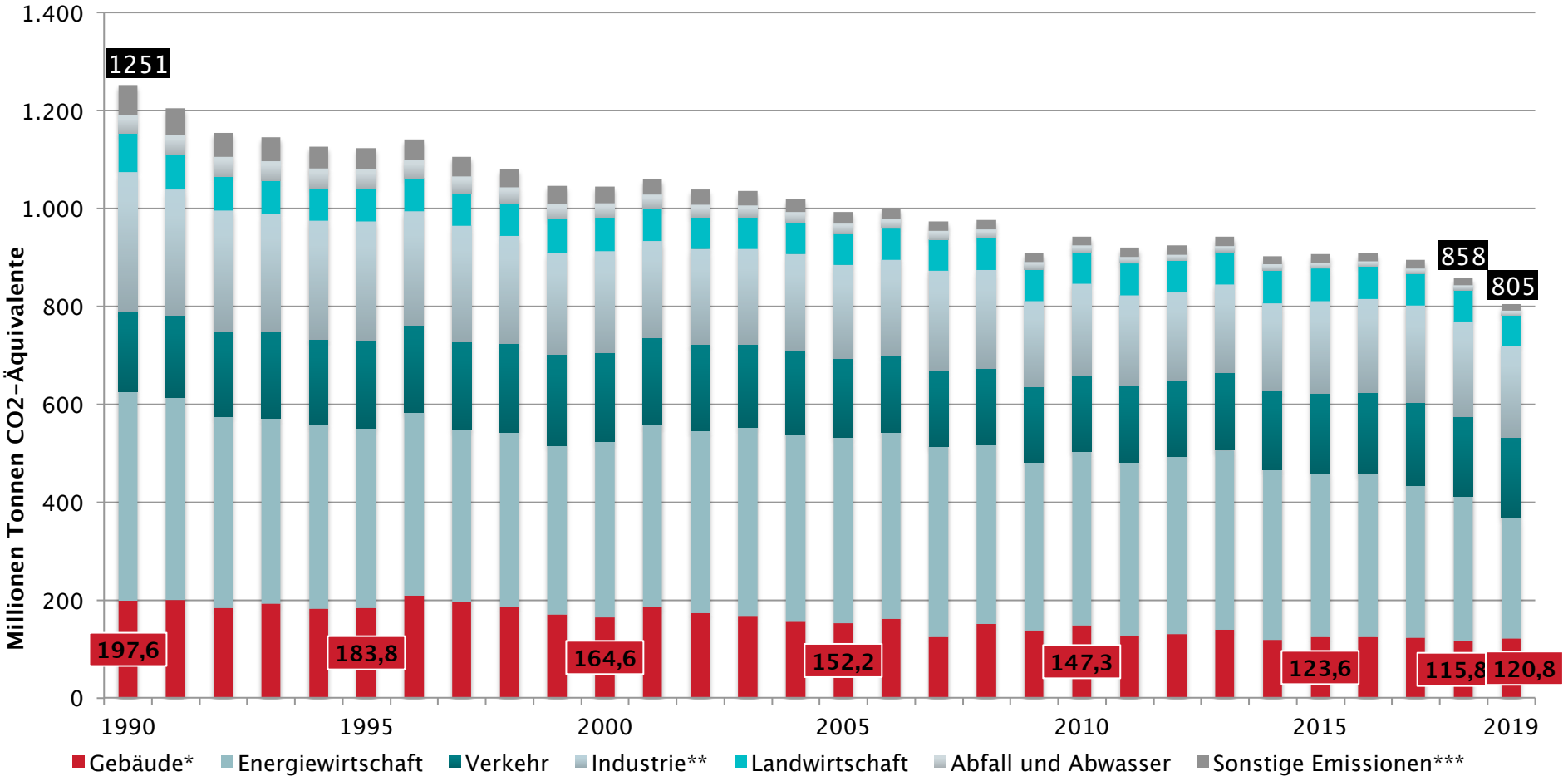
Die THG-Emissionen des Gebäudesektors 182
Zentrale Herausforderungen und Klimaschutzstrategien im Gebäudesektor 184
Zusammenfassung wichtiger „Must Dos“ 198
Skizzierung möglicher politischer Instrumente 202
Literaturverzeichnis 204

Wuppertal Institut

Die THG-Emissionen des Gebäudesektors

Bedeutung des Gebäudesektors für die deutschen Treibhausgasemissionen

Der Gebäudesektor verursacht ca. 15 % der deutschen THG-Emissionen



* umfasst Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und private Haushalte
** umfasst energie- und prozessbedingte Emissionen der Industrie
*** umfasst sonstige Feuerungen (u.a. Militär) & diffuse Emissionen aus Brennstoffen

Quelle: eigene Darstellung nach UBA, 2020: Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase. www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten (01.07.2020)

Sektorübersicht

Wuppertal Institut

Zentrale Herausforderungen und Klimaschutzstrategien im Gebäudesektor

Struktur und Relevanz des Gebäudebestands in Deutschland

Die Dekarbonisierung des Gebäudebestands und insbesondere die Bestandssanierung ist unerlässlich

Anteil des Gebäudebestandes am Endenergieverbrauch Deutschlands (in Klammern nur Wohngebäude)	Jährliche energetische Sanierungsrate
32,5 % (22 %)	0,8 – 1,0 % p.a.

Eigentümerstruktur	Anteil Wohngebäude, die vor 1979, d. h. ohne energetische Mindeststandards errichtet wurden (in Klammern Wohnungen)
• 80 % aller Wohnungen in Besitz von Privatpersonen • 57 % aller Wohnungen vermietet • 23 % aller Wohnungen in Wohneigentümergemeinschaften (WEG)	64 % (69 %)

Quelle: BMWi (2019), Cischinsky et al. (2018), Destatis (2020)

- Dekarbonisierung des Gebäudesektors unerlässlich für die Einhaltung von Klimazielen
- Herausforderung besteht vor allem in der Bestandssanierung
- Kleinteilige Eigentümerstruktur mit hohem Anteil an privaten Wohnungs-/Gebäudeeigentümern

Treiber und Hemmnisse der Dekarbonisierung

Entscheidend für die Dekarbonisierung ist das Zusammenspiel aus Suffizienz, Effizienz und Konsistenz

Suffizienz:
Wieviel Wohnfläche ist genug?

Effizienz:
Wie effizient sollten die Gebäude sein?

Konsistenz:
Wie sollten die Gebäude beheizt werden?

Suffizienz:
Wieviel Wohnfläche ist genug?

Treiber und Hemmnisse der Dekarbonisierung

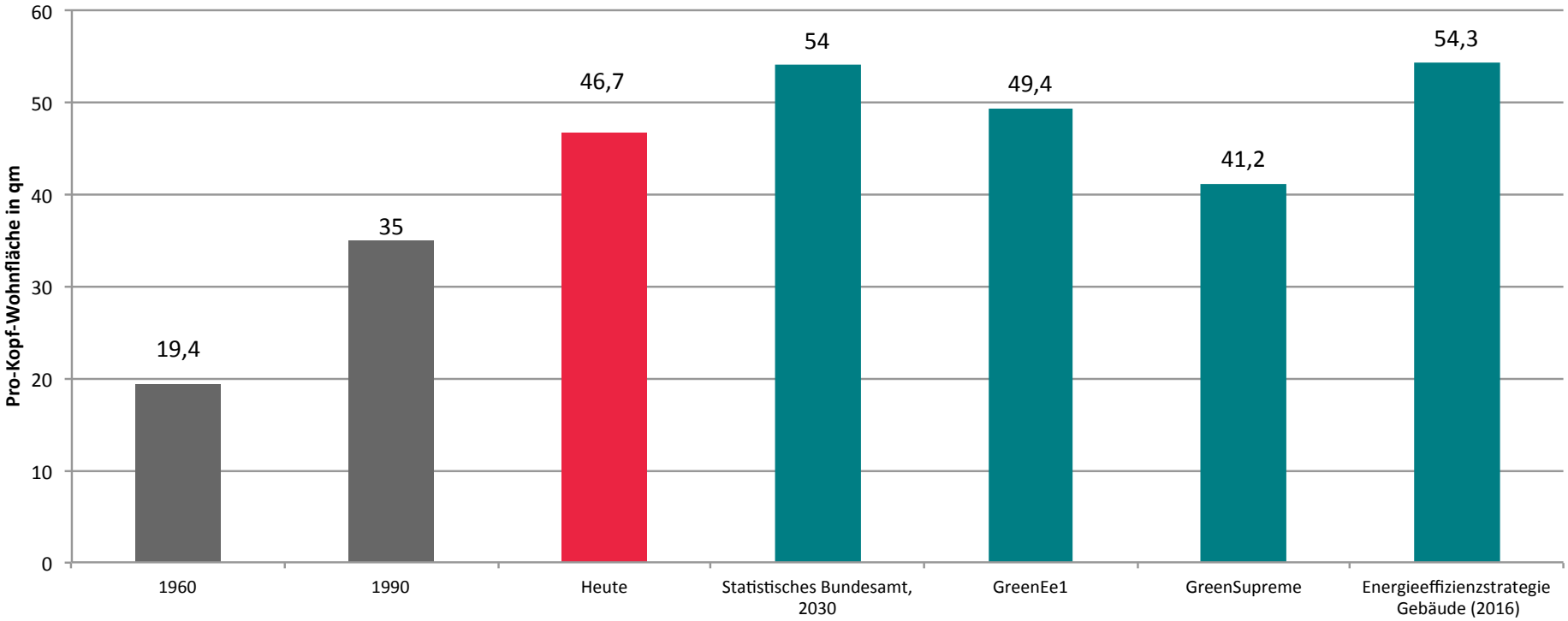
Wie viel Wohnfläche ist genug?

Zeitnahe Trendumkehr beim Wohnflächenbedarf ist notwendig, um den Heiz- und Energiebedarf zu reduzieren

Wuppertal Institut

Sektorbeschreibung

Wohnflächenentwicklung – Gestern, Heute und Morgen



Quelle: eigene Dartellung basierend auf den aufgeführten Szenarien

- Steigende Pro-Kopf-Wohnfläche bedeutet nicht nur erhöhter Flächen- und Ressourcenverbrauch, sondern auch erhöhter Energiebedarf beim Wohnen.
- Rasche Trendumkehr bei der Wohnflächenentwicklung hilft daher, die zu beheizende Wohnfläche und damit den Raumwärmebedarf insgesamt zu senken.

Effizienz:
Wie effizient sollten die Gebäude sein?

Treiber und Hemmnisse der Dekarbonisierung

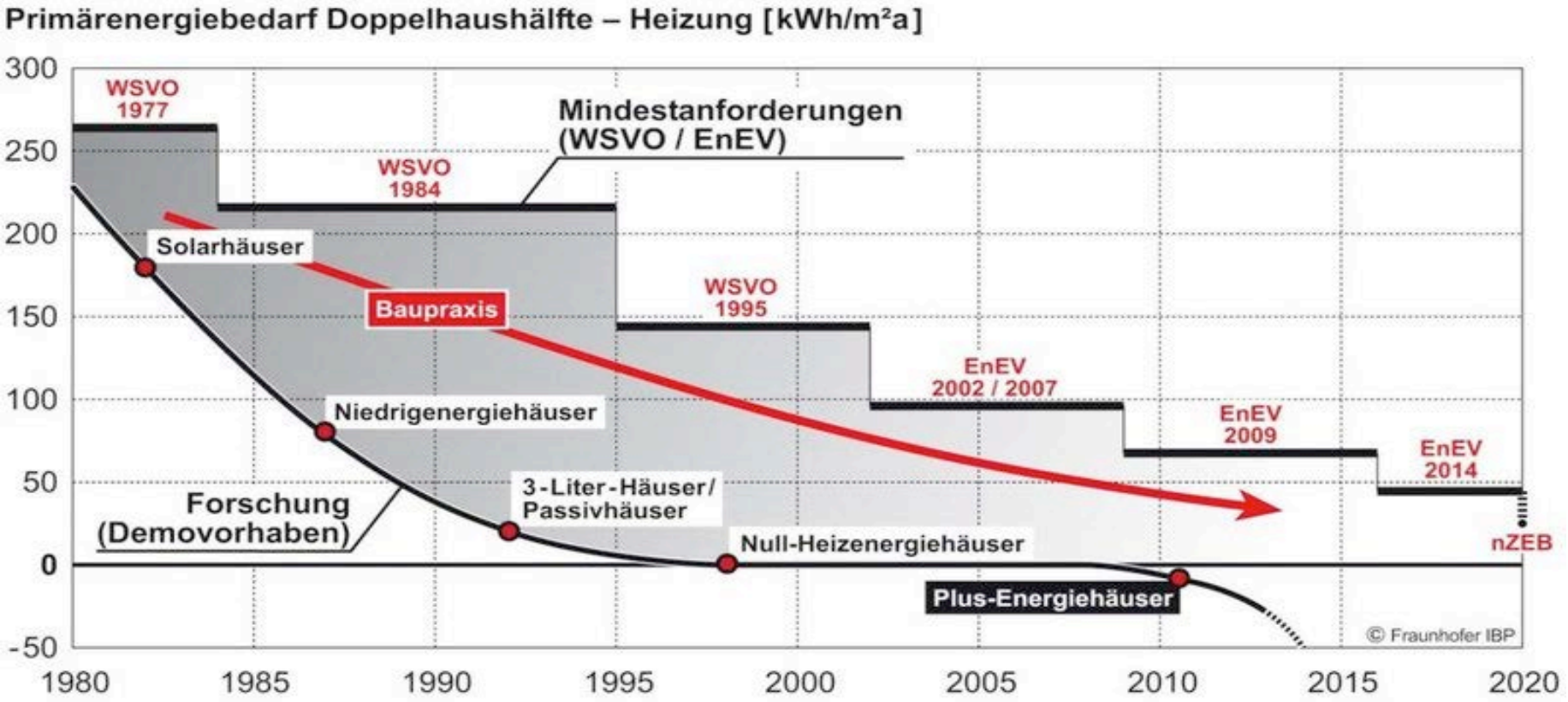
Wie effizient sollten die Gebäude sein?

Hohe energetische Mindeststandards für Neubau UND Bestandssanierungen notwendig

Wuppertal Institut

Sektorbeschreibung

Energetische Mindeststandards



- Hohe energetische Mindeststandards sind ein wirkungsvolles Instrument zur Senkung des Energiebedarfs
- Vorgaben und Sanierungspraxis bleiben bisher deutlich hinter den technologischen Potenzialen zurück

Quelle: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, abgerufen von https://www.bonner-energie-agentur.de/waermeschutz/energieeffizienter-neubau/

Treiber und Hemmnisse der Dekarbonisierung

Wie effizient sollten die Gebäude sein?

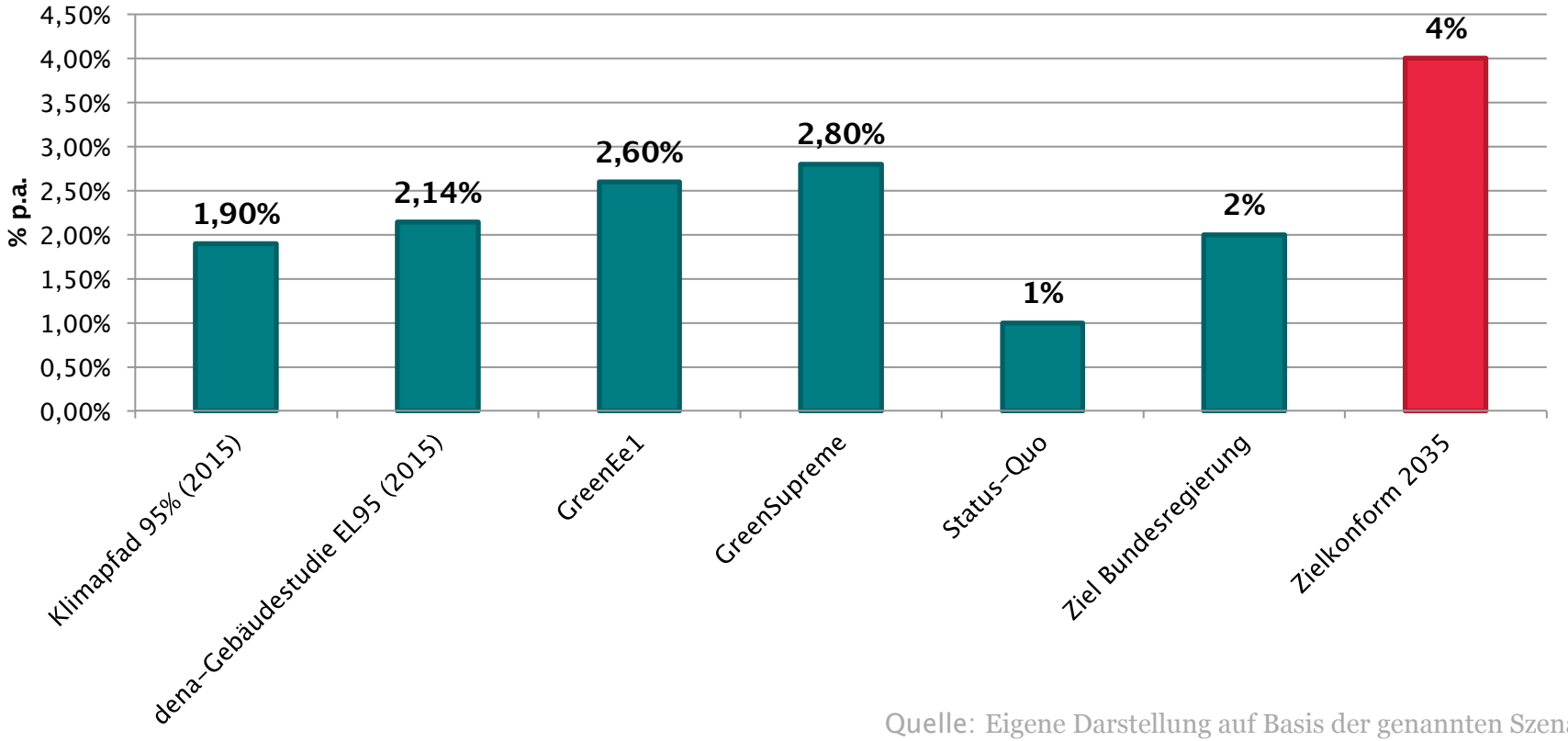
Gegenwärtige 1% p.a. Sanierungsrate ist absolut unzureichend

Wuppertal Institut

Sektorbeschreibung

Mittlere Sanierungsrate* in bestehenden Klimaschutzszenarien (Basisjahr bis 2050)

*Anteil der Wohnungen/Wohnfläche, die im Mittel über den Betrachtungszeitraum pro Jahr umfassend energetisch saniert wurden



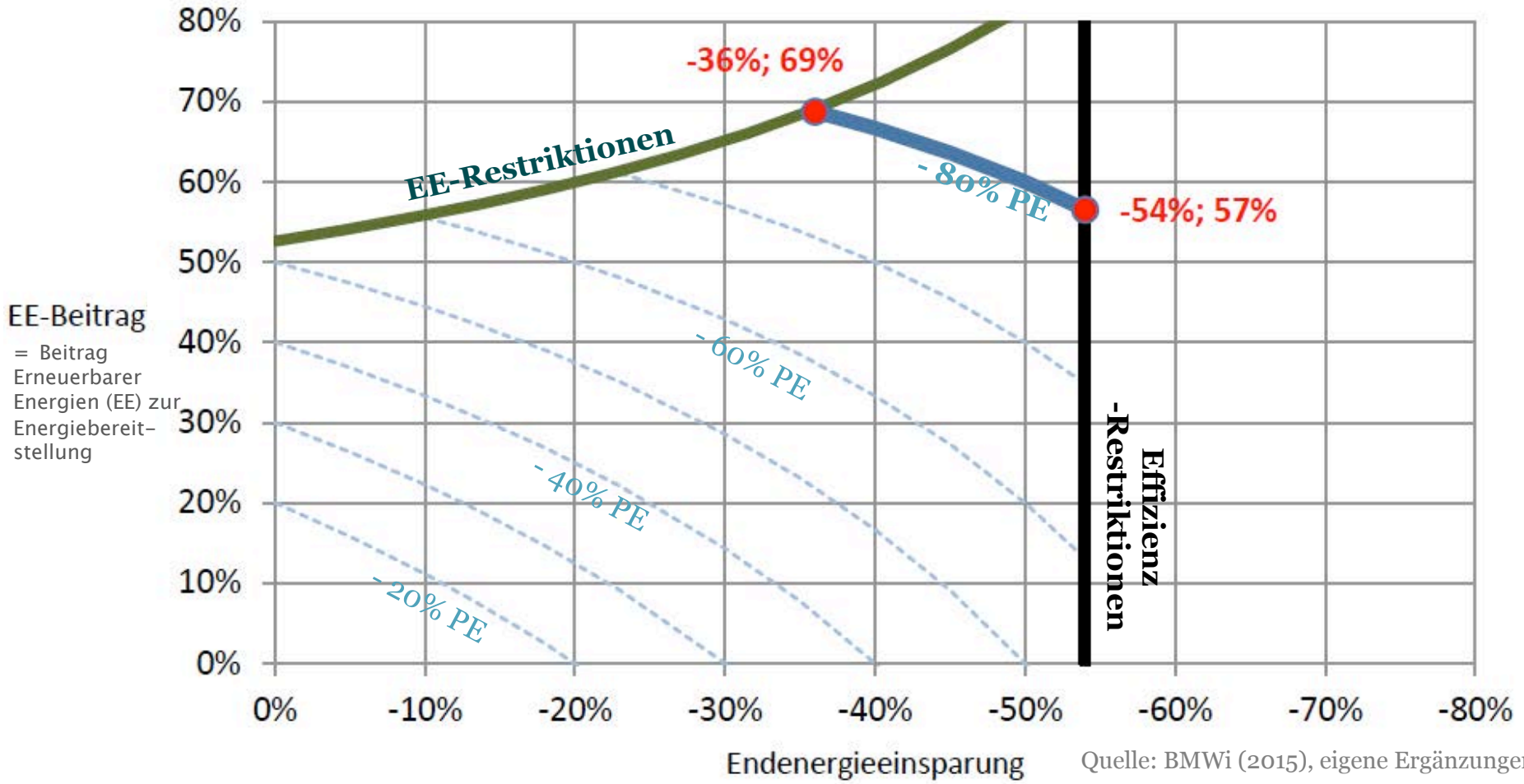
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der genannten Szenarien

- Gegenwärtige energetische Sanierungsraten von rund 1 % p.a. ist sowohl für das Zieljahr 2050 als auch für 2035 absolut unzureichend.
- Klimaschutzszenarien mit nahezu Klimaneutralität bis 2050 erfordern mittlere Sanierungsraten von 1,9 bis 2,8 % p.a.
- Für das Erreichen der Klimaneutralität 2035 wäre eine Sanierungsrate von 4 % erforderlich.

Treiber und Hemmnisse der Dekarbonisierung

Wie effizient sollten die Gebäude sein?

Dekarbonisierung braucht Energieeffizienz UND Erneuerbare



Quelle: BMWi (2015), eigene Ergänzungen

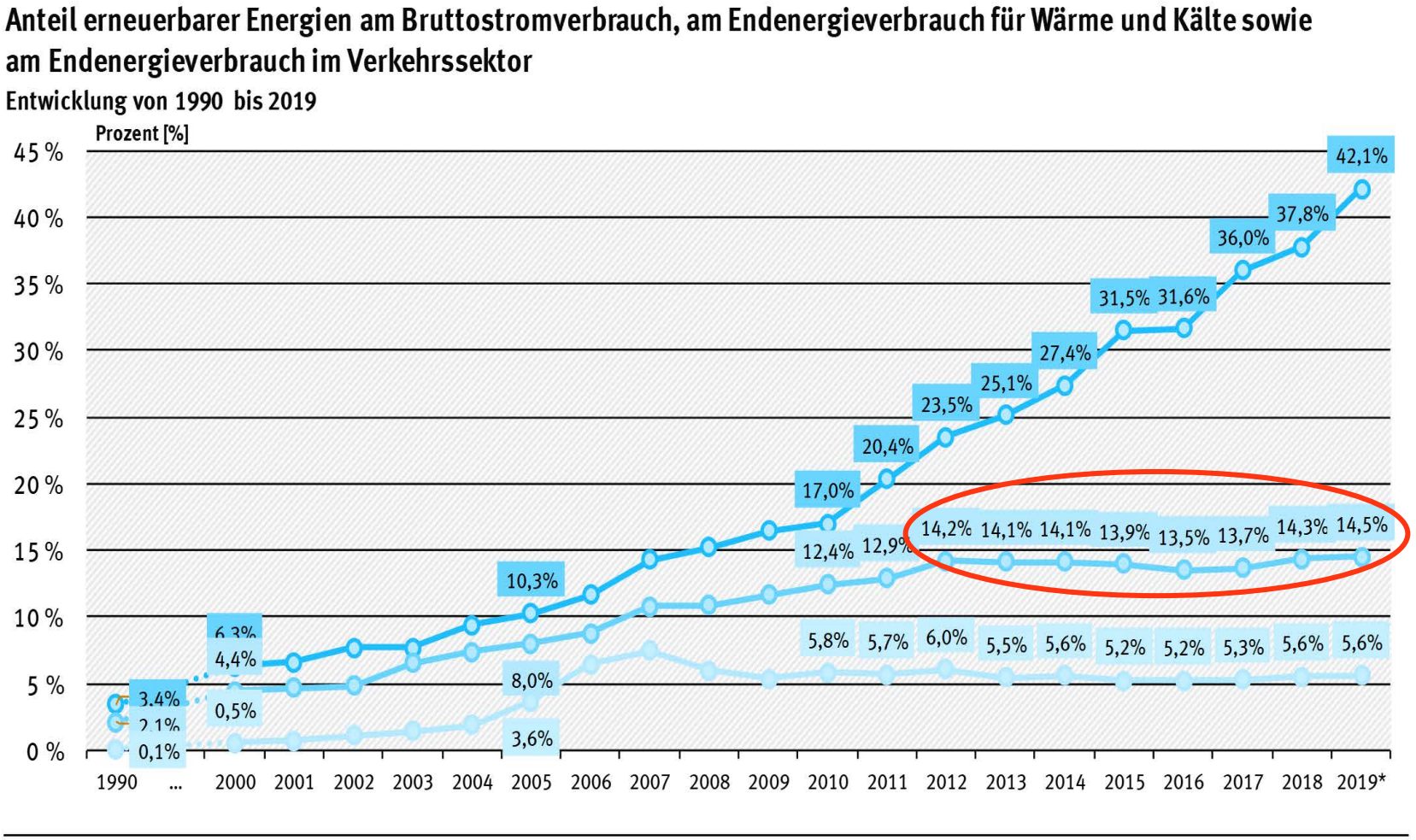
- Zielkorridor für notwendige Reduzierung des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PE) um 80 % (= ursprüngliches Gebäudesektor-Ziel der Bundesregierung aus dem Energiekonzept 2010) ist sehr schmal.
- Zielerreichung theoretisch sowohl über Fokus auf Energieeffizienz als auch auf Erneuerbare Energien möglich.
- Für Klimaneutralität muss der fossile PE um 100 % reduziert werden.
- **ABER:** Selbst um das (schwächere) 80%-Minderungsziel der Bundesregierung zu erreichen, müssen sowohl Potentiale im Bereich Erneuerbare Energien als auch im Bereich Energieeffizienz/Energieeinsparung weitgehend ausgenutzt werden!

Konsistenz:
Wie sollten die Gebäude beheizt werden?

Treiber und Hemmnisse der Dekarbonisierung

Wie sollten die Gebäude beheizt werden?

Stagnation der Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung (Haushalte, GHD* und Industrie) in den letzten 8 Jahren



*Gewerbe, Handel, Dienstleistung

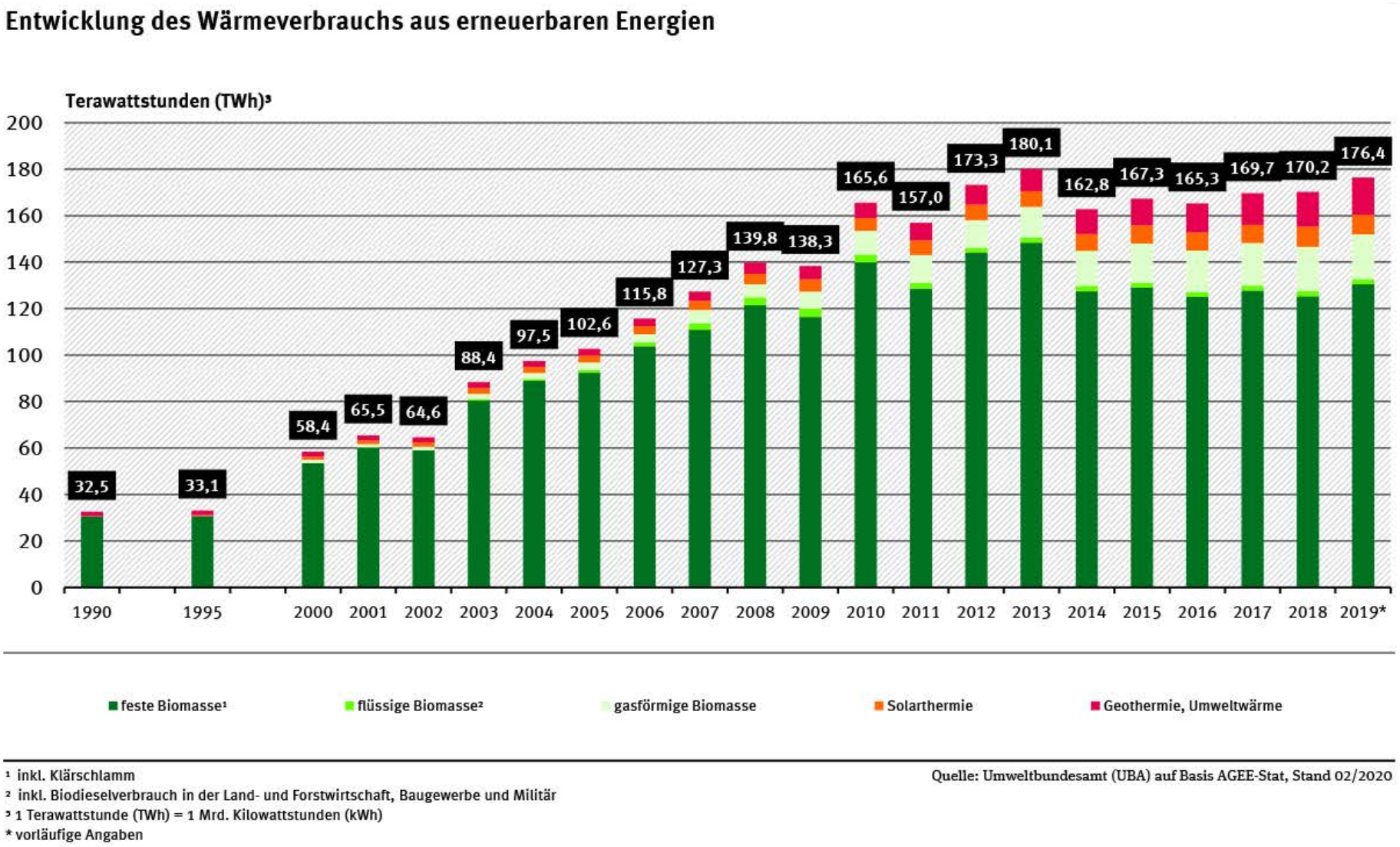
Quelle: UBA (2020b) auf Basis AGEE-Stat (02/2020)

Treiber und Hemmnisse der Dekarbonisierung

Wie sollten die Gebäude beheizt werden?

Biomasse – mit begrenzten Potenzialen – dominiert nach wie vor erneuerbare Wärmeerzeugung

Trotz Ausbaus von Geothermie und Umweltwärme in Summe seit 2012 Stagnation



¹ inkl. Klärschlamm

² inkl. Biodieselverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft, Baugewerbe und Militär

³ 1 Terawattstunde (TWh) = 1 Mrd. Kilowattstunden (kWh)

* vorläufige Angaben

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat, Stand 02/2020

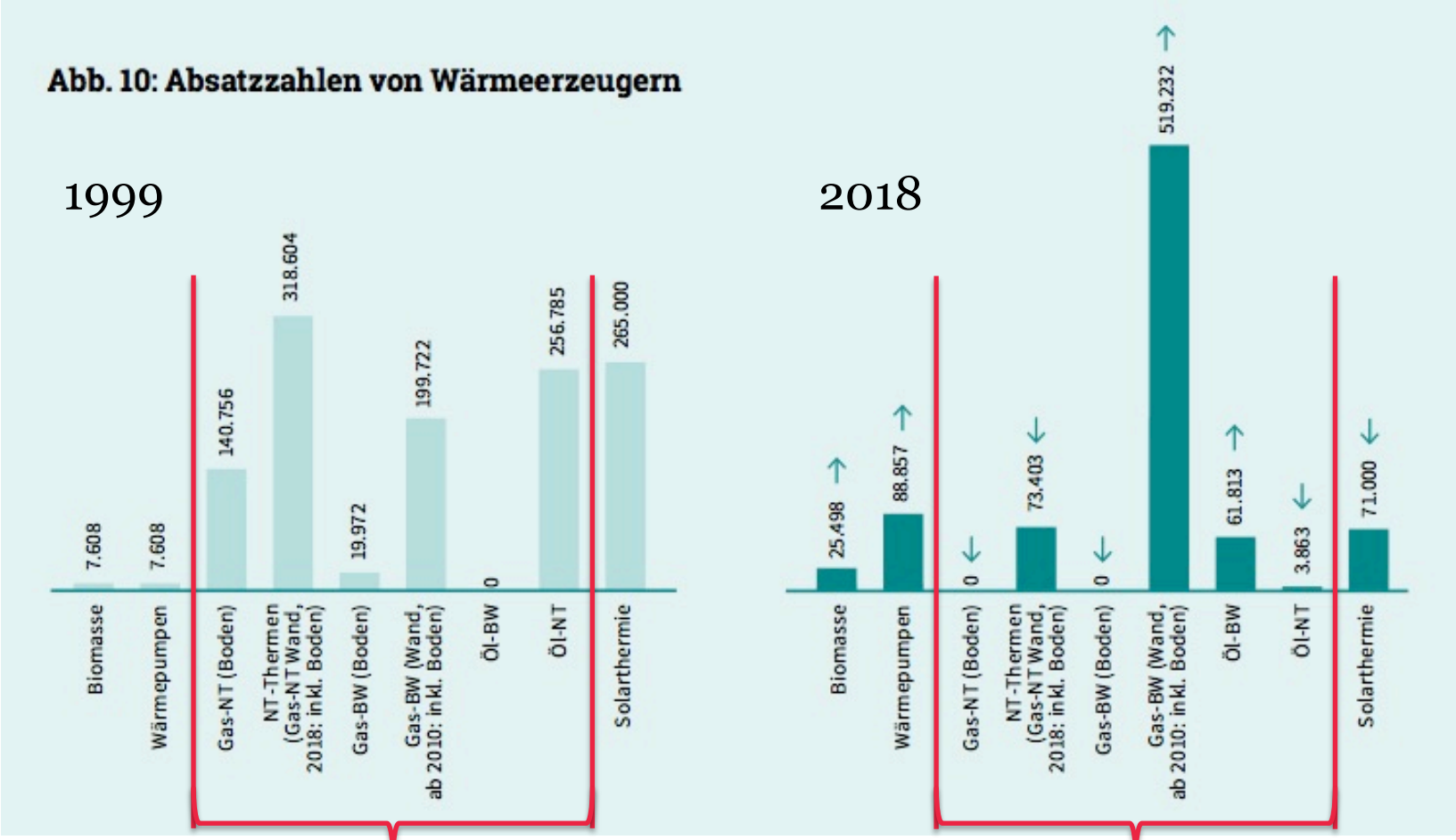
Quelle: UBA (2020b) auf Basis AGEE-Stat (02/2020)

Sektorbeschreibung

Treiber und Hemmnisse der Dekarbonisierung

Wie sollten die Gebäude beheizt werden?

Anteil von fossil befeuerten Heizungen bleibt unverändert hoch -> Lock-in-Gefahr



77 % Fossil

78 % Fossil

Quelle: dena (2019)

- Die meisten neu installierten Heizungen werden unverändert fossil und insbesondere mit Erdgas betrieben.
- Gleichbleibender Trend bei der Installationen von fossil befeuerten Wärmeerzeugern führt zu Lock-ins und verhindert eine Dekarbonisierung bis 2035, da Heizungen sonst weit vor dem Ende ihrer vorgesehenen Lebensdauer (20-30 Jahre) ausgetauscht werden müssten.

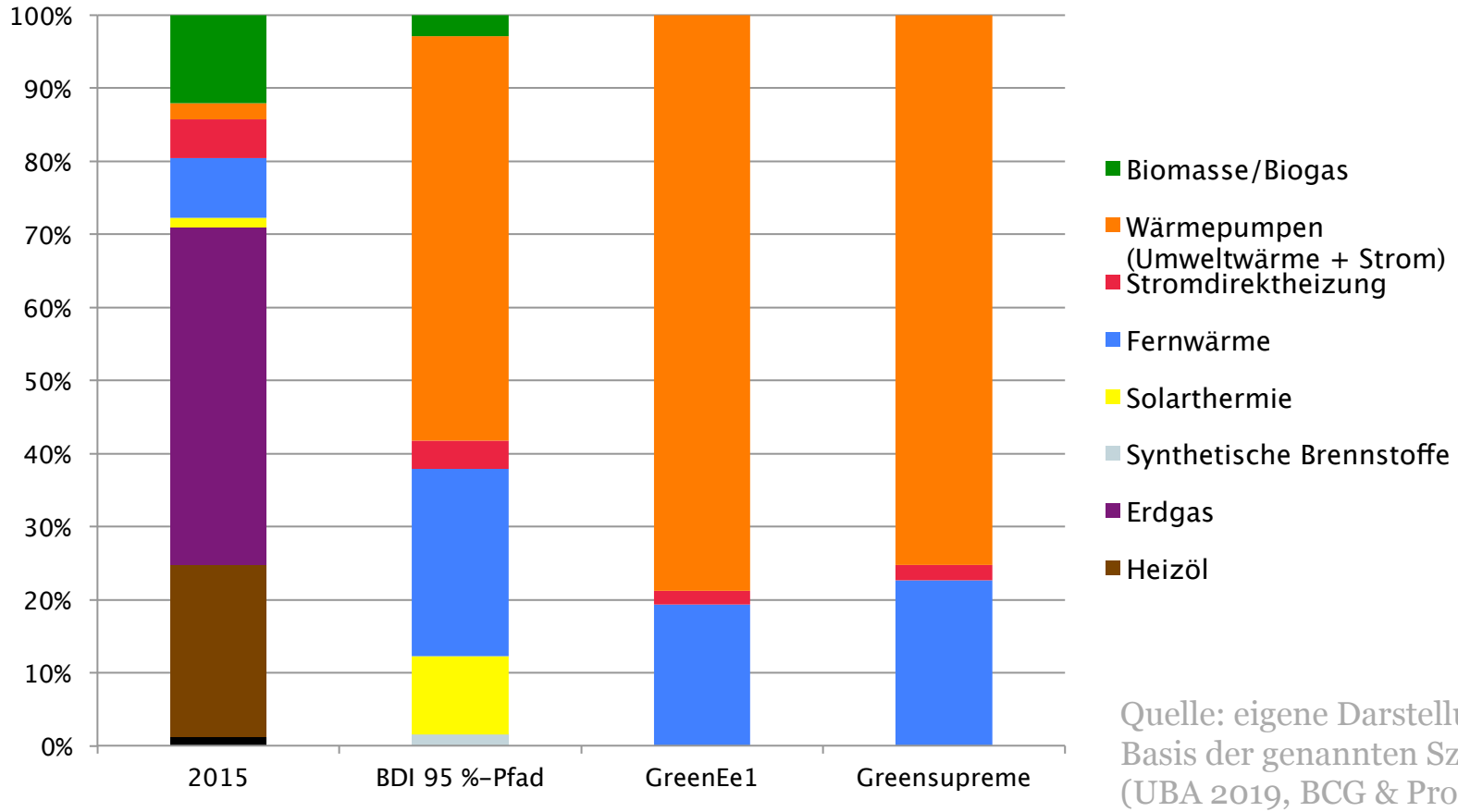
Wie wird der Gebäudebestand beheizt?

Deutliche Elektrifizierung der Wärmeerzeugung erfordert hohes Maß an Energieeffizienz, um Anstieg im Strombedarf zu begrenzen

Wuppertal Institut

Sektorbeschreibung

Beheizungsstruktur beim Erreichen von (weitestgehender) Klimaneutralität



Quelle: eigene Darstellung auf Basis der genannten Szenarien (UBA 2019, BCG & Prognos 2018)

- Deutliche Elektrifizierung -> der überwiegende Teil der Gebäude wird mit Wärmepumpen beheizt
- Hohes Maß an Energieeffizienz notwendig zur Vermeidung von:
  - Massivem Anstieg des Strombedarfs (Systemsicht) und
  - Hohen Erschließungskosten (Wärmepumpe inkl. Wärmequelle) sowie hohen Betriebskosten (Anwendersicht)

Zusammenfassung wichtiger „Must Dos“

Must do für eine Dekarbonisierung bis 2050

Mix aus Suffizienz, Effizienz und Erneuerbaren Energien (Konsistenz)

Wuppertal Institut

Must-Do

SUFFIZIENZ:

- Bremsen des Wohnflächenanstiegs pro Kopf z. B. durch neue, kommunal unterstützte Wohnmodelle (Mehrgenerationen, flexible Nutzung…)
- Landflucht entgegenwirken durch bessere Daseinsvorsorge im ländlichen Raum
- Entwicklung der
- bedingten Einsparpotenziale

EFFIZIENZ (Gebäudehülle):

- Schnellstmöglich jährliche **Sanierungsrate** von ca. 1 % auf 2 % verdoppeln (d.h. 60 % statt 30 % Vollsanierung bis 2050)
- Sukzessive Sanierungstiefe für **Bestandssanierung** von EnEV-Standard (130 % bezogen auf Neubauanforderung) auf KfW55- oder Passivhausstandard erhöhen
- Schnellstmöglich **Neubaustandards** von KfW75 (Referenzgebäude 100 minus 25%) auf KfW40- oder Passivhausstandard erhöhen

ERNEUERBARE:

- Ausbau von erneuerbaren Heizungstechnologien und Umstieg auf erneuerbare Wärmequellen (Umgebungswärme, Abwärme & Geothermie plus Wärmepumpe, Solarenergie, grüne Nah- und Fernwärme, Biomasse, Biomethan, EE-Methan, EE-H_2)

Zusätzliche Must do für eine Dekarbonisierung bis 2035

Efficiency First & Elektrifizierungsstrategie:

Mix aus Suffizienz, Effizienz und Erneuerbare

Wuppertal Institut

Zusätzliche Maßnahmen

EFFIZIENZ (Gebäudehülle):

- Schnellstmöglich jährliche Sanierungsrate von heute ca. 1 % auf mind. 4 % vervierfachen (d.h. 60 % statt 15 % aller Gebäude werden bis 2035 vollsaniert)
- Sofortige Erhöhung der Sanierungstiefe für Bestandssanierung vom jetzigen EnEV-Standard (130 % bezogen auf Neubauanforderung) auf KfW55- oder Passivhausstandard
- Sofortige Verbesserung des Neubaustandards von KfW75 auf KfW40 oder Passivhausstandard

ERNEUERBARE (Wärmeversorgung):

- Schnellstmöglicher Verzicht auf Zubau bzw. Ersatz fossil betriebener Heizungskessel
- Vollständiger Umstieg bis 2035 auf erneuerbare Wärmequellen mit Fokus auf Elektrifizierung (mittels Wärmepumpen) und Solarenergie sowie grüne Nah- und Fernwärme (Wärmepumpe, Geothermie & Umweltwärme, Solarenergie, industrielle und kommunale Abwärme, Biomasse, Kraft-Wärme-Kopplung mit erneuerbaren Gasen)

Chancen & Risiken:

Die Vorteile einer Strategie „Efficiency First & Elektrifizierung“ überwiegen im Vergleich zu einer einseitigen Ausrichtung mit Fokus auf erneuerbare Gase

Fokus	Vorteile/Chancen	Nachteile/Risiken
Effizienz, Suffizienz & Elektrifizierung	• Suffizienz führt zu weniger Flächen- und Ressourcenverbrauch (inkl. graue Energie) und mindert bestehende soziale Verwerfungen (Wohnungsnot in urbanen Zentren) • Hohe energetische Standards als Versicherung gegen steigende Brennstoffkosten • Hohe energetische Standards bieten gleichzeitig Schutz vor sommerlicher Überhitzung • Elektrifizierungsstrategie baut auf Effizienz (Wärmepumpe mit Wirkungsgraden von 300 bis 400 %) und erneuerbaren Strom mit hohem Realisierungspotenzial (auch inländisch) • Wärmepumpenstrategie (mit Erdwärme) eröffnet gleichzeitig Potenzial zur energieeffizienten sommerlichen Kühlung (Regeneration der Erdsonden)	• Energetische Sanierungsrate von 4 %/a sehr ambitioniert und Risiko von Kapazitätsengpässen (Planung und Ausführung) -> Qualifikation & Kapazitätsaufbau essentiell (z. B. auch durch serielles Sanieren) • Möglicherweise fehlende Akzeptanz tiefgreifender energetischer Sanierung • Erschließung von Niedertemperatur-Wärmequellen erforderlich (Erd- und Umgebungswärme, Abwärme) -> Kosten, Potenziale • In winterlichen Dunkelflauten hoher elektrischer Backup erforderlich (Thermosensibilität von Wärmepumpen) • (Moderater) Ausbau der elektrischen Verteilnetze erforderlich
Erneuerbare Gase	• Beibehaltung bzw. Umwidmung vorhandener Infrastrukturen (Gasverteilnetz, Gaskessel bei Syngas) • Direkte Nutzbarkeit von reinem Wasserstoff in Brennstoffzellen möglich	• Risiko nicht ausreichend verfügbarer inländischer und ausländischer erneuerbarer Gase (fossiler Lock-in) • Risiko erhöhter Brennstoffkosten aufgrund – höherer Wärmebedarfe (Gebäude) – geringere Wirkungsgradketten (EE-H2: ca. 67 %, EE-Methan: ca. 50 %, d. h. Faktor 5 bis 6 ggü. WP) – Potenzialbegrenzungen und – Abhängigkeit von Brennstoffimporten • Szenario H2-Beimischung: max. 20% H2-Anteile liefern nur ca. 7% Energie (und somit CO2-Einsparung) • Szenario 100% H2: Austausch aller Gaskessel erforderlich (i.d.R. weit vor Erreichen technischer Lebensdauer)

Wuppertal Institut

Zusätzliche Maßnahmen

Wuppertal Institut

Skizzierung möglicher politischer Instrumente

Was muss passieren?

Policy-Mix aus Regulation, Anreizen sowie Information und Beratung notwendig

Wuppertal Institut

Politikinstrumente

Suffizien

- **Wohnraumbedarfszuwächse reduzieren und Wachstumstrend möglichst umkehren, Flächen intelligent und flexibel nutzen**

Effizienz / Konsistenz

- **Anreizsystem zum Fördern UND Fordern von energetischen Sanierungsmaßnahmen weiterentwickeln**
  - Anlassbezogene energetische Sanierung zur Verpflichtung machen (z. B. bei Vererbung)
  - Verbindlicher Phase Out fossiler Heizsysteme
  - Finanzielle Anreize erhöhen und an Zielgruppen anpassen
  - Verursacher- und sozial gerechte, wirkungsvolle CO_2-Bepreisung
  - Gerechter Lastenausgleich
- **Ganzheitliche Sanierungssteuerung und Monitoring**
  - Verbindliche Sanierungsfahrpläne
  - One-Stop-Shops
- **Qualifizierungs- und Kommunikationsoffensive**
  - Digitalisierung nutzen (z. B. Serielles Sanieren / PreFab, 3D-Druck)
  - Sanierung erlebbar machen (z. B. Demonstration, Erfahrungsaustausch)
  - Ausbildungs- und Qualifizierungsoffensive im Handwerk

Wuppertal Institut

Literaturverzeichnis

Quellen und Literatur

AGEE-Stat (02/2020). Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), Quartalsbericht 02/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/agee-stat_quartalsbericht_q2-2020_0.pdf

BCG & Prognos – The Boston Consulting Group & Prognos (2018). *Klimapfade für Deutschland.* Studie im Auftrag des Bundesverband der deutschen Industrie. https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland (16.03.2020).

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015). Energieeffizienzstrategie Gebäude: Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-gebaeude.pdf?__blob=publicationFile&v=25

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019). Die Energie der Zukunft. Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht-monitoring-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=26

Bonner Energie Agentur (2020). Effizienzstandards im Überblick. https://www.bonner-energie-agentur.de/waermeschutz/energieeffizienter-neubau/ (Grafik des Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP)

Cischinsky, D. H., & Diefenbach, D. N. (2018). Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt (IWU).

Quellen und Literatur

dena – Deutsche Energieagentur (2017). Gebäudestudie. Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima-und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Meldungen/dena_Gebaeudestudie.pdf

dena – Deutsche Energieagentur (2018). *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050*. https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/dena-leitstudie-integrierte-energiewende/

dena – Deutsche Energieagentur (2019). Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand (dena-Gebäudereport kompakt 2019). Deutsche Energie Agentur GmbH. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-GEBAEUDEREPORT_KOMPAKT_2019.pdf

Destatis (2020). Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden. Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden. Lange Reihen ab 1969—2018. Statistisches Bundesamt.

UBA (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: Rescue Studie.* Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/rescue

UBA – Umweltbundesamt (2020). Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase. www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten

UBA – Umweltbundesamt (2020b). Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch, am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte sowie am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/bilder/anteil_ee_in_den_sektoren_02-2020.png

Wuppertal
Institut