

WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM 2050

Die deutsche Energiewende im Kontext
gesellschaftlicher Verhaltensweisen –

Update unter einer Zielvorgabe von 65%
CO₂-Reduktion in 2030 und 100% in 2050

Update dieser Studie
Reduktion energiebedingter CO₂-
Emissionen um 65% bis 2030 und
100% bis 2050

WEGE ZU EINEM KLIMANEUTRALEN ENERGIESYSTEM

Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen – Update für ein CO₂-Reduktionziel von 65% in 2030 und 100% in 2050

Julian Brandes, Markus Haun, Charlotte Senkpiel, Christoph Kost, Andreas Bett, Hans-Martin Henning

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Dezember 2020

Zusammenfassung

Die im Februar 2020 erschienene Studie »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem«¹ zeigt den Einfluss gesellschaftlicher Verhaltensweisen auf mögliche Transformationspfade des deutschen Energiesystems hin zu einer nahezu vollständigen Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen im Jahr 2050. Hierbei wurden die zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie anvisierten Ziele der Bundesregierung einer Reduktion der CO₂-Emissionen von 55% im Jahr 2030 und 95% im Jahr 2050 gegenüber 1990 mit dem Energiesystemmodell REMod untersucht. Als Reaktion auf die im Rahmen des „European Green Deal“ nun erfolgte Verschärfung der europäischen Ziele von 40% auf 55% für 2030 wurden die betrachteten Transformationspfade für Deutschland auf eine Reduktion von 65% im Jahr 2030 und eine vollständige Klimaneutralität des Energiesystems im Jahr 2050 aktualisiert. Dazu wurden alle Szenarien (Referenz, Beharrung auf konventionellen Technologien, Inakzeptanz von großen Infrastrukturmaßnahmen, Suffizienz) neu berechnet und um eine Untersuchung der Sensitivität für Importpreise grünen Wasserstoffs und synthetischer Brennstoffe ergänzt. Um auf die Veränderungen, hervorgerufen durch die Zielverschärfung, näher einzugehen wird in dieser Kurzstudie hauptsächlich auf das Referenzszenario eingegangen. Zusätzlich werden an etlichen Stellen untere und obere Grenzen für den Ausbau von Technologien genannt, die sich aus den Ergebnissen für das Suffizienz- und das Referenzszenario ergeben. Die zentralen Ergebnisse des Updates sind:

- 1. Das Erreichen der Klimaschutzziele, auch mit einer stärkeren Reduzierung der Treibhausgasemissionen als bisher angenommen, ist aus technischer und systemischer Sicht machbar. Jedoch sind die Anstrengungen merklich höher, sowohl bis 2030 als auch bis 2050.**

Die Modellrechnungen mit einer Reduzierung der energiebedingten Emissionen um 65% bis 2030 und um 100% bis 2050 zeigen, dass trotz eines steigenden Anteils fluktuierender erneuerbarer Energien die Versorgung aller Verbrauchssektoren zu jeder Stunde innerhalb der nächsten 30 Jahre gewährleistet werden kann.

- 2. Eine Zielverschärfung der energiebedingten CO₂-Emissionen führt zu einer höheren direkten oder indirekten Nutzung von erneuerbar erzeugtem Strom in den Verbrauchssektoren.**

Durch die Zielverschärfung steigt bis zum Jahr 2030 der Strombedarf auf ca. 700–780 TWh_{el} an und bis zum Jahr 2050 weiter auf etwa 1250–1570 TWh_{el}. Zu den originären Stromanwendungen hinzu kommt der Strombedarf für die Verbrauchssektoren Verkehr, Raumwärme und Industrie sowie für die Herstellung synthetischer Energieträger.

- 3. Zur Deckung dieser erhöhten Strommenge ist ein noch stärkerer Ausbau von Anlagen zur Stromerzeugung aus Wind und Sonne notwendig.**

Die installierte Leistung von Windenergie und Photovoltaik steigt bis zum Jahr 2030 durch die Zielverschärfung auf 155–200 GW_{el} Photovoltaik und 132–145 GW_{el} Windenergie, onshore und offshore. Für Klimaneutralität im Jahr 2050 steigt diese auf 340–450 GW_{el} Photovoltaik und 240–300 GW_{el} Windenergie, onshore und offshore.

¹ Sterchele et al. »Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen«, 2020
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>

4. Die jährlichen Zubaumengen von Windenergie und Photovoltaik liegen zum Erreichen der verschärften Ziele deutlich über den heutigen.

Um das verschärfte Zwischenziel zur Reduktion der Emissionen im Jahr 2030 erreichen zu können, ist bis dahin jährlich ein durchschnittlicher Zubau der Photovoltaik von 10,5–14,8 GW_{el} notwendig. Onshore wird jährlich ein Zubau von 7,4–8,4 GW_{el} Windenergie benötigt und offshore von 1,4–1,7 GW_{el}.

5. Ein starker Ausbau von Systemflexibilität wird durch den mit der Zielverschärfung einher gehenden stärkeren Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien noch wichtiger.

Ein noch weiter steigender Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien im Energiesystem muss durch ein hohes Maß an Systemflexibilität kompensiert werden. Hierbei steigt der Ausbau von Kurzzeitspeichern (insbesondere stationärer Batterien) um rund weitere etwa 60 GWh_{el} auf 84 GWh_{el} im Vergleich zu einem -55 % Zwischenziel im Jahr 2030.

6. Insbesondere die heimische Erzeugung, aber auch der Import von synthetischen Energieträgern ist ein wichtiger Baustein zum Erreichen der verschärften Klimaschutzziele.

Die Zielverschärfung im Jahr 2030 hat zur Folge, dass auf Basis von klimaneutralem Strom hergestellte, synthetische Energieträger bereits früher in großen Mengen bereitgestellt werden müssen. Dabei wird in der Untersuchung davon ausgegangen, dass die Infrastruktur für einen umfangreichen Import erst in späteren Jahren verfügbar ist. Daher spielt die heimische Erzeugung mit 100 TWh eine wesentliche Rolle – sogar mehr als bei dem Zwischenziel von -55 %. Im Zieljahr 2050 zeigt die Zielverschärfung nur einen geringen Einfluss auf die Menge der genutzten synthetischen Energieträger. Da die Importkosten aus heutiger Sicht jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden sind, könnten günstigere Importpreise zu einer stärkeren Nutzung dieser Energieträger führen. Eine Variation der Importpreise wurde aus diesem Grunde berechnet.

7. Für eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 65% bis 2030 müssen batterieelektrische Fahrzeuge 30–35% des Personenverkehrs ausmachen.

Die schärferen Zwischenziele können nur erreicht werden, wenn klimaneutral erzeugter Strom auch in den Verbrauchssektoren verwendet wird. So müssten im Jahr 2030 bereits etwa 19 Mio. batterieelektrische Fahrzeuge eingesetzt werden, was jährlich in etwa 1,8 Mio. neu zugelassenen Batteriefahrzeugen entsprechen würde.

8. In einem klimaneutralen Energiesystem werden nahezu keine konventionellen Antriebe im Lastgüterverkehr mehr betrieben.

Während eine Verschärfung der Zwischenziele im Jahr 2030 einen geringen Einfluss auf die Zusammensetzung der Antriebe für den Lastgüterverkehr zeigt, würden auf Basis der Rechenergebnisse mit verschärften Zielen im Jahr 2050 nahezu keine konventionellen Verbrennungsmotoren mehr eingesetzt. Die Antriebe im Lastgüterverkehr werden zu etwa 70% durch wasserstoffelektrische und 30 % durch batterieelektrische Antriebe ersetzt. Im Suffizienz-Szenario verbleibt ein gewisser Anteil an konventionellen Verbrennungsmotoren, die dort im Jahr 2050 jedoch ausschließlich mit synthetischen Energieträgern betrieben werden.

9. Wärmepumpen, eingesetzt in Haushalten oder zur Versorgung von Fernwärmenetzen, müssen ab sofort zur Schlüsseltechnologie für die Wärmeversorgung werden.

Eine Zielverschärfung von -55% auf -65 im Jahr 2030 würde den Anteil an Wärmepumpen an allen Heizungsanschlüssen von etwa 11% auf 20% ansteigen lassen. Ebenso trägt in den Ergebnissen ein weiterer Ausbau der Fernwärmeanschlüsse, welche ebenfalls teilweise durch Großwärmepumpen gespeist werden, mit 20% aller Anschlüsse zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung bei. Insgesamt kann erwartet werden, dass etwa 40% aller Heizungsanschlüsse 2030 mit Fernwärme oder Wärmepumpen versorgt werden. In einem klimaneutralen Energiesystem 2050 würde der Anteil dieser beiden Versorgungslösungen bei etwa 90% liegen.

10. Die Zielverschärfung führt zu einer Erhöhung der CO₂-Vermeidungskosten. Diese sind allerdings für die verschiedenen Szenarien sehr unterschiedlich und hängen somit wesentlich von der Entwicklung des Endenergiebedarfs ab.

Durch die Zielverschärfung würden die CO₂-Vermeidungskosten mit 200 €/t_{CO2} in etwa 50 €/t_{CO2} über den Kosten des alten CO₂-Zielpfades liegen. Eine starke Verbrauchsreduktion könnte diese Kosten jedoch um etwa 100 €/t_{CO2} senken.

Inhalt

1	Einleitung und Motivation	8
2	Ergebnisse.....	9
2.1	Stromverwendung	10
2.2	Installierte Leistung fluktuierender erneuerbarer Energien	11
2.3	Jährlicher Zubau fluktuierender erneuerbarer Energien.....	12
2.4	Kurzzeitspeicher.....	13
2.5	Synthetische chemische Energieträger.....	14
2.6	Personenverkehr	15
2.7	Lastgüterverkehr	16
2.8	Heizungstechnologien.....	17
2.9	CO ₂ -Vermeidungskosten	18
3	Anhang: Preispfade zum Import synthetischer Energieträger.....	19

Im Februar 2020 veröffentlichte das Fraunhofer ISE die Studie »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen«. Kurz vorher hatte die Europäische Union den „European Green Deal“ für Europa ausgerufen, der sich auch zum Ziel setzte, bis 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freizusetzen und dass eine nachhaltige EU-Wirtschaft entsteht. Um keine Netto-Treibhausgasemissionen in 2050 zu erreichen, wurde das Zwischenziel der EU einer Reduktion von CO₂-Emissionen von 40% bis 2030 nun auf 55% im Vergleich zu 1990 angehoben. Diese EU-Zielverschärfung hat auch für Deutschland eine Zielverschärfung für 2030 zur Folge. Im Gespräch ist hier ein neuer Zielwert für das Jahr 2030 mit minus 65% gegenüber dem Wert von 1990. Gleichzeitig bedeutet die Klimaneutralität im Jahr 2050 eine 100% Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen. Aufgrund dieser neuen andiskutierten Zielstellung hat das Fraunhofer ISE beschlossen, die Szenarien der Studie von Februar 2020 mit diesen Zielwerten neu zu rechnen. Dabei weist das Fraunhofer ISE darauf hin, dass all diese Werte derzeit noch nicht beschlossen sind, sondern sich in Deutschland in einem politischen Diskussionsprozess befinden. Die Ergebnisse können zur Entscheidungsfindung bei den notwendigen Maßnahmen beitragen und als Grundlage für die Neugestaltung des Marktrahmens für den Ausbau erneuerbarer Energien dienen.

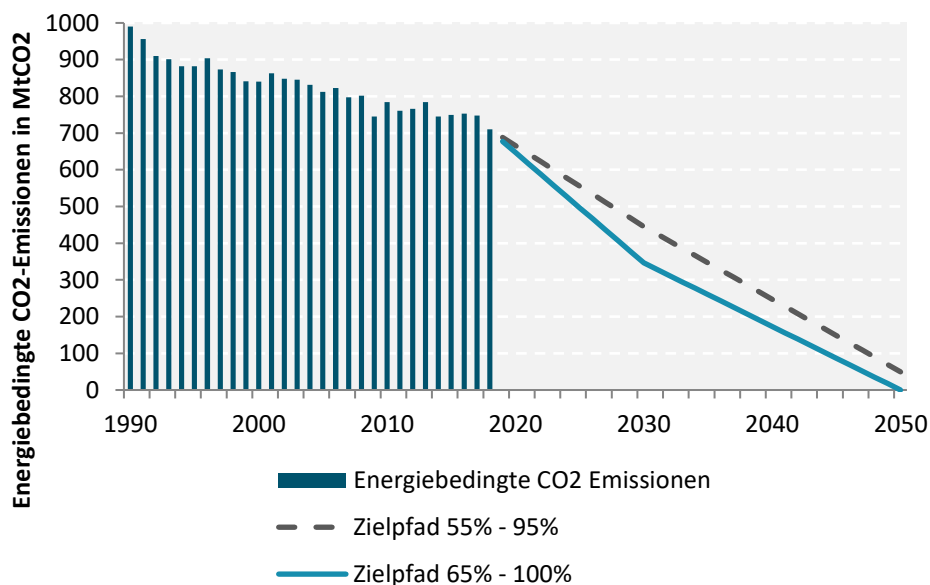


Abbildung 1: Alter Zielpfad mit einer Reduktion von -55% in 2030 und -95% in 2050 (gestrichelte Linie), sowie neuer Zielpfad mit -65% in 2030 und -100% in 2050

2 Ergebnisse

Die vorliegende Kurzstudie fasst die Ergebnisse der neuen Rechnungen mit den Zielwerten 65% im Jahr 2030 und 100% im Jahr 2050 zusammen. Dabei wurden alle sonstigen Annahmen der Szenarien in der Studie beibehalten. Erweitert wurde die Szenarienauswahl um eine Sensitivität für die Preise für importierte synthetische Brennstoffe, um der Dynamik der aktuellen Diskussion zu grünen Energieträgerimporten aus Ländern mit guten Potenzialen für erneuerbare Energien Rechnung zu tragen¹.

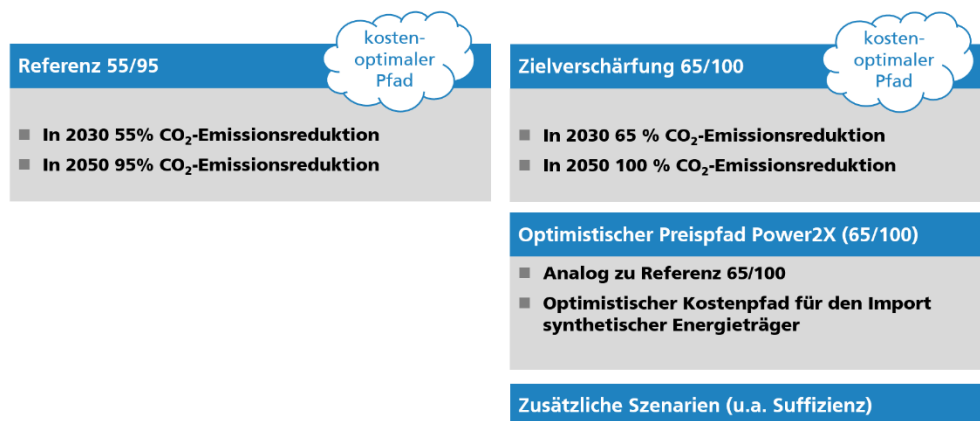


Abbildung 2: Im Rahmen der Kurzstudie betrachtete Szenarien.

Im Nachfolgenden fokussieren sich die Ergebnisse im Wesentlichen auf das neu berechnete Referenzszenario mit altem und neuem Zielpfad. Hierbei soll im Wesentlichen der Unterschied von verschärften Zwischenzielen um das Jahr 2030 verdeutlicht werden. Es wird jedoch auch der Einfluss einer vollständigen CO₂-Reduktion bis 2050 auf die Transformation des Energiesystems verdeutlicht. Da die zukünftige Entwicklung der Energienachfrage, beispielsweise in Haushalten, Verkehr oder der Industrie, unter anderem stark von zukünftigen gesellschaftlichen Entwicklungen abhängt, unterliegt diese starken Unsicherheiten und hat einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Modellrechnungen. Daher wird darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse des Referenzszenarios nicht als Prognose zu interpretieren sind, sondern vor allem den Einfluss der Zielverschärfung verdeutlichen und einen Richtwert für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems darstellen. Ebenso wird für die jeweiligen Ergebnisse ein Intervall zwischen einem Referenzszenario und einem Szenario mit reduzierter Endenergienachfrage (Szenario *Suffizienz* aus der Studie) angegeben.

¹ Eine Erläuterung der Preispfade zum Import synthetischer Energieträger findet sich im Anhang.

2.1 Stromverwendung

Die Dekarbonisierung des Energiesystems ist mit einer steigenden Elektrifizierung eng verbunden. Der Strombedarf wird in Zukunft, bedingt durch eine steigende Nutzung von Sektorenkopplungstechnologien stark steigen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Zielverschärfung von -55% energiebedingte CO₂-Emissionsreduktion auf -65% gegenüber 1990 sowie Nettonullemissionen in 2050 die Elektrifizierung beschleunigen.

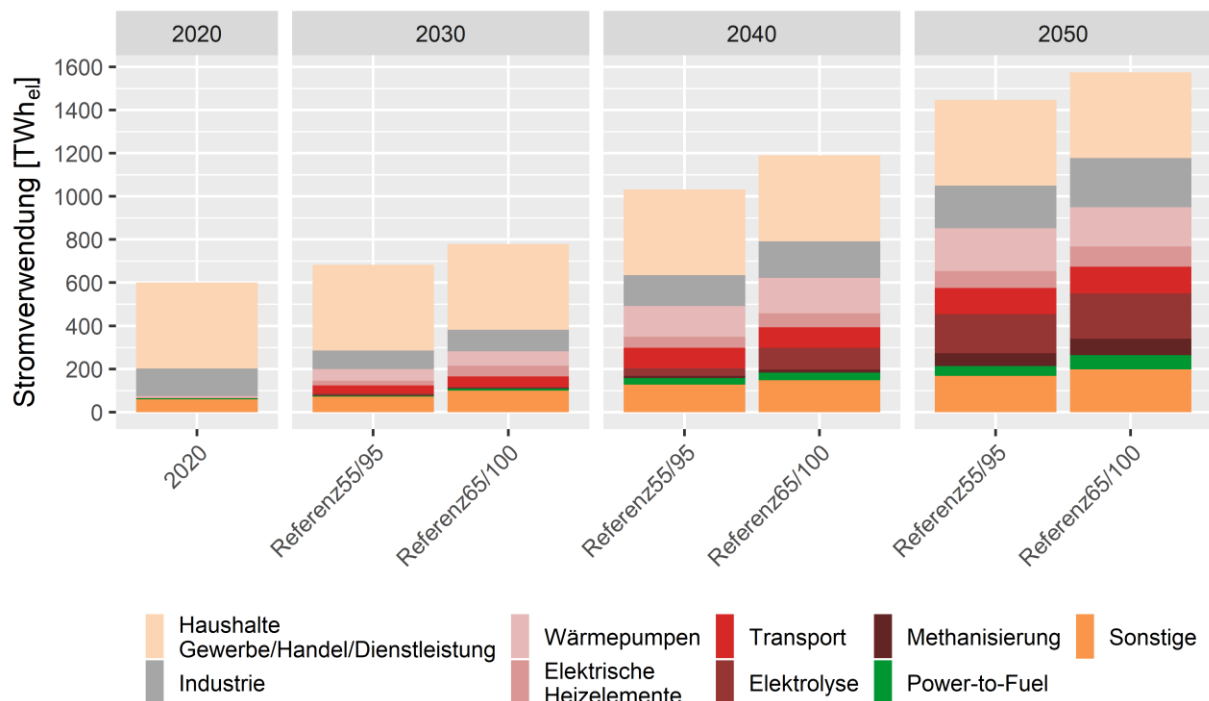


Abbildung 3: Stromverwendung bis 2050 in den Verbrauchssektoren und Hauptanwendungen

In den letzten Jahren lag der Strombedarf in Deutschland bei rund 600 TWh_{el} (577 TWh_{el} in 2019). Coronabedingt wird der Stromverbrauch im Jahr 2020 stark sinken (Laut Energy-charts.info lag die Nettostromerzeugung bis Anfang Dezember bei knapp 450 TWh). Laut den Berechnungsergebnissen steigt der Strombedarf bis 2030 bei 55-prozentigem Minderungsziel im Referenzszenario auf 680 TWh_{el} an. Eine Zielverschärfung auf 65 % Emissionsminderung führt dazu, dass der Strombedarf bis 2030 auf knapp 780 TWh_{el} im Referenzszenario ansteigt. Dies entspricht einem in etwa doppelt so starken Anstieg bis 2030 im Vergleich zu dem 55% Reduktionsziel. Werden bei einer Zielverschärfung als untere Grenze die Ergebnisse des Suffizienz-Szenarios mit einbezogen, wird erwartet, dass der Stromverbrauch in 2030 in einem Bereich von etwa 700 bis 780 TWh_{el} liegen wird. Bis zum Jahr 2050 liegen für die Szenarien Referenz und Suffizienz bei 100% CO₂-Reduktion die Werte zwischen 1250 bis 1580 TWh. Dies entspricht dem Faktor 2,9 im Vergleich zu heute. Im Szenario Suffizienz liegt der Anstieg bis 2050 bei einem Faktor von 2,3.

Eine Zielverschärfung hätte aufgrund von zunehmender Elektrifizierung einen Anstieg des Bruttostrombedarfs bis 2030 auf 700 bis 780 TWh_{el} und bis 2050 auf 1250 bis 1570 TWh_{el} zur Folge.

2.2 Installierte Leistung fluktuierender erneuerbarer Energien

Das Rückgrat der Energieversorgung sind in Zukunft die erneuerbaren Energietechnologien Photovoltaik und Windenergie. Diese müssen den ansteigenden Strombedarf in den Verbrauchssektoren CO₂-neutral bereitstellen, um die Minderung der Emissionen zu erreichen.

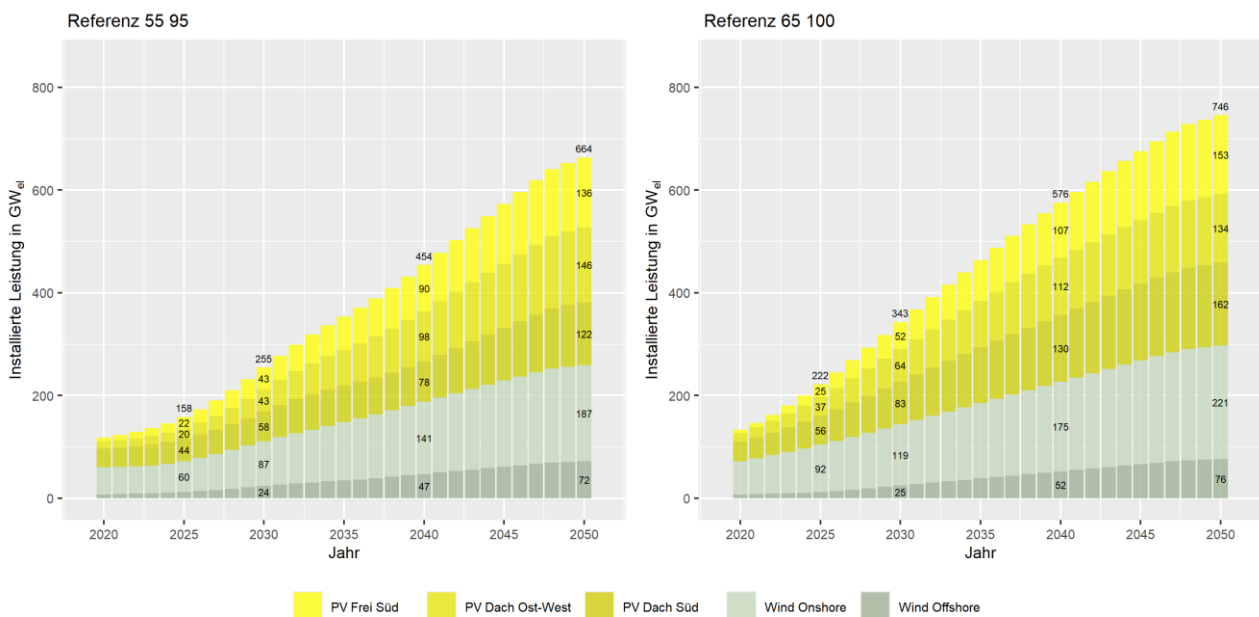


Abbildung 4: Installierte Leistung der erneuerbaren Energietechnologien Wind und Photovoltaik (PV) ohne Zielverschärfung (links) und mit Zielverschärfung (rechts)

Bei dem bisherigen 55% Reduktionsziel wird bis 2030 bereits eine installierte Gesamtleistung erneuerbarer Energietechnologien von rund 255 GW_{el} benötigt. Heute sind rund 115 GW_{el}, davon 53 GW_{el} PV und 62 GW_{el} Windenergieanlagen, in Deutschland installiert¹.

Das bedeutet, dass im hier betrachteten Referenzszenario ohne Zielverschärfung ein Anstieg der installierten Leistung um 140 GW_{el} (ohne Ersatzzubau) benötigt wird. Dies entspricht einem Anstieg um den Faktor 2,2. Mit Zielverschärfung steigt die installierte Leistung im Referenzszenario um den Faktor 3,0 (~345 GW_{el}) und bis 2050 noch deutlich stärker auf ca. das 6,5-fache der heute installierten Leistung.

Wie die vorangegangene Studie gezeigt hat, können bei unterschiedlichen Verhaltensweisen die Werte der benötigten EE-Leistung auch oberhalb dieser Werte (bei den Szenarien Inakzeptanz, Beharrung), aber auch merklich unterhalb (Suffizienz) liegen. In den Berechnungen des Suffizienz-Szenarios ist der Anstieg weniger ausgeprägt (Faktor 2,5 bis 2030 (287 GW_{el}) und Faktor 5,1 in 2050 (583 GW_{el}) bezogen auf die heute installierte Leistung). Das Verhältnis der Technologien in Bezug auf die installierte Leistung liegt bei ca. 40% Wind zu 60% Photovoltaik.

Bei einer Zielverschärfung würde bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu heute eine um 2,9 bis 3,8-mal höhere Leistung an Photovoltaikanlagen (155–199 GW_{el}) und 2,1 bis 2,3-mal höhere Leistung an Wind Onshore und Wind Offshore (131–144 GW_{el}) benötigt.

¹ Quelle: EnergyCharts, aufgerufen am 14.12.2020: energy-charts.info/charts/installed_power

2.3 Jährlicher Zubau fluktuierender erneuerbarer Energien

Um den erforderlichen Zubau von erneuerbaren Energietechnologien zu realisieren, müssen deutlich erhöhte jährliche Zubauraten im Vergleich zu heute umgesetzt werden.

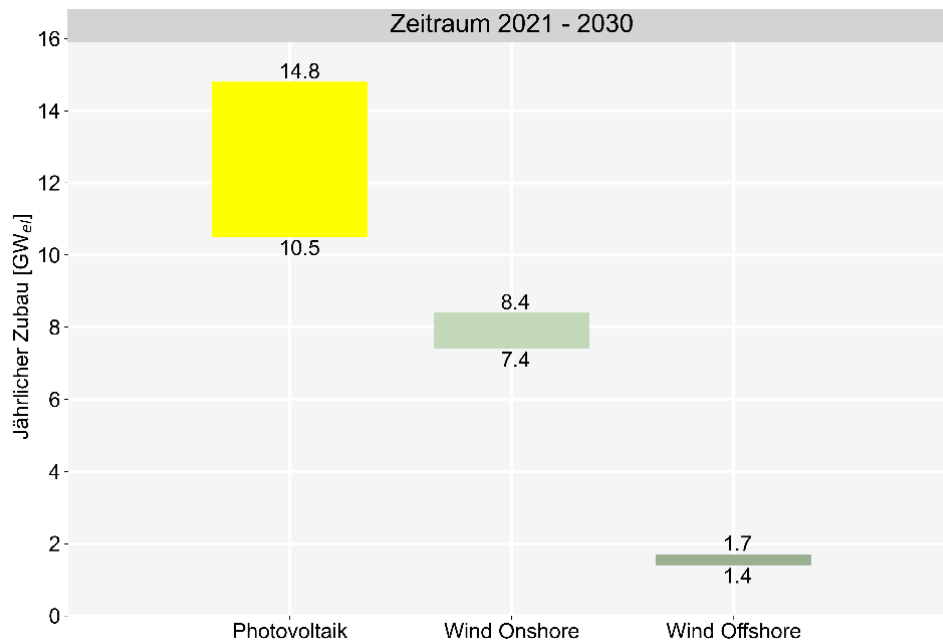


Abbildung 5: Durchschnittliche jährliche Zubauraten der erneuerbaren Energietechnologien in den Jahren 2021-2030. Die obere und untere Grenze ergeben sich als Ergebnis aus dem Referenz- und Suffizienz-Szenario bei Annahme einer Zielverschärfung auf 65% in 2030.

Bei einer Zielverschärfung auf 65% Emissionsreduktion im Jahr 2030 zeigen die Rechnungen pro Jahr einen Bruttozubau von 8,8 bis 10,1 GW_{el} Wind und 10,5 bis 14,8 GW_{el} PV. Die Grenzen ergeben sich aus der Betrachtung der Szenarien Referenz (oberer Wert) und Suffizienz (unterer Wert). Bei aktueller Zielsetzung von 55% im Jahr 2030 wird hingegen ein durchschnittlicher jährlicher Windenergiezubau von 2,5 bis 6,7 GW_{el} und ein Photovoltaikzubau von 5,2 bis 9,3 GW_{el} benötigt. Im Vergleich: Der PV-Zubau in den Jahren 2019 und 2020 lag jeweils bei knapp 3,9 GW_{el} und der Windkraftanlagenzubau bei 2,0 GW_{el} in 2019 und knapp 1,4 GW_{el} in 2020. Hieraus wird deutlich, dass der Zubau der erneuerbaren Energietechnologien deutlich zunehmen müsste, um mit dem in den Modellrechnungen definierten Ziel kompatibel zu sein.

Hinweis: Für den Ersatz der Anlagen wurden durchschnittliche Lebensdauern für Wind offshore von 20 Jahren, für Wind onshore ansteigend von 23,1 Jahren (2020) auf 26,4 Jahre (2050) und für PV ansteigend von 25,1 Jahre (2020) auf 28,7 Jahre (2050) berücksichtigt.

Jährlich müssen bis 2030 durchschnittlich 10,5 bis 14,8 GW_{el} PV und 8,8 bis 10,1 GW_{el} Windenergieanlagen installiert werden (inklusive Ersatz für auslaufende Anlagen).

2.4 Kurzzeitspeicher

Kurzzeitspeicher können die zeitlich fluktuierende Stromerzeugung aus den erneuerbaren Energiequellen Sonne und Wind sowie die fluktuierende Last im Energiesystem in großen Teilen ausgleichen. Als Technologien spielen die heute schon installierten Pumpspeicherkraftwerke sowie Batteriespeicher eine wichtige Rolle.

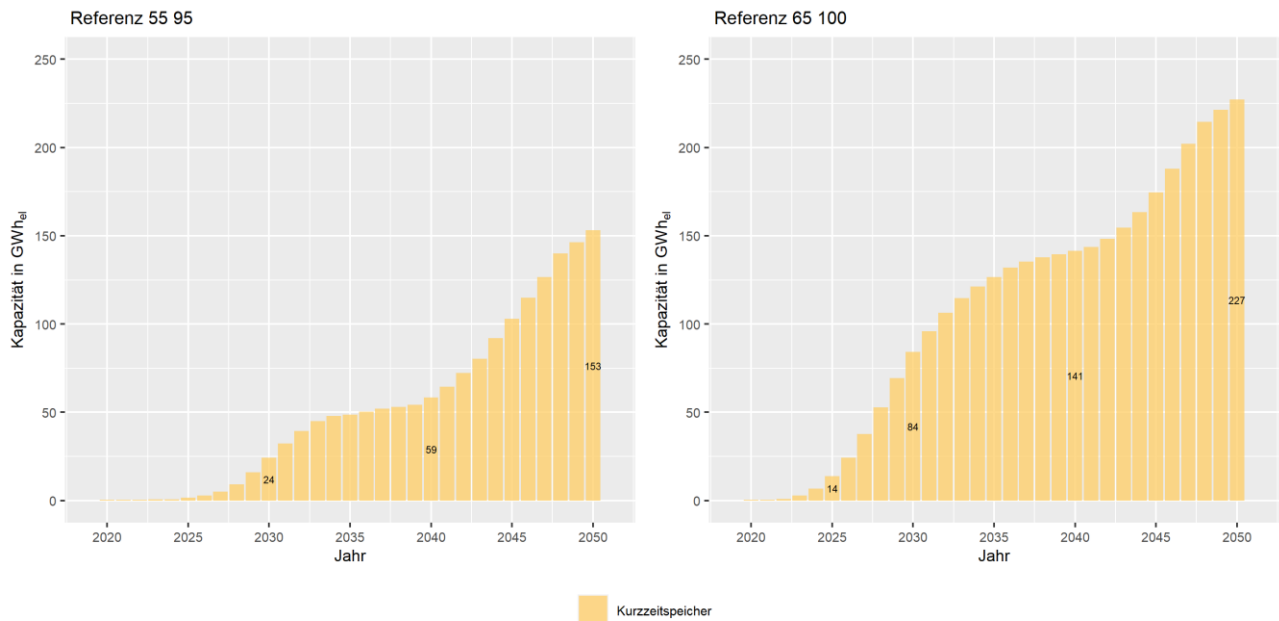


Abbildung 6: Installierte Kapazität von Kurzzeitspeicher für das Referenz-Szenario, links in der ursprünglichen Berechnung mit den Zielwerten 55/95 und rechts mit den verschärften Zielvorgaben von 65/100.

Die installierte Kapazität steigt in beiden Szenarien kontinuierlich bis 2050 an (siehe Abbildung 6). Während der Ausbau der Batteriespeicher im Szenario 55/95 erst im Jahr 2025 beginnt, sind im Szenario 65/100 schon ab dem Jahr 2023 Kurzzeitspeicher installiert. Die Zielverschärfung erhöht den Bedarf im Jahr 2030 von 24 GWh_{el} um das 3,5-fache auf 84 GWh_{el}. In beiden Szenarien wird zwischen 2040 und 2050 nochmal verstärkt ausgebaut. Bei einer Zielverschärfung sind verglichen mit dem Referenz 55/95 Szenario (153 GWh_{el}) im Jahr 2050 mit 227 GWh_{el} 1,5-mal mehr Batteriespeicher notwendig. Mit dieser Entwicklung folgen die Energiespeicher dem früheren und insgesamt umfangreicheren Ausbau von Photovoltaik und Windenergie unter einer Zielverschärfung. Auch unter der Annahme suffizienten gesellschaftlichen Verhaltens steigt der Bedarf an Kurzzeitspeichern mit 57 GWh_{el} im Jahr 2030 deutlich an.

Die Zielverschärfung würde den Bedarf an Flexibilität in Form von Kurzzeitspeichern im Jahr 2030 auf etwa 60-85 GWh_{el} ansteigen lassen.

2.5 Synthetische chemische Energieträger

Synthetische chemische Energieträger (inkl. Biomasse) haben einen vielfältigen Nutzen für ein zukünftiges Energiesystem. Ihre Herstellung kann Flexibilität für das Energiesystem bereitstellen und ihr Einsatz kann zur Dekarbonisierung in den Verbrauchssektoren beitragen. Insbesondere die heute diskutierten Preise, zu welchen diese importiert werden können, unterliegen derzeit starken Schwankungen, weshalb hierzu eine Kostensensitivität mit der Annahme eines optimistischeren Preispfads gerechnet wurde¹.

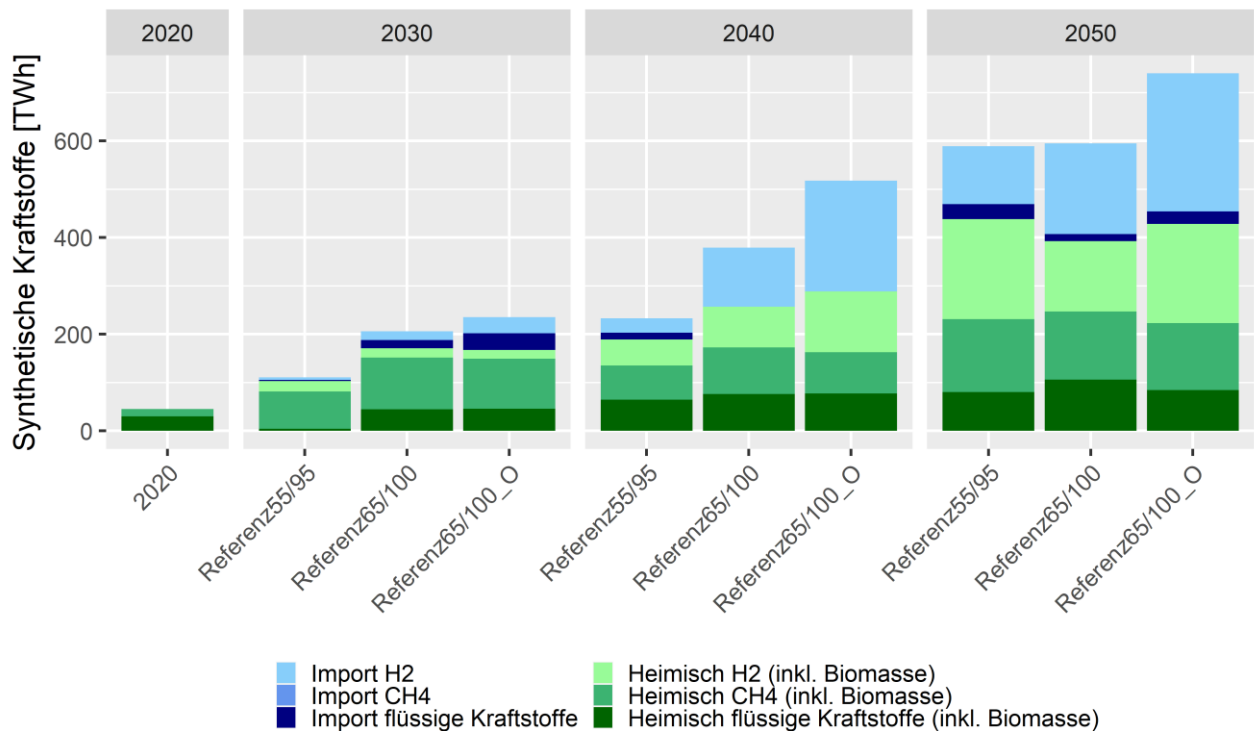


Abbildung 7: Energiemengen verwendeter synthetisch hergestellter chemischer Energieträger in TWh, unterteilt in heimisch hergestellte und importierte Mengen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Anteil der heimisch erzeugten synthetischen Energieträger in allen Fällen die Importe übersteigt. Während der Import erst ab dem Jahr 2030 zu geringen Mengen möglich ist, liegt der Anteil heimisch erzeugter synthetischer Energieträger auch im Jahr 2050 bei knapp 70%. Durch die Zielverschärfung steigt der Anteil an chemischen Energieträgern um knapp 150 TWh in 2030 an. In 2050 macht die Zielverschärfung mit insgesamt knapp 600 TWh chemischer Energieträger dagegen nahezu keinen Unterschied. Betrachtet man auch das Suffizienz-Szenario, ergibt sich ein Bereich von 400 bis 600 TWh. Es müssen also bei schärferen Zwischenzielen bereits früher große Mengen synthetischer Energieträger bereitgestellt werden. Können synthetische Energieträger zu günstigeren Preisen importiert werden, steigt die Gesamtmenge auf knapp 750 TWh an und vor allem der Import von Wasserstoff zeigt nahezu eine Verdoppelung im Jahr 2050.

Heimisch erzeugte sowie importierte, auf Basis erneuerbaren Stroms hergestellte synthetische chemische Energieträger, sind ein wichtiger Teil zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele.

¹ Eine Erläuterung zu den unterschiedlichen Kostenpfaden für den Import synthetischer Energieträger findet sich im Anhang.

2.6 Personenverkehr

Um die Zwischenziele zur Reduzierung der energiebedingten CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2030 zu erreichen, müssen die Emissionen im Verkehrssektor durch den Einsatz von Technologien, welche erneuerbar erzeugten Strom nutzen, gesenkt werden. Abbildung 8 zeigt, wie sich die verwendeten Antriebstechnologien im PKW-Bereich bis 2050 unter den Annahmen im Referenz-Szenario entwickeln.

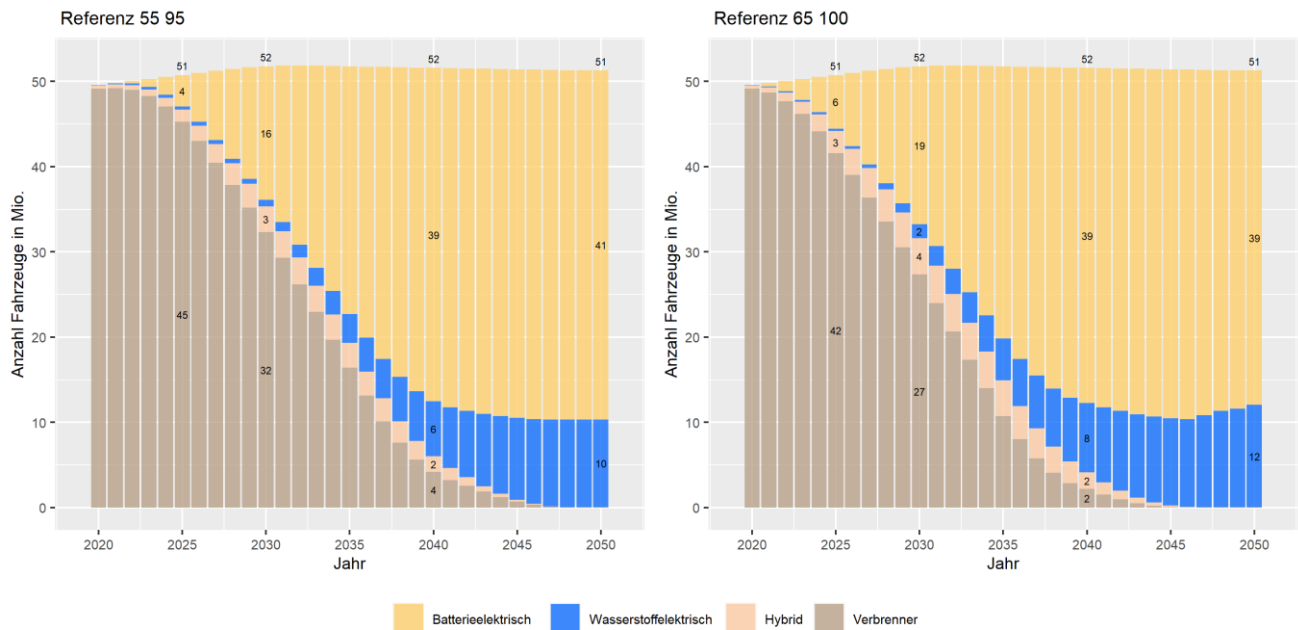


Abbildung 8: Aufteilung des PKW-Bestands nach Antriebstechnologien bis 2050 im Referenz-Szenario. Links ursprüngliche Berechnung mit Zielwerten 55/95, rechts mit der Verschärfung auf 65/100 bis zum Jahr 2050.

Beide Szenarien verdeutlichen, dass durch eine Transformation zu einem klimaneutralen Energiesystem bis 2050 kontinuierlich alle Verbrennungsmotoren durch batterie- oder wasserstoffelektrische Fahrzeuge ersetzt werden. Hybride Antriebstechnologien dienen nur als vorübergehende Lösung. Während bei einem Zwischenziel von 55% im Jahr 2030 unter den Annahmen des Referenz-Szenarios bereits 16 Mio. batterieelektrische Fahrzeuge zum Einsatz kommen, steigt diese Anzahl bei einer Zielverschärfung auf 65 % weiter auf 19 Mio. Fahrzeuge (ca. 35 % aller Fahrzeuge) an. Dies entspricht im Mittel in etwa 1,8 Mio. jährlich neu zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen bis 2030. Im Jahr 2050 machen unabhängig von der Zielverschärfung batterieelektrische Fahrzeuge ca. 80% des gesamten Fahrzeugbestands aus. Bei diesen Ergebnissen ist zu beachten, dass keine Optionen wie der Modal-Shift, also eine mögliche Verschiebung auf andere Verkehrsmittel, im Modell betrachtet wurden. Unter Berücksichtigung des Suffizienz-Szenarios, in dem eine rückläufige Fahrleistung im Personenverkehr angenommen wird, ergibt sich für den Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge im Jahr 2030 ein Intervall von 30–35%.

Abhängig von der Verkehrsentwicklung sind bis 2030 im Bestand 30-35 % batterieelektrische Fahrzeuge notwendig, um die verschärften Ziele zu erreichen.

2.7 Lastgüterverkehr

Genauso wie im Personenverkehr ist im Lastgüterverkehr eine Umstellung auf emissionsfreie Antriebstechnologien nötig, um die Reduktionsziele zu erreichen. Abbildung 9 zeigt, wie sich die Verteilung der Antriebstechnologien im LKW-Bereich bis 2050 entwickelt.

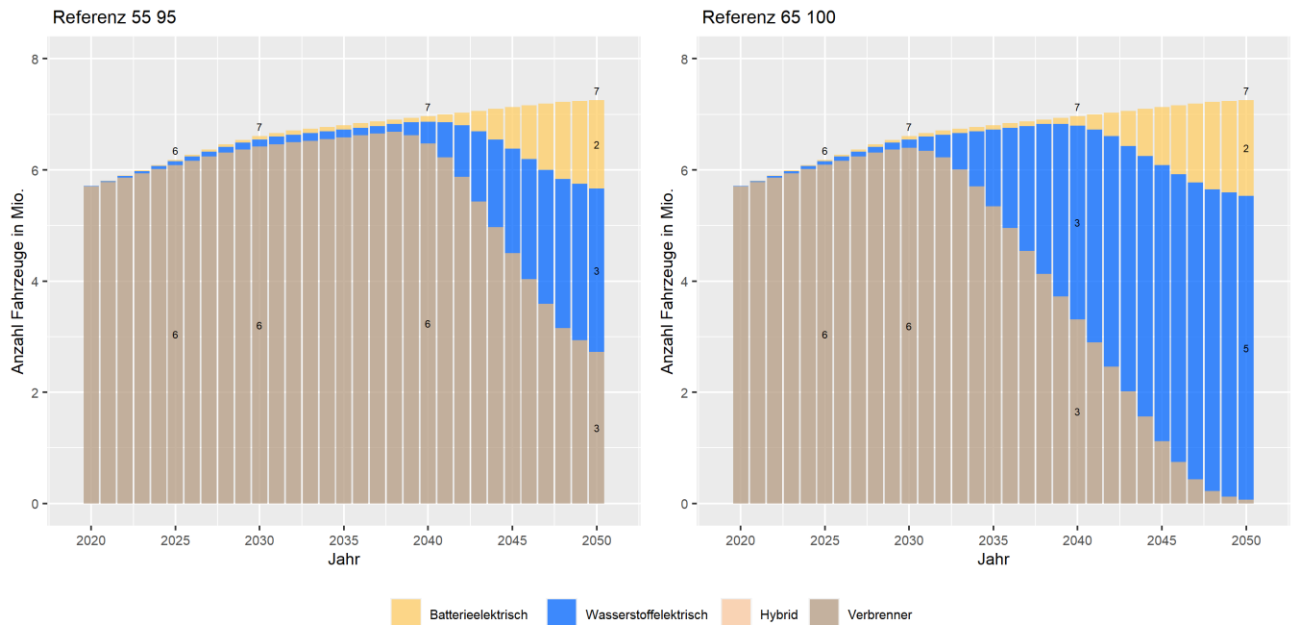


Abbildung 9: Aufteilung des LKW-Bestands nach Antriebstechnologien bis 2050, links für die ursprüngliche Berechnung des Referenz Szenarios mit den Zielen 55/95, rechts mit den aktualisierten Zielen 65/100 für den gesamten Pfad bis 2050.

Im Referenz-Szenario bleibt bis 2030 die Zielverschärfung nahezu folgenlos, es werden noch über 97% Verbrennungstechnologien eingesetzt. In der nachfolgenden Transformation des Lastgüterverkehrs wird dann stärker auf wasserstoffelektrische als auf batterieelektrische Antriebe gesetzt, hybride Antriebe spielen keine Rolle. Während im Referenz 55/95 Szenario die Umstellung auf batterie- und wasserstoffelektrische Antriebe erst im Jahr 2040 beginnt, ist unter einer Zielverschärfung schon 10 Jahre früher, also ab 2030, ein Wechsel der Antriebstechnologie zu beobachten. Dieser Unterschied spiegelt sich auch im Zielsystem in 2050: Unter dem 95% Ziel sind noch 38% aller Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet, wasserstoffelektrische stellen 40% und batterieelektrische 22%. In einem klimaneutralen Energiesystem sind Verbrennungsmotoren bei der kostenoptimalen Lösung fast nicht mehr vorhanden und werden mit Anteilen zu 75% durch wasserstoffelektrische und zu 24% durch batterieelektrische Antriebe ersetzt. Die Verhaltensänderungen des Suffizienz-Szenarios, die eine konstante Fahrleistung im Lastgüterverkehr einschließen, haben starke Auswirkungen auf den Lastgüterverkehr. Durch Anstrengungen in anderen Sektoren ist es im LKW-Bereich noch möglich, 45% Verbrennungsmotoren einzusetzen, die dann aber mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden.

Unter einer Zielverschärfung wird im LKW-Bereich schon 5 bis 10 Jahre früher und in deutlich größerem Umfang auf klimaneutrale Antriebstechnologien gesetzt.

2.8 Heizungstechnologien

Die Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser machte im Jahr 2018 in Deutschland rund 30% des gesamten Endenergieverbrauchs aus. Eine wesentliche Maßnahme zur Reduktion der Emissionen ist der Einsatz von Heizungstechniken mit niedrigeren spezifischen CO₂-Emissionen. Bei einer Reduktion der CO₂-Emissionen um 65% bis 2030 zeigen sich die gleichen Trends wie bei einer Reduktion um 55% (vgl. Abbildung 10).

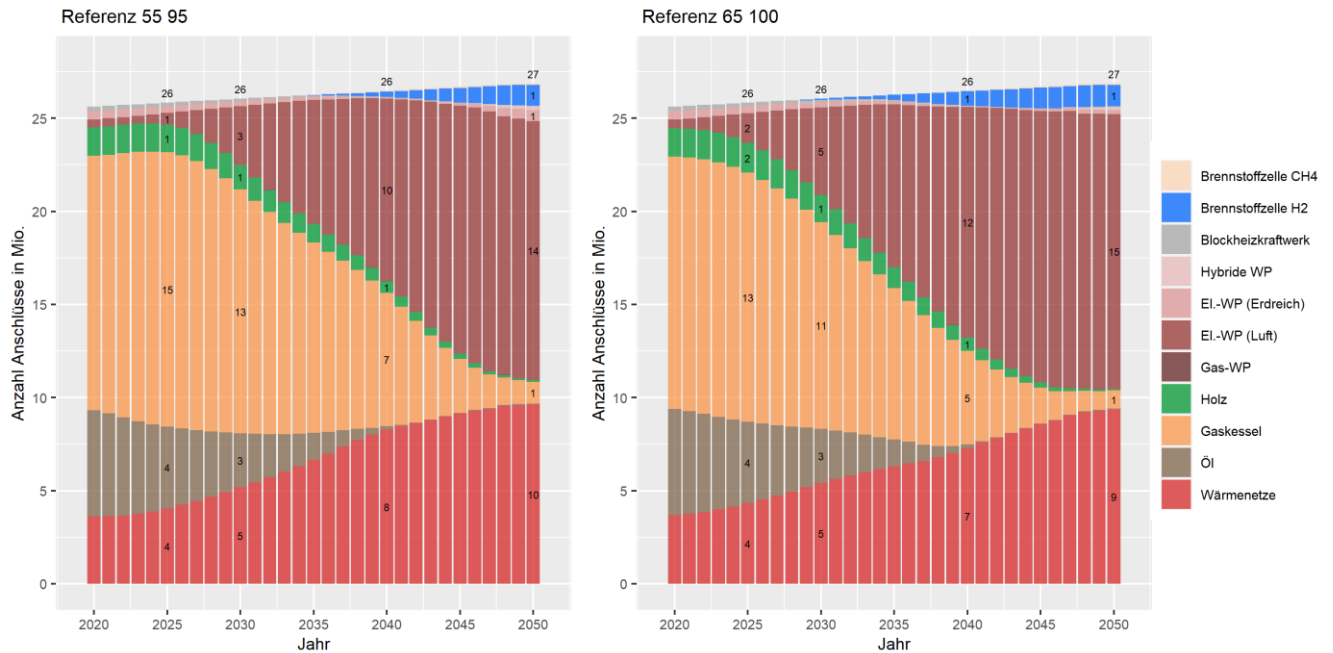


Abbildung 10: Zusammensetzung der Heizungssysteme zur Bereitstellung von Heizwärme und Trinkwarmwasser in Gebäuden für das Referenzszenario ohne (links) und mit (rechts) Zielverschärfung. Solarthermie und Heizstäbe können zusätzlich genutzt werden, sind hier aber nicht mit dargestellt (WP: Wärmepumpe).

Schlüsseltechnologie zur Reduktion der Emissionen in der Wärmeversorgung sind Wärmepumpen, sowohl als direkte Heizungsanschlüsse als auch zum Speisen von Fernwärmeleitungen. Bereits eine Reduktion der Emissionen von 55% und 95% führt zu einem Anteil von Wärmepumpen von 11% und Fernwärmeanschlüssen von 20 % aller Heizungsanschlüsse im Jahr 2030. Bei einer Zielverschärfung von 65% in 2030 und 95% in 2050 steigt der Anteil der Wärmepumpen im Jahr 2030 auf etwa 20% an. In absoluten Zahlen sind dies circa zwei Millionen mehr installierte Wärmepumpen als im Referenzszenario. Gaskessel werden dafür schneller aus dem System verdrängt. Für eine vollständige Reduktion der CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 werden zwei Drittel aller Heizungsanschlüsse durch Wärmepumpen oder mit synthetischen Brennstoffen (Gaskessel und Brennstoffzellen) versorgt, ein Drittel wird mit Fernwärme betrieben.

Wärmepumpen müssen ab sofort zur Schlüsseltechnologie in der Gebäudewärme werden. Auch die Anschlüsse ans Fernwärmenetz steigen an.

2.9 CO₂-Vermeidungskosten

Die CO₂-Vermeidungskosten geben die Nettomehraufwendungen an, die pro eingesparter Tonne CO₂ Emission gegenüber einem BAU (Business As Usual) Szenario anfallen. Für die fünf verschiedenen Szenarien Referenz 55/95, Referenz 65/100, Suffizienz 65/100 und die letzten beiden mit optimistischen Importpreisannahmen, sind die Vermeidungskosten Abbildung 11 dargestellt.

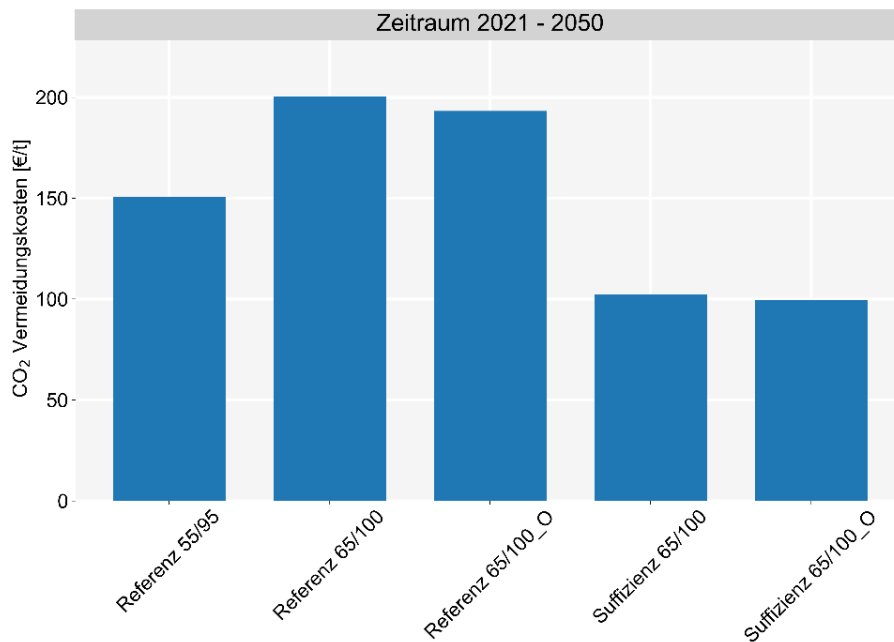


Abbildung 11: CO₂ Vermeidungskosten über den Zeitraum 2021 bis 2050 für die Szenarien Referenz 55/95, Referenz 65/100, Suffizienz 65/100, sowie die verschärften Szenarien mit optimistischen Preisannahmen für den Import synthetischer chemischer Energieträger (_O)

Die CO₂-Vermeidungskosten schwanken über die Szenarien zwischen rund 100 und 200 €/t_{CO₂}. Die Zielverschärfung im Referenzszenario hat einen Anstieg von 150 €/t_{CO₂} auf 200 €/t_{CO₂} zur Folge. Wie in den letzten Kapiteln gezeigt wurde, sind unter einer Zielverschärfung klimaneutrale Technologien zum einen deutlich früher nötig und zum anderen auch in einem deutlich größeren Umfang. Beides führt zu dem beobachteten Anstieg unter der verschärften Reduktion von energiebedingten CO₂ Emissionen. Die beiden Suffizienz Szenarien zeigen, dass die dort angenommenen gesellschaftlichen Verhaltensänderungen einen immensen Einfluss auf die CO₂-Vermeidungskosten haben und die Kosten auf die Hälfte (etwa 100 €/t_{CO₂}) senken. Unter diesen Annahmen wäre eine signifikant geringere Menge an technischen Anlagen zur Wandlung, Speicherung, Verteilung und Nutzung erneuerbarer Energien notwendig, und die dafür notwendigen Investitionen und sonstigen Kosten würden dementsprechend geringer ausfallen. Günstigere Preise für den Import von synthetischen Energieträgern haben nur einen kleinen Einfluss auf die CO₂-Vermeidungskosten. Sowohl im Referenz Szenario als auch im Suffizienz Szenario sinken sie die Kosten um weniger als 10 €/t_{CO₂}.

Eine Zielverschärfung resultiert in einem Anstieg der CO₂-Vermeidungskosten von 150 € auf 200 € pro Tonne CO₂ (Wert gilt für das Referenz-Szenario). Der entsprechende Wert liegt im Suffizienz-Szenario bei rund 100 € pro Tonne CO₂.

3

Anhang: Preispfade zum Import synthetischer Energieträger

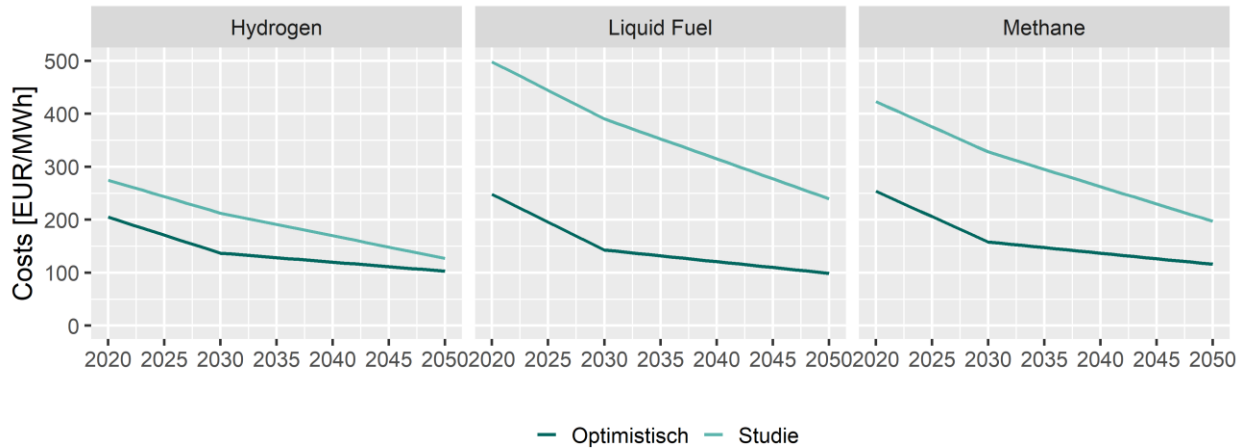


Abbildung 12: Angenommene Preispfade für den Import synthetischer Energieträger. Einmal der in der Studie »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem« verwendete Pfad sowie ein optimistischerer Pfad¹.

Im optimistischen Preispfad wurden die Kostenannahmen für den Import synthetischer Energieträger gegenüber den Kosten aus der Studie deutlich reduziert. Die aktualisierten Preispfade basieren auf der im Rahmen einer Dissertation entwickelten Methodik zur Betrachtung des Imports von synthetischen Energieträgern². Gründe für einen optimistischeren Preispfad sind gegenüber den in der Februar-Studie verwendeten Kostenprojektionen reduzierte Kostenentwicklungen für die eingesetzten Technologien wie beispielsweise Elektrolyseure, der Windenergie oder Photovoltaikanlagen. Ebenso unterliegen den aktualisierten Preiskurven genauere Berechnungen der Volllaststunden des Betriebs der Elektrolyseure an den Standorten, welche für die Erzeugung der synthetischen Energieträger betrachtet wurden. Die Kosten von synthetischen flüssigen Kraftstoffen nehmen im Vergleich zu alten Kostenpfaden stärker ab als die der anderen Energieträger, weil hier keine Verflüssigung für den Transport nach Deutschland berücksichtigt werden muss.

¹ Quelle: Energy efficiency and economic assessment of imported energy carriers based on renewable Electricity; Hank et. al, 2020

² "Techno-economic and environmental assessment of Power-to-Liquid processes", Hank et. al, 2020 (submitted)