

Das Marktpotenzial von eFuels

Klimabeitrag und Erfolgsfaktoren
des Hochlaufs

Herausgeber:

eFuel Alliance e. V.

Berliner Büro:

Unter den Linden 10
10117 Berlin
Deutschland

Brüsseler Büro:

De Crayer Straat 7, Rue de Crayer 7
1000 Brüssel
Belgien

T +49 (0) 30 700 140 313

F +49 (0) 30 700 140 150

E info@efuel-alliance.eu

www.efuel-alliance.eu

Autoren:

Studienkoordinatoren:

Ralf Diemer, eFuel Alliance e. V., Chief Executive Officer

Dr. Tobias Block, eFuel Alliance e. V., Chief Strategy Officer

Co-Autoren:

Dr. Lukas Mauler, Porsche Consulting GmbH, Associate Partner

Corentin Prié, Porsche Consulting GmbH, Manager

Datum:

03/2026

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	007
2. Hintergrund, Umfang und Ziele der Studie	025
3. EU-Mobilitätstransformation: Szenario „EU Ambition“	033
3.1. Einführung in die Folgenabschätzung der Europäischen Kommission	034
3.2. Methodik, Modellierung und Datenerhebung	035
3.2.1. Flotte und Antrieb	035
3.2.2. Energiebedarf	038
3.2.3. CO ₂ -Emissionen	040
3.3. Bestandsflottenentwicklung und erforderliche Neuzulassungen in der Straßenmobilität	043
3.3.1. Pkw-Segment	043
3.3.2. Lkw- und Bussegment	049
3.4. Energiebedarf	052
3.5. Jährliche CO ₂ -Emissionen	061
4. Engpassanalyse: Szenario „Bottleneck-adjusted“	067
4.1. Methodik, Modellierung und Datenerhebung	069
4.1.1. Umfang der Engpassanalyse	069
4.1.2. Methodik und Modellierung des Angebots für die EU-Mobilität	071
4.1.3. Methodik, Modellierung und Datenerhebung für den Bedarf der EU-Mobilität	074
4.1.4. Methodik und Modellierung des „Bottleneck-adjusted“-Szenarios	079
4.2. Detaillierter Ansatz für beispielhafte Engpassfaktoren	081
4.2.1. Lithium	081
4.2.2. Windkraftausrüstung für die eFuel-Produktion	086
4.2.3. Elektrolyseausrüstungen für die eFuel-Produktion	090
4.2.4. Installation von eFuel-Anlagen	094
4.3. Überblick über Ergebnisse und Sensitivitäten	098
4.4. Angepasste Neuzulassungen und Bestandsflottenentwicklung für die Straßenmobilität	104
4.5. Resultierender Energiebedarf im Verkehrssektor	109
4.6. Resultierende jährliche CO ₂ -Emissionen im Verkehrssektor	111

5. eFuel-Marktpotenzial: Szenario „Industrial eFuel Potential“	113
5.1. Methodik, Modellierung und Datenerhebung	115
5.2. eFuel-Hochlauf, Szenario „Industrial eFuel Potential“ vs. „EU Ambition“	116
5.3. Resultierende jährliche CO ₂ -Emissionen im Verkehrssektor	119
5.4. Einhaltung des CO ₂ -Budgets in den analysierten Szenarien	120
6. eFuel Status quo: Potenziale und Herausforderungen	123
6.1. Methodik und Datenerhebung	125
6.2. Angekündigter eFuel-Hochlauf nach Kraftstoff und Region	126
6.3. Marktherausforderungen	136
7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen für einen erfolgreichen eFuel-Hochlauf	139
Anhang A – Literatur	146
Anhang B – Autoren	149
Anhang C – Begutachtung	149
Anhang D – Abkürzungen	150
Anhang E – Detaillierte Ergebnisse der Engpassanalyse	150





Zusammenfassung



EINLEITUNG

Im globalen Bestreben zur Bekämpfung des Klimawandels haben sich mehr als 180 Länder dem Pariser Klimaabkommen verpflichtet, mit dem Ziel, die Erderwärmung deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Diese Verpflichtung setzt kohlenstoffintensive Sektoren wie die Mobilität erheblich unter Druck. Die Europäische Union hat einen ambitionierten Plan für den Antriebswechsel vorgelegt, insbesondere im Bereich der Straßenmobilität, wo erwartet wird, dass batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) bis zur Mitte des Jahrhunderts die EU-Flotten dominieren. Im Gegensatz dazu wird prognostiziert, dass Verbrennungsmotoren (ICEs) in der Schifffahrt und Luftfahrt weiterhin die primäre Technologie darstellen. Angesichts der Geschwindigkeit der Flottenerneuerung und potenzieller industrieller Engpässe in kritischen Antriebs- und Energielieferketten werden ICEVs weiterhin eine Rolle spielen, und die Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen wird bis 2050 erheblich bleiben. eFuels bieten die Möglichkeit erheblicher CO₂-Einsparungen in Mobilitätsflotten, sofern ihre Einführung beschleunigt wird. Trotz zahlreicher Projekte, die sich auf den Markteintritt von eFuels vorbereiten, bestehen weiterhin Finanzierungsherausforderungen, die adressiert werden müssen. Diese Analyse liefert eine quantitative Bewertung des eFuel-Marktpotenzials in der EU und skizziert die erforderlichen Maßnahmen, um Projektfinanzierungen zu ermöglichen und die Skalierung der Produktion durch die Akteure voranzutreiben.



ICEs bleiben in allen Mobilitätssegmenten relevant, insbesondere in der Schifffahrt und Luftfahrt.

Trotz der Einführung neuer Antriebstechnologien wie Batterien und Brennstoffzellen wird erwartet, dass Verbrennungsmotoren (ICEs) langfristig in allen Mobilitätssegmenten eine bedeutende Rolle spielen. Die Folgenabschätzung der Europäischen Kommission¹, veröffentlicht Anfang 2024, bietet eine umfassende Analyse verschiedener Transformationsszenarien für die Mobilität. Szenario 3 wurde entwickelt, um die europäischen Klimaziele zu erreichen – eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 90 % bis 2040 gegenüber dem Niveau von 1990 sowie Klimaneutralität bis 2050. Aus diesem Grund dient Szenario 3 als Grundlage für das Verständnis des Transformationsplans

der Europäischen Kommission und wird in dieser Studie als „EU Ambition“-Szenario bezeichnet.

Der Anteil von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (ICEVs) und Plug-in-Hybridfahrzeugen (PHEVs) bleibt in allen Mobilitätsbestandsflotten auch bis 2040 erheblich. In der Schifffahrt und Luftfahrt wird prognostiziert, dass ICE-Antriebe im Jahr 2040 mehr als 80 % der Bestandsflotte ausmachen, da alternative Antriebe technisch nur in wenigen Anwendungsfällen einsetzbar sind. Trotz der in diesem Szenario angenommenen ambitionierten Elektrifizierung wird erwartet, dass ICE-Antriebe in Straßenmobilitätsflotten etwa 37 % der Pkw und bis zu 62 % der Lkw und Busse darstellen.

EU ICE-Anteil 2040

Basierend auf der Folgenabschätzung 2024 der Europäischen Kommission

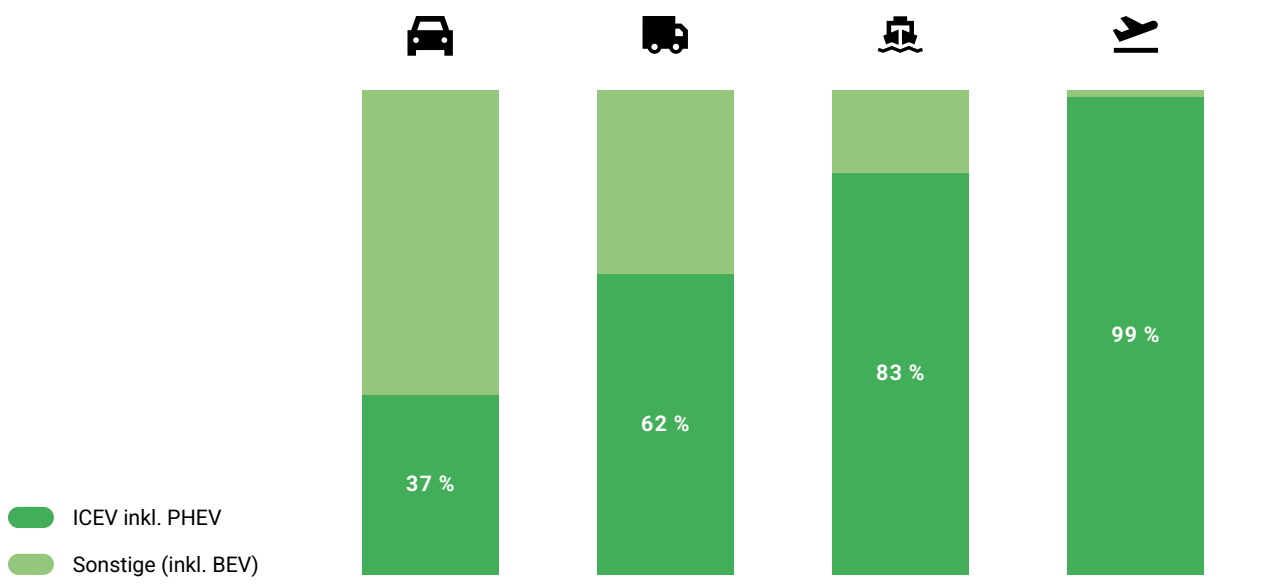


Abbildung 1: Prognostizierter ICEV-Anteil in EU-Mobilitätsbestandsflotten 2040: Szenario „EU Ambition“. Umfang: Pkw, Lkw und Busse, Schifffahrt, Luftfahrt

Die BEV-Transformation im Straßenverkehr der EU könnte sich verzögern.

Die Europäische Kommission hat ambitionierte Ziele für die Einführung von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) in der Straßenmobilität festgelegt. Im Rahmen des „EU Ambition“-Szenarios gibt es einen klaren Fahrplan zur BEV-Durchdringung in verschiedenen Flottenkategorien. Ziel ist es, bis 2050 einen BEV-Anteil von 80 % in der Pkw-Bestandsflotte und einen Anteil von 48 % in der Lkw- und Busbestandsflotte zu erreichen.

Um die Ziele für 2050 im Pkw-Bereich zu erreichen, muss der BEV-Anteil bei den Neuzulassungen spätestens bis 2034 80 % erreichen, sofern ICEVs nicht vorzeitig verschrottet werden. Folglich müssen die BEV-Neuzulassungen für Pkw bis 2030 auf 7,4 Millionen Einheiten steigen – was innerhalb von sieben Jahren einer Verfünffachung entspricht. Für Lkw und Busse ist ein Wachstum um den Faktor sieben innerhalb von fünf Jahren erforderlich. Die Erreichung der ambitionierten Ziele der Europäischen Kommission zur BEV-Einführung im Bereich der Straßenmobilität wird erheblichen Druck auf die Batterie- und die damit verbundenen Energiesystem-Lieferketten ausüben. Gleichzeitige Hochlaufinitiativen in anderen Regionen könnten zu potenziellen Engpässen führen und unterstreichen die Notwendigkeit strategischer Planung und langfristiger Investitionen.

Um die Machbarkeit der im „EU Ambition“-Szenario vorgeschlagenen Übergangsgeschwindigkeit zu bewerten, wurde eine umfassende Analyse industrieller Engpässe durchgeführt. Diese Analyse untersuchte 27 kritische Faktoren, die das Tempo der Mobilitätstransformation beeinflussen, und verglich Nachfrage und Angebot, um potenzielle Engpässe oder Überkapazitäten zu identifizieren. Zusätzliche Dimensionen, die den Übergang beeinflussen könnten – wie regulatorische Änderungen,

geopolitische Dynamiken, Kundentrends, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhergesehene wirtschaftliche Ereignisse – wurden in dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

Die Analyse wurde in vier Hauptbereiche der Lieferkette gegliedert:

1. **Batterie:**

Versorgung mit Lithium, Nickel, Kobalt und Graphit; Anoden- und Kathodenproduktion; Zellfertigung

2. **Erneuerbarer Strom:**

Ausrüstung für Wind- und Solarstrom; Installation von Wind- und Solarkapazitäten; Stromnetz-Infrastruktur; öffentliche Ladepunkte

3. **Grünwasserstoff:**

Ausrüstung für Wind- und Solarstrom; Elektrolysesysteme; Installation von Wasserstoffanlagen

4. **eFuels:**

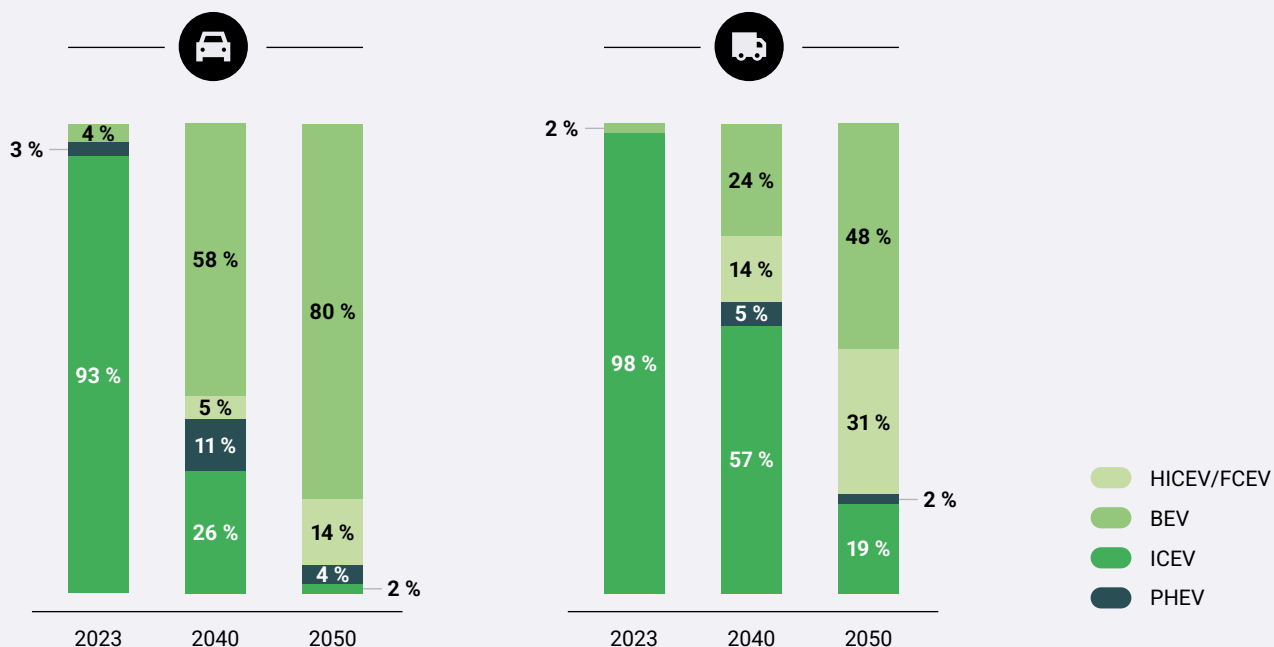
Ausrüstung für Wind- und Solarstrom; Elektrolysesysteme; Installation von eFuel-Anlagen

Ziel ist es, bis 2050 einen BEV-Anteil von 80 % in der Pkw-Bestandsflotte und einen Anteil von 48 % in der Lkw- und Busbestandsflotte zu erreichen.

Szenario „EU Ambition“

Basierend auf Folgenabschätzung der Europäischen Kommission

ANTRIEBSANTEIL IN BESTANDSFLOTTEN



BEV NEUZULASSUNGEN

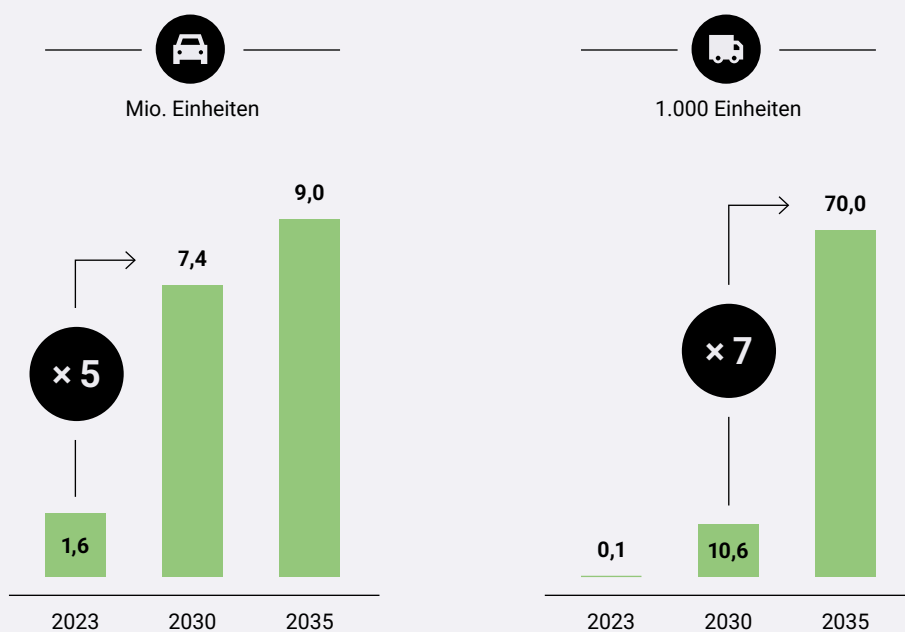


Abbildung 2: BEV-Anteil in den EU-Mobilitätsbestandsflotten und bei Neuzulassungen: Szenario „EU Ambition“. Umfang: Pkw, Lkw und Busse

In der Batterielieferkette werden im „EU Ambition“-Szenario bis 2044 Engpässe erwartet, vor allem aufgrund begrenzter Lithium- und Nickelabbaukapazitäten, mit Defiziten von rund 30 % bzw. 20 % über den Zeitraum.

Für jedes Jahr bis 2050 wurde die EU-Nachfrage nach allen 27 Engpassfaktoren aus dem „EU Ambition“-Szenario abgeleitet. In der Batterielieferkette wurden ein Technologie-Fahrplan sowie die Materialrecycling-Vorschriften der EU berücksichtigt. So soll beispielsweise der Wechsel von nickelbasierten zu Eisenphosphat-Chemien in Pkw-Batterien die Nickel-Nachfrage senken. Die Energiebedarfsprognosen für 2030, 2040 und 2050 stammen aus der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission; ergänzende Interpolationen dienen der Anpassung an die Bestandsflottenentwicklung in den Mobilitätssegmenten. Auf der Angebotsseite wurden Kapazitätsgrenzen der Industrie auf Basis von Branchenankündigungen und extrapolierten Trends prognostiziert. Da viele Lieferketten global organisiert sind, wurde angenommen, dass die EU einen proportionalen Anteil der weltweiten Versorgung entsprechend ihrem Anteil an der globalen Nachfrage erhält. Die globale Nachfrage wurde dabei unter der Annahme berechnet, dass die angekündigten Klimaziele erreicht werden.

In der Batterielieferkette werden im „EU Ambition“-Szenario bis 2044 Engpässe erwartet, vor allem aufgrund begrenzter Lithium- und Nickelabbaukapazitäten, mit Defiziten von rund 30 % bzw. 20 % über den Zeitraum. Ein wesentlicher Treiber ist das starke Nachfragewachstum nach Batterierohstoffen sowohl auf EU- als auch auf globaler Ebene – ausgelöst durch Klimaziele. Aufgrund langer Vorlaufzeiten und begrenzter Projektankündigungen im Bergbausektor könnte der Kapazitätsausbau bis 2035 eingeschränkt bleiben. Nach 2035 werden zusätzliche Kapazitäten erwartet, unterstützt durch Fortschritte in der Batterietechnologie und im Materialrecycling, die den Druck auf die Lieferketten bis 2045 voraussichtlich mindern.

Die Lieferketten für erneuerbaren Strom und Wasserstoff werden voraussichtlich bis 2035 unter Druck stehen, vor allem aufgrund des begrenzten Tempos bei Projektinstallationen innerhalb der EU. Zusätzlich könnten Einschränkungen bei der Stromnetzkapazität und der Wasserstoff-Transportinfrastruktur den Fortschritt weiter drosseln. Zwar dürften diese Engpässe die Einführung neuer Antriebstechnologien nicht verhindern, sie könnten jedoch die Realisierung von CO₂-Einsparungen im Mobilitätssektor verzögern.

Die Deckung der EU-Nachfrage nach eFuels wird voraussichtlich bis 2030 eine Herausforderung bleiben, vor allem aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Ausrüstung für erneuerbare Energien und unzureichender eFuel-Produktionskapazitäten. Ab 2030 werden jedoch kürzere Projektvorlaufzeiten und ein verbesserter Zugang zu Ausrüstung für erneuerbare Energien einen zusätzlichen Kapazitätsausbau ermöglichen. Laut der Analyse industrieller Engpässe erlaubt das „EU Ambition“-Szenario einen beschleunigten Hochlauf der eFuel-Produktion ab 2030.

Ein Szenario wurde entwickelt, um die Geschwindigkeit der EU-Mobilitätstransformation zu bewerten, falls diese Engpässe nicht behoben werden können. Dieses wird als „Bottleneck-adjusted“-Szenario bezeichnet. In diesem Szenario wird das Tempo des

Übergangs so angepasst, dass der Druck auf die Lieferketten reduziert wird, während deren Auslastung maximiert wird. Lieferketten, die als besonders ausbaufähig identifiziert wurden, werden bis zur maximal machbaren Kapazität hochgefahren.

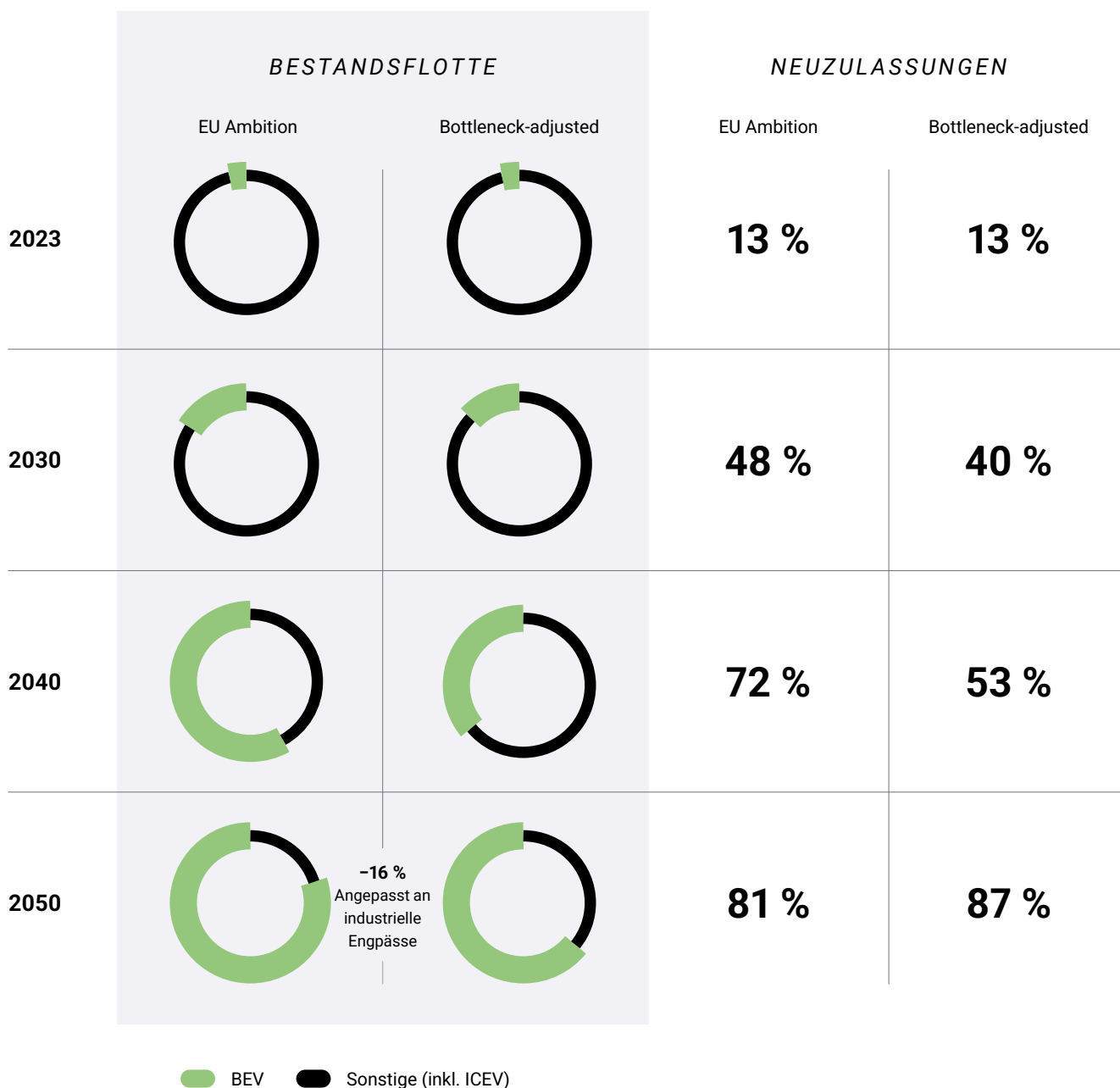


Abbildung 3: BEV-Anteil in der EU-Pkw-Bestandsflotte und Neuzulassungen: Szenario „EU Ambition“ vs. „Bottleneck-adjusted“.

Infolgedessen wird sich der Hochlauf von BEVs im Pkw-Segment voraussichtlich um etwa fünf Jahre verzögern. Im „Bottleneck-adjusted“-Szenario ist der BEV-Anteil in der Pkw-Bestandsflotte bis 2040 im Vergleich zum „EU Ambition“-Szenario halbiert, und die Entlastung der Lieferketten nach 2045 gleicht die Verzögerung nicht aus. Bis 2050 erreicht der BEV-Anteil 64 % gegenüber den geplanten 80 %. Folglich bleibt der Anteil von ICEVs und PHEVs höher als erwartet – rund 60 % im Jahr 2040 und 25 % im Jahr 2050 für Pkw. Ähnliche Trends zeigen sich im Lkw- und Bussegment.

Ein verzögerter Ausstieg aus ICEVs führt zwangsläufig zu einer langsameren Reduzierung des Flüssigkraftstoffverbrauchs als ursprünglich von der Europäischen Kommission geplant.

Ein verzögertes Übergangsszenario führt zu einer erhöhten Nachfrage nach Flüssigkraftstoffen.

Das „EU Ambition“-Szenario zielt auf eine deutliche Reduzierung des Flüssigkraftstoffverbrauchs im Bereich der Straßenmobilität bis 2050 ab, getrieben durch einen progressiven BEV-Hochlauf. Nach diesem Plan wird die Nachfrage nach Flüssigkraftstoffen in den Schiff- und Luftfahrtsegmenten voraussichtlich leicht steigen, da Verbrennungsmotoren (ICEs) dort weiterhin die dominierende Antriebsart bleiben und die Mobilitätsnachfrage in diesen Sektoren weiter wächst.

Im „Bottleneck-adjusted“-Szenario wird die kumulierte Nachfrage nach Flüssigkraftstoffen bis 2050 um 14 % höher prognostiziert als im „EU Ambition“-Szenario. Für die Straßenmobilität liegt die kumulierte Nachfrage sogar 23 % über dem EU-Plan.

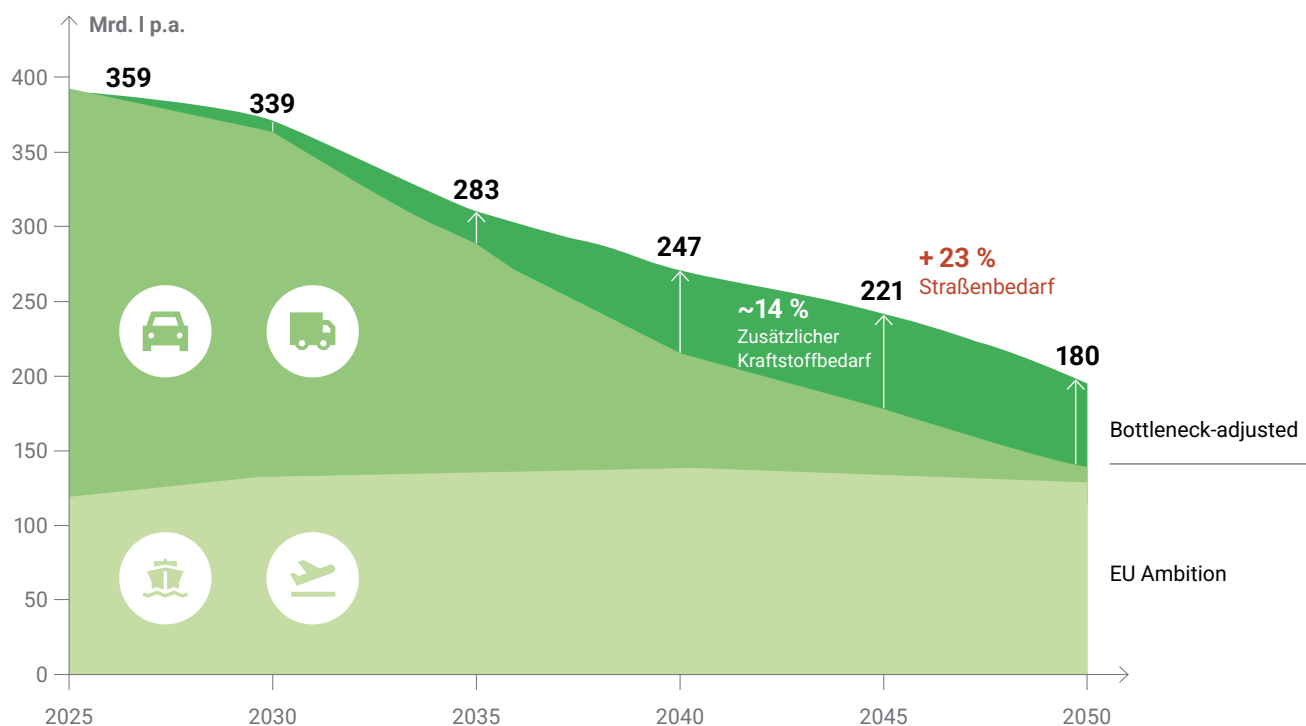


Abbildung 4: Jährliche Nachfrage nach Flüssigkraftstoffen in der EU-Mobilität: Szenario „EU Ambition“ vs. „Bottleneck-adjusted“. Umfang: Benzin, Diesel, Schweröl, Methanol, Ammoniak und Kerosin | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent

Wenn die Transformation der Antriebstechnologien in der Mobilität langsamer voranschreitet als von der EU geplant, bleibt die Nachfrage nach Flüssigkraftstoffen höher als erwartet, was die Realisierung von CO₂-Einsparungen verzögern könnte. eFuels können dazu beitragen, die mit der fortgesetzten Nutzung von Flüssigkraftstoffen verbundenen CO₂-Emissionen zu mindern.

Klimaziele könnten durch eine Beschleunigung des eFuel-Hochlaufs erreicht werden.

Um den potenziellen industriellen Hochlauf der eFuel-Kapazitäten zu quantifizieren, wurden mehrere Faktoren auf globaler Ebene bewertet. Basierend auf Prognosen für die Installation von eFuel-Kapazitäten und die Bereitstellung von Ausrüstung für erneuerbare

Energien sowie Produktionsprozesse wie Elektrolyse wurde der Hochlauf von eFuels modelliert und als „Industrial eFuel Potential“-Szenario bezeichnet. Der in Abbildung 5 dargestellte Hochlauf repräsentiert den Anteil der globalen eFuel-Versorgung, der der EU-Mobilität zugeordnet ist, proportional zu ihrem Anteil an der globalen eFuel-Nachfrage. Kapazitäten, die anderen Sektoren und Märkten zugeordnet sind – einschließlich Ausrüstung für erneuerbare Energien und Elektrolyse – wurden aus dieser Berechnung ausgeschlossen. Die Ergebnisse basieren ausschließlich auf der industriellen Machbarkeit des eFuel-Hochlaufs und berücksichtigen keine zusätzlichen einschränkenden Faktoren wie regulatorische Änderungen, geopolitische Dynamiken, Kundentrends, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhergesehene wirtschaftliche Ereignisse.

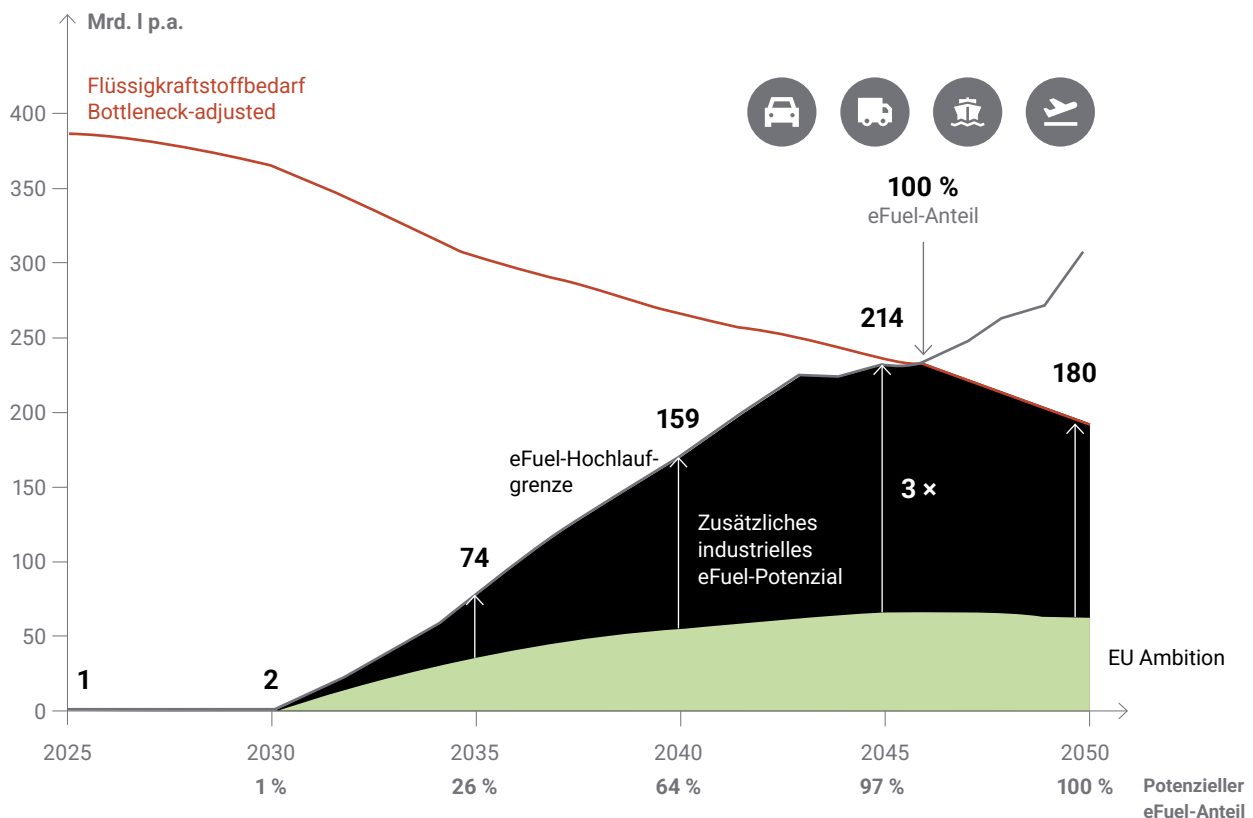


Abbildung 5: Jährliche Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen in der EU-Mobilität im Szenario „Bottleneck-adjusted“ und eFuel-Hochlauf: Szenario „EU Ambition“ vs. „Industrial eFuel Potential“.

Umfang: Benzin, Diesel, Schweröl, Methanol, Ammoniak und Kerosin | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent

Im „EU Ambition“-Szenario wird zwischen 2030 und 2040 ein signifikanter eFuel-Hochlauf im Mobilitätsbereich erwartet, wobei die Nachfrage auf mehr als 50 Milliarden Liter Benzinäquivalent über die vier Mobilitätssegmente ansteigt. Nach 2045 wird prognostiziert, dass die eFuel-Nachfrage stagniert, basierend auf der Annahme, dass sich die Antriebswende beschleunigt, was zu einer minimalen Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen für die Straßenmobilität über 2045 hinaus führt. Darüber hinaus wird erwartet, dass nachhaltige Bio-fuels – obwohl hier nicht dargestellt – eine wesentliche Rolle bei der Reduzierung der CO₂-Emissionen im Rahmen des „EU Ambition“-Szenarios spielen.

Bis 2045 könnte der eFuel-Markt 200 Milliarden Liter Benzinäquivalent erreichen und im darauffolgenden Jahr eine 100-prozentige eFuel-Quote erzielen – unter der Annahme eines verzögerten Ausstiegs aus flüssigen Kraftstoffen in der Straßenmobilität, wie im „Bottleneck-adjusted“-Szenario skizziert.

Im Gegensatz dazu zeigt das „Industrial eFuel Potential“-Szenario, dass sich der eFuel-Hochlauf nach 2030 deutlich beschleunigen könnte, wobei die kumulierten Mengen möglicherweise das Dreifache der im „EU Ambition“-Szenario prognostizierten Werte erreichen. Bis 2045 könnte der eFuel-Markt 200 Milliarden Liter Benzinäquivalent erreichen und im darauffolgenden Jahr eine 100-prozentige eFuel-Quote erzielen – unter der Annahme eines verzögerten Ausstiegs aus flüssigen Kraftstoffen in der Straßenmobilität, wie im „Bottleneck-adjusted“-Szenario skizziert.

Diese Ergebnisse haben Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen in der Mobilität, die unter Verwendung eines Lebenszyklus-Ansatzes berechnet wurden. Diese Methodik umfasst die Fahrzeugproduktion, die Energielieferketten (Well-to-Tank) und die Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel) innerhalb des Modellierungsrahmens. Für jede Antriebstechnologie sinken die produktionsbedingten Emissionen im Zeitverlauf, getrieben durch Verbesserungen in der Fertigung und die abnehmende Kohlenstoffintensität des Energiemixes. Ebenso nehmen die Emissionen aus Energieversorgung und Fahrzeugnutzung (Well-to-Wheel) ab, während sich der Energiemix weiterentwickelt. Auf Flottenebene führt der Ausstieg aus fossilen Energiequellen in Kombination mit Effizienzgewinnen durch die Elektrifizierung der Straßenmobilität zu einer kontinuierlichen Reduktion der jährlichen CO₂-Emissionen im Zeitverlauf.

Die Pariser Klimakonferenz von 2015 setzte ein globales Klimaziel dahingehend fest, die Erwärmung auf 1,75 °C (oder deutlich unter 2 °C) über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Um dies zu erreichen, schätzte der IPCC ein verbleibendes CO₂-Budget² von etwa 1.400 Gt CO₂ ab dem 1. Januar 2018, um die Überschreitung der 1,75 °C-Schwelle mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % zu vermeiden. Nach Berücksichtigung der globalen CO₂-Emissionen bis 2024³ wird das Restbudget

Anfang 2025 auf etwa 700 Gt CO₂ geschätzt. Die Zuweisung eines Anteils dieses Budgets an die EU, basierend auf ihrem Bevölkerungsanteil, und anschließend an die EU-Mobilität entsprechend ihrem Emissionsanteil unter den EU-Sektoren⁴ ergibt etwa 19 Gt CO₂, die ab 2025 für die EU-Mobilität verfügbar sind. Diese Zuweisung umfasst Lebenszyklus-Emissionen, einschließlich Fahrzeugproduktion, Energieversorgung (Well-to-Tank) und Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel).

Um den Fortschritt hin zu den Klimazielen in der EU-Mobilität zu bewerten, wurden die kumulierten CO₂-Emissionen berechnet und mit dem zugewiesenen CO₂-Restbudget ab 2025 verglichen. Drei Szenarien wurden bewertet und sind in Abbildung 6 dargestellt: das „EU Ambition“-Szenario, das „Bottleneck-adjusted“-Szenario und das „Industrial eFuel Potential“-Szenario*.

* Basiert auf dem „Bottleneck-adjusted“-Szenario mit Berücksichtigung des zusätzlichen industriellen eFuel-Potenzials.

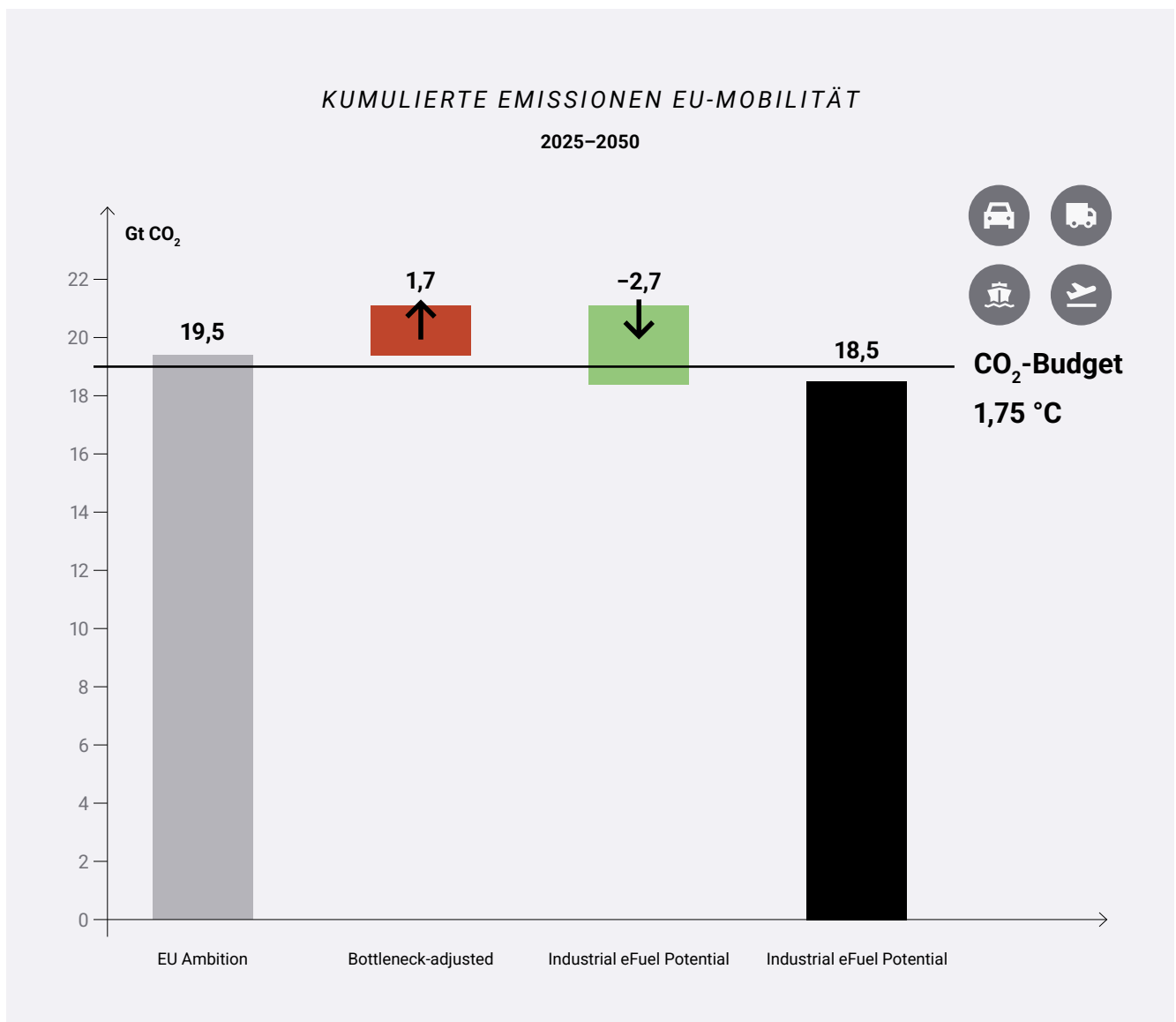


Abbildung 6: Kumulierte Lebenszyklus-CO₂-Emissionen in der EU-Mobilität in Milliarden Tonnen CO₂ (Gt): Szenario „EU Ambition“ vs. „Bottleneck-adjusted“ vs. „Industrial eFuel Potential“.



Aus Sicht der industriellen Machbarkeit können eFuels als entscheidender Hebel dienen, um Klimaziele zu erreichen – selbst wenn sich die Antriebstransformation in der EU-Mobilität verzögert.

Das „EU Ambition“-Szenario erfüllt das CO₂-Budget für 1,75 °C ungefähr, sofern bis 2050 die Klimaneutralität erreicht wird, im Einklang mit den europäischen Klimazielen. Im „Bottleneck-adjusted“-Szenario könnte die zusätzliche Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen, verursacht durch die verzögerte Antriebswende, die kumulierten Emissionen um bis zu 1,7 Gt CO₂ erhöhen und damit das zugewiesene Budget für die EU-Mobilität überschreiten. Durch eine Beschleunigung des eFuel-Hochlaufs auf sein volles industrielles Potenzial können diese zusätzlichen Emissionen jedoch ausgeglichen werden, wodurch die Einhaltung des CO₂-Budgets ermöglicht wird.

Aus Sicht der industriellen Machbarkeit können eFuels als entscheidender Hebel dienen, um Klimaziele zu erreichen – selbst wenn sich die Antriebstransformation in der EU-Mobilität verzögert.

Zahlreiche Projekte planen den Markteintritt und stehen derzeit vor Finanzierungsherausforderungen.

In den vergangenen Jahren hat sich in der eFuel-Industrie eine erhebliche Dynamik entwickelt, mit mehr als 500 weltweit angekündigten eFuel-Projekten. Diese Analyse konzentriert sich auf Kraftstofftypen, die bis 2030 für die Mobilität voraussichtlich besonders relevant sein werden: eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan und eDiesel. Aktuelle Ankündigungen deuten auf ein starkes Wachstum des eFuel-Angebots bis 2030 hin, wobei alle Regionen zum Hochlauf beitragen – insbesondere China und Europa.

Bis 2030 wird erwartet, dass viele neue Akteure in den eFuel-Markt eintreten. Laut Ankündigungen wird HIF Global voraussichtlich die Produktion führen und bis 2030 rund 12 % der weltweiten Kapazität stellen, mit mehreren Skalierungsprojekten in Regionen wie Südamerika, den USA und Australien.

Wichtige Akteure aus China planen – und in einigen Fällen bauen sie diese bereits – eMethanol-Anlagen in der Inneren Mongolei, wobei sie kostengünstige erneuerbare Energien nutzen und für 18 % der weltweit angekündigten Produktion bis 2030 stehen. Weitere aufstrebende Akteure sind European Energy mit Sitz in Dänemark, das Skalierungsprojekte in Europa plant. Insgesamt wurden mehr als 120 Unternehmen identifiziert, die bis 2030 eFuel-Skalierungspläne verfolgen, was zu einer stark fragmentierten Angebotslandschaft führt.

Die Datenbank zeigt einen starken Fokus auf eMethanol, das 82 % der angekündigten Kapazität bis 2030 ausmacht – insbesondere in China, wo Methanol als Weg zur Verringerung der Ölabhängigkeit und zur Dekarbonisierung der Straßenmobilität und der Schifffahrt betrachtet wird. eMethanol dient zudem als vielseitiger Plattformkraftstoff für alle Mobilitätssegmente. Andere Kraftstoffe wie eSAF, eBenzin/eNaphtha und eMethan sollen

PRO AKTEUR

2030

eFuel-Projekt-Kapazitäten

~20 Mrd. l



PRO KRAFTSTOFFART

- eMethanol
- eBenzin/eNaphtha
- eMethan
- eSAF
- eDiesel

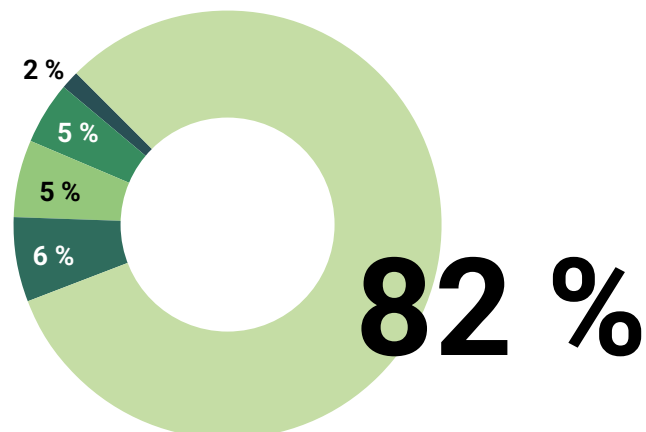


Abbildung 7: Marktanteil der eFuel-Produktion nach Akteur und Kraftstoffart basierend auf weltweit angekündigter Produktion im Jahr 2030. Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, IEA⁶, Methanol Institute⁷ | Umfang: eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan, eDiesel | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent | SAF: Sustainable Aviation Fuel



ebenfalls skaliert werden, wobei jeder etwa 5 % der prognostizierten eFuel-Produktion bis 2030 repräsentiert, während eDiesel nicht priorisiert wird und hauptsächlich als Nebenprodukt in angekündigten Projekten erscheint. Für eSAF wird bis 2030 ein starkes Wachstum erwartet, und das Marktgleichgewicht könnte sich langfristig zu seinen Gunsten verschieben. Darüber hinaus kann eMethanol in eBenzin oder eSAF umgewandelt werden – ein Detail, das in aktuellen Ankündigungen nicht immer spezifiziert wird. Das könnte den Marktanteil der Kraftstofftypen bis 2030 beeinflussen.

Obwohl zahlreiche Akteure angekündigt haben, die eFuel-Produktion bis 2030 hochzuskalieren, könnten mehrere Herausforderungen die Projektausführung verzögern. Der Projektfortschritt wurde über verschiedene

Phasen hinweg verfolgt: Konzept- oder Machbarkeitsstudie, Front-End Engineering Design (FEED), Final Investment Decision (FID), Bau und Betrieb. Derzeit ist die Finanzierung nur für 6 % der für 2030 geplanten eFuel-Kapazität gesichert, von der sich der Großteil im Bau befindet, während ein kleiner Teil bereits in Betrieb ist. Umgekehrt haben 94 % der angekündigten Kapazität die FID noch nicht erreicht. Ein erheblicher Anteil – 76 % der Gesamtkapazität – befindet sich noch in der Konzept- oder Machbarkeitsphase, während 14 % in der Engineering- und Designphase sind oder auf Abnahme- und Investorenverpflichtungen zur Sicherung der Finanzierung warten. Die FID bleibt eine entscheidende Hürde für die eFuel-Industrie. Die kommenden Monate werden ausschlaggebend sein, um den Betrieb vor 2030 aufzunehmen, da Bau und Inbetriebnahme bis zu vier Jahre dauern können. Regulatorische Unsicherheit ist ein wesentlicher Faktor, der langfristige Verpflichtungen von Abnehmern und Investoren hemmt. Ein unterstützender regulatorischer Rahmen und robuste Hochlaufstrategien sind entscheidend, um eFuel-Investitionen freizusetzen.

*Ein unterstützender
regulatorischer
Rahmen und robuste
Hochlaufstrategien
sind entscheidend,
um eFuel-Investitionen
freizusetzen.*

eFuel-Investitionen können durch einen unterstützenden regulatorischen Rahmen ermöglicht werden.

Die im Szenario 3 des Folgenabschätzungsberichts der Europäischen Kommission von 2024 skizzierte Mobilitätstransformation – das „EU Ambition“-Szenario – wird voraussichtlich aufgrund von Engpässen in der Batterielieferkette Verzögerungen erfahren. Im Gegensatz dazu zeigt die industrielle Machbarkeitsbewertung für eFuels das Potenzial, ihren Hochlauf ab 2030 zu beschleunigen, um die Klimaziele zu erreichen. Der aktuelle Stand der eFuel-Industrie zeigt jedoch weiterhin erhebliche Schwächen, die zu einer begrenzten Finanzierung europäischer Projekte führen.

Die Europäische Union hat einen umfassenden regulatorischen Rahmen für eFuels geschaffen, der mehrere Instrumente zur Förderung von Nachfrage und Angebot im Mobilitätssektor umfasst – insbesondere im Schiffs- und Luftverkehr. Die verbleibenden Herausforderungen zur Freisetzung von Projektfinanzierungen können durch die Nutzung dieser etablierten Instrumente adressiert werden. Auf der Angebotsseite bleibt das langfristige Projektrisiko aufgrund von Einschränkungen bei der eFuel-Produktion hoch. Sich im Zeitverlauf entwickelnde Anforderungen schaffen Unsicherheit hinsichtlich der langfristigen Konformität der ersten Projekte. Auf der Nachfrageseite fehlen langfristige Abnahmeverpflichtungen, da die aktuellen Nachfrageprognosen aufgrund unzureichender Quoten niedrig bleiben. Darüber hinaus richtet sich die Regulierung hauptsächlich an die Schifffahrt- und Luftfahrtsegmente, beispielsweise durch die Festlegung von Verpflichtungen für Flugzeugbetreiber, die begrenzt in der Lage sind, langfristige Volumenverträge einzugehen. Folglich stimmen die Risikoniveaus für Produktion und Abnahme nicht mit den Erwartungen der Investoren überein, was die Projektfinanzierung behindert. Mehrere Maßnahmen könnten dazu beitragen, das Projektrisiko sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite zu mindern.

Auf der Angebotsseite ist die Harmonisierung langfristiger Kriterien für die eFuel-Produktion entscheidend. Insbesondere sollten die Anforderungen an die zeitliche Korrelation mit der Versorgung durch erneuerbaren Strom flexibler gestaltet werden, um die Marktentwicklung zu stärken. Die Einführung von „Grandfathering“-Regelungen für erste Projekte – falls sich Produktionsstandards ändern – könnte langfristige Angebotsrisiken für Abnehmer und Erlösrisiken für Investoren verringern. Darüber hinaus könnte die Integration unvermeidbarer

industrieller CO₂-Quellen in die Produktionsstandards für eFuels den Hochlauf beschleunigen, insbesondere in Regionen mit begrenztem Zugang zu biogenen Quellen. Die Einführung international anerkannter Nachhaltigkeitszertifikate für CO₂-Quellen würde die Nachhaltigkeit importierter eFuels sicherstellen und Importe aus Regionen mit kostengünstiger erneuerbarer Energie unterstützen.

Auf der Nachfrageseite können langfristige Abnahmeverpflichtungen durch die Erhöhung der eFuel-Quoten mit klaren langfristigen Projektionen und definierten Bedingungen für Nichtkonformität gesichert werden. Die Belohnung einer Übererfüllung der Quoten durch zusätzliche Multiplikatoren und Credit Banking könnte die Verpflichtungen weiter fördern.



Die Nutzung bestehender Förderprogramme – wie SAF-Allowances, EU Innovation Fund und European Hydrogen Bank – ist entscheidend. Insbesondere kann der Wettbewerb mit anderen förderfähigen Technologien durch die Einführung dedizierter Budgets für die Schiff- und Luftfahrt in Auktionen der European Hydrogen Bank verringert werden. Innerhalb des EU-Emissionshandelssystems (ETS) würde die Erhöhung der Anzahl von Allowances spezifisch für eSAF-Projekte den Fluggesellschaften helfen, eSAF-Kosten auszugleichen, den Wettbewerb mit bioSAF zu reduzieren und die Attraktivität von eSAF-Abnahmeverträgen zu steigern. Darüber hinaus würde die Zuteilung von eSAF-Allowances für die gesamte Dauer des Abnahmevertrags – anstatt jährlich – langfristige Erlössicherheit im Rahmen des ETS bieten. Darüber hinaus kann die Anerkennung der eFuel-Nutzung in anderen Mobilitätssektoren die Nachfrage verstärken. Beispielsweise wäre die Einführung einer eFuel-Anrechnung in den CO₂-Standards für die Straßenmobilität – wie bereits in der Schweiz umgesetzt –

wirksam. Insgesamt würde diese Maßnahme Skaleneffekte fördern, Investitionskosten senken und Investitions- sowie Abnahmerisiken durch branchenübergreifende Risikoteilung mindern.

Die Attraktivität von eFuel-Projekten zu erhöhen und Abnahme- sowie Finanzierungsverpflichtungen zu stimulieren, erfordert die Nutzung bestehender regulatorischer Instrumente. Entscheidend sind pragmatische Produktionsstandards, eine gestärkte Nachfrage durch ambitionierte Quoten in der RED, ReFuelEU Aviation und FuelEU Maritime sowie eine technologieneutrale CO₂-Flottenregulierung für neue Fahrzeuge. Die Investitionsattraktivität lässt sich durch die Zusammenarbeit zwischen eFuel-Produzenten und branchenübergreifenden Abnehmern stärken, indem Kostensenkungen mit Skalierungsstrategien kombiniert und Risikoteilungsstrukturen implementiert werden. Zusammen mit einem robusten und verlässlichen regulatorischen Rahmen sind diese Maßnahmen entscheidend, um den eFuel-Hochlauf in Europa freizusetzen und ihren Beitrag zur Erreichung der Klimaziele zu maximieren. ⚡

Entscheidend sind pragmatische Produktionsstandards, eine gestärkte Nachfrage durch ambitionierte Quoten in der RED, ReFuelEU Aviation und FuelEU Maritime sowie eine technologieneutrale CO₂-Flottenregulierung für neue Fahrzeuge.

ZUSAMMENGEFASST

- ▶ Verbrennungsmotoren (ICEVs) werden voraussichtlich in allen Mobilitätsbestandsflotten bis 2040 relevant bleiben, insbesondere in der Schifffahrt und Luftfahrt.
- ▶ Die ambitionierten Pläne der EU-Kommission für die breite Einführung von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) in der Straßenmobilität setzen die Batterie- und Energieversorgungsketten erheblich unter Druck. Gleichzeitige Hochlaufinitiativen in anderen Regionen könnten zu Engpässen führen und unterstreichen die Notwendigkeit strategischer Planung und langfristiger Investitionen.
- ▶ Wenn die Antriebstransformation in der Mobilität nicht so schnell voranschreitet wie von der EU geplant, bleibt die Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen höher als erwartet, was die CO₂-Einsparungen möglicherweise verzögert.
- ▶ Aus Sicht der industriellen Machbarkeit kann der eFuel-Hochlauf beschleunigt werden, um die Klimaziele zu erreichen – selbst wenn sich die Antriebstransformation in der Mobilität verzögert.
- ▶ Zahlreiche Projekte bereiten den Eintritt in den eFuel-Markt vor; sie stehen jedoch derzeit vor Finanzierungsherausforderungen. Das Erreichen der Final Investment Decision (FID) in den kommenden Monaten wird entscheidend sein, um den Betrieb bis 2030 zu ermöglichen. Die Freisetzung von eFuel-Projektfinanzierungen erfordert regulatorische Unterstützung und robuste Hochlaufstrategien.
- ▶ Um die Attraktivität von eFuel-Projekten zu erhöhen und Abnahme- sowie Finanzierungsverpflichtungen zu verstärken, können bestehende regulatorische Instrumente genutzt werden. Die Harmonisierung der Produktionsstandards für eFuels kann langfristige Konformitätsrisiken mindern, während die Erhöhung der eFuel-Quoten und die Einführung einer branchenübergreifenden eFuel-Anrechnung die Nachfrage sichern können.
- ▶ Abnahme- und Finanzierungsverpflichtungen für eFuels können zusätzlich durch die Zusammenarbeit zwischen eFuel-Produzenten und branchenübergreifenden Abnehmern gefördert werden, indem Kostensenkungen mit Skalierungsstrategien kombiniert und Risikoteilungsstrukturen implementiert werden.





Hintergrund, Umfang und Ziele der Studie



Die Pariser Klimakonferenz von 2015 setzte ein globales Ziel dahingehend fest, die Erwärmung auf 1,75 °C (oder deutlich unter 2 °C) über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Um dies zu erreichen, hob der IPCC in seinem Bericht von 2018² hervor, dass ein globales CO₂-Budget eingehalten werden muss. Obwohl sich die Europäische Union nicht direkt zu einem CO₂-Budget verpflichtet hat, hat sie sich im Rahmen des Green Deal dazu bekannt, bis 2050 Netto-Null-Treibhausgasemissionen (THG) in allen Sektoren zu erreichen.



Die Mobilität spielt in diesem Übergang eine entscheidende Rolle: Im Jahr 2023 entfielen auf verkehrsbezogene Aktivitäten 794 Mt CO₂-Äq⁸, was über 25 % der gesamten THG-Emissionen der EU von mehr als 2.900 Mt CO₂-Äq⁴ ausmacht. Trotz technologischer Verbesserungen wurden die Effizienzgewinne durch die steigende Nachfrage nach Mobilität weitgehend zunichte gemacht, sodass die Emissionen auf einem konstant hohen Niveau verbleiben.

Die Dekarbonisierung der Mobilität ist daher ein Kernbaustein der Klimastrategie der EU. Diese Herausforderung umfasst vier zentrale Segmente:

- Personenkraftwagen, die den Großteil der Straßenverkehrsemissionen verursachen;
- Lkw und Busse, unverzichtbar für den Güterverkehr und den öffentlichen Transport;
- Schifffahrt, die Säule des globalen Handels und der europäischen Logistik;
- Luftfahrt, ein Sektor mit wachsender Nachfrage und begrenzten Alternativen zu flüssigen Kraftstoffen.

Während Sektoren wie die Stromerzeugung in den letzten Jahren erhebliche Emissionsminderungen erreicht haben, bleibt die Mobilität aufgrund ihrer Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und der Komplexität der Umstellung großer, heterogener Fahrzeugflotten eine der größten Herausforderungen bei der Dekar-

bonisierung. Die Erreichung der Klimaneutralität erfordert ein koordiniertes Vorgehen von Politik, Industrie und Gesellschaft, unterstützt durch innovative Technologien und Infrastruktur. Jüngste EU-Initiativen wie das „Fit for 55“-Paket haben ambitionierte Ziele eingeführt – z. B. eine 100 %-Reduktion der Auspuffemissionen für neue Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 2035 – und damit Debatten über die Rolle von Technologien wie eFuels und Elektrifizierung ausgelöst. Allerdings konzentrieren sich die aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen auf Tank-to-Wheel-Emissionen und übersehen Lebenszyklusauswirkungen wie Emissionen aus der Fahrzeugproduktion und der Energieversorgung (Well-to-Tank). Lebenszyklusanalysen zeigen, dass ein sektorspezifischer Ansatz das Erreichen der Klimaziele womöglich gefährdet, was die Notwendigkeit einer integrierten Strategie unterstreicht, die einen Mix von Technologien über alle Mobilitätssegmente hinweg nutzt.

eFuels bieten unter anderem eine vielversprechende Möglichkeit, die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus in der Mobilität zu senken. Dennoch ist ihr potenzieller Beitrag zur Erreichung der Klimaziele in den europäischen Mobilitätsflotten bislang unklar, was die Planung des Hochlaufs erschwert. Ziel dieser Studie ist es, das Marktpotenzial von eFuels für die Segmente Straße, Luftfahrt und Schifffahrt anhand einer Bewertung verschiedener Szenarien zu untersuchen. Der Hauptzweck besteht darin, Transparenz über die Auswirkungen der EU-Flotten-Transformationsszenarien auf die Einhaltung der Klimaziele zu schaffen und die mögliche Rolle von eFuels in diesem Zusammenhang zu bestimmen. Nach der Darstellung aktueller Herausforderungen definiert die Studie Maßnahmen, die den Hochlauf von eFuels erleichtern und ihren Beitrag zur Einhaltung des verbleibenden CO₂-Budgets für die europäische Mobilität erhöhen sollen.



eFuels bieten unter anderem eine vielversprechende Möglichkeit, die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus in der Mobilität zu senken. Dennoch ist ihr potenzieller Beitrag zur Erreichung der Klimaziele in den europäischen Mobilitätsflotten bislang unklar, was die Planung des Hochlaufs erschwert.

Innerhalb der EU27 wurden vier Mobilitätssegmente für diese Analyse ausgewählt, da sie unter allen Mobilitätssektoren den höchsten Anteil an Treibhausgasemissionen haben: Pkw, Lkw und Busse, Schifffahrt und Luftfahrt. Die Transformation wurde anhand von zwei Schlüsseldimensionen bewertet, die sich direkt auf die CO₂-Emissionen im Lebenszyklus der EU-Mobilität auswirken: Antrieb und Energie.

In den Segmenten der Straßenverkehrsmobilität wurden die Antriebs- und die Energiewende durch die Modellierung beider Flotten und ihres jeweiligen Energiebedarfs in mehreren Szenarien mit unterschiedlichen Antriebs- und Energiequoten bewertet. Die Straßenmobilitätsbestandsflotten wurden auf der Grundlage der in der EU27 zugelassenen Fahrzeuge definiert: Das Pkw-Segment umfasst den Individualverkehr und leichte Nutzfahrzeuge*, während das Lkw- und Bussegment mittlere und schwere Nutzfahrzeuge sowie Busse umfasst.

* Erfüllen ein maximales zulässiges Gesamtgewicht von 3,5 Tonnen.

In der Schifffahrt und in der Luftfahrt hat die Flottenerneuerung nur begrenzte Auswirkungen auf die Antriebswende, da die Fahrzeuglebensdauer im Vergleich zur Straßenmobilität deutlich länger ist. Außerdem wird die Modellierung der europäischen Flotte durch internationale Fahrten noch komplexer. In der Luftfahrt ist die technische Machbarkeit alternativer Antriebe ebenfalls begrenzt, während Schiffsbetreiber die Flexibilität durch den Einsatz von Dual-Fuel-Motoren in neuen Schiffen und die Nachrüstung bestehender Schiffe mit alternativen Technologien erhöhen können. Daher konzentrierte sich die Bewertung für diese Segmente auf die in europäischen Häfen und Flughäfen getankte Energie und nicht auf die Modellierung der Entwicklung des Antriebs. Bei diesem Ansatz wurde der interkontinentale und intrakontinentale Schiffsverkehr für alle Schiffe über 400 GT berücksichtigt, einschließlich Containerschiffe, Massengutfrachter, Öltanker, LNG-Tanker, Passagierschiffe, Chemikaliertanker und Gastanker. In der Luftfahrt deckt die Analyse alle zivilen Flugzeuge ab, die in Europa im Einsatz sind – auf Kurz-, Mittel- und Langstrecken – und umfasst Flüge innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (EEA) sowie außereuropäische Strecken.

Für die vier Mobilitätssegmente wurden mehrere Szenarien für die Antriebs- und die Energiewende bewertet.

Das erste Szenario wurde aus der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission von 2024 abgeleitet und dient der Erfüllung der EU-Klimaziele, d. h. der Senkung der CO₂-Emissionen um 55 % bis 2030 im Vergleich zu 1990, einer Senkung um 90 % bis 2040 und der Klimaneutralität bis 2050. Dieses Szenario spiegelt zwar nicht die aktuellen EU-Vorschriften wider, gibt aber einen Einblick in die Absichten der Kommission für die Mobilitätswende und wird im Folgenden als „EU Ambition“-Szenario bezeichnet.

Das zweite Szenario basierte auf einer Analyse der industriellen Machbarkeit des Szenarios „EU Ambition“. Kritische Engpässe in der Antriebs- und Energieversorgungskette wurden identifiziert und quantifiziert, um die Erfolgswahrscheinlichkeit zu bewerten. Andere Einflussfaktoren – wie regulatorische Änderungen, geopolitische Dynamik, Kundentrends, gesellschaftliche Akzeptanz und wirtschaftliche Ereignisse - wurden nicht bewertet. Auf der Grundlage dieser Engpassanalyse wurde die Transformation im Rahmen des Szenarios „EU Ambition“ im Zeitverlauf angepasst, um den Druck auf die Lieferkette zu verringern und gleichzeitig die Konsistenz mit der ursprünglichen Transformation zu wahren. Dieses Szenario wird als „Bottleneck-adjusted“-Szenario bezeichnet.

Das dritte Szenario wurde entwickelt, um das industrielle Potenzial von eFuels für die Dekarbonisierung der EU-Mobilität zu bewerten. Industrielle Beschränkungen wurden durch eine Bewertung der Engpässe in den eFuel-Lieferketten ermittelt, und das Szenario wurde so konzipiert, dass die Geschwindigkeit der eFuel-Einführung innerhalb dieser Beschränkungen maximiert wird, wobei auf dem „Bottleneck-adjusted“-Szenario aufgebaut wurde. Diese Transformation wird als „Industrial eFuel Potential“-Szenario bezeichnet.

Diese drei Szenarien werden in den → **Kapiteln 3, 4 bzw. 5** ausführlich vorgestellt. Für jedes Szenario wurden die jährlichen CO₂-Emissionsreduktionen und die Einhaltung des CO₂-Budgets bewertet.

Schließlich wurde in → **Kapitel 6** der Status quo der eFuel-Industrie anhand einer Datenanalyse der angekündigten Produktionskapazitäten untersucht, um Transparenz über die aktuellen Herausforderungen des Marktes zu schaffen. Im Ergebnis wurden in dieser Studie sowohl das Potenzial als auch die Grenzen von eFuels aufgezeigt und die erforderlichen Maßnahmen skizziert, um ihren Beitrag zur Kohlenstoffeinsparung in der EU-Mobilität zu maximieren.

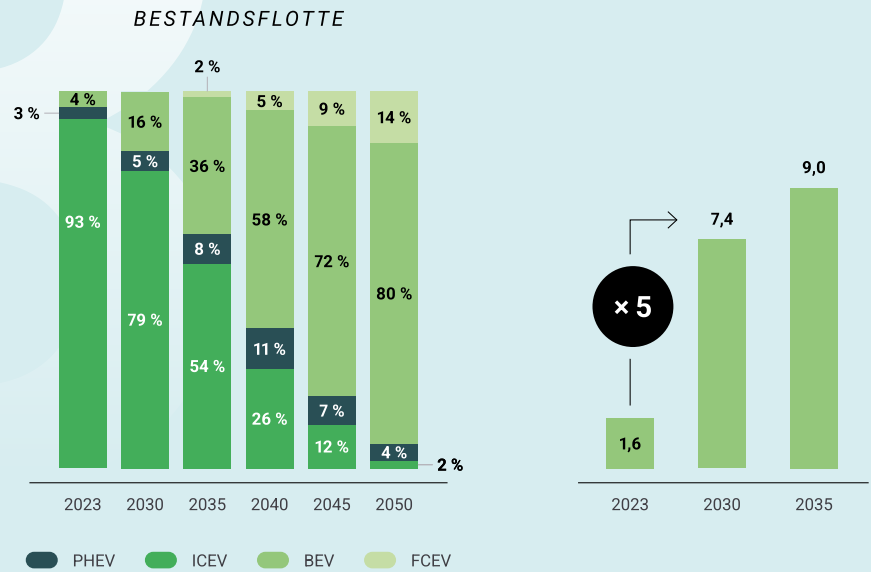
Die Studie wurde in vier Phasen durchgeführt, wie in Abbildung 8 dargestellt, und wird in den → **Kapiteln 3 bis 6** detailliert beschrieben. 



3 EU-Mobilitätstransformation

SZENARIO „EU AMBITION“

Gemäß den EU-Plänen ist eine schnelle Antriebs- und Energie-wende erforderlich



4 Engpassanalyse

SZENARIO „BOTTLENECK-ADJUSTED“

Der BEV-Hochlauf verzögert sich; weitere Maßnahmen sind für die Klimaziele nötig

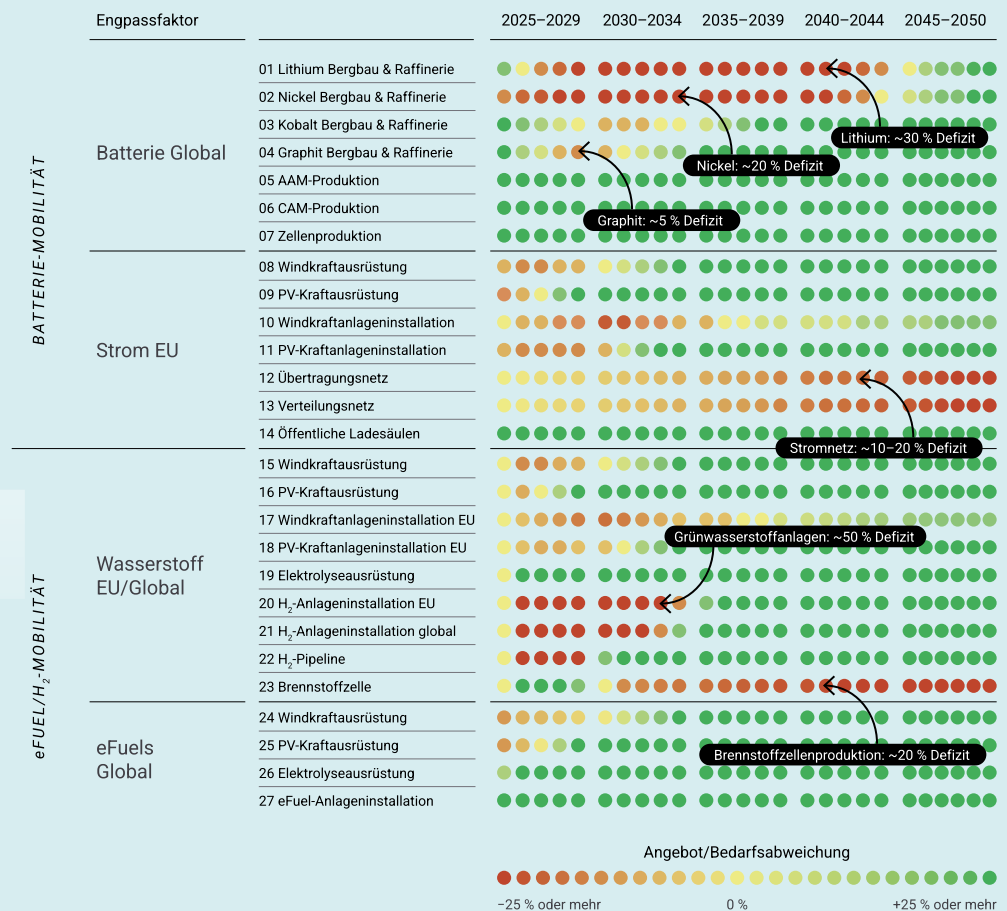
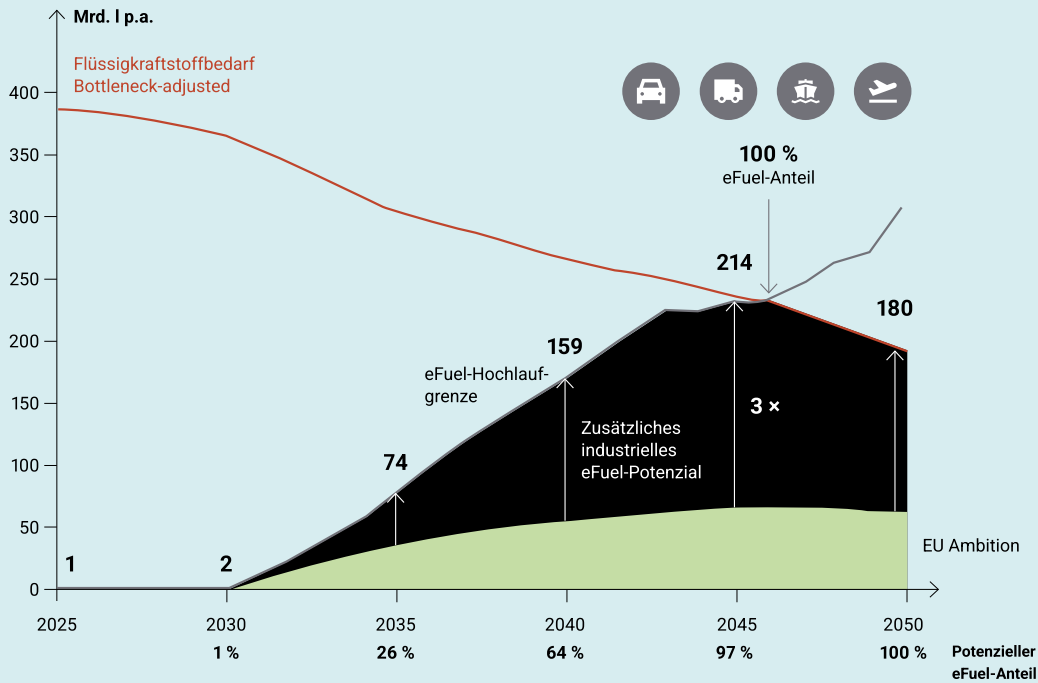


Abbildung 8: Struktur der Studie.

5 eFuel-Marktpotenzial

SZENARIO „INDUSTRIAL eFUEL POTENTIAL“

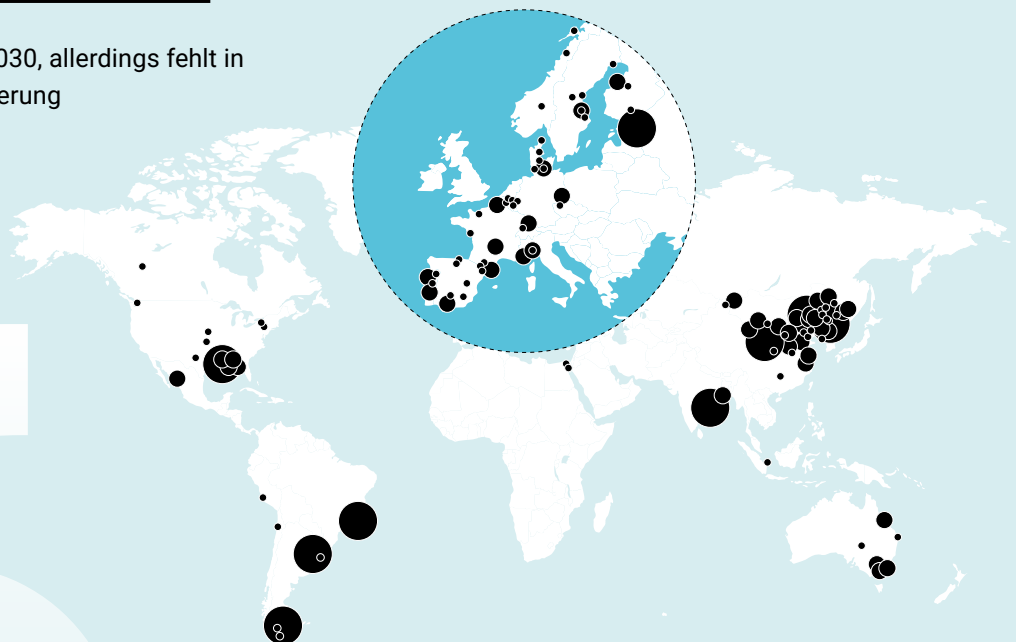
eFuels könnten schneller wachsen und die Dekarbonisierungslücke damit schließen



6 eFuel Status quo

POTENZIALE UND HERAUSFORDERUNGEN

eFuels wachsen stark bis 2030, allerdings fehlt in vielen Projekten die Finanzierung





*EU-Mobilitätstransformation:
Szenario „EU Ambition“*



3.1. Einführung in die Folgenabschätzung der Europäischen Kommission

Das Hauptziel dieser Studie war es, die von der Europäischen Union bis 2050 geplante Mobilitätswende zu analysieren. Um sich an den Klimazielen der EU zu orientieren, war eine zuverlässige und offizielle Informationsquelle erforderlich. Der derzeitige Stand der europäischen Regulierungsinstrumente lässt jedoch keine genaue Transformationsprognose über das Jahr 2035 hinaus zu. Die Folgenabschätzung der Europäischen Kommission ist ein strukturierter Prozess, der bei der Vorbereitung neuer EU-Initiativen – sowohl legislativer als auch nichtlegislativer Art – eingesetzt wird, um notwendige Maßnahmen zu bewerten und die potenziellen wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Auswirkungen der verfügbaren Optionen zu analysieren. Sie liefert eine faktische Grundlage für die Entscheidungsfindung und unterstützt die Kommission bei der Gestaltung einer wirksamen und angemessenen Politik. Die Berichte werden zusammen mit Legislativvorschlägen veröffentlicht und dem Europäischen Parlament und dem Rat übermittelt. Der Bericht über die Folgenabschätzung von 2024¹ bietet eine umfassende Analyse von Transformationsszenarien für verschiedene Sektoren. Szenario 3 wurde entwickelt, um die EU-Klimaziele zu erreichen, d. h. eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 55 % bis 2030 im Vergleich zum Stand von 1990, eine Reduzierung um 90 % bis 2040 und Klimaneutralität bis 2050. Aus diesem Grund wurde Szenario 3 als Grundlage für das Verständnis des EU-Plans zur Transformation der Mobilität festgelegt und wird im Folgenden als „EU Ambition“-Szenario bezeichnet.

3.2. Methodik, Modellierung und Datenerhebung

3.2.1. Flotte und Antrieb

Um die Geschwindigkeit der Einführung der verschiedenen Antriebstechnologien zu analysieren, wurde ein Flottenmodell entwickelt. Der Folgenabschätzungsbericht der Europäischen Kommission enthält keine Bestandsflottengrößen in Form von Fahrzeugzahlen, sondern gibt

die Anteile der Antriebsarten für die Jahre 2030, 2040 und 2050 in den folgenden Segmenten an: Pkw, Lkw und Busse sowie nationale und internationale Schifffahrt. Für den Luftverkehr wird keine detaillierte Antriebsvorhersage gemacht; der Bericht enthält jedoch Energiebedarfsdaten für alle vier in dieser Studie untersuchten Mobilitätssegmente. Die Verfügbarkeit der Daten aus dem Folgenabschätzungsbericht der Europäischen Kommission ist in Abbildung 9 dargestellt.

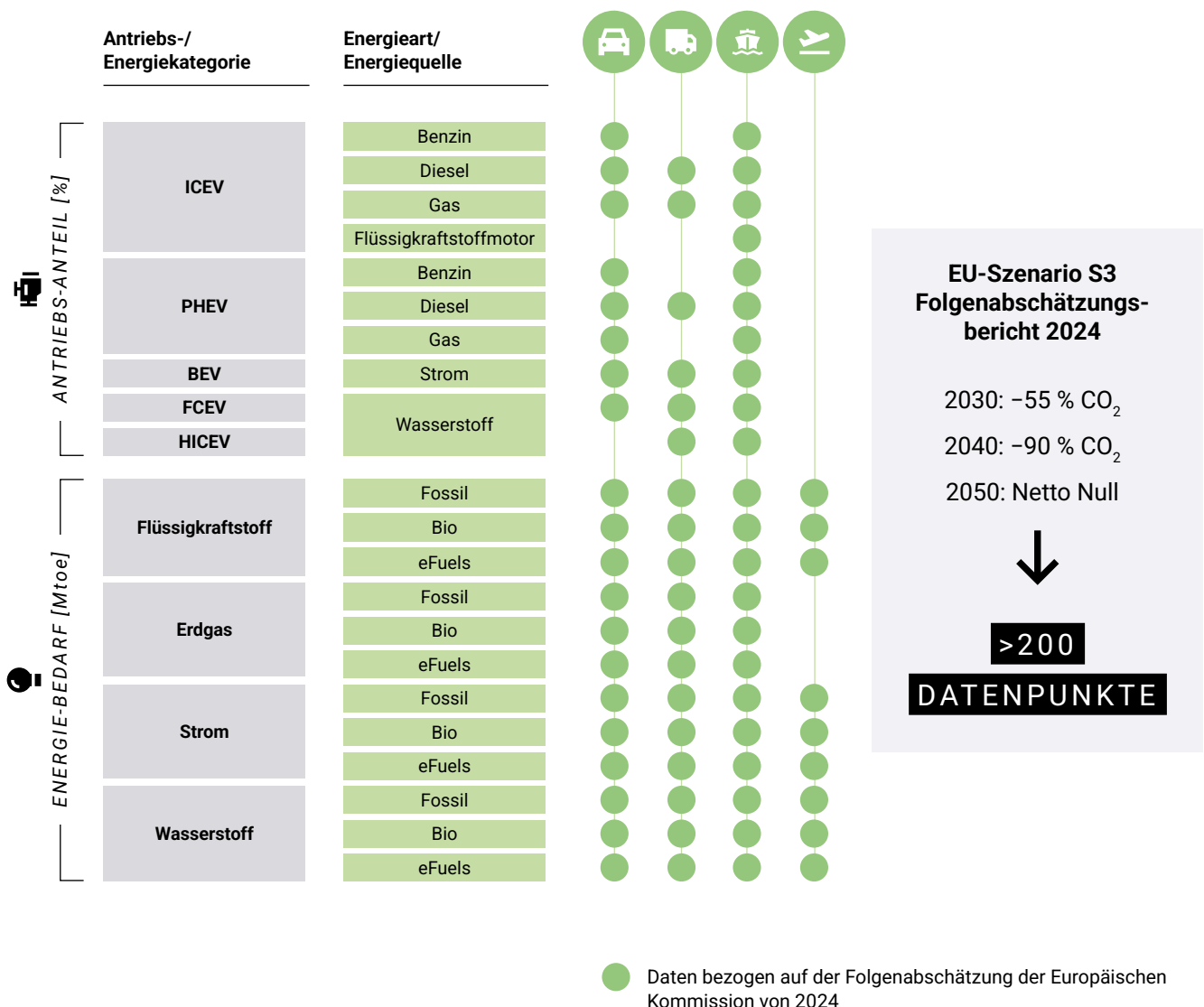


Abbildung 9: Verfügbare Daten aus der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission zur Modellierung der Antriebs- und Energiewende.

Bei der Straßenmobilität ist ein Flottenmodell unerlässlich, um detaillierte jährliche CO₂-Emissionen abzuleiten, die für die Berechnung der kumulativen Emissionen entscheidend sind – die Grundlage für die Einhaltung der Klimaziele gemäß dem CO₂-Budget. In einer Lebenszyklusanalyse werden die jährlichen CO₂-Emissionen sowohl vom Energiebedarf als auch von der Fahrzeugproduktion bestimmt. Die Methodik für die CO₂-Berechnung wird in → **Abschnitt 3.2.3.** näher erläutert. Zur Schätzung der energie- und fahrzeugproduktionsbedingten Emissionen wurde ein Modell entwickelt, das die Anzahl der Fahrzeuge für jeden Antrieb sowohl auf Bestandsflotten- als auch auf Neuzulassungsebene simuliert. Im Szenario „EU Ambition“ verwendet das Modell die im Folgenabschätzungsbericht angegebenen Bestandsflottenanteile der Antriebsarten für die Datenpunkte 2030, 2040 und 2050 als Zielvorgaben. Für jedes Jahr bis 2050 wurden die Neuzulassungen so modelliert, dass diese Ziele für alle Antriebsarten erreicht werden: ICEV mit Benzin-, Diesel- und Methantrieb, PHEV mit Benzin-, Diesel- und Methantrieb, BEV, FCEV, und HICEV. Für PHEV-Pkw werden im Folgenabschätzungsbericht keine Angaben zum Anteil von Diesel, Benzin und Methan gemacht. Diese Anteile wurden mit den entsprechenden Anteilen des ICEV-Antriebs abgeglichen.

In einem nächsten Schritt wurde die Bestandsflottengröße für jeden Antrieb zwischen den Datenpunktjahren abgeleitet. Im Pkw-Segment beträgt der angestrebte BEV-Anteil beispielsweise 16 % im Jahr 2030 und 58 % im Jahr 2040. Dies bedeutet, dass die BEV-Bestandsflotte von 33 Millionen auf 120 Millionen Fahrzeuge anwächst. Die BEV-Neuzulassungen wurden so modelliert, dass sie diesen Anstieg von 87 Millionen Fahrzeugen über das Jahrzehnt abdecken, wobei ein linearer Anstieg von Jahr zu Jahr zugrunde gelegt wurde.

Zusätzlich kompensieren die Neuzulassungen den Ausstieg von Fahrzeugen aus der Bestandsflotte am Ende ihres natürlichen Lebenszyklus.

Da der Folgenabschätzungsbericht der Europäischen Kommission keine Angaben zu den Bestandsflottengrößen in Form der Anzahl der Fahrzeuge enthält, wurden die Bestandsflottendaten durch eine klare Trennung der beiden Segmente der Straßenmobilität angepasst. Das Pkw-Segment umfasst sowohl den Individualverkehr als auch leichte Nutzfahrzeuge*, während das Lkw- und Bussegment mittlere und schwere Nutzfahrzeuge sowie Busse umfasst. Unter der Annahme, dass die Nachfrage nach Mobilität auf der Straße in den kommenden Jahrzehnten stabil bleibt, wurde die Bestandsflottengröße für die Datenpunkte 2030, 2040 und 2050 als konstant auf dem Niveau von 2025 modelliert. Die Bestandsflottengröße für 2025 wurde auf der Grundlage historischer Neuzulassungen geschätzt, wobei eine durchschnittliche Fahrzeuglebensdauer von 16 Jahren für Pkw (gemäß einer aktuellen Studie des Umweltbundesamtes⁹) und von 8 Jahren für Lkw und Busse angenommen wurde. Während die tatsächliche Lebensdauer je nach Anwendungsfall variiert, bietet die Anwendung kategoriespezifischer Durchschnittswerte eine solide Schätzung der Bestandsflottengröße und der Durchdringungsgeschwindigkeit neuer Antriebsarten. Die Daten zu den Neuzulassungen wurden bis 2023 von ACEA¹⁰ bezogen, und die Werte für 2024 und 2025 wurden als Durchschnitt der jährlichen Zulassungen zwischen 2015 und 2023 definiert. In diesem Zeitraum wurden jährlich durchschnittlich 12 Millionen Pkw und 380.000 Lkw und Busse neu zugelassen. Unter der Annahme, dass die Bestandsflottengröße bis 2050 stabil bleibt, werden auch die jährlichen Neuzulassungen auf einem ähnlichen Niveau bleiben.

* Erfüllen ein maximales zulässiges Gesamtgewicht von 3,5 Tonnen.

	Jährliche Neuzulassungen	Bestands- flotte	Durchschnittliche Lebensdauer
	12,3 Mio.	208,7 Mio.	16 Jahre
	379.579	2,7 Mio.	8 Jahre

Abbildung 10: Annahmen zu den Daten der EU-Fahrzeugflotte und der durchschnittlichen Lebensdauer im Jahr 2025.

Demzufolge entfallen auf die Pkw-Bestandsflotte 208,7 Millionen Fahrzeuge und auf die Lkw- und Busbestandsflotte 2,7 Millionen Fahrzeuge in den Jahren 2025, 2030, 2040 und 2050. Zwischen diesen Datenpunktyahren berechnet das Modell die Neuzulassungen und Bestandsflottengrößen, um die im Szenario „EU Ambition“ definierten Ziele für den Anteil der Antriebsarten zu erreichen.

Im Luftfahrtsektor zeigen die Daten zur Energienachfrage aus dem Folgenabschätzungsbericht deutlich, dass flüssige Kraftstoffe die vorherrschende Energiequelle bleiben werden – 99 % im Jahr 2040 und 93 % im Jahr 2050 – unter dem Szenario „EU Ambition“. Darüber hinaus erfolgt die Erneuerung der Flugzeugbestandsflotte viel langsamer als bei der Straßenmobilität, und die Analyse der CO₂-Emissionen konzentriert sich auf die energiebezogenen Emissionen, die etwa 90 % der Lebenszyklusemissionen ausmachen. Die

Dekarbonisierungsziele in diesem Segment werden daher durch die verwendete Energie und nicht durch den Antrieb bestimmt. In Anbetracht dieser Faktoren ist ein Energienachfragemodell am besten geeignet, um den Wandel in der Luftfahrt zu analysieren.

Ähnliche Überlegungen gelten für die Schifffahrt, wo die Erneuerung der Flotte aufgrund der deutlich längeren Lebensdauer – über 30 Jahre im Vergleich zu durchschnittlich 8 Jahren bei Lkw und Bussen und 16 Jahren bei Pkw – nur sehr begrenzte Auswirkungen auf die Umstellung des Antriebs hat. Darüber hinaus haben die Schiffsbetreiber bereits die Möglichkeit, die Flexibilität zu erhöhen, indem sie neue Schiffe mit Dual-Fuel-Motoren ausstatten und bestehende Schiffe mit alternativen Motortechnologien nachrüsten. Auch in diesem Segment wird die Energiewende der wichtigste Treiber für die Dekarbonisierung sein.



3.2.2. Energiebedarf

In der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission wird der Energiebedarf für 2015, 2030, 2040 und 2050 für jedes in dieser Studie analysierte Mobilitätssegment angegeben. Der Folgenabschätzungsbericht gibt die physikalische Form des Kraftstoffs an – z. B. flüssig oder gasförmig –, nennt aber nicht explizit den Kraftstofftyp für Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel. Für die Straßenmobilität wurde das in dieser Studie entwickelte Flottenmodell verwendet, um jeden Energietyp dem entsprechenden Antrieb zuzuordnen und die Nachfrage auf der Grundlage des Anteils des Antriebs und des Energiegehalts des Kraftstoffs abzuleiten. In den Segmenten Schiff- und Luftfahrt wurde von der Europäischen Kommission keine Unterscheidung zwischen den Kraftstoffarten vorgenommen; flüssiger Kraftstoff wird als Marine Fuel bzw. Jet Fuel bezeichnet. Bei Marine Fuels wird davon ausgegangen, dass diese Schweröl, Diesel, Methanol und Ammoniak enthalten, während Jet Fuel Kerosin umfasst.

In dieser Studie wurden Energieanalysen unter Verwendung einer standardisierten Maßeinheit durchgeführt: des Liter-Benzinäquivalents. Diese Einheit wurde gewählt, da sie für europäische Verbraucher eine intuitive und weiterhin anerkannte Referenz für den Energiegehalt ist. Die Verwendung des Liter-Benzinäquivalents als gemeinsame Grundlage ermöglicht einen konsistenten und umfassenden Vergleich des Energiebedarfs über verschiedene Energieträger hinweg.

Bei der Straßenmobilität steht der Energiebedarf in direktem Zusammenhang mit der Bestandsflottengröße für jeden Antrieb. Daher wurden die im Bericht über die Folgenabschätzung für die Jahre 2015, 2030, 2040 und 2050 bereitgestellten Datenpunkte zum Energiebedarf mit dem Flottenmodell für jedes Jahr

bis 2050 gekoppelt. Dieser Ansatz erhöht die Genauigkeit bei der Modellierung des Energiebedarfs für alle Energiearten.

Für jeden Antrieb und die entsprechende Energieart in den Datenpunktyahren 2030, 2040 und 2050 wurde der durchschnittliche jährliche Energieverbrauch pro Fahrzeug berechnet, indem der im Folgenabschätzungsbericht angegebene Energiebedarf auf Flottenebene durch die aus dem Flottenmodell abgeleitete Bestandsflottengröße dividiert wurde. Da für das Jahr 2025 keine Daten im Folgenabschätzungsbericht vorliegen, wurde angenommen, dass der jährliche Energieverbrauch der Fahrzeuge für alle Antriebe und Energiearten den Werten von 2030 entspricht. Zwischen den Jahren mit Datenpunkten wurde die Entwicklung des jährlichen Energieverbrauchs pro Fahrzeug durch lineare Interpolation bestimmt, was eine jährliche Schätzung für jede Antriebstechnologie bis 2050 ermöglicht.

So steigt beispielsweise der Jahresverbrauch eines durchschnittlichen Benzin-Pkw von 1.102 Litern im Jahr 2030 auf 1.366 Liter im Jahr 2050. Im Gegensatz dazu sinkt der durchschnittliche Stromverbrauch von BEVs im Laufe der Zeit – von 2.267 kWh im Jahr 2030 auf 2.093 kWh im Jahr 2050. Dieser gegenläufige Trend wird in dem Folgenabschätzungsbericht der Europäischen Kommission nicht erklärt und ergibt sich aus der Annahme, dass die Bestandsflottengröße konstant bleibt. Der Rückgang des BEV-Energieverbrauchs kann als eine Verlagerung der Nutzung interpretiert werden: Derzeit ziehen BEVs Nutzer großer Autos mit hoher Fahrleistung an, aber langfristig ist zu erwarten, dass sie auch in kleineren Autos mit geringerer Fahrleistung eingesetzt werden. Umgekehrt konzentrieren sich Benzinautos derzeit auf kleinere Fahrzeuge mit geringem Jahresverbrauch, aber es wird erwartet, dass sie im Laufe der Zeit für Anwendungsfälle mit höheren Fahrleistungen und Reich-

	ICEV Benzin	BEV
	~1.100 l p.a.	~2.250 kWh p.a.
	~20.000 l p.a.	~67.300 kWh

Abbildung 11: Durchschnittlicher jährlicher Energieverbrauch von Pkw und Lkw und Bussen, exemplarisch für ICEV-Benziner und BEV im Jahr 2025.

weitenanforderungen eingesetzt werden – was den Anstieg des durchschnittlichen Jahresverbrauchs erklärt.

Für jede Energieart und jedes Jahr bis 2050 wurde der Energiebedarf auf Flottenebene berechnet, indem der durchschnittliche jährliche Energieverbrauch pro Fahrzeug mit der Bestandsflottengröße der entsprechenden Antriebsart multipliziert wurde.

Die Folgenabschätzung der Europäischen Kommission simuliert den Einsatz von kohlenstoffarmen Energieträgern und gibt die angenommenen Anteile für die Datenpunkte 2015, 2030, 2040 und 2050 an. So wird beispielsweise für die Pkw-Mobilität ein Anstieg des Anteils der Biokraftstoffe von 7 % im Jahr 2030 auf 27 % im Jahr 2040 und 30 % im Jahr 2050 prognostiziert. Die Folgenabschätzung der Europäischen Kommission unterscheidet jedoch nicht zwischen konventionellen und fortschrittlichen Biokraftstoffen; die angegebenen Quoten gelten für alle Biokraftstofftypen zusammen. Darüber hinaus differenziert der Folgenabschätzungsbericht die Einführung

von Kraftstoffen nach Mobilitätssegmenten. Beispielsweise wird prognostiziert, dass der Hochlauf von eMethan im Schifffahrtssektor schneller erfolgt als bei Lkw und Bussen – 21 % gegenüber 7 % im Jahr 2040 und 45 % gegenüber 38 % im Jahr 2050.

Für jede Energieart wurden die Anteile der einzelnen Energieträger für jedes Jahr bis 2050 durch lineare Interpolation zwischen den Bezugspunkten für 2015, 2030, 2040 und 2050 ermittelt. Diese Anteile wurden dann mit dem entsprechenden Energiebedarf für jede Energieart multipliziert, um den Bedarf nach Energieträgern zu berechnen. Dieser Schritt ist für die Bewertung der CO₂-Emissionen unerlässlich.

Wie in → **Abschnitt 3.2.1.** hervorgehoben wurde, hat die Flottenerneuerung nur minimale Auswirkungen auf die Energienachfrage in den Segmenten Schifffahrt und Luftfahrt, wo die Dekarbonisierung durch die verwendete Energie und nicht durch den Antrieb vorangebracht wird. Aus diesem Grund wurde die Energienachfrage in diesen Segmenten nicht

mit dem Flottenmodell gekoppelt. Stattdessen wurde zur Modellierung der Energienachfrage eine lineare Interpolation zwischen den Jahren 2015, 2030, 2040 und 2050 vorgenommen.

3.2.3. CO₂-Emissionen

Zur Abschätzung der CO₂-Emissionen in den in dieser Studie untersuchten EU-Mobilitätssegmenten – Pkw, Lkw und Busse, Schifffahrt und Luftfahrt – wurden spezifische methodische Ansätze definiert.

Bei der Straßenmobilität wurden die CO₂-Emissionen auf Fahrzeugebene über den gesamten Lebenszyklus hinweg analysiert, gefolgt von einer Modellierung auf Flottenebene. Die Lebenszyklusemissionen umfassen die Emissionen, die bei der Fahrzeugherstellung, der Energieversorgung und der Fahrzeugnutzung entstehen. Im Folgenden werden diese als „Fahrzeugproduktion“, „Well-to-Tank“ bzw. „Tank-to-Wheel“-Emissionen bezeichnet. Die „Well-to-Wheel“-Emissionen kombinieren die beiden Stufen „Well-to-Tank“ und „Tank-to-Wheel“. Alle drei Emissionsfaktoren werden stark von der Wahl des Antriebs und der vom Fahrzeug verwendeten Energiequelle beeinflusst.

Die Wahl des Antriebs wirkt sich direkt auf die CO₂-Emissionen sowohl bei der Fahrzeugherstellung als auch beim Tank-to-Wheel-Betrieb aus. Für ein durchschnittliches Fahrzeug aus dem Lkw- und Bussegment, das im Jahr 2025 hergestellt wird, sind die Produktionsemissionen bei einem Diesel-ICEV mit 43 Tonnen CO₂ niedriger als bei einem BEV, das 87 Tonnen CO₂ emittiert. Für jeden Antriebstyp wurden die durchschnittlichen Produktionsemissionen aus detaillierten Analysen vom Umweltbundesamt und IFEU abgeleitet⁹. Durch die Verringerung der CO₂-Intensität des Energiemixes sinken die produktionsbedingten Emissionen mit der Zeit. Ausgehend von den Ergebnissen der Studie für die Jahre 2020, 2030 und 2050 wurden die Interpolationen an die im Szenario „EU Ambition“ angenommene Entwicklung des europäischen Strommixes angepasst. So führt die Produktion eines durchschnittlichen Diesel-ICEV im Lkw- und Bussegment bis 2040 zu 22 Tonnen CO₂ – der Hälfte des Wertes von 2025. Ein ähnlicher Trend wird für BEVs modelliert, wobei die Emissionen bis 2040 auf 43 Tonnen CO₂ sinken.

Die Wahl des Antriebs beeinflusst auch die Tank-to-Wheel-Emissionen über die gesamte Lebensdauer, wobei alternative Antriebe einen klaren Vorteil bieten: 0 Tonnen CO₂ für ein BEV gegenüber 432 Tonnen für einen durchschnittlichen Diesel-ICEV im Lkw- und Bussegment. Folglich hat die Entwicklung des Anteils der Antriebe in den Mobilitätsflotten einen erheblichen Einfluss auf die Fahrzeugproduktion und die Tank-to-Wheel-Emissionen auf Flottenebene.

Bei der Straßenmobilität wurden die CO₂-Emissionen auf Fahrzeugebene über den gesamten Lebenszyklus hinweg analysiert, gefolgt von einer Modellierung auf Flottenebene.

Energieart	Benzin	Diesel	Kerosin	Methanol	Methan	Wasserstoff
Well-to-Tank	0,60 kg CO ₂ /l	0,63 kg CO ₂ /l	0,56 kg CO ₂ /l	0,45 kg CO ₂ /l	0,86 kg CO ₂ /kg	10,9 kg CO ₂ /kg
Tank-to-Wheel	2,34 kg CO ₂ /l	2,70 kg CO ₂ /l	2,52 kg CO ₂ /l	1,92 kg CO ₂ /l	2,56 kg CO ₂ /kg	
Well-to-Wheel	2,94 kg CO ₂ /l	3,33 kg CO ₂ /l	3,08 kg CO ₂ /l	2,37 kg CO ₂ /l	3,44 kg CO ₂ /kg	10,9 kg CO ₂ /kg

Abbildung 12: CO₂-Intensitätsfaktoren der konventionellen fossilen Energieträger.

Der zweite wichtige Faktor ist die vom Fahrzeug genutzte Energiequelle. Lebenszyklusanalysen umfassen die Emissionen aus der Energieerzeugung und -versorgung, die so genannten Well-to-Tank-Emissionen. Deshalb hat die Wahl des Energieträgers erhebliche Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen. Für jeden Antrieb wurden die energiebezogenen Emissionen anhand des CO₂-Intensitätsfaktors¹¹ der jeweiligen Energieart berechnet, wie in Abbildung 12 dargestellt.

Für ein durchschnittliches Diesel-ICEV im Lkw- und Bussegment werden die Well-to-Tank-Emissionen auf der Grundlage eines CO₂-Intensitätsfaktors von 0,63 kg CO₂ pro Liter und eines jährlichen Kraftstoffverbrauchs von 20.000 Litern berechnet. Über eine Lebensdauer von 8 Jahren ergeben sich daraus 101 Tonnen CO₂, wenn das Fahrzeug ausschließlich mit fossilem Diesel betrieben wird. Die Well-to-Wheel-Emissionen belaufen sich auf 533 Tonnen CO₂. Wird das Fahrzeug mit eFuels auf Basis von grünem Wasserstoff angetrieben, wird angenommen, dass die CO₂-Emissionen im Vergleich zu herkömmlichem fossilem Diesel auf Well-to-Wheel-Basis um

70 % reduziert werden. Diese Annahme entspricht der Mindestanforderung des delegierten Rechtsakts zur Treibhausgasmethodik im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Artikel 28¹²) und gilt auch für Biokraftstoffe. Die restlichen 30 % der Emissionen werden Well-to-Tank zugerechnet. Mit anderen Worten: eFuels und Biokraftstoffe gelten als emissionsfreie Technologien für die Fahrzeugnutzung, nicht aber für die Energieversorgung. Ausgehend von dieser Annahme stößt ein mit eDiesel betriebenes Fahrzeug während seiner Lebensdauer 160 Tonnen CO₂ aus. In der Praxis könnte der Schwellenwert von 70 % in vielen Fällen überschritten werden, was zusätzliches Dekarbonisierungspotenzial durch eFuels oder Biokraftstoffe bietet.



Gruppe	Fossil			Atom	Erneuerbar							
Stromquelle	Kohle	Biomasse Mitver- brennung	Erdgas	Atom	Bio- masse	Solar PV-Park	Solar PV-Dach	Solar konzentr.	Geo- thermal	Wasser- kraft	Wind offshore	Wind onshore
Intensitätsfaktor g CO ₂ /kWh	820	740	490	12	230	48	41	27	38	24	12	11
Anteil 2023	12,3 %	3,5 %	16,8 %	22,9 %	5,6 %	9,1 %			0,3 %	11,8 %	2,0 %	15,7 %
Anteil in Gruppe 2023	37,8 %	10,7 %	51,5 %	100 %	12,6 %	20,4 %			0,7 %	26,5 %	4,5 %	35,3 %
Intensitätsfaktor Gruppe g CO ₂ /kWh	641			12	48							

Abbildung 13: CO₂-Intensitätsfaktoren und Anteil der Stromquellen.
PV: Photovoltaik

In ähnlicher Weise wird der Well-to-Wheel-Ansatz zur Messung der CO₂-Emissionen für andere Energiearten, wie z.B. Strom, verwendet. Während Strom auf einer Tank-to-Wheel-Basis kohlenstoffneutral ist, sind die Well-to-Tank-Emissionen nicht neutral – selbst wenn der Strom ausschließlich aus erneuerbaren Energien stammt. Die Installation von Onshore-Windturbinen und die Nutzung des Stromnetzes führen beispielsweise zu einem CO₂-Emissionsfaktor von 11 g CO₂/kWh. Für ein durchschnittliches Fahrzeug aus dem Lkw- und Bussegment führt die ausschließliche Nutzung von Onshore-Windstrom zu Well-to-Tank-Emissionen von 6 Tonnen CO₂ während seiner Lebensdauer. Für jede Stromquelle wurde ein CO₂-Intensitätsfaktor definiert¹³, wie in Abbildung 13 dargestellt.

In der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission wird der Strommix in drei Gruppen eingeteilt: fossile, Atom- und erneuerbare Energiequellen. Um jeder Gruppe einen CO₂-Intensitätsfaktor zuzuordnen, wurden

der Strommix 2023¹⁴ und die jeweiligen CO₂-Intensitäten verwendet, wie in Abbildung 13 dargestellt. Innerhalb jeder Gruppe wird angenommen, dass der CO₂-Intensitätsfaktor über die Zeit konstant bleibt.

In dieser Analyse wird davon ausgegangen, dass für einen bestimmten Antrieb alle Fahrzeuge Zugang zum durchschnittlichen EU-Energiemix haben, unabhängig von lokalen Abweichungen oder individuellen Energiebezugsvereinbarungen. So wird beispielsweise beim Szenario „EU Ambition“ davon ausgegangen, dass alle Diesel-ICEVs im Lkw- und Bussegment im Jahr 2040 44 % fossilen Diesel, 30 % Biodiesel und 26 % eDiesel verwenden. Diese eFuel-Quote erscheint äußerst ambitioniert im Vergleich zum aktuellen RFNBO-Ziel für 2030 gemäß der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED)¹⁵. In diesem Szenario hebt die Europäische Kommission die Notwendigkeit einer deutlichen Erhöhung der eFuel-Quoten hervor, um die Klimaziele zu erreichen. Ebenso wird angenommen, dass alle batterie-

elektrischen Pkw im Jahr 2040 3 % fossilen Strom, 10 % Atomstrom und 87 % erneuerbaren Strom verbrauchen. Die CO₂-Intensitätsfaktoren bilden zusammen mit den Anteilen der jeweiligen Energieträger in der EU die Grundlage für die Berechnung der CO₂-Intensität der von den einzelnen Antrieben verwendeten Energie. Der zunehmende Anteil kohlenstoffarmer Energieträger, der im Szenario „EU Ambition“ angenommen wird, verringert die CO₂-Intensität des Energiemixes im Laufe der Zeit, wodurch die Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen über alle Antriebe hinweg sinken. So sollen die jährlichen Well-to-Wheel-Emissionen eines durchschnittlichen Benzin-Pkw von 3,1 Tonnen CO₂ im Jahr 2025 auf 2,1 Tonnen im Jahr 2040 sinken, basierend auf dem für 2040 angenommenen Benzinmix – 50 % fossiles Benzin, 27 % Biobenzin und 23 % eBenzin. Analog zu eDiesel betont die Europäische Kommission die Notwendigkeit, die Quoten für eBenzin deutlich anzuheben, um die Erreichung der Klimaziele sicherzustellen. Jedes produzierte Fahrzeug wird über seine Lebensdauer hinweg verfolgt, und seine Well-to-Wheel-Emissionen werden mit der Entwicklung der CO₂-Intensität des entsprechenden Energiemixes synchronisiert.

In den Sektoren Schifffahrt und Luftfahrt wurden die CO₂-Emissionen direkt aus der Energienachfrage berechnet, da diese der Haupttreiber der Emissionen ist. Branchenanalysen^{16,17} zeigen, dass die Emissionen aus der Produktion eines Flugzeugs etwa 10 % seiner Lebenszeitemissionen ausmachen – eine Zahl, die auch für Schiffe gilt. Unter der Annahme, dass die jährliche Produktion von Flugzeugen und Schiffen proportional zum Energiebedarf in den jeweiligen Segmenten ist, wurden die jährlichen Produktionsemissionen auf Flottenebene auf 10 % der jährlichen energiebezogenen Emissionen geschätzt. Ähnlich wie bei der Mobilität im Straßenverkehr wurden die energiebezogenen Emissionen in der Schifffahrt und im Luftverkehr für jeden Energieträger auf

der Grundlage des CO₂-Intensitätsfaktors des Kraftstoffs und des Energiebedarfs auf Flottenebene abgeleitet. Die Flottenemissionen entwickeln sich im Laufe der Zeit entsprechend den Veränderungen dieser Parameter im Rahmen des Szenarios „EU Ambition“.

3.3. Bestandsflottenentwicklung und erforderliche Neuzulassungen in der Straßenmobilität

Wie in → **Abschnitt 3.2.1.** hervorgehoben wurde, ist die Energiewende die wichtigste Triebkraft für den Wandel im Schiff- und Luftfahrtsegment. Im Gegensatz dazu hat die Transformation des Antriebs innerhalb der Flotten nur eine geringe Auswirkung, vor allem aufgrund der langsamen Flottenerneuerung und der hohen Energieflexibilität der Schiffe. Daher wurde der Flottenwandel in diesen Segmenten nicht weiter analysiert; stattdessen wird der Schwerpunkt auf die Energienachfrage gelegt.

Für die Straßenmobilität wurde die Entwicklung der Bestandsflottengröße bei verschiedenen Antriebsarten im Detail untersucht, da sie sich direkt auf den Energiebedarf und die CO₂-Emissionen während des gesamten Fahrzeuglebenszyklus auswirkt.

3.3.1. Pkw-Segment

In der Pkw-Mobilität zeigen die Ergebnisse des Szenarios „EU Ambition“, das aus der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission entstanden ist, deutlich den Anspruch, neue Antriebsarten wie BEVs und FCEVs bis 2050 zu verbreiten.

Wie in Abbildung 14 dargestellt, prognostiziert die Simulation, dass BEVs bis 2030 einen Bestandsflottenanteil von 15 % überschreiten und vor 2040 die Parität mit ICEVs erreichen werden. Dies entspricht einer BEV-Bestandsflotte von mehr als 30 Millionen Fahrzeugen



im Jahr 2030 und über 120 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2040. Diesem Szenario zufolge werden BEV im Jahr 2050 80 % der Bestandsflotte ausmachen und sich als führender Antrieb in der Pkw-Mobilität etablieren. Die Europäische Kommission geht davon aus, dass der Anteil der FCEVs erst später ansteigen wird. 2040 werden sie mit einem Anteil von 5 % – das entspricht mehr als 10 Millionen Fahrzeugen – eine signifikante Bestandsflottengröße erreichen und sich bis 2050 einem Anteil von 15 % bzw. rund 30 Millionen Fahrzeugen nähern. Für PHEV wird bis 2040 ein Anstieg auf über 20 Millionen Fahrzeuge prognostiziert, was einem Anteil von 11 % an der Bestandsflotte entspricht, bevor sie bis 2050 auf weniger als 10 Millionen Fahrzeuge mit einem Anteil von nur 4 % zurückgehen. Dies zeigt, dass die PHEV-Technologie eher als

Übergangslösung denn als langfristige Option betrachtet wird. Nach dem Szenario „EU Ambition“ werden ICEVs bis 2050 mit einem Anteil von weniger als 2 % und einer Bestandsflotte von weniger als 5 Millionen Fahrzeugen fast vollständig aus dem Verkehr gezogen. Zum Vergleich: Das ist etwa die Hälfte der heutigen BEV-Bestandsflotte in der Europäischen Union. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Europäische Kommission zur Erreichung der Klimaziele auf einen vollständigen Ausstieg aus der Nutzung von Verbrennungsmotoren (ICEVs) und einen starken Einstieg in die Nutzung von BEVs in der Pkw-Mobilität setzt.

Der angestrebte Flottenwandel hängt von der Entwicklung der Neuzulassungen ab. Um die im Szenario „EU Ambition“ der Europäischen Kommission skizzierte BEV-Einführung zu

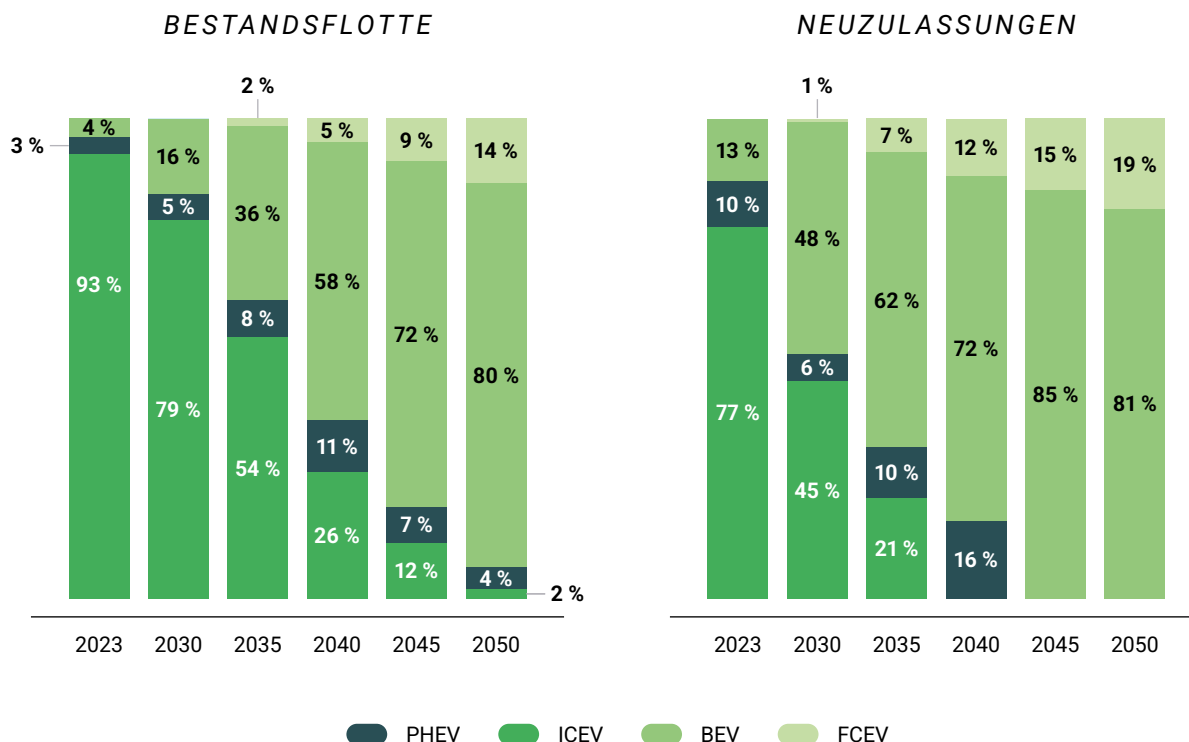


Abbildung 14: Anteil der Antriebe an der Pkw-Bestandsflotte und an den Neuzulassungen: Szenario „EU Ambition“.

erreichen, zeigt das Flottenmodell, dass hohe BEV-Marktanteile bei den Neuzulassungen notwendig sind – 48 % bis 2030, 62 % bis 2035 und 72 % bis 2040. Um bis 2050 einen BEV-Anteil von 80 % an der Bestandsflotte zu erreichen, muss der Anteil der Antriebe an den Neuzulassungen vor 2045 seinen Höhepunkt erreichen. Nach diesem Szenario sollte der BEV-Anstieg bei den Neuzulassungen innerhalb eines Zeitrahmens von 25 Jahren erfolgreich umgesetzt werden. Darüber hinaus zeigt die Simulation, dass der Marktanteil von FCEVs ab 2030 ansteigt, bis 2035 7 % erreicht und bis 2050 kontinuierlich auf fast 20 % ansteigt. Der Marktanteil von PHEVs soll bis 2040 auf über 15 % ansteigen, bevor sie schrittweise aus dem Verkehr gezogen werden. Im Szenario „EU Ambition“ werden nach 2045 keine Neuzulassungen von PHEV mehr erwartet, was ihre Rolle als Übergangstechnologie bestätigt. Um die im Folgenabschätzungsbericht der Europäischen Kommission festgelegten Bestandsflottenziele zu erreichen, müssen ICEVs bis 2040 schrittweise aus den Neuzulassungen verschwinden. Das Modell zeigt jedoch, dass ICEVs im Jahr 2035 immer noch einen Marktanteil von mehr als 20 % haben. Die in der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission prognostizierte Elektrifizierung verläuft langsamer als die derzeitige EU-Flottenregulierung, die eine vollständige Elektrifizierung der Neuzulassungen bis 2035 vorsieht. Um das europäische „Fit for 55“-Paket und die Emissionsnormen für neue Pkw und Transporter ab 2035 zu erfüllen, wird die Einführung von Fahrzeugen mit kohlenstoffneutralem Kraftstoff (CNFV) notwendig sein, um diesen verbleibenden 20 % ICEV-Anteil sowie den PHEV-Anteil von 11 % im Jahr 2035 und 16 % im Jahr 2040 zu adressieren. Im Szenario der Europäischen Kommission bleibt der Verbrennungsmotor auch nach 2040 mit einem kombinierten Anteil von 37 % für ICEVs und PHEVs in der Bestandsflotte relevant. Nachhaltige Kraftstoffe werden daher eine entscheidende Rolle bei der Erreichung

Im Szenario der Europäischen Kommission bleibt der Verbrennungsmotor auch nach 2040 mit einem kombinierten Anteil von 37 % für ICEVs und PHEVs in der Bestandsflotte relevant. Nachhaltige Kraftstoffe werden daher eine entscheidende Rolle bei der Erreichung der Klimaziele spielen.

der Klimaziele spielen. Die Energieprognose für das Szenario „EU Ambition“ wurde in dieser Studie untersucht und wird in → **Abschnitt 3.4.** analysiert.

Nach dem Szenario „EU Ambition“ wird erwartet, dass sich die Neuzulassungen bis 2045 stabilisieren und von zwei Technologien dominiert werden: BEVs (85 %) und FCEVs (15 %). Um die Auswirkungen auf den BEV-Markt in der gesamten Wertschöpfungskette zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 15 die prognostizierte Zahl der BEV-Neuzulassungen bis 2035. Die Ergebnisse zeigen, dass die Neuzulassungen bis 2030 7,4 Millionen und bis 2035 9 Millionen Fahrzeuge erreichen müssen. Zum Vergleich: Laut ACEA-Marktdaten¹⁰ wurden im Jahr 2023 in der Europäischen Union 1,6 Millionen BEVs verkauft. Diese Zahl muss sich verfünffachen, um das Ziel für 2030 zu



erreichen – nur sieben Jahre später. Ein solches Wachstum erfordert eine proaktive Planung der gesamten BEV-Lieferkette, einschließlich kritischer Batterierohstoffe, Kathoden- und Anodenmaterialien, Batteriezellen, Batteriepacks und der Fahrzeugproduktion. Dieser Hochlauf setzt auch die Energieinfrastruktur, einschließlich der Stromübertragungs- und -verteilungsnetze sowie der Ladekapazitäten, erheblich unter Druck. Die Durchführbarkeit dieses Szenarios wurde bewertet und wird in → **Kapitel 4** näher erläutert.

Eine weitere wichtige Erkenntnis betrifft den ambitionierten Ausstieg aus der Nutzung von Verbrennungsmotoren. Wie aus Abbildung 14 hervorgeht, werden Verbrennungsmotoren bis 2050 aus der Bestandsflotte verschwinden und nur noch einen Anteil von 2 % haben. Die Simulation zeigt jedoch, dass ICEVs im Jahr 2035 immer noch mehr als 20 % der Neuzulassungen ausmachen, was 6,4 Millionen neuen ICE-Fahrzeugen entspricht. Fünfzehn Jahre später sinkt der ICEV-Bestandsflottenanteil auf 2 %, was etwa 3,6 Millionen Fahrzeugen entspricht.

Dies entspricht nicht der durchschnittlichen Pkw-Lebensdauer von 16 Jahren, da die 6,4 Millionen ICEV, die 2035 zugelassen wurden, unter normalen Bedingungen auch 2050 noch auf den Straßen unterwegs sein würden. Diese Diskrepanz verdeutlicht die Notwendigkeit einer vorzeitigen Verschrottung, um die Bestandsflottenziele zu erreichen, da das natürliche Ende der Lebensdauer allein nicht ausreicht. Das in dieser Analyse entwickelte Flottenmodell berechnet die Anzahl der Fahrzeuge, die vorzeitig verschrottet werden müssen, wobei älteren Fahrzeugen gegenüber neueren Vorrang eingeräumt wird. Abbildung 16 veranschaulicht den Ansatz zur Erreichung der Bestandsflottenziele bis 2040 im Rahmen des Szenarios „EU Ambition“ unter Berücksichtigung der Abwrackanforderungen.

Im Jahr 2039 verbleiben 67,2 Millionen ICEVs in der Bestandsflotte, die alle mit Benzin, Diesel oder Methan betriebenen ICE-Fahrzeuge umfassen. Das Ziel, bis 2040 einen ICEV-Anteil von 26 % zu erreichen – wie in Abbildung 14 dargestellt – erfordert eine Reduzierung um 12,1 Millionen Fahrzeuge. Allerdings verlassen nur 4,2 Millionen ICEVs die Bestandsflotte durch natürliches Auslaufen, was bedeutet, dass 7,9 Millionen Fahrzeuge vorzeitig verschrottet werden müssen, um dieses Ziel zu erreichen. Wenn man älteren Fahrzeugen bei der vorzeitigen Verschrottung Vorrang

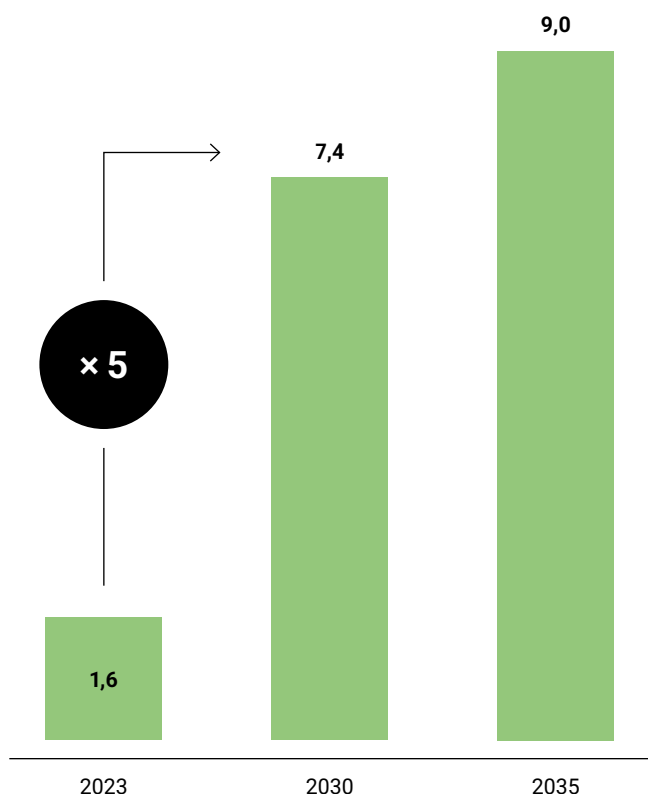
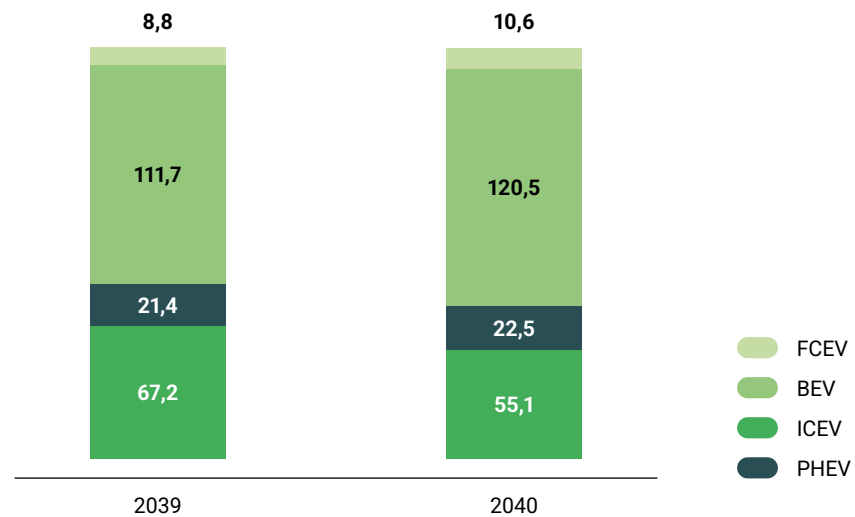


Abbildung 15: BEV-Neuzulassungen in Millionen Fahrzeugen: Szenario „EU Ambition“.

EU Ambition 2039–2040 Bestandsflottenantriebsanteile [Mio. Einheiten]



Berechnete Verschrottungen 2040 ICEV [Mio. Einheiten]

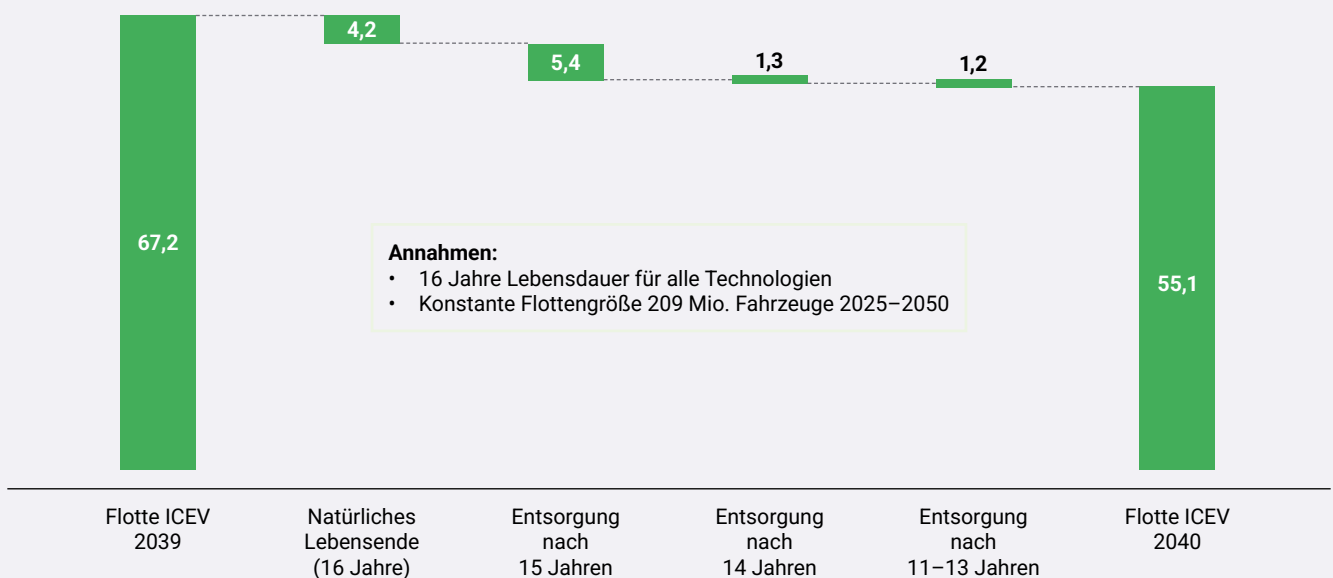


Abbildung 16: Ansatz der Verschrottungsberechnung für ICEVs zwischen 2039 und 2040: Szenario „EU Ambition“.

einräumt, werden bis 2040 5,4 Millionen 15-jährige Fahrzeuge aus dem Verkehr gezogen, dazu 1,3 Millionen 14-jährige Fahrzeuge und 1,2 Millionen Fahrzeuge im Alter zwischen 11 und 13 Jahren. Die Tatsache, dass nur 4,2 Millionen Fahrzeuge auf natürliche Weise ausscheiden, obwohl 9,5 Millionen Fahrzeuge 16 Jahre früher (im Jahr 2024) auf den Markt kommen, spiegelt die Auswirkungen der vorzeitigen Verschrottung in den Vorjahren wider.

Mit anderen Worten: Ein Teil dieser Fahrzeuge wurde bereits vor 2039 aus dem Verkehr gezogen. Abbildung 17 veranschaulicht die Pkw-Abgänge, die erforderlich sind, um die Bestandsflottenziele nach dem von der Europäischen Kommission definierten Szenario „EU Ambition“ zu erreichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Neuzulassungen von ICEV bei etwa 7 Millionen Fahrzeugen

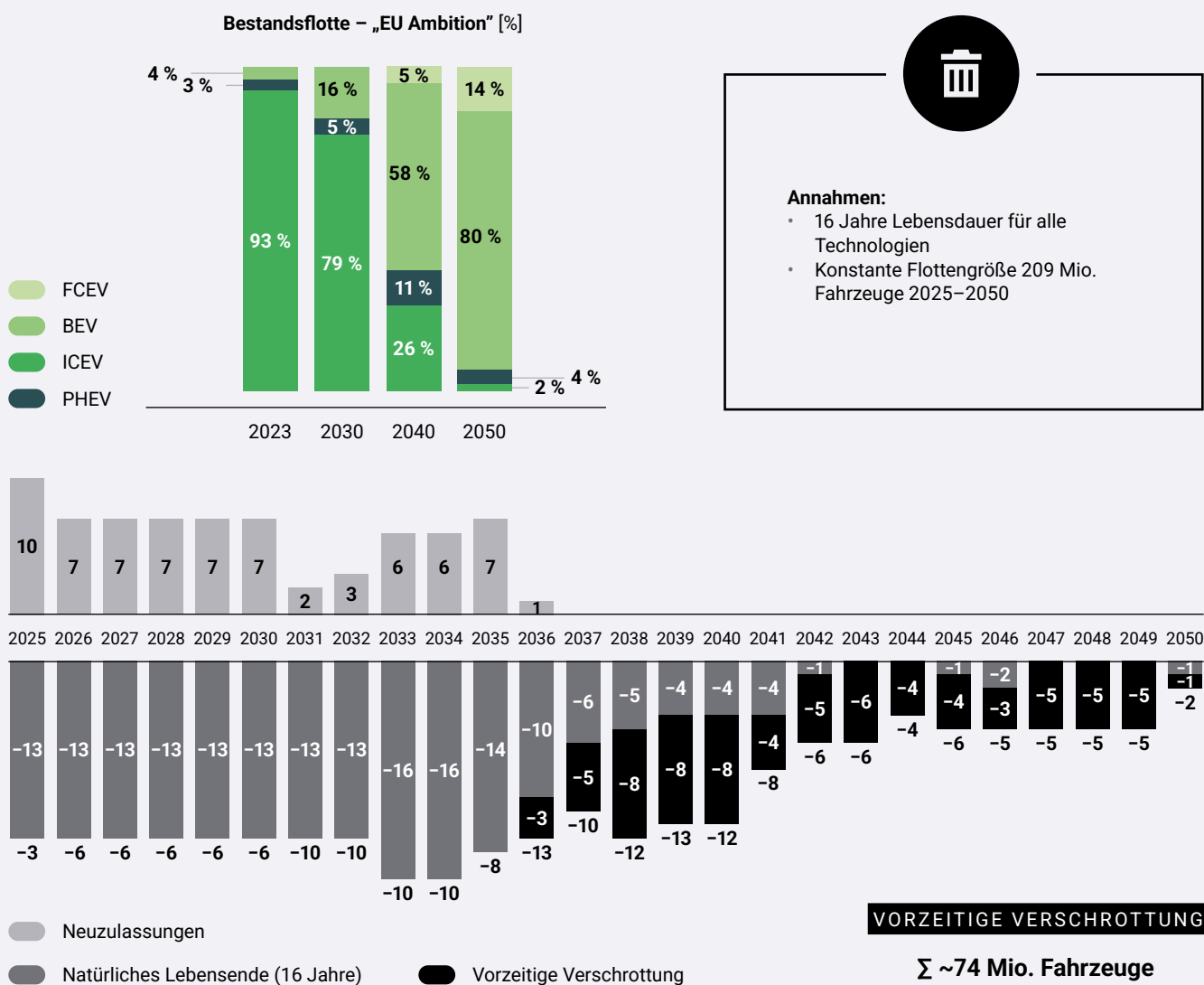


Abbildung 17: Ausstieg aus der Pkw-Bestandsflotte zur Erfüllung der Bestandsflottenziele in Millionen Fahrzeugen: Szenario „EU Ambition“.

bleiben, bevor sie bis 2036 auslaufen. Von diesem Zeitpunkt an würde das natürliche Auslaufen in den folgenden 16 Jahren etwa 7 Millionen Fahrzeuge ausmachen. So dürften die 6 Millionen ICEV, die 2035 zugelassen werden, bis 2050 auf natürliche Weise vom Markt verschwinden. Durch die vorzeitige Verschrottung ab 2036 werden diese Fahrzeuge jedoch früher aus dem Verkehr gezogen. Dies beschleunigt das Ausscheiden aus der Bestandsflotte und erfordert die Verschrottung selbst relativ neuer Fahrzeuge. Insgesamt müssen fast 75 Millionen Fahrzeuge vorzeitig verschrottet werden, um die Bestandsflottenziele zu erreichen. Die finanziellen Auswirkungen der Durchführung eines solchen Abwrackprogramms werden auf über 200 Milliarden Euro geschätzt, wenn man den durchschnittlichen Restwert der verschrotteten Fahrzeuge im Verhältnis zu ihrem Alter zugrunde legt. Anstatt eines Abwrackprogramms würde eine Investition in derselben Größenordnung in die eFuel-Produktion ausreichen, um die Hälfte der weltweit für 2030 geplanten Kapazität zu finanzieren – diese wird auf etwa 20 Milliarden Liter Benzinäquivalent geschätzt, wie in → **Kapitel 6** dargelegt.

3.3.2. Lkw- und Bussegment

Im Lkw- und Bussegment spiegelt das aus der Folgenabschätzung der Europäische Kommission abgeleitete Szenario „EU Ambition“ einen längeren Transformationsprozess im Vergleich zur Pkw-Mobilität wider, wie in Abbildung 18 dargestellt. Im Gegensatz zum Pkw-Segment wird dieser Übergang nicht von einer einzigen Technologie getrieben, sondern von einem diversifizierten Mix, bei dem wasserstoffbasierte Antriebe eine wichtige Rolle spielen. Es wird davon ausgegangen, dass BEVs und FCEVs bis 2050 schrittweise eingeführt werden und einen großen Anteil an der Bestandsflotte einnehmen werden, obwohl ICEVs auch nach 2040 noch eine wichtige Rolle spielen könnten. BEVs gewinnen ab 2035 mit einem

*Anstatt eines Abwrackprogramms
würde eine Investition in
derselben Größenordnung in die
eFuel-Produktion ausreichen, um
die Hälfte der weltweit für 2030
geplanten Kapazität zu finanzieren.*

Anteil von 13 % an der Lkw- und Busbestandsflotte an Bedeutung und erreichen kurz nach 2045 die Parität mit ICEVs. Dies entspricht etwa 350.000 BEVs im Jahr 2035 und 1 Million im Jahr 2045. Bis 2050 wird der Anteil der BEVs an der Bestandsflotte auf 48 % geschätzt. Wasserstoffantriebe – einschließlich FCEVs und HICEVs – gelten als Schlüsselalternativen für die Transformation der Lkw- und Busmobilität. Zusammengekommen werden diese Technologien bis 2035 mit einem Anteil von 7 %, d. h. mehr als 150.000 Fahrzeugen, relevant und sollen bis 2050 einen Anteil von 31 % erreichen und damit herkömmliche ICEVs übertreffen. Dies bedeutet, dass bis 2050 mehr als 800.000 Lkw und Busse mit Wasserstoff betrieben werden.

Im Gegensatz zu den Pkw wird erwartet, dass PHEV im Bereich der Lkw- und Busmobilität nicht wesentlich an Bedeutung gewinnen und im 25-Jahres-Zeitraum einen Anteil von maximal 5 % erreichen. Ähnlich wie im Pkw-Segment werden PHEV als Übergangstechnologie behandelt, die nach 2045 ausläuft und bis 2050 nur noch einen Anteil von 2 % hat – weniger als 70.000 Fahrzeuge. Nach dem Szenario „EU Ambition“ bleiben Verbrennungsmotoren



in der EU-Bestandsflotte relevant und machen 2040 immer noch 57 % und 2050 19 % aus. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Europäische Kommission zur Erreichung der Klimaziele auf einen vielfältigen Mix von Antriebstechnologien setzt, wobei BEVs den Übergang anführen und wasserstoffbetriebene Fahrzeuge als eine wichtige ergänzende Lösung dienen. Im Gegensatz zu Pkw werden Verbrennungsmotoren nicht vollständig aus dem Verkehr gezogen, sondern spielen auch nach 2050 eine Rolle.

Ähnlich wie bei der Pkw-Mobilität wurden die Neuzulassungen analysiert, um zu ermitteln, wie ambitioniert die Antriebstransformation ist. Um den im Szenario „EU Ambition“ festgelegten BEV-Bestandsflottenanteil von 48 % zu erreichen, muss der BEV-Marktanteil ab 2030 steigen und bis 2035 20 %, bis 2040 30 % und bis 2050 60 % erreichen. Da die Einführung von

BEV später beginnt als bei der Pkw-Mobilität, muss sie innerhalb eines kürzeren Zeitrahmens von 20 Jahren erfolgreich umgesetzt werden. Ebenso muss die Markteinführung von Wasserstoffantrieben bis 2030 beginnen und bis 2035 12 %, bis 2040 17 % und bis 2050 fast 40 % erreichen. Trotz des geplanten Auslaufens des Verbrennungsmotors wird erwartet, dass er bis 2045 einen bedeutenden Marktanteil von etwa 20 % halten wird. Darüber hinaus stimmt das von den EU-Vorschriften festgelegte Ziel einer 90-prozentigen Reduktion der Emissionen am Auspuff im Jahr 2040 nicht mit dem von der Europäischen Kommission entwickelten und in dieser Studie analysierten Szenario überein. Neue Zulassungsergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass ICEVs bis 2050 vollständig vom Markt verschwinden werden. Unter der Annahme, dass das „EU Ambition“-Szenario eintritt, werden ICEVs über 2050 hinaus in der Bestandsflotte verbleiben, aber ihr vollständiger

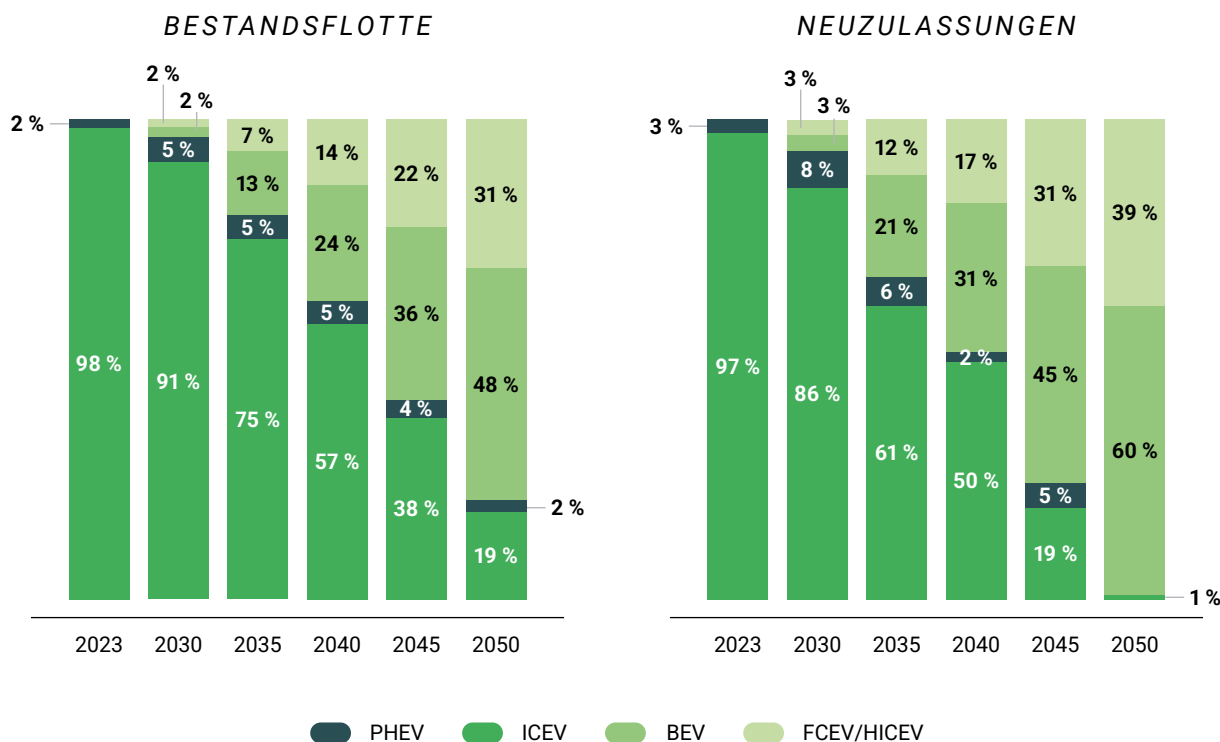


Abbildung 18: Anteil der Antriebe an der Lkw- und Busbestandsflotte und an den Neuzulassungen: Szenario „EU Ambition“.

Ausstieg würde bis etwa 2058 erfolgen, wenn man eine durchschnittliche Fahrzeuglebensdauer von acht Jahren berücksichtigt. Für die Lkw- und Busmobilität bestätigt das Modell die Intention der Europäischen Kommission, PHEVs nur als Übergangstechnologie einzusetzen, da ab 2050 keine Neuzulassungen mehr geplant sind.

In diesem Szenario wird eine Stabilisierung der Neuzulassungen bis 2050 prognostiziert, die sich auf zwei Kategorien verteilen: BEVs (60 %) und wasserstoffbetrieben (40 %). Um die Auswirkungen auf beide Wertschöpfungsketten zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 19 die prognostizierte Zahl der Zulassungen von BEVs und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen bis 2035.

Infolgedessen sind im Jahr 2030 10.600 BEV-Zulassungen und im Jahr 2035 70.000 erforderlich, um die Bestandsflottenziele zu erreichen.

Dies entspricht einer Versiebenfachung innerhalb von nur fünf Jahren und verstärkt den Druck, den das Pkw-Segment bereits auf die Batterie- und Energieversorgungsketten ausübt. Im gleichen Zeitraum muss die Zahl der wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge von 10.900 Einheiten im Jahr 2030 auf 38.400 Einheiten im Jahr 2035 ansteigen – ein Anstieg um das Vierfache. Obwohl die Antriebswende im Lkw- und Bussegment weniger aggressiv verläuft als bei den Pkw, hängt ihr Erfolg von denselben Lieferketten für beide Segmente ab. Dies bedeutet, dass potenzielle Engpässe gemeinsame Auswirkungen haben könnten, die in → **Kapitel 4** analysiert werden.

Ähnlich wie für das Pkw-Segment wurde auch für die Lkw- und Busbestandsflotte eine vorzeitige Verschrottung bewertet. Allerdings bietet die von der Europäischen Kommission für dieses Segment festgelegte langsamere

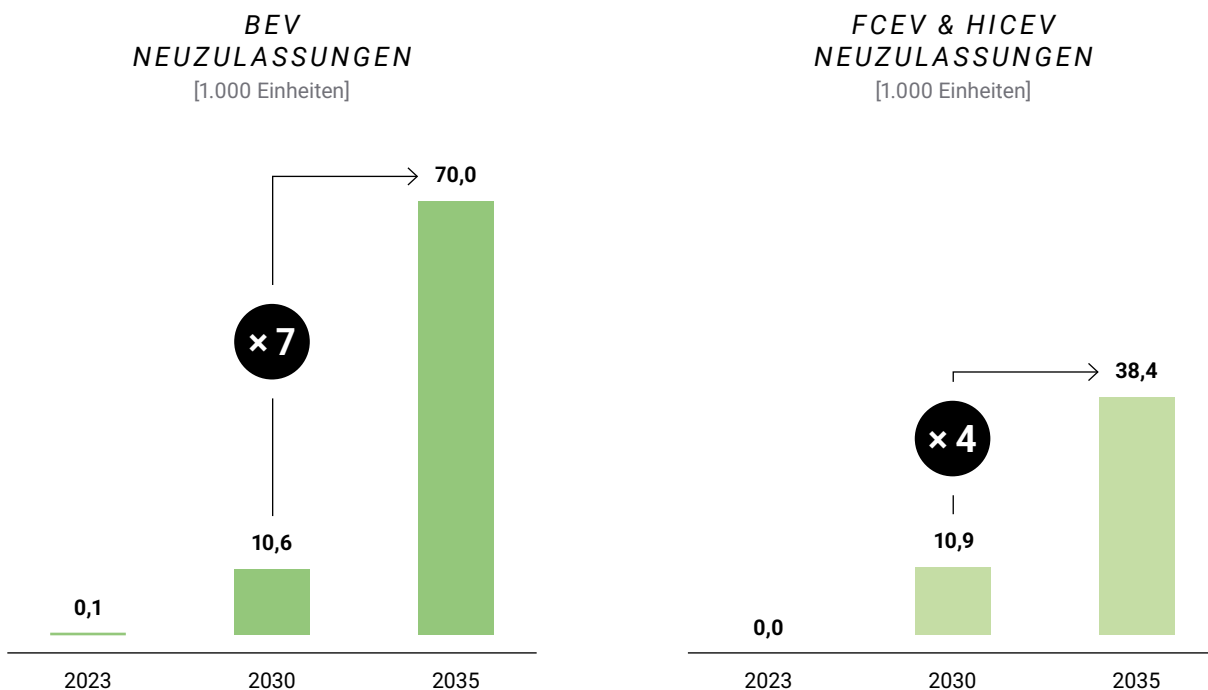


Abbildung 19: Neuzulassungen von BEV und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen in tausend Fahrzeugen: Szenario „EU Ambition“.

Transformationsgeschwindigkeit in Verbindung mit der kürzeren durchschnittlichen Lebensdauer der Fahrzeuge mehr Flexibilität für die natürliche Flottenerneuerung. Daher wurden für dieses Segment keine signifikanten Auswirkungen im Zusammenhang mit der vorzeitigen Verschrottung festgestellt.

Während die Antriebstransformation ein wichtiger Treiber für die Erreichung der Klimaziele im Bereich der Straßenmobilität ist, stellt die Energiewende eine weitere entscheidende Säule der Dekarbonisierung dar – insbesondere im Schiff- und Luftfahrtsegment.

3.4. Energiebedarf

Neben der Antriebswende ist die Energiewende eine wichtige Säule der Dekarbonisierung. Im Bereich der Straßenmobilität ist sie

eng mit der Antriebstransformation und somit mit der Flottenerneuerung verbunden. Wie in → **Abschnitt 3.2.1.** hervorgehoben, wird die Dekarbonisierung in den Segmenten Schifffahrt und Luftfahrt nicht durch die Flottenerneuerung, sondern durch die Art der verwendeten Energie vorangetrieben. Abbildung 20 zeigt den prognostizierten Anteil der Energienachfrage nach Energieart in diesen beiden Segmenten für 2050, basierend auf der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission.

Im Szenario „EU Ambition“ unterstreichen die Ergebnisse die anhaltende Dominanz flüssiger Brennstoffe in beiden Segmenten bis 2050.

In europäischen Häfen werden bis 2050 voraussichtlich 60 % der Energieversorgung auf flüssige Marine Fuels entfallen, darunter Schweröl, Diesel, Methanol und Ammoniak.

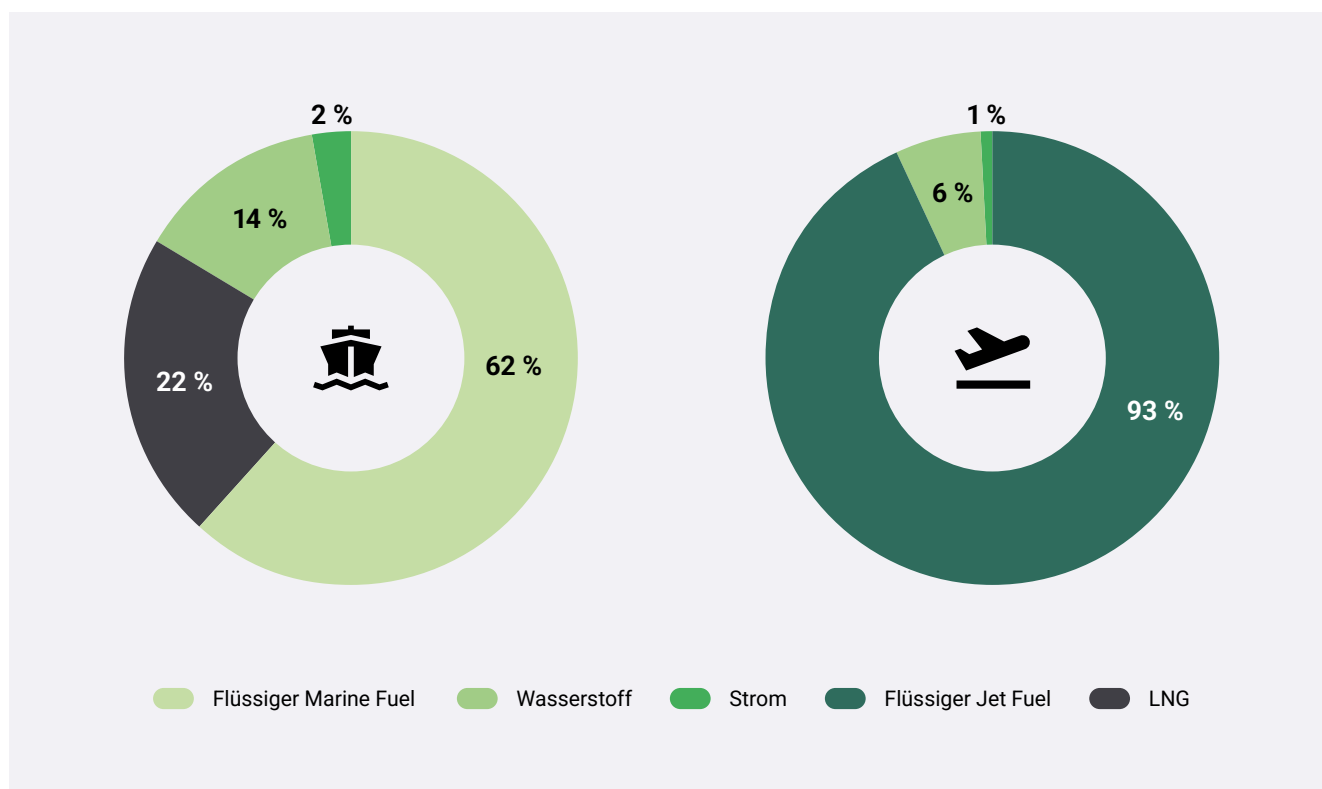


Abbildung 20: Anteil der Energienachfrage im Schiffs- und Luftverkehr im Jahr 2050: Szenario „EU Ambition“.

LNG (Liquefied Natural Gas) wird mit einem Anteil von 22 % voraussichtlich weiterhin eine große Rolle spielen. Dem Bericht der Europäischen Kommission zufolge wird Wasserstoff 14 % des Energiebedarfs ausmachen, was ihn zu einer wichtigen Option bei der maritimen Energiewende macht. Elektrizität hingegen wird mit einem Anteil von nur 2 % bis 2050 voraussichtlich nur eine marginale Rolle spielen. Aufgrund der begrenzten Reichweite wird die direkte Elektrifizierung nur für bestimmte Anwendungen wie den Kurzstreckenschiffsverkehr, Passagierfähren, Binnenschifffahrtswege und die Landstromversorgung geeignet sein.

Im Luftfahrtsegment gibt es nur sehr wenige Anwendungen, die Alternativen zu flüssigem Jet Fuel* zulassen. Nach dem Szenario „EU Ambition“ werden bis 2050 immer noch 93 % der Energieversorgung auf europäischen

Flughäfen aus Jet Fuel bestehen. Die direkte Nutzung von Wasserstoff (6 %) und Strom (1 %) wird auf Nischenanwendungen mit flexiblen Gewichts- und Reichweitenanforderungen beschränkt bleiben. So ist es beispielsweise technisch unwahrscheinlich, dass elektrisch oder mit Wasserstoff betriebene Flugzeuge für Transatlantikflüge geeignet sind.

Abbildung 21 zeigt die Entwicklung der Energienachfrage in den vier in dieser Studie analysierten Mobilitätssegmenten – Pkw, Lkw und Busse, Schifffahrt und Luftfahrt – aufgeschlüsselt nach Energiearten.

Die aus der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission abgeleitete und in dieser Studie modellierte Energieprognose zeigt einen Gesamtrückgang der Energienachfrage um

* Auch Kerosin genannt.

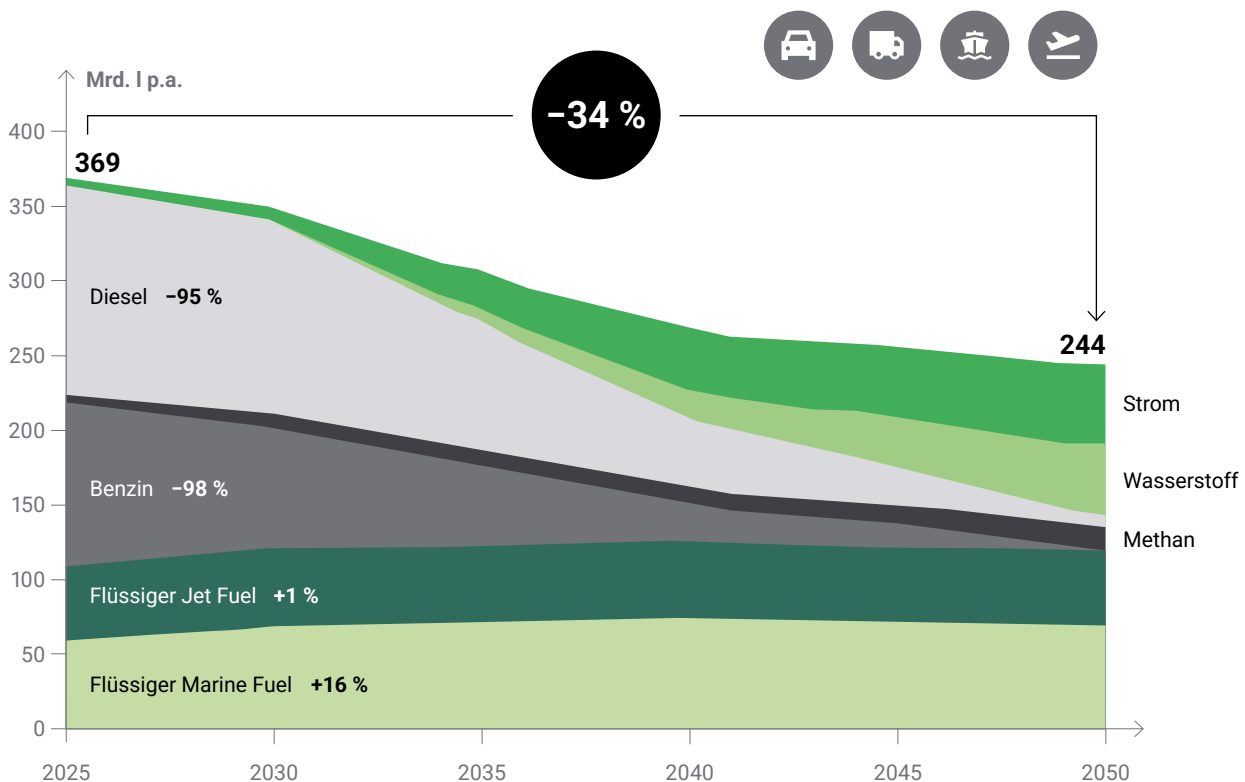


Abbildung 21: Jährliche Energienachfrage der EU-Mobilität nach Energieart: Szenario „EU Ambition“.

Die Ergebnisse werden in Milliarden Litern Benzinäquivalent angegeben | Diesel bezieht sich auf die Verwendung von Diesel in der Straßenmobilität, Marine Fuel bezieht sich auf Schweröl, Diesel, Methanol und Ammoniak

34 % zwischen 2025 und 2050 – von 369 auf 244 Milliarden Liter Benzinäquivalent. Dieser Rückgang ist in erster Linie auf den schrittweisen Verzicht auf flüssige Kraftstoffe in den Segmenten Pkw sowie Lkw und Busse zurückzuführen, der sich aus der in → **Abschnitt 3.3.** erläuterten Antriebstransformation ergibt. Strom und Wasserstoff werden mit dem Hochlauf von BEVs, FCEVs und HICEVs eingeführt. Effizienzgewinne bei Elektroantrieben tragen weiter zum Rückgang des Gesamtenergiebedarfs bei.

Die Nachfrage nach Strom und Wasserstoff steigt auch mit der Energiewende in der Schiff- und Luftfahrt, obwohl sie in diesen Segmenten zweitrangige Lösungen bleiben. Bis 2050 wird die Stromnachfrage voraussichtlich das Äquivalent von 53 Milliarden Litern Benzin – oder 480 TWh – erreichen, was 22 % der Gesamtenergienachfrage in den vier Mobilitätssegmenten in der EU entspricht. Die Wasserstoffnachfrage wird auf 47 Milliarden Liter Benzinäquivalent oder 13 Millionen Tonnen Wasserstoff ansteigen, was fast 20 % der Energienachfrage im Mobilitätsbereich entspricht.

Getrieben vor allem durch die Energiewende in den Segmenten Schifffahrt sowie Lkw und Busse wird die Methannachfrage bis 2050 voraussichtlich von 3 bis 10 Millionen Tonnen bzw. 5 bis 15 Milliarden Liter Benzinäquivalent steigen, was 6 % des Gesamtenergiebedarfs entspricht.

Laut dem Szenario „EU Ambition“ soll der Diesel- und Benzinverbrauch um 95 % bzw. 98 % zurückgehen. Dieser drastische Ausstieg steht in direktem Zusammenhang mit dem ambitionierten Elektrifizierungsplan für die Straßenmobilität, wonach ICEVs und PHEVs zusammen nur 6 % der Pkw und 20 % der Lkw und Busse im Jahr 2050 ausmachen werden.

Für Jet Fuel und Marine Fuel wird eine andere Entwicklung erwartet, da flüssige Kraftstoffe im Schiffs- und Luftverkehr langfristig dominieren. Die Nachfrage nach Jet Fuel wird den Prognosen zufolge bis 2050 mit etwa 49 Milliarden Litern Benzinäquivalent in etwa auf dem derzeitigen Niveau bleiben. Während 7 % des Energiebedarfs in der Luftfahrt durch Wasserstoff und Strom gedeckt werden, wie aus Abbildung 20 hervorgeht, bleibt der Kerosinverbrauch aufgrund des kontinuierlichen Anstiegs des Flugverkehrs – der in den letzten Jahren zu beobachten war – stabil, was die Effizienzverbesserungen bei Flugzeugtriebwerken mehr als ausgleicht. Die Nachfrage nach Marine Fuel wird in den nächsten 25 Jahren voraussichtlich um 16 % steigen, obwohl 38 % der maritimen Energienachfrage bis zum Jahr 2050 durch alternative Quellen – LNG, Wasserstoff und Strom – gedeckt werden, wie in Abbildung 20 dargestellt. Diese Annahme beruht auf der Erwartung, dass die Schiffsverkehrsnachfrage in den kommenden Jahrzehnten weiter ansteigen wird. Insgesamt führt dieser Trend in Verbindung mit dem allgemeinen Rückgang der Gesamtenergienachfrage dazu, dass der Anteil von Jet Fuel und Marine Fuel an allen Energiearten bis 2050 steigen wird – um 20 % bzw. 29 %, wie in Abbildung 22 dargestellt.

Insgesamt machen flüssige Kraftstoffe bis 2050 53 % des gesamten Energiebedarfs in den vier Mobilitätssegmenten aus. Dies entspricht 128 Milliarden Litern Benzinäquivalent, die jährlich aus emissionsfreien Quellen wie fortschrittlichen Biokraftstoffen und eFuels bereitgestellt werden müssen. Um die Einhaltung der Klimaziele zu gewährleisten, legt die Europäische Kommission in ihrer Folgenabschätzung Quoten für verschiedene Verkehrsegmente fest. In dieser Studie wurden diese Quoten den entsprechenden Kraftstoffarten für die Datenpunkthjahre 2030, 2040 und 2050

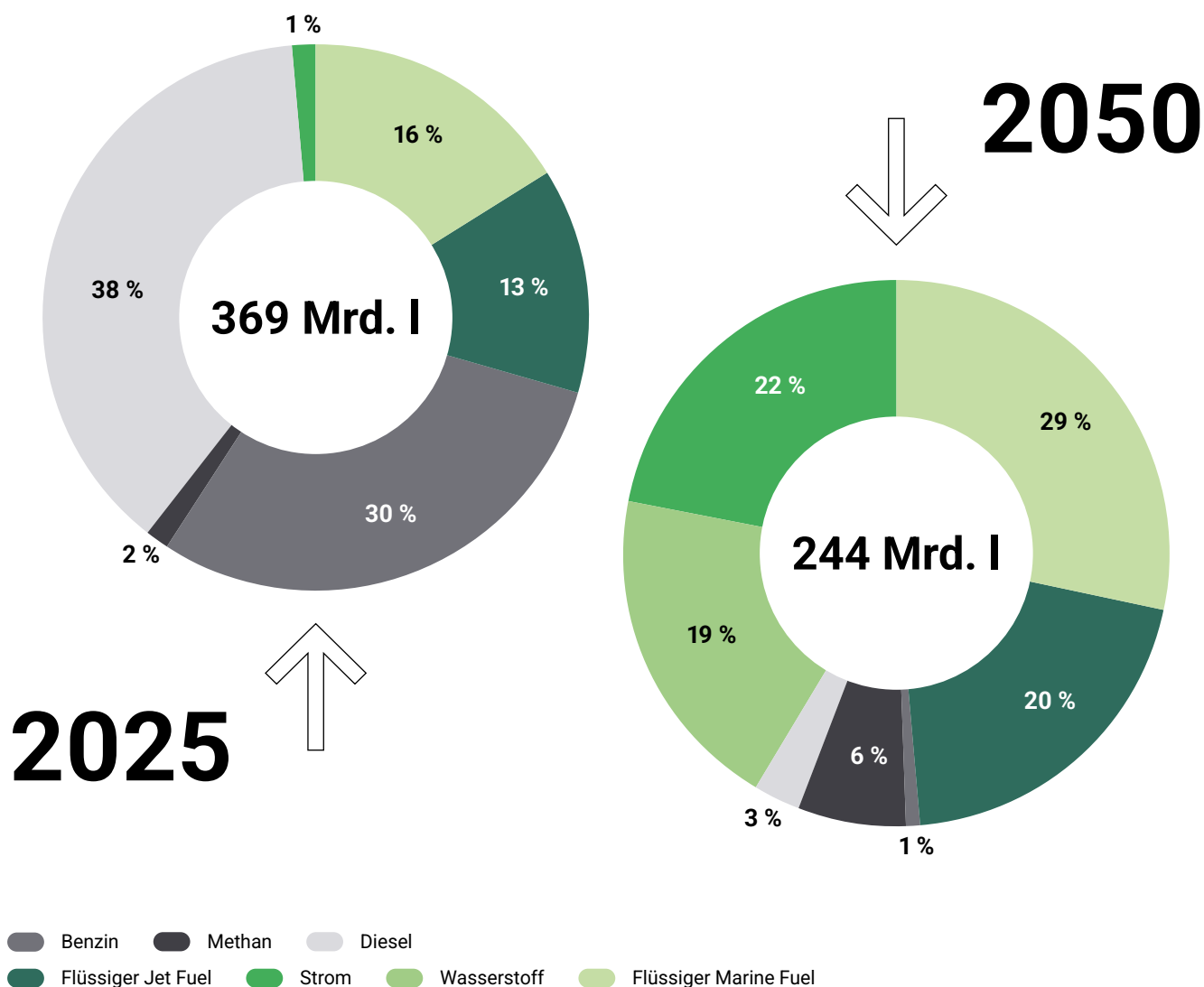


Abbildung 22: Anteil der Energienachfrage der EU-Mobilität 2025 und 2050 nach Energieart: Szenario „EU Ambition“. Die Ergebnisse werden in Milliarden Litern Benzinäquivalent angegeben | Diesel bezieht sich auf die Verwendung von Diesel in der Straßenmobilität, Marine Fuel bezieht sich auf Schweröl, Diesel, Methanol und Ammoniak

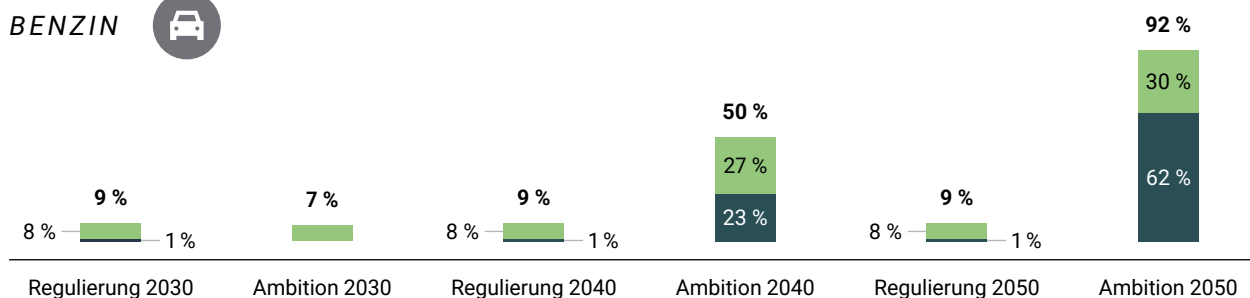
zugewiesen. Sie sind in Abbildung 23 als „Ambition“ bezeichnet, während Quoten, die sich an den aktuellen EU-Verordnungen orientieren, als „Regulierung“ bezeichnet werden.

Im Straßenverkehr basiert das Szenario „Aktuelle EU-Regulierung“ auf der Erneuer-

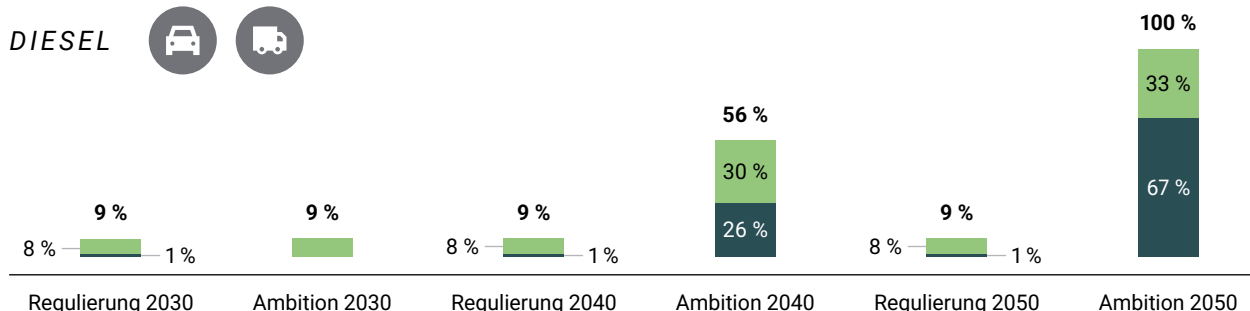
bare-Energien-Richtlinie (RED)¹⁵, die den Ausbau von eFuels und fortschrittlichen Biokraftstoffen vorantreibt. Mit Stand Anfang 2026 haben 15 Mitgliedstaaten die Umsetzung der RED III begonnen oder bereits vollständig abgeschlossen. Hinsichtlich der nationalen Ambitionen für RFNBO bestehen jedoch



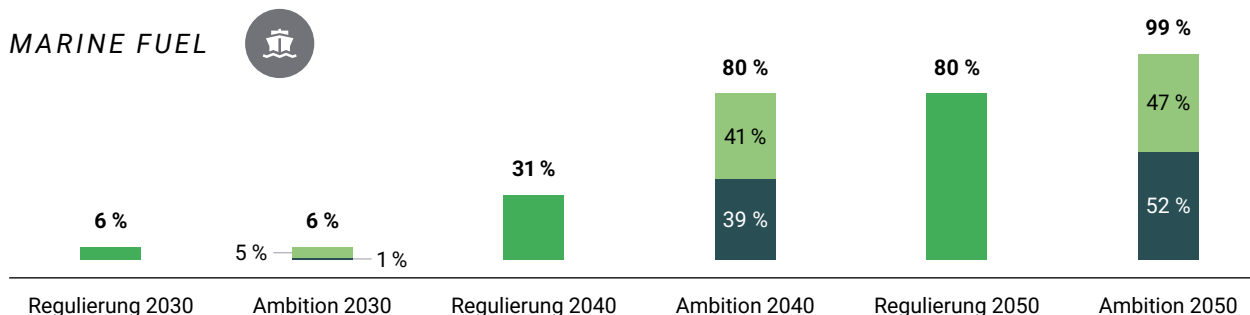
BENZIN



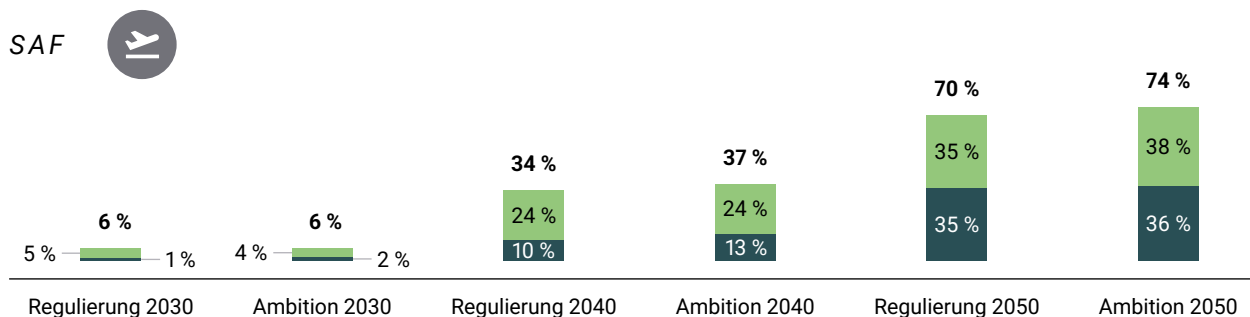
DIESEL



MARINE FUEL



SAF



eFuels
 eFuels & Biofuels
 Biofuels

Abbildung 23: eFuel und Biofuel-Quoten: Szenario „EU Ambition“ vs. „Aktuelle EU-Regulierung“.

Diesel bezieht sich auf die Verwendung von Diesel in der Straßenmobilität, Marine Fuel bezieht sich auf Schweröl, Diesel, Methanol und Ammoniak | SAF: Sustainable Aviation Fuel | Annahmen für die Regulierung: Quoten für eBenzin und eDiesel basierend auf der RED III RFNBO-Quote 2030, ohne Multiplikatoren, konstant bis 2050; Quoten für Biobenzin und Biodiesel basierend auf der RED III-Quote für fortschrittliche Biokraftstoffe 2030, ohne Multiplikatoren, konstant bis 2050 und der aktuellen durchschnittlichen Beimischungsquote von 3,2 % für Biokraftstoffe der ersten Generation im Straßenverkehr basierend auf der SHARES Datenbank; Quoten für Marine Fuel abgeleitet von den FuelEU Maritime-Quoten für die Verringerung der Treibhausgasintensität im Schiffsverkehr, ohne Berücksichtigung von Multiplikatoren; Quoten für SAF abgeleitet von den ReFuelEU Aviation SAF-Quoten, ohne Berücksichtigung von Multiplikatoren.

Während die Ziele für 2030 in der aktuellen Regulierung (RED III) nicht auf 2040 und 2050 erweitert werden, wird im Szenario der Europäischen Kommission deutlich, dass die Quoten für eFuels und Biokraftstoffe deutlich erhöht werden müssen, um die Klimaziele zu erreichen.

erhebliche Unterschiede. Finnland hat beispielsweise eine besonders ambitionierte RFNBO-Quote von 4 % im Straßenverkehr für das Jahr 2030 beschlossen. In Spanien und Belgien werden Quoten von 2,5 % bzw. 2 % diskutiert. Andere Mitgliedstaaten zeigen hingegen deutlich geringere Zielsetzungen: Deutschland schlägt eine Quote von 1,2 % vor, während Frankreich und Schweden jeweils 1 % anstreben. Staaten wie Polen, Tschechien oder Portugal beschränken sich auf die Mindestvorgabe von 0,5 %. Insgesamt ergibt sich daraus bereits ein potenzieller Bedarf von rund 30 TWh bzw. 3 Milliarden Liter eFuels. Die zusätzliche Nachfrage der übrigen Mitgliedstaaten ist hierbei noch nicht berücksichtigt. Da die Umsetzung der RED III in mehreren Mitgliedstaaten noch nicht abgeschlossen ist, wurden für diese Analyse die auf EU-Ebene festgelegten Quoten als Referenzbasis herangezogen. Die Quoten werden derzeit für 2030 festgelegt und in dieser Analyse als konstant für 2040 und 2050 angenommen, da die Ziele für diese Jahre noch nicht angeglichen sind. Dementsprechend wird für fortschrittliche Biokraftstoffe eine Quote von 4,5 % und für eFuels eine Unterquote von 1 % festgelegt. Multiplikatoren für eFuels und Biokraftstoffe

wurden von dieser Analyse ausgenommen, wobei von einem progressiven Szenario ausgegangen wurde, bei dem alle EU-Mitgliedstaaten bei der Umsetzung der RED III Multiplikatoren abschaffen. Unter der Annahme, dass der Anteil der Biokraftstoffe der ersten Generation auf dem heutigen Durchschnittswert von 3,2 % bleibt – laut der SHARES Datenbank¹⁸, wird für 2030 eine gesetzliche Quote von 8 % für Biokraftstoffe festgelegt. Das aus der Folgenabschätzung der Kommission abgeleitete Szenario „EU Ambition“ sieht für eBenzin und eDiesel einen verzögerten Anstieg bis 2030 vor, mit einem vernachlässigbaren Anteil von eFuels – im Vergleich zu 1 % eFuels nach der aktuellen Regulierung. Während die Ziele für 2030 in der aktuellen Regulierung (RED III) nicht auf 2040 und 2050 erweitert werden, wird im Szenario der Europäischen Kommission deutlich, dass die Quoten für eFuels und Biokraftstoffe deutlich erhöht werden müssen, um die Klimaziele zu erreichen. Bis 2040 sollen laut der Europäischen Kommission die Quoten für eBenzin 23 % erreichen und bis 2050 auf 62 % ansteigen, während die Quoten für eDiesel sogar noch höher angesetzt sind – 26 % bis 2040 und 67 % bis 2050.

Im maritimen Segment basiert das Szenario „Aktuelle EU-Regulierung“ auf der FuelEU Maritime-Verordnung¹⁹, die Quoten für die Reduzierung der Treibhausgasintensität festlegt. Als emissionsfreie Kraftstoffe können eFuels und Biofuels dazu beitragen, diese Ziele zu erreichen. Daher können diese Quoten zur Verringerung der Treibhausgasintensität direkt mit den im Szenario „EU Ambition“ prognostizierten Kraftstoffquoten verglichen

werden. Ähnlich wie bei der Straßenmobilität wurden Multiplikatoren bei dieser Analyse nicht berücksichtigt. Im Jahr 2030 stimmen beide Szenarien mit einer Quote von 6 % überein. Langfristig unterstreicht das Szenario „EU Ambition“ jedoch die Notwendigkeit einer deutlichen Erhöhung der Quoten, um die Klimaziele zu erreichen – 80 % nachhaltige Kraftstoffe bis 2040 gegenüber 31 % unter der aktuellen Regulierung und 99 % gegenüber 80 % bis 2050.

Im Luftfahrtsegment basiert das Szenario „Aktuelle EU-Regulierung“ auf den in ReFuelEU Aviation²⁰ definierten eSAF- und bioSAF-Quoten. Ähnlich wie bei der Straßen- und Schiffs-mobilität wurden Multiplikatoren bei dieser Analyse nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Quoten in beiden Szenarien sehr ähnlich bleiben, mit nur einem leichten Anstieg im Szenario „EU Ambition“ für 2040 und 2050 im Vergleich zur „aktuellen EU-Regulierung“.

Auf der Grundlage der im Folgenabschätzungsbericht der Europäischen Kommission ermittelten Quoten wurde der Hochlauf von eFuels detailliert modelliert, und die Ergebnisse sind in Abbildung 24 dargestellt.



In allen vier Segmenten soll das Angebot an eFuels bis 2030 steigen und sich bis 2045 auf einem jährlichen Produktionsniveau von 60 Milliarden Litern Benzinäquivalent stabilisieren. Das Modell spiegelt das Bestreben Europas wider, die Produktion von eFuels für die Schifffahrt – einschließlich eDiesel, eMethanol und eAmmoniak – und eSAF kontinuierlich zu steigern und bis 2050 ein jährliches Angebot von 36 bzw. 18 Milliarden Litern Benzinäquivalent zu erreichen. Im Straßenverkehr wird ein

Anstieg von eBenzin und eDiesel bis 2040 prognostiziert, was mit einem jährlichen Angebot von fast 18 Milliarden Litern Benzinäquivalent zur Dekarbonisierung der Flotte beiträgt.

Insgesamt unterstreicht der im Szenario „EU Ambition“ der Europäischen Kommission definierte Anstieg die Notwendigkeit, die Produktion von eFuels in allen Verkehrssegmenten zu steigern, um die CO₂-Reduktionsziele zu erreichen.

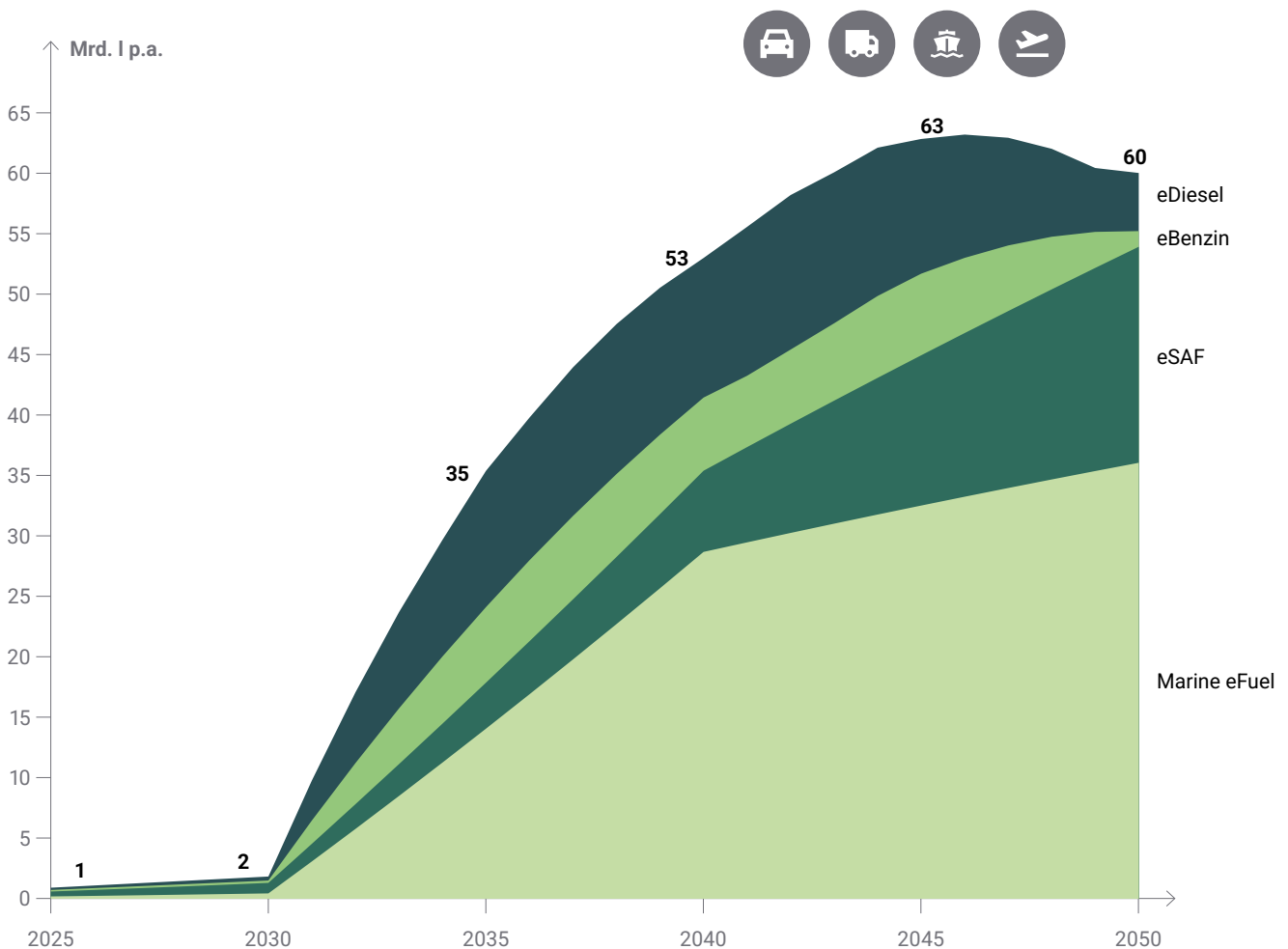


Abbildung 24: Jährlicher eFuel-Bedarf in der EU-Mobilität nach Energieart: Szenario „EU Ambition“.

Die Ergebnisse werden in Milliarden Litern Benzinäquivalent angegeben | eDiesel bezieht sich auf die Verwendung von eDiesel in der Straßenmobilität, Marine eFuel bezieht sich auf eDiesel, eMethanol und eAmmoniak | SAF: Sustainable Aviation Fuel

EXKURS

eFuel- und Grünwasserstoffbedarf für Land- und Baumaschinen

Diese Studie konzentriert sich auf vier Mobilitätssegmente, die derzeit am stärksten zu den CO₂-Emissionen im europäischen Verkehr beitragen: Pkw, Lkw und Busse, die Schifffahrt sowie die Luftfahrt. Auch andere Mobilitätssektoren werden erneuerbare Kraftstoffe benötigen, um ihre Emissionen signifikant zu reduzieren. Eine ergänzende Analyse von Porsche Consulting leitete den zukünftigen Antriebsmix für Land- und Baumaschinen auf Basis einer detaillierten Total Cost of Ownership-Bewertung (TCO) ab. Neuzulassungen wurden nach Antriebstechnologie und Nutzungskategorie differenziert, der Energieverbrauch für jede Kategorie auf Basis von Industriedaten definiert und der Energiebedarf auf Flottenebene abgeleitet. Der resultierende Energiemix wurde unter einem Ambitionsniveau bewertet, das den Hochlaufzielen für eDiesel und grünen Wasserstoff im Straßenverkehr gemäß der Folgenabschätzung der

Europäischen Kommission entspricht. Mit anderen Worten: Es wurden dieselben Quoten für eDiesel und grünen Wasserstoff wie im „EU Ambition“-Szenario für die Straßenmobilität angesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 dargestellt.

Diese Analyse zeigt, dass die europäische Nachfrage nach eFuels und grünem Wasserstoff für Land- und Baumaschinen bis 2050 das Äquivalent von 7 Milliarden Litern Benzin erreichen könnte und damit mehr als 10 % der von der Europäischen Kommission prognostizierten eFuel-Nachfrage für Straßenmobilität, Schifffahrt und Luftfahrt übersteigt. Obwohl sich diese Studie auf die für die Erreichung der Klimaziele der EU kritischsten Mobilitätssegmente konzentriert, sollten auch andere Segmente im Rahmen der umfassenden Bemühungen zur Bekämpfung des Klimawandels berücksichtigt werden.

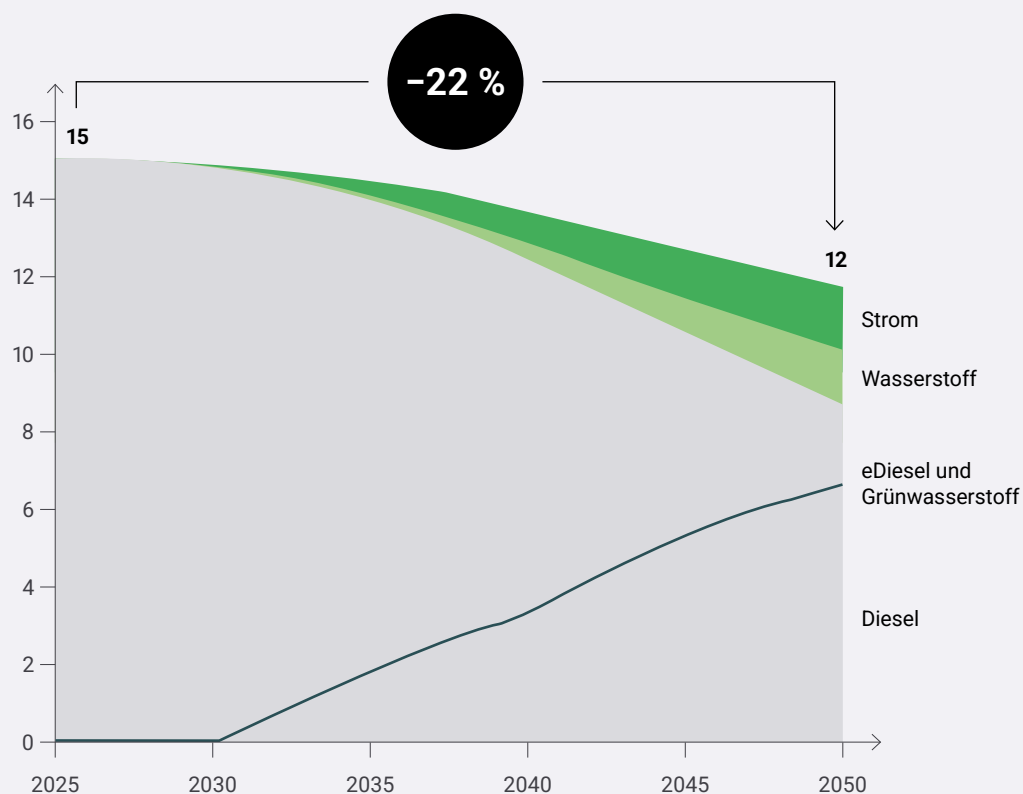


Abbildung 25: Jährlicher Kraftstoffbedarf von Land- und Baumaschinen in der EU.

Quelle: Porsche Consulting Powertrain TCO Model | Die Ergebnisse werden in Milliarden Litern Benzinäquivalent angegeben |

Annahme: Hochlauf von eDiesel und grünem Wasserstoff basierend auf den Quoten für die Straßenmobilität im „EU Ambition“-Szenario

3.5. Jährliche CO₂-Emissionen

Auf der Grundlage der modellierten Antriebswende in der Straßenmobilität und der Energiewende in allen vier Segmenten wurden die CO₂-Emissionen für das Szenario „EU Ambition“ der Europäischen Kommission nach einem Lebenszyklusansatz berechnet. Dieser

umfasst die Emissionen aus der Fahrzeugproduktion, der gesamten Energieversorgungskette und der Fahrzeugnutzung. Die detaillierte Methodik wird in → **Abschnitt 3.2.3.** erläutert. Die daraus resultierenden jährlichen CO₂-Emissionen für jedes Segment sind in Abbildung 26 dargestellt.

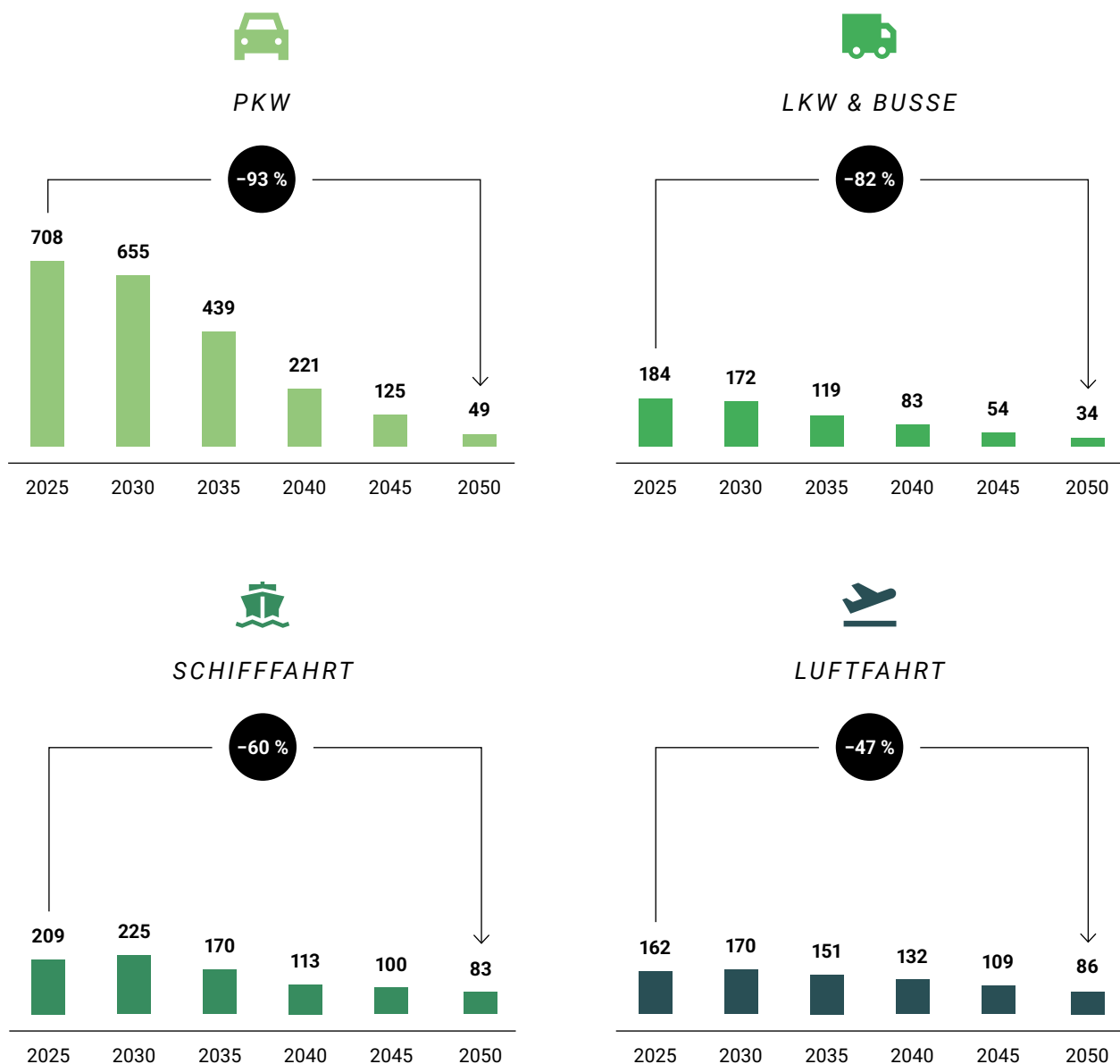


Abbildung 26: Jährliche Lebenszyklus-CO₂-Emissionen in der EU-Mobilität nach Segmenten in Mio. Tonnen CO₂/a: Szenario „EU Ambition“.

Im Schiffs- und Luftverkehr verzögern sich die Kohlenstoffeinsparungen aufgrund der steigenden Verkehrsnachfrage und der begrenzten Machbarkeit einer direkten Elektrifizierung.

Für das Jahr 2025 zeigt die Simulation die höchsten CO₂-Emissionen im Personenverkehr, die dabei einen Wert von über 700 Millionen Tonnen erreichen. Dies ist vor allem auf den höheren jährlichen Energieverbrauch in diesem Segment zurückzuführen. Die anderen drei Segmente weisen derzeit ähnliche Emissionswerte auf, die zwischen 160 und 210 Millionen Tonnen CO₂ liegen.

Für den Straßenverkehr wird eine schnellere Dekarbonisierung projiziert, wobei Pkw zwischen 2025 und 2050 eine Reduktion von 93 % und Lkw und Busse eine Reduktion von 82 % erreichen sollen. Dieses Ziel steht im Einklang mit den für 2050 angenommenen hohen Elektrifizierungsraten: 94 % für Pkw (80 % BEV und 14 % FCEV) und 79 % für Lkw und Busse (48 % BEV und 31 % Wasserstoffantriebe). Die daraus resultierenden Effizienzgewinne, die in Abbildung 21 dargestellt sind, maximieren in Verbindung mit der Annahme, dass bis 2050 89 % des Stroms aus erneuerbaren Quellen und 8 % aus Kernenergie stammen werden, das Dekarbonisierungspotenzial.

Im Schiffs- und Luftverkehr verzögern sich die Kohlenstoffeinsparungen aufgrund der steigenden Verkehrsnachfrage und der begrenzten Machbarkeit einer direkten Elektrifizierung. Dies führt zu einer stärkeren Abhängigkeit von der Einführung von eFuels und Biofuels. Infolgedessen wird in diesen beiden Sektoren um 2030 eine Kohlenstoffspitze erwartet, bevor erneuerbare Kraftstoffe ab 2035 einen erheblichen Beitrag leisten. Bis 2050 sollen die CO₂-Reduktionen im Vergleich zu 2025 im Schiffsverkehr 60 % und im Luftverkehr 47 % erreichen. Obwohl die kombinierte Quote für erneuerbare Kraftstoffe im Jahr 2050 voraussichtlich 99 % bzw. 74 % erreichen wird – wie in Abbildung 23 dargestellt –, begrenzt die konservative Annahme, dass diese Kraftstoffe eine um 70 % geringere CO₂-Intensität als herkömmliche fossile Kraftstoffe aufweisen (siehe → **Abschnitt 3.2.3.**), die Kohlenstoffeinsparungen auf maximal 70 %. In der Praxis erreichen eFuels und fortschrittliche Biokraftstoffe oft Einsparungen von mehr als 80 % und bieten damit zusätzliches Dekarbonisierungspotenzial für den Schiffs- und Luftverkehr.

Die CO₂-Emissionen wurden über alle Phasen des Fahrzeuglebenszyklus für jedes der vier Mobilitätssegmente analysiert. Zu den Lebenszyklusemissionen zählen die Emissionen, die bei der Fahrzeugherstellung, der Energieversorgung und der Fahrzeugnutzung entstehen. Diese werden im Folgenden als „Fahrzeugproduktion“, „Well-to-Tank“ bzw. „Tank-to-Wheel“ bezeichnet. Die „Well-to-Wheel“-Emissionen kombinieren die

beiden Phasen Well-to-Tank und Tank-to-Wheel. Während Tank-to-Wheel spezifisch für die Mobilität auf der Straße ist und andere Begriffe für verschiedene Segmente gelten – wie z.B. „Tank-to-Wake“ für die maritime Mobilität – wird die Analyse vereinfacht, indem die Terminologie der Straße für alle Segmente verwendet wird. Der Gesamtfortschritt bei der Erreichung der Emissionsziele ist in Abbildung 27 dargestellt.

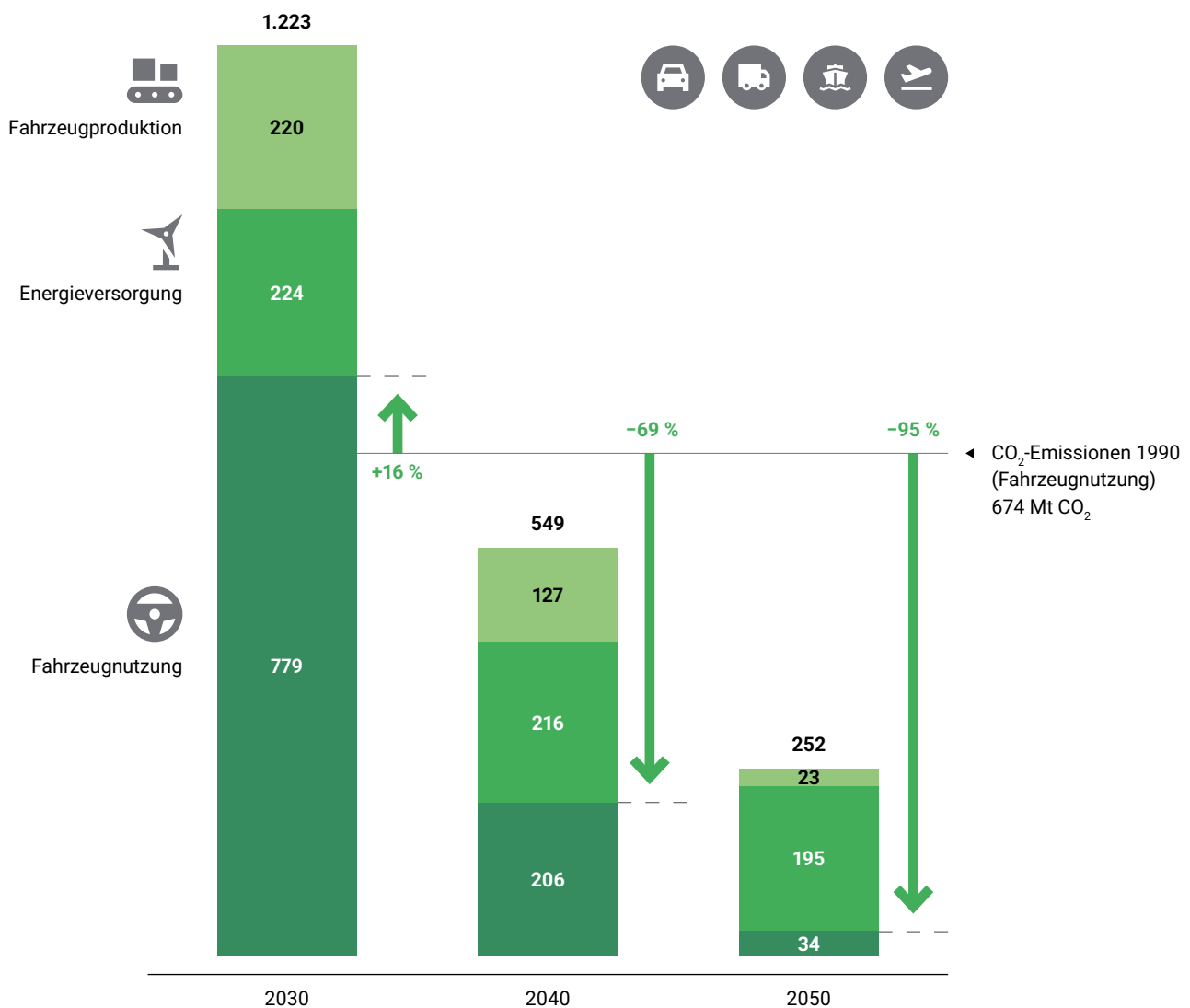


Abbildung 27: Jährliche CO₂-Emissionen nach Phasen des Fahrzeuglebenszyklus in der EU-Mobilität in Millionen Tonnen CO₂/a: Szenario „EU Ambition“.

In der Mobilität sind die von der Europäischen Union festgelegten CO₂-Emissionsziele auf den Bereich Tank-to-Wheel beschränkt. Daher werden die Tank-to-Wheel-Emissionen hervorgehoben und mit den Werten von 1990 im selben Bereich verglichen. Im Jahr 2030 reichen die im „EU Ambition“-Szenario definierten Antriebs- und Energiewende nicht aus, um eine Senkung um 55 % gegenüber 1990 zu erreichen. Stattdessen bleiben die Emissionen aufgrund der gestiegenen Mobilitätsnachfrage und der Trägheit der Transformation höher als 40 Jahre zuvor. Ab 2030 führt die Umstellung auf Elektromobilität im Straßenverkehr in Verbindung mit dem Ausbau erneuerbarer Kraftstoffe in allen Segmenten zu einem steilen Rückgang der CO₂-Emissionen im Tank-to-Wheel-Bereich – um den Faktor vier zwischen 2030 und 2040 und um den Faktor sechs zwischen 2040 und 2050. Dies führt zu einer Verringerung von bis zu 70 % bis 2040 und 95 % bis 2050 im Vergleich zu den Werten von 1990. Die Erreichung des 90 %-Reduktionsziels bis 2040 und der Klimaneutralität bis 2050, wie im Szenario „EU Ambition“ skizziert, erfordert zusätzliche Anstrengungen – entweder innerhalb des Mobilitätssektors oder durch Kompensation in anderen Sektoren. Es ist auch wichtig zu beachten, dass der Schienenverkehr, der Geländeverkehr, Motorräder und die Freizeitschifffahrt außerhalb des Rahmens dieser Analyse liegen; ihre Einbeziehung würde die CO₂-Emissionen über die in Abbildung 27 dargestellten Ergebnisse hinaus erhöhen.

Die Verringerung der CO₂-Emissionen im Bereich Tank-to-Wheel kann sich auf die Emissionen in anderen Lebenszyklusphasen auswirken, etwa bei der Fahrzeugproduktion oder Well-to-Tank. Zum Beispiel haben BEVs null Emissionen auf einer Tank-to-Wheel-Basis, verursachen aber höhere Emissionen während der Fahrzeugproduktion im Vergleich zu konventionellen ICEVs, hauptsächlich aufgrund der Batterieherstellung und ihrer energieintensiven Lieferkette. Auch die Stromquelle

beeinflusst die Well-to-Tank-Emissionen. Im Szenario „EU Ambition“ führt die Annahme der Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu einer deutlichen Verringerung der CO₂-Emissionen sowohl bei der Fahrzeugherstellung als auch auf Well-to-Tank-Basis. Diese Annahme ist entscheidend dafür, dass die Elektrifizierung effektiv zu den Klimazielen beiträgt. Wie in → **Abschnitt 3.2.3.** erläutert, wird für eFuels und Biofuels auf Well-to-Wheel-Basis ein CO₂-Reduktionsfaktor von 70 % im Vergleich zu herkömmlichen fossilen Kraftstoffen angenommen. Die restlichen 30 % werden den Well-to-Tank-Emissionen zugerechnet. Mit anderen Worten: eFuels und Biokraftstoffe gelten als emissionsfreie Technologien im Bereich der Fahrzeugnutzung, nicht aber im Bereich der Energieversorgung. In der Praxis könnte der Schwellenwert von 70 % für die Reduzierung von eFuels und Biofuels in vielen Fällen überschritten werden, was eine weitere Reduzierung der Emissionen aus der Energieversorgung ermöglicht. Unter den derzeitigen Annahmen stagnieren diese Emissionen bis 2050 bei rund 200 Millionen Tonnen CO₂ und sind damit der wichtigste Emissionsverursacher.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die im Szenario „EU Ambition“ der Europäischen Kommission skizzierte Transformation einen starken Dekarbonisierungspfad auf Tank-to-Wheel-Basis darstellt. Allerdings müssen im Kampf gegen den Klimawandel auch weitere Emissionsfaktoren – wie die Fahrzeugproduktion und die Energieversorgung (Well-to-Tank) – berücksichtigt werden. Um die erfolgreiche Einführung dieser ambitionierten Antriebs- und Energiewende zu gewährleisten, ist eine quantitative Machbarkeitsanalyse erforderlich, die in → **Kapitel 4** untersucht wird. ⚡

Die Erreichung des 90 %-Reduktionsziels bis 2040 und der Klimaneutralität bis 2050, wie im Szenario „EU Ambition“ skizziert, erfordert zusätzliche Anstrengungen – entweder innerhalb des Mobilitätssektors oder durch Kompensation in anderen Sektoren.







*Engpassanalyse:
Szenario „Bottleneck-
adjusted“*



Das Szenario „EU Ambition“, das sich aus Szenario 3 der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission ableitet, wirft Fragen zur industriellen Machbarkeit der angenommenen Antriebs- und Energiewende in den Mobilitätssegmenten Pkw, Lkw und Busse, Schifffahrt und Luftfahrt auf. Eine derart ambitionierte Einführung neuer Antriebe und Energiequellen könnte die globalen und europäischen Lieferketten erheblich unter Druck setzen. Um die Durchführbarkeit der in der Folgenabschätzung der Kommission vorgeschlagenen Transformationsgeschwindigkeit zu bewerten, wurde eine umfassende Engpassanalyse durchgeführt. Diese Analyse untersuchte 27 kritische Faktoren der Lieferkette, die das Tempo des Mobilitätswandels stark beeinflussen. Ziel war es, Angebot und Nachfrage zu vergleichen, um mögliche Engpässe oder zusätzliche Kapazitäten zu ermitteln.



4.1. Methodik, Modellierung und Datenerhebung

4.1.1. Umfang der Engpassanalyse

Um einen technologieneutralen Dekarbonisierungspfad für die EU-Mobilität zu definieren, konzentrierte sich die Engpassanalyse dieser Studie auf industrielle Machbarkeitsfaktoren. Zusätzliche Dimensionen, die die Transformation der Antriebs- und Energieversorgungsketten verzögern könnten – wie Regulierung, geopolitische Dynamik, Kundentrends, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhersehbare wirtschaftliche Ereignisse – wurden nicht bewertet. Für die Bewertung der industriellen Machbarkeit wurde die Analyse in vier Hauptbereiche der Versorgungskette gegliedert: Batterien, erneuerbarer Strom, grüner Wasserstoff und eFuels. Innerhalb dieser Kategorien wurden 27 kritische Faktoren in der Versorgungskette – so genannte „Engpassfaktoren“ – ermittelt und bewertet. Einige wurden auf globaler Ebene bewertet, wo die Versorgung mit anderen Märkten geteilt wird, während andere auf europäischer Ebene analysiert wurden.

In der gesamten Batterielieferkette wurden die globalen Bergbau- und Raffineriekapazitäten für Lithium, Nickel, Kobalt und batteriege-rechten Graphit als entscheidend für die Aus- weitung der Batterieproduktion identifiziert.

Darüber hinaus wurden die weltweiten Pro- duktionskapazitäten für aktive Anoden- und Kathodenmaterialien sowie für Batteriezellen unter die Lupe genommen, da Verzögerun- gen beim Hochlauf der Produktion erhebliche Auswirkungen auf die Einführung von BEVs haben könnten. Die Herstellungskapazitäten für Batteriepacks und Fahrzeuge wurden nicht als potenzielle Engpässe für die Einführung von BEV betrachtet, da die Automobilherstel- ler ihre Fähigkeit, diese Kapazitäten zu erwei- tern, unter Beweis gestellt haben. Störungen in diesem Bereich sind in der Regel auf Ver- zögerungen in den vorgelagerten Lieferketten oder auf eine zögerliche Nachfrage zurück- zuführen. Die Batterie-Lieferkette wurde auf- grund ihrer internationalen Verbreitung auf globaler Ebene analysiert. So wird ein Großteil des Lithiums, das in Batterien für die europäi- sche Mobilität verwendet wird, aus Ländern wie Chile, Bolivien, Argentinien und Australien bezogen. Die Raffineriekapazitäten konzentrie- ren sich jedoch hauptsächlich auf China, das auch die Produktion von Anoden- und Katho- den-Aktivmaterialien dominiert. Die meisten Batteriezellen werden derzeit aus China und Südkorea importiert, obwohl die Europäische Union plant, ihre eigenen Produktionskapazi- täten auszubauen. Dies verdeutlicht den glo- balen Charakter der Batterielieferkette und unterstreicht die Notwendigkeit, die weltweite Marktdynamik bei der Engpassanalyse zu berücksichtigen.

In der Stromversorgungskette für erneuerbare Energien wurde die Herstellung von Wind- und Photovoltaikausrüstung aufgrund des inter- nationalen Charakters dieses Marktes auf globaler Ebene analysiert. Die Geschwindigkeit der Installation von Windkraft- und Photovol- taikanlagen wurde auf europäischer Ebene bewertet, wobei interkontinentale Stromim- porte aufgrund technischer und finanzieller Beschränkungen ausgeschlossen wurden. Ebenso wurde das Tempo der Installation

von Übertragungs- und Verteilungsnetzen auf europäischer Ebene bewertet, ebenso wie die Geschwindigkeit der Einführung von öffentlichen Ladestationen.

Ähnlich wie beim erneuerbaren Strom hängt die Durchführbarkeit des Ausbaus von grünem Wasserstoff von den weltweiten Produktionskapazitäten für Wind- und Photovoltaikausrüstung ab. Darüber hinaus wurden die weltweiten Produktionskapazitäten für Elektrolyseausrüstung bewertet. In Anbetracht der Bestrebungen der Europäischen Union, die Versorgung mit grünem Wasserstoff sowohl aus europäischen als auch aus globalen Quellen auszubauen²¹, wurde die Geschwindigkeit der Installation von Produktionskapazitäten für grünen Wasserstoff sowohl auf europäischer als auch auf globaler Ebene bewertet. Für europäische Projekte zur Erzeugung von grünem Wasserstoff ist die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien in der EU ein entscheidender Faktor, da diese Projekte in der Regel Strom aus dem Netz in Verbindung mit Stromabnahmeverträgen (PPA) beziehen. Aus diesem Grund wurde das Tempo der Installation von Windkraft- und Photovoltaikanlagen in Europa als zusätzlicher limitierender Faktor bewertet. Für globale Projekte zur Erzeugung von grünem Wasserstoff werden aufgrund der abgelegenen Lage in der Regel autonome Kraftwerke bevorzugt. Daher wurden mögliche Beschränkungen bei der Installation von Kraftwerken für erneuerbare Energien bereits bei der Bewertung der globalen Installation von grünem Wasserstoff berücksichtigt. Die Geschwindigkeit der Installation von Wasserstoffpipelines wurde auf europäischer Ebene analysiert, da Beschränkungen in diesem Bereich die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff in der EU beeinträchtigen könnten. Schließlich wurden die weltweiten Fertigungskapazitäten für Brennstoffzellen bewertet, um mögliche Beschränkungen bei der Einführung von FCEV zu ermitteln.

Schließlich wurden die eFuel-Lieferketten auf globaler Ebene bewertet, da eFuels voraussichtlich international gehandelt werden – nicht nur wegen der Kapazitätsbeschränkungen in Europa, sondern auch, weil die Produktion in Regionen mit hohem Potenzial an erneuerbaren Energien Vorrang haben sollte, um Kostensenkungen zu erzielen. Ähnlich wie bei erneuerbarem Strom und grünem Wasserstoff wurden die weltweiten Produktionskapazitäten für Windkraft- und Photovoltaikausrüstungen sowie die weltweite Produktion von Elektrolyseausrüstung analysiert. Die weltweite Installationsgeschwindigkeit von eFuel-Produktionsanlagen ist entscheidend für die Sicherstellung der eFuel-Einführung in der Europäischen Union und wurde eingehend untersucht. Da Wasserstoff und die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien integrale Bestandteile von eFuel-Anlagen sind, wurden mögliche Beschränkungen im Zusammenhang mit ihrer Installationsgeschwindigkeit bereits bei der Bewertung der weltweiten Installation von eFuel-Produktionsanlagen berücksichtigt.

Wie in → **Abschnitt 3.2.1.** hervorgehoben wurde, ist die Energiewende der wichtigste Treiber für den Wandel in der Schiff- und Luftfahrt. Im Gegensatz dazu hat die Antriebswende in diesen Flotten relativ geringe Auswirkungen, was hauptsächlich auf die langsame Flottenerneuerung und die hohe Energieflexibilität der Schiffe zurückzuführen ist. Außerdem werden, wie in → **Abschnitt 3.4.** erwähnt, Brennstoffzellen- und Batterieantriebe auf einige wenige Anwendungen beschränkt bleiben.

Aus diesem Grund wurden potenzielle industrielle Engpässe in den Lieferketten von Brennstoffzellen und Batterien für den Schiffs- und Luftverkehr nicht weiter untersucht. Stattdessen konzentrierte sich die Machbarkeitsbewertung auf die Energieversorgungsketten, insbesondere auf erneuerbaren Strom, grünen Wasserstoff und eFuels.

4.1.2. Methodik und Modellierung des Angebots für die EU-Mobilität

Der Ansatz beinhaltet einen Vergleich von Angebot und Nachfrage in der EU-Mobilität für alle 27 Engpassfaktoren für jedes Jahr bis 2050. Die EU-Mobilitätsnachfrage wurde unter dem Szenario „EU Ambition“ für jeden Engpassfaktor in den kritischen Antriebs- und Energieversorgungsketten auf der Grundlage von Flotten- und Energiemodellen quantifiziert. Der Ansatz und die Datenerhebung, die zur Ableitung der EU-Nachfragekurven verwendet wurden, werden in → **Abschnitt 4.1.3.** näher erläutert. Um das Angebot zu quantifizieren, wurde eine Methode entwickelt, um der EU-Mobilität einen verfügbaren Anteil des weltweiten Angebots zuzuweisen, da die meisten Lieferketten mit anderen Sektoren und Märkten geteilt werden. Bei dieser Methode erhält die EU-Mobilität einen proportionalen Anteil am weltweiten Angebot, der ihrem Anteil an der weltweiten Nachfrage entspricht. Dieser Mechanismus gliedert sich in vier Schritte, wie in Abbildung 28 für den Lithiumbergbau dargestellt.

Der Ansatz begann auf der globalen Ebene, wo Nachfragedaten für alle Engpassfaktoren gesammelt wurden. Um die Ambition anderer Märkte bei der Erfüllung ihrer Klimaverpflichtungen widerzuspiegeln, wurde die globale Nachfrage aus dem „Announced Pledges“-Szenario (APS) der International Energy Agency (IEA) abgeleitet. Das 2021 eingeführte APS modelliert, wie sich das globale Energiesystem entwickeln würde, wenn alle Regierungen ihre angekündigten Klima- und Energieversprechen vollständig und pünktlich umsetzen würden. Dies schließt die neuesten nationalen Ankündigungen für kurz- und langfristige Kohlenstoffreduktionsziele ein, unabhängig davon, ob sie rechtlich bindend sind.

Das APS entspricht einer Begrenzung der globalen Erwärmung auf etwa 1,7 °C über

dem vorindustriellen Niveau. Dieses Ziel stimmt mit dem Ziel des Pariser Abkommens überein, die globale Erwärmung „deutlich unter 2 °C“ zu halten, aber es erreicht nicht die globale Klimaneutralität bis 2050. Im Gegensatz dazu wurde das in dieser Studie bewertete „EU Ambition“-Szenario von der Europäischen Kommission so konzipiert, dass die Klimaneutralität bis 2050 erreicht wird, was es fortschrittlicher macht als den globalen Kurs des APS. Die von der Europäischen Union angekündigte höhere Ambition wurde im APS berücksichtigt und gleicht konservativere Ziele in anderen Märkten aus.

Der Zweck dieser Studie bestand darin, die Machbarkeit der Transformation auf der Grundlage der angekündigten Ambitionen der EU und anderer globaler Märkte zu bewerten – und nicht auf der Grundlage eines Szenarios, das von globaler Klimaneutralität bis 2050 ausgeht. Die Tatsache, dass die globalen Ambitionen im Allgemeinen weniger aggressiv sind als die der EU, mindert den Druck auf kritische Antriebs- und Energieversorgungsketten. Geht man davon aus, dass die EU einen ihrem Anteil an der weltweiten Nachfrage entsprechenden Anteil am weltweiten Angebot erhält, so schafft dies mehr Flexibilität für die europäische Transformation im Falle von Engpässen. Umgekehrt könnten sich Engpässe verschärfen oder neue Engpässe entstehen, wenn die globalen Ambitionen zunehmen, was sich direkt auf die Transformation der Mobilität in der EU auswirken würde. Ebenso könnten Engpässe abnehmen oder verschwinden, wenn die globalen Ambitionen nachlassen.

Die Bewertung der Engpässe in dieser Studie spiegelt die gegenwärtigen globalen Ankündigungen wider, aber künftige Änderungen der globalen Zielsetzungen könnten die Ergebnisse verändern. Die IEA hat in mehreren detaillierten Berichten, auf die später in dieser Studie Bezug genommen wird, die globale

VARIABLE

ERGEBNIS (BEISPIELHAFT)

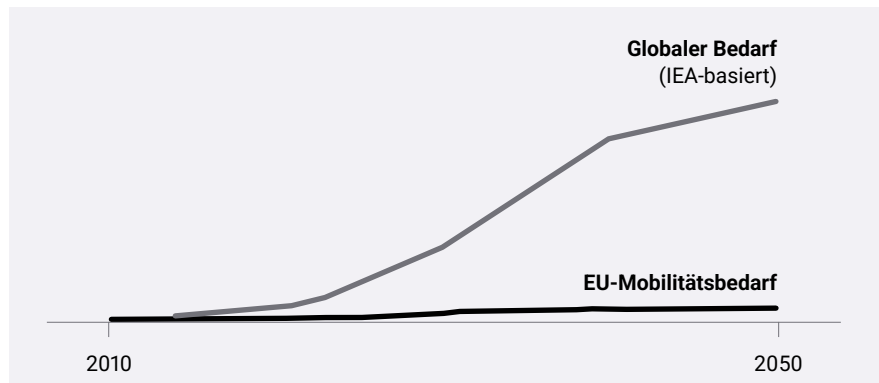
Engpassfaktor

LITHIUM-BERGBAU

1

Bedarf

Global & EU-Mobilität



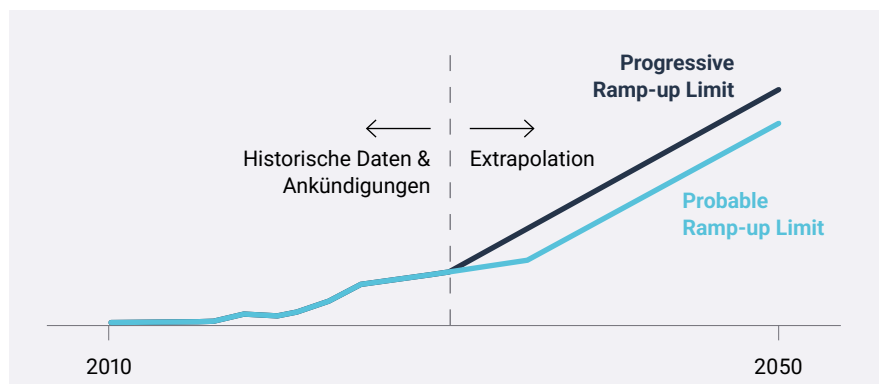
2

Angebot

Global

Szenario-Treiber

HOCHLAUFGESCHWINDIGKEIT



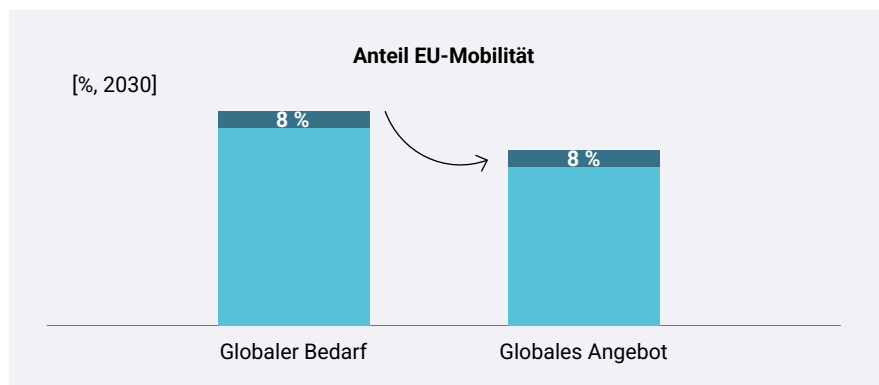
3

Angebot

EU-Mobilität

Szenario-Treiber

EU-MOBILITÄTSANTEIL



4

Engpass

EU-Mobilität

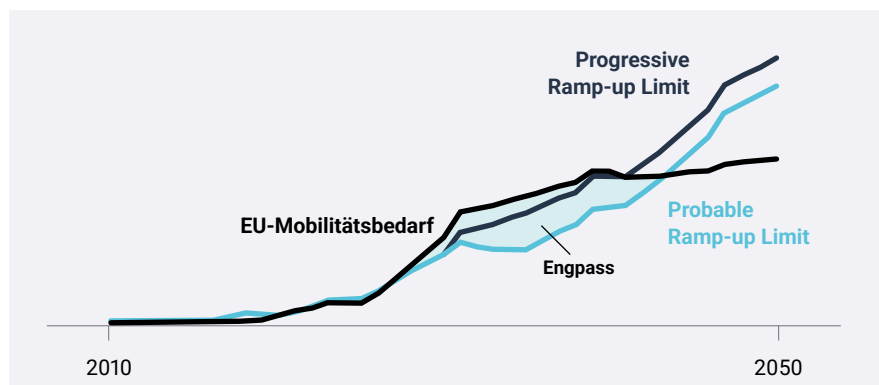


Abbildung 28: Ansatz der Engpassanalyse am Beispiel des Lithiumabbaus: Szenario „EU Ambition“.

Nachfrage nach APS für die gesamte Antriebs- und Energieversorgungskette abgeleitet. Für jeden Engpassfaktor wurde die EU-Mobilitätsnachfrage auf der Grundlage des „EU Ambition“-Szenarios berechnet, und ihr Anteil an der weltweiten Nachfrage wurde verwendet, um der EU-Mobilität den gleichen Anteil am weltweiten Angebot zuzuweisen.

Im zweiten Schritt wurde das weltweite Angebot auf der Grundlage bestehender Kapazitäten und Ankündigungen der Industrie prognostiziert. Die Datenerhebung und die quantitativen Ergebnisse werden in → **Abschnitt 4.2.** für Lithium, Windkraftausrüstung, Elektrolyseausrüstung und eFuel-Produktionskapazitäten und in Anhang E für alle anderen Engpassfaktoren in kritischen Antriebs- und Energieversorgungsketten detailliert beschrieben.

Für neu entstehende Versorgungsketten wie Batterien, grüner Wasserstoff und eFuels reichen historische Daten allein nicht aus, um den zukünftigen Kapazitätsaufbau vorherzusagen. Daher wurden die angekündigten Kapazitäten verfolgt und bis 2030 prognostiziert. Ankündigungen, die über 2030 hinausgehen, wurden aufgrund ihrer derzeit geringen Umsetzungswahrscheinlichkeit ausgeschlossen. Pläne der Industrie innerhalb eines Fünfjahreshorizonts beinhalten in der Regel stärkere Verpflichtungen der Interessengruppen, was das Vertrauen in ihre Durchführbarkeit erhöht.

Bis 2030 ist es unwahrscheinlich, dass der Kapazitätsausbau die Summe der bestehenden Kapazitäten und der aktuellen Ankündigungen der Industrie übersteigt, da die Vorlaufzeiten für neue Kapazitätserweiterungen im Allgemeinen bei fast allen Engpassfaktoren mehr als fünf Jahre betragen. Daher wurde die Summe der bestehenden Kapazitäten und der für 2030 angekündigten Kapazitäten als Hochlaufgrenze für den Zeitraum 2025–2030 festgelegt. Eine Ausnahme wurde für die

Installationsgeschwindigkeit von Windkraft- und Photovoltaikanlagen gemacht, da die Vorlaufzeiten in der Regel kürzer als fünf Jahre sind und der Reifegrad der Branche es erlaubt, künftige Ausbaugrenzen aus historischen Trends abzuleiten.

Für den Zeitraum 2030–2035 schaffen längere Vorlaufzeiten Raum für neue Projekte. Daher wurde die Hochlaufgrenze ab 2030 auf der Grundlage eines beschleunigten Kapazitätswachstums unter Verwendung der durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 2025 bis 2030 projiziert. Es wird erwartet, dass alle Lieferketten bis 2035 ihre maximale Ausbaugeschwindigkeit erreichen, so dass die Ausbaugrenze ab 2035 als die höchste jährliche Kapazitätserweiterung definiert wurde, die vor 2035 erreicht wurde, und danach als Konstante angewendet wird. Dieses Versorgungsszenario wird als „Probable Ramp-up Limit“ bezeichnet. Es stellt keine realistische Branchenprognose dar, da zusätzliche externe Faktoren den Hochlauf über die Antriebs- und Energieversorgungsketten beeinflussen – wie regulatorische Rahmenbedingungen, geopolitische Entwicklungen, Verbrauchertrends, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhersehbare wirtschaftliche Ereignisse. Stattdessen beschreibt dieses den maximal möglichen Hochlauf, der unter Berücksichtigung der industriellen Einschränkungen erreicht werden kann.

Eine Sensitivitätsanalyse wurde durchgeführt, um ein aggressiveres Angebotsszenario ab 2030 zu simulieren, das als „Progressive Ramp-up Limit“ bezeichnet wird. In diesem Szenario wird der jährliche Kapazitätzzubau von 2030 bis 2038 als Maximum zwischen einem CAGR-basierten* Zubau und dem besten Zubaujahr der Vorjahre festgelegt. Ab 2039 wird der höchste jährliche Zubau, der bis 2038 erreicht wird, als Konstante verwendet.

* CAGR von 2025–2030.

Nach der Projektion der Nachfrage- und Angebotskurven auf globaler Ebene wurden die Auswirkungen auf die Mobilität in der EU abgeleitet. Es wurde angenommen, dass der Anteil der EU-Mobilität am weltweiten Angebot proportional zu ihrem Anteil an der weltweiten Nachfrage ist. So wird beispielsweise für das Jahr 2030 eine Lithiumnachfrage der EU-Mobilität von 8 % der weltweiten Lithiumnachfrage prognostiziert, wie in Schritt 1 berechnet. Dementsprechend wurde der gleiche Anteil des weltweiten Lithiumangebots der EU-Mobilität zugewiesen. Dieser Ansatz wurde konsequent für jedes Jahr von 2025 bis 2050 angewandt.

Diese Annahme impliziert keinen bevorzugten Zugang der EU gegenüber anderen Regionen, was bedeutet, dass das Angebot für die EU-Mobilität nicht nur von der Geschwindigkeit des globalen Kapazitätsausbaus, sondern auch von der Nachfrage aus anderen Regionen abhängt. Mit anderen Worten: Wenn die weltweite Nachfrage stark ansteigt, sinkt der Anteil des Angebots, der für die EU-Mobilität

zur Verfügung steht – selbst wenn die weltweiten Angebotskapazitäten in diesem Zeitraum weiter wachsen. Umgekehrt steigt der Anteil des Angebots, der für die EU-Mobilität bereitgestellt wird, wenn die weltweite Nachfrage zurückgeht.

In einem letzten Schritt wurden Nachfrage- und Angebotskurven auf der Ebene der EU-Mobilität verglichen, um potenzielle Engpässe und Möglichkeiten zur Beschleunigung des Wandels zu ermitteln.

4.1.3. Methodik, Modellierung und Datenerhebung für den Bedarf der EU-Mobilität

Auf der Grundlage des Szenarios „EU Ambition“ wurden aus Flotten- und Energiemodellen Nachfragekurven für die Mobilität abgeleitet und später mit Angebotskurven für jeden Engpassfaktor in kritischen Antriebs- und Energieversorgungsketten verglichen. Die Methodik zur Erstellung von Nachfragekurven wird in diesem Abschnitt ausführlich beschrieben.

	PHEV	BEV
	20 kWh 2025–2050	55 kWh 2025 80 kWh 2035+
	100 kWh 2025–2050	500 kWh 2025 600 kWh 2030+

Abbildung 29: Durchschnittliche Batteriekapazität pro Fahrzeug.

4.1.3.1. Batterie

In der Batterieversorgungskette wurde die Nachfrage nach Batteriezellen auf der Grundlage der BEV- und PHEV-Neuzulassungen und der entsprechenden durchschnittlichen Batteriekapazität pro Fahrzeug für jedes Mobilitätssegment – Pkw sowie Lkw und Busse – berechnet. Die Entwicklung der durchschnittlichen Batteriekapazität im Laufe der Zeit wurde berücksichtigt, und Abbildung 29 gibt einen Überblick über diese Annahmen. Für Pkw wurden die Annahmen zur Batteriekapazität aus der detaillierten Lebenszyklusanalyse des Umweltbundesamtes⁹ abgeleitet. Für Lkw und Busse wurden die Annahmen auf der Grundlage einer Studie von Link et al. (2024)²² getroffen. In beiden Segmenten wird davon ausgegangen, dass die durchschnittliche BEV-Batteriekapazität aufgrund technischer Verbesserungen und steigender Reichweiten-erwartungen im Laufe der Zeit zunehmen wird. Mit zunehmender Verbreitung von BEV wird es erforderlich sein, eine größere Flexibilität bei der Reichweite zu bieten, um Nutzer zu gewinnen, die noch zögern, auf batterieelektrische Mobilität umzusteigen. Zwischen den in Abbildung 29 dargestellten Datenpunkten wurden lineare Interpolationen durchgeführt.

Der jährliche Bedarf an Batteriezellen im Szenario „EU Ambition“ wurde für die Straßenmobilität auf der Grundlage der BEV- und PHEV-Neuzulassungen und der durchschnittlichen Batteriekapazität berechnet. Die Ergebnisse, die in Abbildung 30 dargestellt sind, zeigen, dass der Hochlauf der Batterielieferkette bis 2040 abgeschlossen sein sollte, um das Szenario „EU Ambition“ zu erreichen.

Der Bedarf an kritischen Rohstoffen sowie an aktivem Anodenmaterial (AAM) und aktivem Kathodenmaterial (CAM) hängt von der Nachfrage nach Batteriezellen und der in Fahrzeugen verwendeten Zellchemie ab. Die von

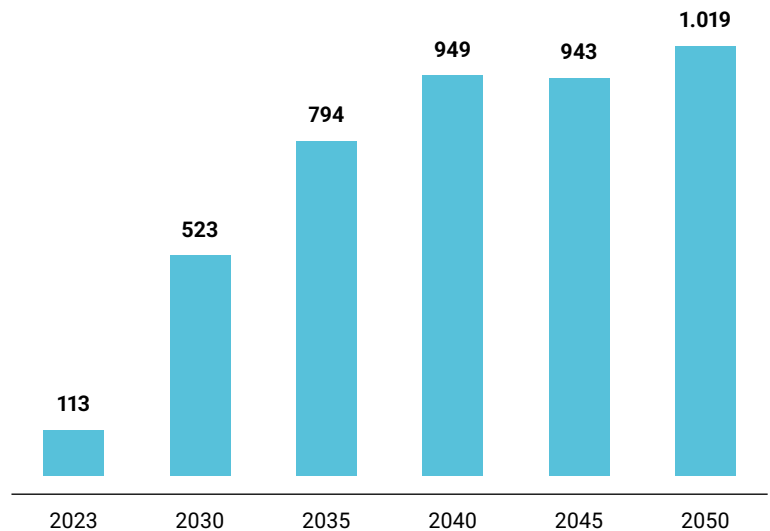


Abbildung 30: Jährlicher Bedarf an Batteriezellen in der EU-Straßenmobilität in GWh: Szenario „EU Ambition“.

Porsche Consulting entwickelte Prognose für die Batteriezellenchemie wurde angewandt, um die Entwicklung des Marktanteils der einzelnen Chemikalien zu modellieren. Für Personenkraftwagen sagt das Modell voraus, dass die LFP- und LMFP-Chemie langfristig den Volumenmarkt dominieren wird, gefolgt von LNMO und NCA. Es wird erwartet, dass nickelreiche NMC-Chemien das Leistungssegment bedienen werden, während andere Standard-NMC-Chemien voraussichtlich auslaufen werden. Im Lkw- und Bus-Segment werden mittelfristig die LFP- und LMFP-Chemien dominieren, während andere Chemien auf bestimmte Anwendungsfälle beschränkt sind. Für jede Zellchemie wurde der gravimetrische Gehalt an kritischen Rohstoffen – Lithium, Nickel, Kobalt und Graphit – bewertet. Durch die Kombination des jährlichen Bedarfs an Batteriezellen, der Prognose für die Zellchemie und des Rohstoffgehalts pro Chemie wurde der jährliche Rohstoffbedarf für die Segmente Pkw sowie Lkw und Busse berechnet. In ähnlicher Weise wurde die spezifische Nachfrage

nach AAM und CAM für jede Batteriezellenchemie bewertet, wobei die jährliche Nachfrage aus der Nachfrage nach Batteriezellen und der Prognose für die Chemie in beiden Segmenten der Straßenmobilität abgeleitet wurde.

4.1.3.2. Erneuerbarer Strom

Für jeden Engpassfaktor in der Stromversorgungskette für erneuerbare Energien wurden Nachfragekurven aus dem Energienachfragemodell abgeleitet.

Die Stromnachfrage wurde für drei Energiequellen-Gruppen modelliert – fossile, Atom- und erneuerbare Energien. Die Entwicklung des Strommixes innerhalb dieser Gruppen wurde jedoch in der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission nicht dargestellt. Um speziell die Nachfrage nach Wind- und Photovoltaikkapazitäten zu bewerten, wurde der Strommix im Modell weiter verfeinert. Der detaillierte Strommix aus dem Jahr 2023 diente als Ausgangsbasis¹⁴, während die Projektionen für 2030 und 2050 aus dem IEA-Szenario „Announced Pledges“ abgeleitet wurden, das im World Energy Outlook 2023²³ beschrieben ist. Die Nachfrage nach Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik wurde für den Zeitraum 2025–2050 berechnet, und die entsprechende installierte Kapazität, die jedes Jahr benötigt wird, wurde auf der Grundlage jährlicher Kapazitätsauslastungsfaktoren modelliert: durchschnittlich 2.730 Stunden für Windkraftanlagen und 1.130 Stunden für Solar-Photovoltaik, gemäß den durchschnittlichen europäischen Klimadaten des Jahres 2019²⁴.

Die Nachfrage nach Übertragungs- und Verteilungsnetzen wurde aus der Gesamtstromnachfrage in der EU-Mobilität und der durchschnittlichen Netzlänge abgeleitet, die für die Stromübertragung und -verteilung innerhalb der EU erforderlich ist. Die Stromnachfrage für

die EU-Mobilität wurde direkt aus dem Energiemodell für jedes Jahr bis 2050 übernommen.

Auf der Grundlage des ENTSO-E TYNDP-Berichts für 2020²⁵ und historischer Trends bei der Stromübertragung in der EU wurde die spezifische Nachfrage nach Übertragungsnetzkapazität auf 130 km/TWh geschätzt. In ähnlicher Weise wurde die spezifische Nachfrage nach Verteilernetzkapazitäten auf 5.000 km/TWh festgelegt, wie aus dem IEA-Bericht Electricity Grids and Secure Energy Transition (2023)²⁶ hervorgeht. Unter Verwendung dieser Faktoren wurde der Bedarf der EU-Mobilität an Übertragungs- und Verteilungsnetzen in Kilometern für jedes Jahr bis 2050 berechnet.

Die Nachfrage nach öffentlichen Ladekapazitäten wurde auf der Grundlage der BEV- und PHEV-Bestandsflottengröße und der durchschnittlich benötigten Ladekapazität pro Fahrzeug berechnet. Im Pkw-Segment wurde der durchschnittliche Ladekapazitätsbedarf mit 1,3 kW für BEVs und 0,8 kW für PHEVs angenommen, gemäß dem IEA Global EV Outlook 2024²⁷. Für Lkw und Busse wurden die Anforderungen der Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR) for Heavy Duty²⁸ zugrunde gelegt, was zu einem Ladeleistungsbedarf von 22,4 kW für BEVs führte. Der durchschnittliche Kapazitätsbedarf für PHEVs wurde auf 13,8 kW geschätzt, wobei das gleiche proportionale Verhältnis zu BEVs wie im Pkw-Segment angenommen wurde.

4.1.3.3. Grüner Wasserstoff

Die Europäische Union plant, gemäß der EU-Wasserstoffstrategie (2022)²¹ und dem REPowerEU-Plan (2022)²⁹ bis 2030 jeweils 10 Millionen Tonnen grünen Wasserstoff zu produzieren und zu importieren, um alle Sektoren zu versorgen. Dies macht die Bewertung der Engpässe noch komplexer, da beide Versorgungsketten getrennt bewertet wurden,

wobei davon ausgegangen wurde, dass sie jeweils 50 % zur Gesamtversorgung beitragen. Für die EU-Mobilität im Szenario „EU Ambition“ wurde die Nachfrage auf der Grundlage dieser Annahme zwischen europäischen und globalen Quellen aufgeteilt.

Der Ansatz beginnt mit der Bewertung des Bedarfs an Elektrolysekapazität. Für jede Lieferkette und jedes Jahr wurde die erforderliche Elektrolysekapazität auf der Grundlage der jährlichen Kapazitätsauslastung und des aus dem Energiemodell abgeleiteten Bedarfs an grünem Wasserstoff berechnet. Für die europäischen Produktionsstandorte wurde eine durchschnittliche jährliche Kapazitätsauslastung von 2.500 Stunden angenommen, während die globalen Produktionsstandorte von günstigeren Bedingungen profitieren und 4.000 jährliche Volllaststunden erreichen. Diese Werte wurden mithilfe des Porsche Consulting Green Hydrogen Cost Model ermittelt, basierend auf durchschnittlichen Klimadaten²⁴ in Regionen, in denen derzeit großskalige Projekte für grünen Wasserstoff realisiert werden, wie beispielsweise an den portugiesischen oder dänischen Küsten in Europa sowie in ausgewählten Gebieten der MENA-Region weltweit. Dadurch sinkt der Bedarf an installierter Leistung für globale Anlagen im Vergleich zu europäischen Anlagen bei gleichem Produktionsvolumen. Im Szenario „EU Ambition“ beispielsweise wird 2040 die Elektrolysekapazität für die Versorgung der EU-Mobilität mit grünem Wasserstoff voraussichtlich 11,2 GW in der EU und 7,0 GW in globalen Regionen erreichen.

Im zweiten Schritt wird der Bedarf an Wind- und Photovoltaikkapazitäten für europäische und globale Produktionsstandorte quantifiziert. Es wird davon ausgegangen, dass die europäischen Produktionsanlagen Strom aus erneuerbaren Energiequellen beziehen, die im Netz verfügbar sind. Daher wurde die erforderliche Stromkapazität für die Produktion

von grünem Wasserstoff jeder erneuerbaren Energiequelle entsprechend ihrem Anteil und ihrer voraussichtlichen Entwicklung, wie in → **Abschnitt 4.1.3.2.** definiert, zugewiesen. So wird beispielsweise prognostiziert, dass Photovoltaik im Jahr 2040 47 % der gesamten installierten erneuerbaren Kapazität ausmachen wird. In Anbetracht der Tatsache, dass die erforderliche Elektrolyseur-Kapazität für die europäische Produktion von grünem Wasserstoff im Jahr 2040 auf 11,2 GW projiziert wird, sollten 47 % dieser Kapazität – etwa 5,2 GW – durch Photovoltaikquellen betrieben werden. Unter Verwendung dieses Ansatzes wurden die erforderlichen installierten Kapazitäten für Wind- und Solarenergie für europäische grüne Wasserstoffprojekte für jedes Jahr bis 2050 abgeleitet. Bei globalen Projekten für grünen Wasserstoff wird davon ausgegangen, dass die Elektrolysekapazitäten durch eigenständige Wind- und Photovoltaikanlagen betrieben werden, wobei die installierten Kapazitäten gleichmäßig auf die beiden Quellen verteilt sind. Um das „EU Ambition“-Szenario im Jahr 2040 zu erfüllen, werden für die globale Produktion von grünem Wasserstoff beispielsweise 3,5 GW an installierter Windkraftkapazität und ebenso 3,5 GW an Photovoltaikkapazität benötigt.

Um den Bedarf an Wasserstoffpipelines in der Europäischen Union zu quantifizieren, wurden die Ankündigungen der Industrie zu neuen oder umgestellten Pipelineprojekten mithilfe der IEA Hydrogen Infrastructure Database⁶ analysiert. Auf der Grundlage der technischen Daten dieser Projekte wurde der spezifische Bedarf an Pipelinekapazität auf 13.750 km pro Mt Wasserstoff geschätzt. Es wurde davon ausgegangen, dass der Wasserstofftransport über Pipelines in der EU für alle Wasserstoffarten, unabhängig von der Energiequelle, erforderlich sein wird. Zu Beginn der geplanten Transformation im Rahmen des Szenarios „EU Ambition“ ist es unwahrscheinlich, dass wasserstoffbetriebene

Bei globalen Projekten für grünen Wasserstoff wird davon ausgegangen, dass die Elektrolysekapazitäten durch eigenständige Wind- und Photovoltaikanlagen betrieben werden, wobei die installierten Kapazitäten gleichmäßig auf die beiden Quellen verteilt sind.

Fahrzeuge ausschließlich mit grünem Wasserstoff betankt werden. Da die Einführung von grünem Wasserstoff voraussichtlich mehrere Jahrzehnte dauern wird, werden auch andere Wasserstoffarten – wie fossiler Wasserstoff – über das Pipelinenetz in die EU-Mobilität eingespeist. Es wird davon ausgegangen, dass das Pipelinenetz die Mobilität auf der Straße und im Luftverkehr bedient, nicht aber die maritime Mobilität. Importierter Wasserstoff wird über Häfen transportiert, wo Schiffe direkt betankt werden können. Die im Rahmen des „EU Ambition“-Szenarios erforderliche Wasserstoff-Pipelinekapazität wurde auf der Grundlage der Wasserstoffnachfrage im Straßen- und Luftverkehrssegment und des spezifischen Nachfragefaktors von 13.750 km/Mt berechnet.

Der jährliche Brennstoffzellenbedarf wurde für die Straßenmobilität berechnet, während der Schiffs- und Luftverkehr nicht weiter analysiert wurde, wie in → **Abschnitt 4.1.1.** erwähnt. Die Brennstoffzellennachfrage wurde aus den FCEV-Neuzulassungen und der durchschnittlichen Brennstoffzellenkapazität pro Fahrzeug abgeleitet, die für Pkw mit 104 kW und für Lkw und Busse mit 245 kW angenommen wurde,

basierend auf einer Benchmark-Analyse der Industrie für mehrere Marken in beiden Segmenten.

4.1.3.4. eFuels

Ähnlich wie die Versorgungskette für grünen Wasserstoff wurde die Versorgungskette für eFuels bewertet, indem der Schwerpunkt auf die erforderlichen Kapazitäten für eFuel-Produktionsanlagen, Elektrolyseanlagen sowie Wind- und Solarenergie gelegt wurde. Im Gegensatz zu grünem Wasserstoff hat die Europäische Union keine klare Beschaffungsstrategie für eFuels definiert, so dass weltweite Importe eine praktikable Option für die Mobilitätsversorgung darstellen. Aufgrund erheblicher Kostenvorteile bei der Herstellung von eFuels in Regionen mit einem hohen Potenzial an erneuerbaren Energien wird davon ausgegangen, dass die eFuel-Versorgung für die EU-Mobilität auf globaler Ebene erfolgt. Diese Annahme ist entscheidend für die Berücksichtigung von Effizienzgewinnen und deren Auswirkungen auf die erforderlichen Kapazitäten für erneuerbare Energien und Elektrolyseanlagen.

Die benötigte jährliche Kapazität für eFuel-Produktionsanlagen wurde direkt aus der im Energiemodell berechneten eFuel-Nachfrage für alle in dieser Studie analysierten Mobilitätssektoren abgeleitet. Zur Ermittlung der installierten Kapazität für die Methanol- und Fischer-Tropsch-(FT)-Syntheserouten wurde angenommen, dass eBenzin und eMethanol über die Methanolsynthese hergestellt werden, während eDiesel und eSAF über die FT-Route produziert werden. Obwohl es in der Praxis zu Abweichungen von dieser Annahme kommen kann, deuten aktuelle Projekte auf einen klaren Trend in diese Richtung hin. Der eFuel-Bedarf wurde für jeden Synthesepfad auf der Grundlage der vom Energiemodell bereitgestellten detaillierten Kraftstoffmengen berechnet. Es wurde angenommen, dass die globalen eFuel-Produktionsanlagen mit einer durchschnittlichen jährlichen Auslastung von 5.000 Stunden arbeiten. Dieser Wert wurde mithilfe des Porsche Consulting eFuel Cost Model erstellt, basierend auf durchschnittlichen Klimadaten²⁴ in globalen Regionen, in denen derzeit großskalige eFuel-Projekte umgesetzt werden, wie beispielsweise in Patagonien (Chile) oder der Inneren Mongolei (China). Auf der Grundlage dieser Annahme und der jährlichen eFuel-Nachfrage wurden die erforderlichen Methanol- und FT-Synthesekapazitäten im Zeitverlauf projiziert. Bis 2040 wird im von der Europäischen Kommission entwickelten „EU Ambition“-Szenario eine Methanolsynthesekapazität benötigt, die etwa 104 Milliarden Liter Benzinäquivalent entspricht, ergänzt durch eine zusätzliche Kapazität von 55 Milliarden Litern über den Fischer-Tropsch-Prozess.

Für jeden Synthesepfad wurde die erforderliche installierte Elektrolysekapazität anhand von Effizienzdaten aus dem eFuel-Kostenmodell von Porsche Consulting berechnet. Im nächsten Schritt wurden die erforderlichen installierten Wind- und Photovoltaikkapazitäten unter der Annahme abgeleitet, dass die

Elektrolyseanlagen durch dedizierte, eigenständige Wind- und Photovoltaikanlagen mit gleicher Kapazitätsverteilung zwischen beiden Quellen betrieben werden – ähnlich wie bei den globalen grünen Wasserstoffproduktionsanlagen, wie in → **Abschnitt 4.1.3.3.** beschrieben. Um das „EU Ambition“-Szenario zu erfüllen, wird beispielsweise für die globale eFuel-Produktion im Jahr 2040 eine installierte Windkraftkapazität von 59 GW für die Methanol-Route und 32 GW für die Fischer-Tropsch-Route prognostiziert. Die gleichen Kapazitäten werden für Photovoltaik benötigt.

4.1.4. Methodik und Modellierung des „Bottleneck-adjusted“-Szenarios

Nach der Modellierung der Angebots- und Nachfragekurven für jeden Engpassfaktor in der EU-Mobilität auf der Grundlage der in den → **Abschnitten 4.1.2. und 4.1.3.** beschriebenen Methodik werden potenzielle Engpässe ermittelt, wenn die Nachfrage das Angebot im Szenario „EU Ambition“ übersteigt. Umgekehrt werden Möglichkeiten zur Beschleunigung der Transformation ermittelt, wenn das Angebot die Nachfrage übersteigt. Unter Verwendung der Angebotskurven aus dem Szenario „Probable Ramp-up Limit“ wurden die Neuzulassungen von Fahrzeugen und die Quoten für kohlenstoffarme Energie durch einen Bottom-up-Ansatz berechnet, um die Konsistenz mit den vorherigen Annahmen zu gewährleisten. In mehreren Fällen wirken sich mehrere Engpassfaktoren auf die Lieferkette aus. Für jedes Jahr wird der restriktivste Engpassfaktor verwendet, um das „Bottleneck-adjusted“-Szenario zu erstellen. Das resultierende Szenario stellt keine realistische Branchenprognose dar, da verschiedene externe Faktoren den Hochlauf über die Antriebs- und Energieversorgungsketten beeinflussen – wie regulatorische Rahmenbedingungen, geopolitische Entwicklungen, Verbrauchertrends, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhersehbare



wirtschaftliche Ereignisse. Stattdessen beschreibt das „Bottleneck-adjusted“-Szenario den maximal möglichen Hochlauf, der unter Berücksichtigung der industriellen Einschränkungen erreicht werden kann.

So wird die BEV-Neuzulassungsquote für Pkw im Jahr 2032 im Szenario „EU Ambition“ auf 65 % prognostiziert. Im Vergleich dazu zeigt das „Bottleneck-adjusted“-Szenario ein Maximum von 40 %. Dieser Wert ergibt sich aus dem restriktivsten Engpassfaktor im Jahr 2032 – dem Lithiumangebot.

Das Modell legt zunächst das maximale Lithiumangebot fest, das für die EU-Mobilität gemäß dem Szenario „Probable Ramp-up Limit“ auf 34 kt geschätzt wird. Dieses Angebot wird dann zwischen der Pkw-Mobilität und der Lkw- und Bus-Mobilität aufgeteilt, wobei die Konsistenz mit den Lithium-Nachfrageanteilen für dasselbe Jahr im Rahmen des Szenarios „EU Ambition“ gewahrt wird. Im Ergebnis erhält die Pkw-Mobilität 94 % des Lithiumangebots im Jahr 2032, was 32 kt entspricht. Zum Vergleich: Der Anteil des Angebots für Nickel ist höher – 98 % –, da NMC-Chemien im Lkw- und Bussegment eine untergeordnete Rolle spielen.

Auf der Grundlage der im Szenario „EU Ambition“ eingeführten Zellchemie-Prognose und des gravimetrischen Lithiumgehalts der einzelnen Chemietypen wird der durchschnittliche Lithiumgehalt für das Pkw-Segment im Jahr 2032 auf 82 g/kWh berechnet. In Verbindung mit dem Lithiumangebot von 32 kt beträgt die maximale Batteriezellenkapazität auf der Grundlage der Lithiumverfügbarkeit 395 GWh. Nach einem ähnlichen Verfahren erreicht die Zellkapazität auf der Grundlage der Nickelverfügbarkeit 461 GWh. Der gleiche Ansatz gilt für die Versorgung mit Kobalt und Graphit sowie für das aktive Anodenmaterial, das aktive Kathodenmaterial und die Zellproduk-

tionskapazitäten. An diesem Punkt wird Lithium als der begrenzende Faktor identifiziert und die maximale Zellkapazität wird mit 395 GWh angenommen.

Diese Kapazität wird dann zwischen BEVs und PHEVs aufgeteilt, wobei die Konsistenz mit den Anteilen der Batteriezellnachfrage für dasselbe Jahr im Rahmen des Szenarios „EU Ambition“ gewahrt wird. Folglich erhalten BEVs 96 % der verfügbaren Batteriezellenkapazität – etwa 380 GWh. Bei einer durchschnittlichen BEV-Batteriekapazität von 73 kWh im Jahr 2032 bedeutet dies 5,2 Millionen BEV-Neuzulassungen, was einem Marktanteil von 40 % entspricht. Bei dieser Berechnung wird davon ausgegangen, dass die jährlichen Pkw-Neuzulassungen konstant bei etwa 13 Millionen Fahrzeugen bleiben, um die Bestandsflottengröße über den gesamten Zeitraum 2025–2050 an das Szenario „EU Ambition“ anzupassen – etwa 209 Millionen Fahrzeuge. Anschließend wird das Flottenmodell zur Ableitung der Bestandsflottengrößen und der Anteile der Antriebsarten herangezogen.

Der gleiche Ansatz wird angewandt, um den realisierbaren Hochlauf anderer Antriebsstränge sowohl im Pkw- als auch im Lkw- und Bus-Segment zu ermitteln. Auf der Energie-seite folgt die Methode zur Ableitung von Energiequoten einem analogen Prozess und wird nach der Anpassung der Antriebswende umgesetzt.

Typischerweise verringert die Anpassung der Antriebstransformation den Druck auf die Energieversorgungsketten, was bedeutet, dass die meisten kohlenstoffarmen Energiequoten eher steigen als durch Engpässe im „Bottleneck-adjusted“-Szenario eingeschränkt zu werden. Schließlich werden die CO₂-Emissionen auf der Grundlage der angepassten Antriebs- und Energiewende modelliert.

4.2. Detaillierter Ansatz für beispielhafte Engpassfaktoren

In diesem Kapitel wird die in → **Abschnitt 4.1.** vorgestellte Methodik anhand eines Beispiels aus der Batterielieferkette – Lithium – sowie drei Beispielen aus der eFuel-Lieferkette illustriert: Windkraftausrüstung, Elektrolyseausrüstung und die Installation von eFuel-Produktionsanlagen. Die Ergebnisse der industriellen Engpassbewertung für zusätzliche Faktoren sind in Anhang E enthalten. → **Abschnitt 4.1.** führte eine Sensitivitätsanalyse unter Verwendung des „Progressive Ramp-up Limit“-Szenario ein. In diesem Kapitel wird die Methode für das Basisszenario, das als „Probable Ramp-up Limit“-Szenario bezeichnet wird, detailliert beschrieben, während die Sensitivitätsergebnisse in → **Abschnitt 4.3.** dargestellt werden.

4.2.1. Lithium

Lithium ist ein kritischer Rohstoff für den Hochlauf von BEVs und PHEVs, da es sowohl im Pkw- als auch im Lkw- und Bus-Segment sowie in den meisten Batteriezellchemien bis 2050 verwendet wird. Die Lithiumversorgung wurde zusammen mit der Nickelversorgung als der limitierendste Faktor für die Ausweitung der Elektromobilität identifiziert. Da Nickel im Lkw- und Busbereich eine sekundäre Rolle spielt, konzentriert sich dieses Kapitel auf den Ansatz für Lithium.

Abbildung 31 zeigt die prognostizierte globale jährliche primäre Lithiumversorgung, wobei sowohl die Abbau- als auch die Raffineriekapazitäten berücksichtigt werden.

01 LITHIUM BERGBAU & RAFFINERIE

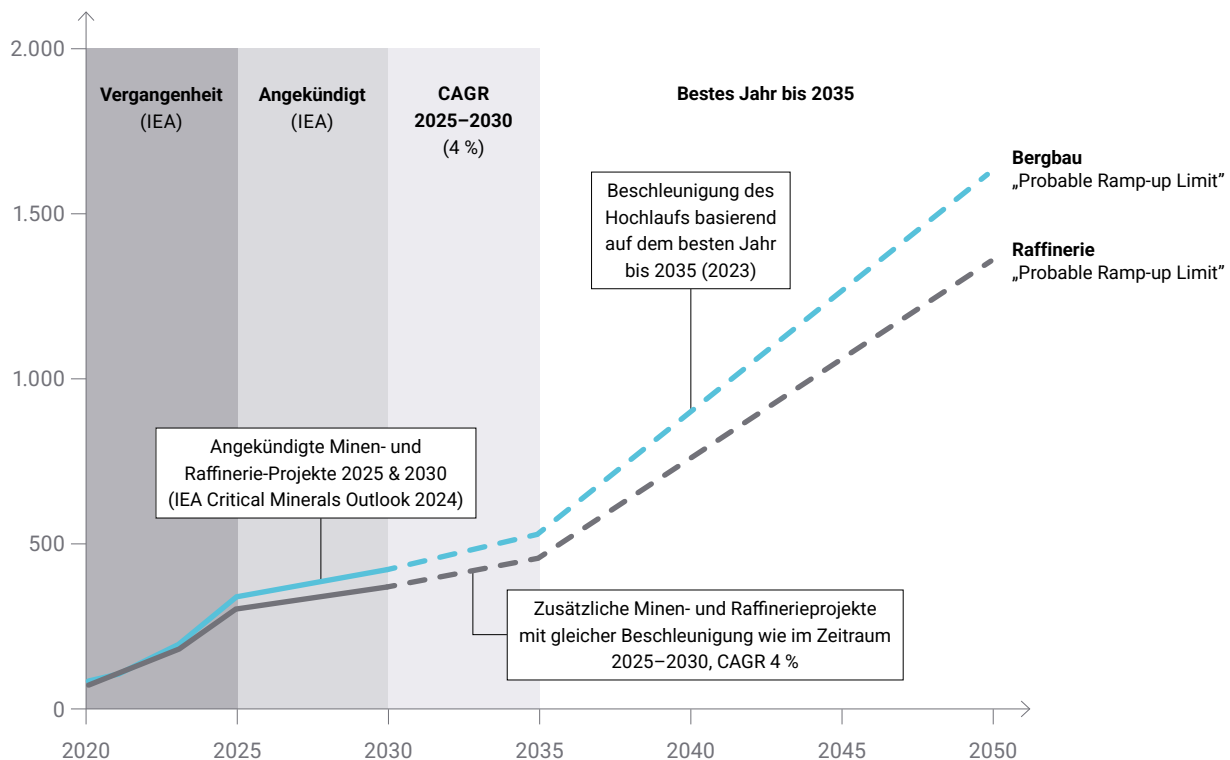


Abbildung 31: Globale jährliche primäre Lithiumversorgung in kt/a: Szenario „Probable Ramp-up Limit“. Quelle: IEA Global Critical Minerals Outlook 2024³⁰

Dem in → **Abschnitt 4.1.** beschriebenen Ansatz folgend wurde der Hochlauf auf Basis historischer Abbau- und Raffineriekapazitäten prognostiziert, kombiniert mit der Prognose der International Energy Agency (IEA)³¹ zu Kapazitätsankündigungen für 2025 und 2030. Zwischen diesen Datenpunkten wurde die Kapazität linear interpoliert.

Über 2030 hinaus wurden angekündigte Kapazitäten aufgrund ihrer derzeit geringen Umsetzungswahrscheinlichkeit ausgeschlossen. Kurzfristige Pläne – typischerweise innerhalb von fünf Jahren – werden in der Regel durch stärkere Zusagen von Lithiumabbauunternehmen gestützt, was das Vertrauen in deren Realisierbarkeit erhöht. Die Einbeziehung langfristiger Ankündigungen würde die prognostizierte Hochlaufgeschwindigkeit künstlich verringern.

Bis 2030 ist es unwahrscheinlich, dass der Kapazitätshochlauf die Summe der bestehenden Kapazitäten und aktuellen Branchenankündigungen überschreitet, da die Vorlaufzeiten für neue Lithiumabbauprojekte laut dem IEA-Bericht *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*³⁰ mehr als fünf

Jahre betragen. Für den Zeitraum 2030–2035 lassen die Vorlaufzeiten wieder Raum für neue Projekte.

Das Hochlauflimit ab 2030 wurde auf Basis einer Beschleunigung der neuen Kapazitätzugänge prognostiziert, unter Verwendung der jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 2025 bis 2030. Beispielsweise wird die globale Lithiumabbaukapazität für 2030 auf 423 kt basierend auf Ankündigungen prognostiziert. Die Anwendung einer CAGR von 4 % – abgeleitet aus dem Zeitraum 2025–2030 – ergibt eine Kapazität von 442 kt im Jahr 2031.

Bis 2035 wird erwartet, dass die Abbau- und für den Lithiumabbau bis 2036 wird voraussichtlich 2025 sein, mit einem Kapazitätswachstum von 73 kt gegenüber 2024. Die Annahme, dass dieses „beste Jahr“ sich 2036 wiederholt, führt zu einer Kapazität von 599 kt im Jahr 2036, ausgehend von 526 kt im Jahr 2035. Derselbe jährliche Kapazitätswachstum wird für jedes Jahr von 2036 bis 2050 angenommen.

Der resultierende Versorgungshochlauf stellt keine realistische Branchenprognose dar, da verschiedene externe Faktoren den Hochlauf der Versorgungskette beeinflussen – wie regulatorische Rahmenbedingungen, geopolitische Entwicklungen, Verbrauchertrends, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhersehbare wirtschaftliche Ereignisse. Stattdessen beschreibt er den maximal möglichen Hochlauf, der unter Berücksichtigung der industriellen Einschränkungen erreicht werden kann.

Die Lithiumversorgung für die EU-Mobilität wurde nach dem in → **Abschnitt 4.1.** dargestellten Ansatz abgeleitet und ist für Lithium in Abbildung 32 veranschaulicht.

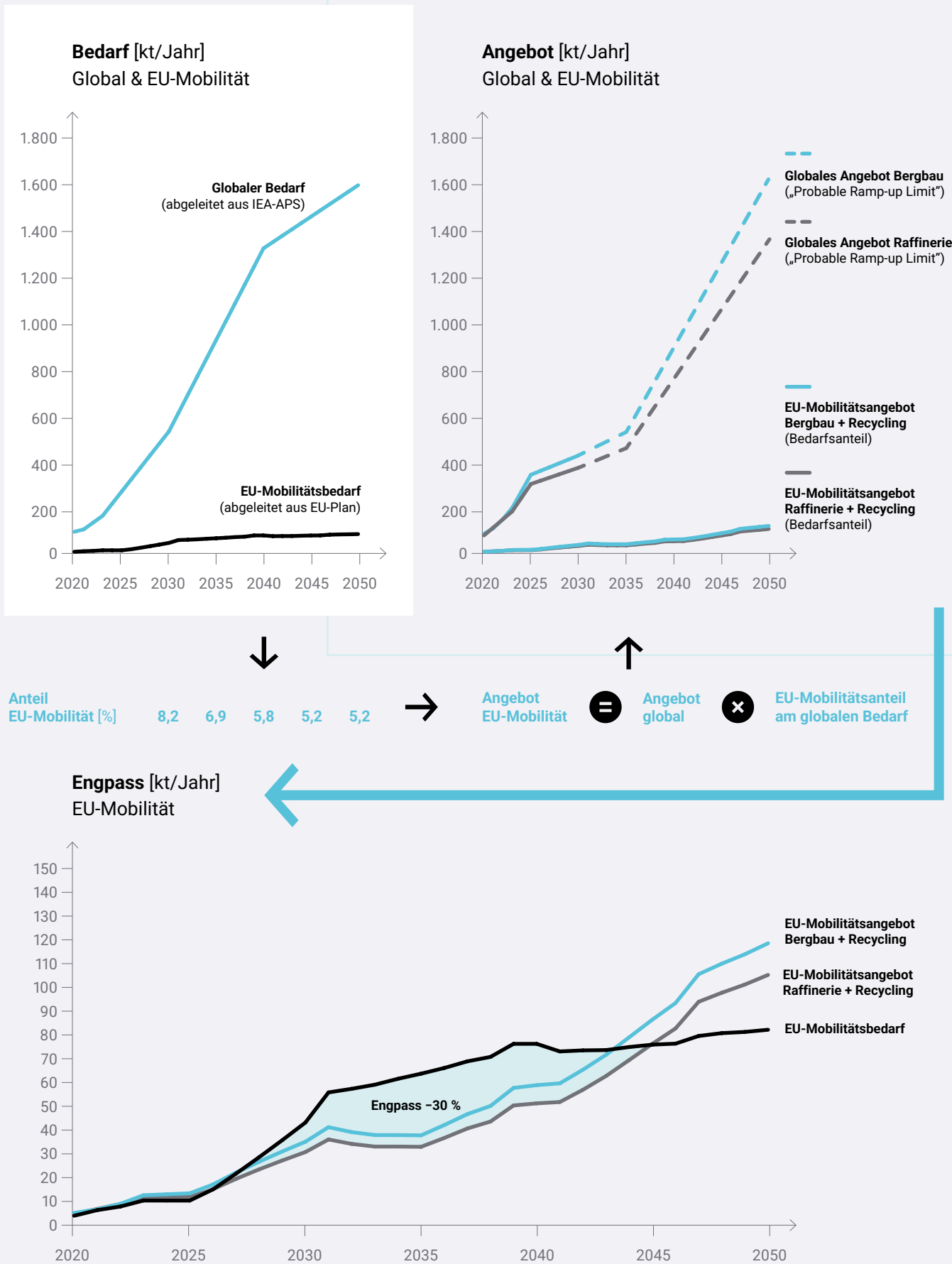


Abbildung 32: Ansatz zur Identifizierung von Batterie-Engpässen in der EU-Mobilität, jährliche Lithiumverfügbarkeit in kt/a.
 Quelle: IEA Global Critical Minerals Outlook 2024³⁰

Die globale primäre Lithium-Nachfrage wurde aus dem IEA-Bericht „Global Critical Minerals Outlook 2024³¹ unter dem „Announced Pledges“ (APS) Szenario übernommen, um die Ambitionen anderer Länder zu berücksichtigen. Die Nachfrage umfasst globale „Clean Technologies“ wie BEVs sowie alle anderen Lithiumanwendungen.

Im Jahr 2023 schätzte die IEA die weltweite Nachfrage auf 165 kt – 92 kt für „Clean Technologies“ und 73 kt für andere Anwendungen. Die globale sekundäre Versorgung und Wiederverwendung wurden auf 5 kt geschätzt. Daher wurde die globale primäre Lithium-Nachfrage auf 160 kt festgelegt. Zusätzliche Datenpunkte aus dem IEA-Bericht lagen für 2030, 2040 und 2050 vor, wobei zwischen ihnen eine lineare Interpolation angewendet wurde.

Wie in → **Abschnitt 4.1.3.1.** beschrieben, wurde die Lithium-Nachfrage für die EU-Mobilität unter dem „EU Ambition“-Szenario modelliert. Für jedes Jahr bis 2050 wurde der Anteil der globalen Nachfrage berechnet, der der EU-Mobilität zugeschrieben wird – beispielsweise 6,9 % im Jahr 2035 –, und auf die in Abbildung 31 abgeleitete globale primäre Lithiumversorgung angewendet. Diese Annahme impliziert keinen bevorzugten Zugang zu primärem Lithium für die EU-Mobilität im Vergleich zu anderen Regionen und Sektoren. Folglich hängt die Versorgung für die EU-Mobilität nicht nur von der globalen Hochlaufgeschwindigkeit der Kapazitäten ab, sondern auch von der Nachfrage anderer Regionen. Da die globale Lithium-Nachfrage und die Nachfrage der EU-Mobilität unterschiedlichen Entwicklungen folgen, ist der Anteil der Versorgung, der der EU-Mobilität zugewiesen wird, im Zeitverlauf nicht konstant. Er nimmt nach 2030 ab, da andere Länder ihre Ambitionen zur beschleunigten Einführung von Elektrofahrzeugen verstärken. Auf dieser Grundlage wird

prognostiziert, dass die primäre Lithiumversorgung für die EU-Mobilität zwischen 2030 und 2035 zurückgeht, obwohl die globalen Abbau- und Raffineriekapazitäten in diesem Zeitraum weiter steigen.

Für Batterierohstoffe ergänzt eine zusätzliche Versorgungsquelle die aus diesem Ansatz abgeleitete Versorgungskurve für die EU-Mobilität. Während sich die Engpassbewertung auf die primäre Versorgung mit kritischen Rohstoffen konzentrierte, wurde auch die Verfügbarkeit von Sekundärmaterialien modelliert, um sowohl die primäre als auch die sekundäre Versorgung abzubilden. Die aktuelle Regulierung zum Recycling von Batteriematerialien³² diente als Grundlage für die Modellierung der Sammel- und Rückgewinnungsraten für Lithium, Nickel und Kobalt. Für Graphit wurden die durchschnittlichen Sammel- und Rückgewinnungsraten von Lithium, Nickel und Kobalt angenommen. Für alle vier kritischen Rohstoffe ist geplant, die Sammelrate bis 2030 auf 70 % zu erhöhen, während die Rückgewinnungsraten mittelfristig je nach Material zwischen 80 % und 95 % liegen sollen.

Unter der Annahme, dass das resultierende Sekundärmaterial im europäischen Markt verbleibt und in neue Batteriezellen für den EU-Markt integriert werden kann, wurde die Verfügbarkeit von Sekundärmaterial auf Basis der durchschnittlichen Fahrzeuglebensdauer modelliert. Anschließend wurden Quoten für recyceltes Material in neuen Batterien für Pkw, Lkw und Busse berechnet. Die Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 33, zeigen, dass recyceltes Material in EU-Batterien ab 2040 einen signifikanten Einfluss hat, mit bis zu 27 % Sekundär-Lithium in neuen Pkw, Lkw und Bussen. In der Lithium-Engpassbewertung wird diese Menge zur Primärversorgung addiert und trägt dazu bei, potenzielle Engpässe in der Rohstoffversorgungskette zu entschärfen.

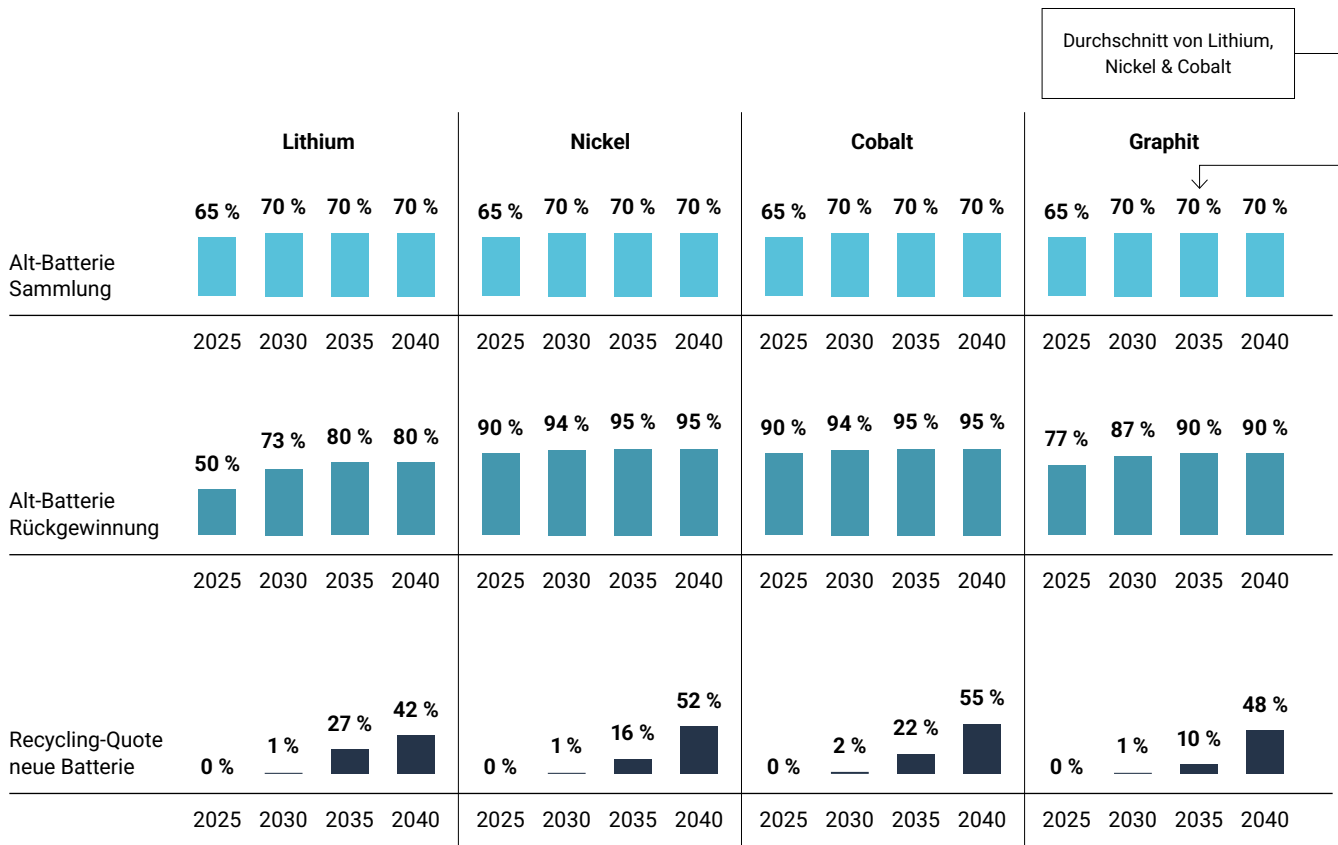


Abbildung 33: Sammel- und Rückgewinnungsraten für Batteriematerialien in der EU für Pkw sowie Lkw und Busse.
Quelle: European Regulation on Batteries and Waste Batteries³²

01 LITHIUM BERGBAU & RAFFINERIE

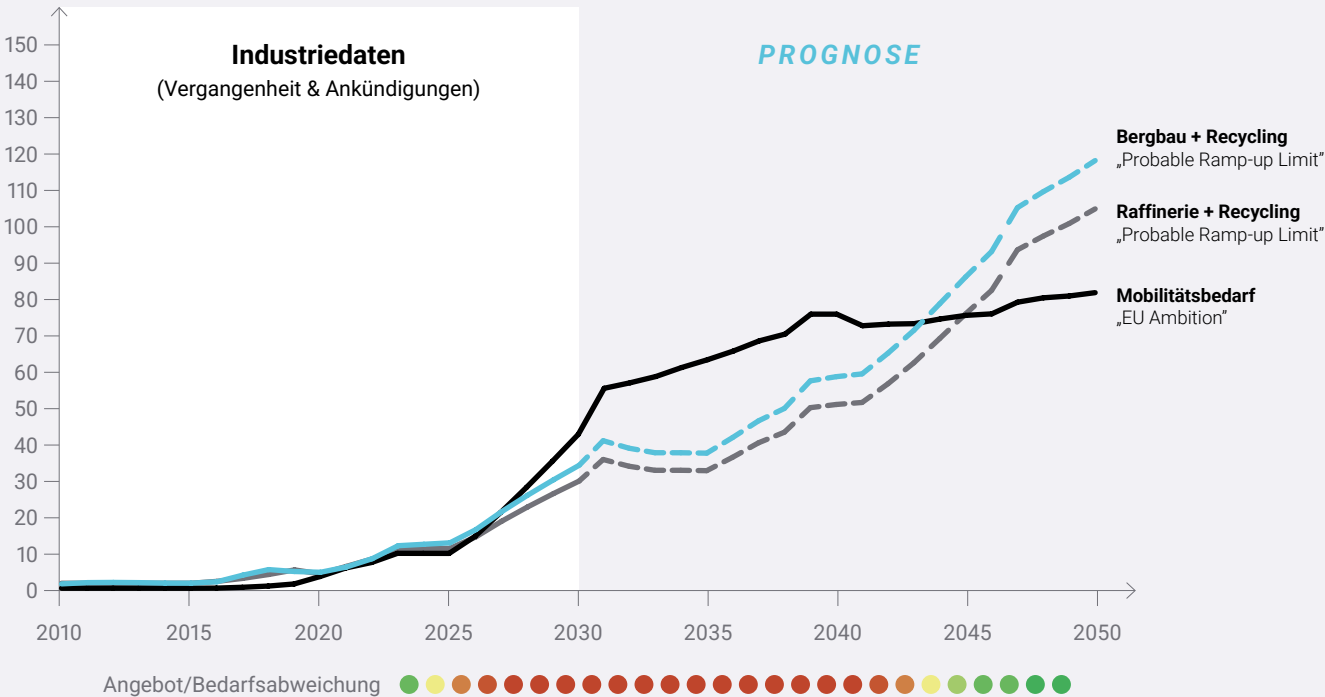


Abbildung 34: Vergleich der jährlichen Lithiumversorgung und -nachfrage in kt/a in der EU-Mobilität: Szenario „EU Ambition“.

Schließlich wurde die Lithiumversorgung mit der Lithiumnachfrage in der EU-Mobilität verglichen, um industrielle Engpässe oder Chancen zur Beschleunigung des BEV-Hochlaufs zu identifizieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 34 dargestellt.

Gemäß dem „EU Ambition“-Szenario wird erwartet, dass die Lithiumnachfrage zwischen 2025 und 2032 stark ansteigt, getrieben durch ambitionierte BEV-Neuzulassungen im Pkw-Segment. Dies führt ab 2027 unter dem „Probable Ramp-up Limit“-Szenario zu einer Engpasssituation mit einem durchschnittlichen jährlichen Versorgungsdefizit von rund 30 %.

Nach 2032 könnte das Wachstum der Lithiumnachfrage abnehmen, da ein großer Anteil der Neuzulassungen elektrifiziert ist. Der spätere Hochlauf von BEVs im Lkw- und Bussegment hält die Nachfrage jedoch bis 2040 hoch. Über 2040 hinaus wird prognostiziert, dass die Lithiumnachfrage für die EU-Mobilität stagniert, da der BEV-Hochlauf abgeschlossen ist und FCEVs Marktanteile gewinnen.

Ab 2040 beginnt das Recycling einen signifikanten Einfluss zu haben, und mit der globalen fortgeschrittenen Einführung von BEVs steigt die gesamte Lithiumversorgung für die EU-Mobilität. Engpässe dürften bis 2047 abklingen. Ab diesem Zeitpunkt könnten – sofern andere Engpassfaktoren dies zulassen – BEV-Neuzulassungen die im „EU Ambition“-Szenario angenommenen Werte übersteigen.

Der in dieser Analyse prognostizierte Lithium-Engpass – und seine Intensität – hat direkte Auswirkungen auf den Hochlauf von Elektrofahrzeugen in der EU, der im „Bottleneck-adjusted“-Szenario in → **Abschnitt 4.3.** bewertet wird.

4.2.2. Windkraftausrüstung für die eFuel-Produktion

In der Engpassbewertung wurde die Verfügbarkeit von Windkraftausrüstung als potenzieller limitierender Faktor für den Hochlauf erneuerbarer Energien in der EU sowie für die Produktion von grünem Wasserstoff und eFuels bewertet. Während die globale Versorgung für alle drei Anwendungen identisch ist, hängt die Auswirkung der Verfügbarkeit von Windkraftausrüstungen von der Kritikalität anderer Engpässe ab. Beispielsweise könnten Windkraftausrüstungen den Hochlauf von eFuels begrenzen, wenn andere Engpassfaktoren in der eFuel-Lieferkette weniger kritisch sind. Umgekehrt könnte dies für grünen Wasserstoff kein limitierender Faktor sein, wenn andere Einschränkungen bedeutender sind. Aus diesem Grund wurde die Bewertung für alle drei Anwendungen parallel durchgeführt. Dieses Beispiel konzentriert sich auf die Verfügbarkeit von Windkraftausrüstungen für die eFuel-Produktion.

Für den Zeitraum 2025–2030 wurde das Hochlauflimit für die meisten Engpassfaktoren aus der Summe bestehender Kapazitäten und aktueller Branchenankündigungen abgeleitet. Eine Ausnahme wurde für die Verfügbarkeit von Windkraft- und Photovoltaik-ausrüstungen sowie für die Installationsgeschwindigkeit von Wind- und Photovoltaikkraftwerken in der EU gemacht. Diese Lieferketten haben eine ausreichende Reife erreicht, um zukünftige Hochlauflimits auf Basis historischer Trends zu prognostizieren.

Die historische Verfügbarkeit von Windkraftausrüstungen – wie Rotorblätter, Naben, Gondeln, Türme, Leistungselektronik und Netzanschlüsse – wurde als direkt korrelierend mit den globalen Installationen von Windkraftwerken angenommen. Globale historische Daten zur installierten Windkraftkapazität der Inter-

national Renewable Energy Agency (IRENA)³³ wurden verwendet, um das Hochlauflimit für Windkraftausrüstungen zu prognostizieren.

Laut der Datenbank wurde die weltweit installierte Kapazität im Jahr 2023 auf 1.017 GW geschätzt, einschließlich Onshore- und Offshore-Windkraft. Zwischen 2024 und 2035 wurde angenommen, dass die neuen Zubauten mit der gleichen Geschwindigkeit wie in den Jahren 2012–2023 wachsen, basierend auf einer jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 13 %. Ab 2036 wird angenommen, dass sich der Hochlauf an der maximalen jährlichen Kapazitätssteigerung orientiert, die vor 2035 beobachtet wurde, nämlich 500 GW im Jahr 2035.

Abbildung 35 veranschaulicht die quantitativen Ergebnisse für die weltweit installierte Kapazität von Windkraftausrüstungen unter dem „Probable Ramp-up Limit“-Szenario.

Die Versorgung mit Windkraftausrüstungen für die EU-Mobilität wurde nach dem in → **Abschnitt 4.1.** dargestellten Ansatz abgeleitet und ist in Abbildung 36 veranschaulicht.

Die globale Nachfrage nach installierter Windkraftkapazität wurde aus dem IEA-Bericht World Energy Outlook 2023²³ unter dem „Announced Pledges“ (APS) Szenario abgeleitet, um die Ambitionen anderer Länder bei der Skalierung der Windenergie zur Erreichung der Klimaziele widerzuspiegeln. Ausgehend

24 WINDKRAFTAUSRÜSTUNG

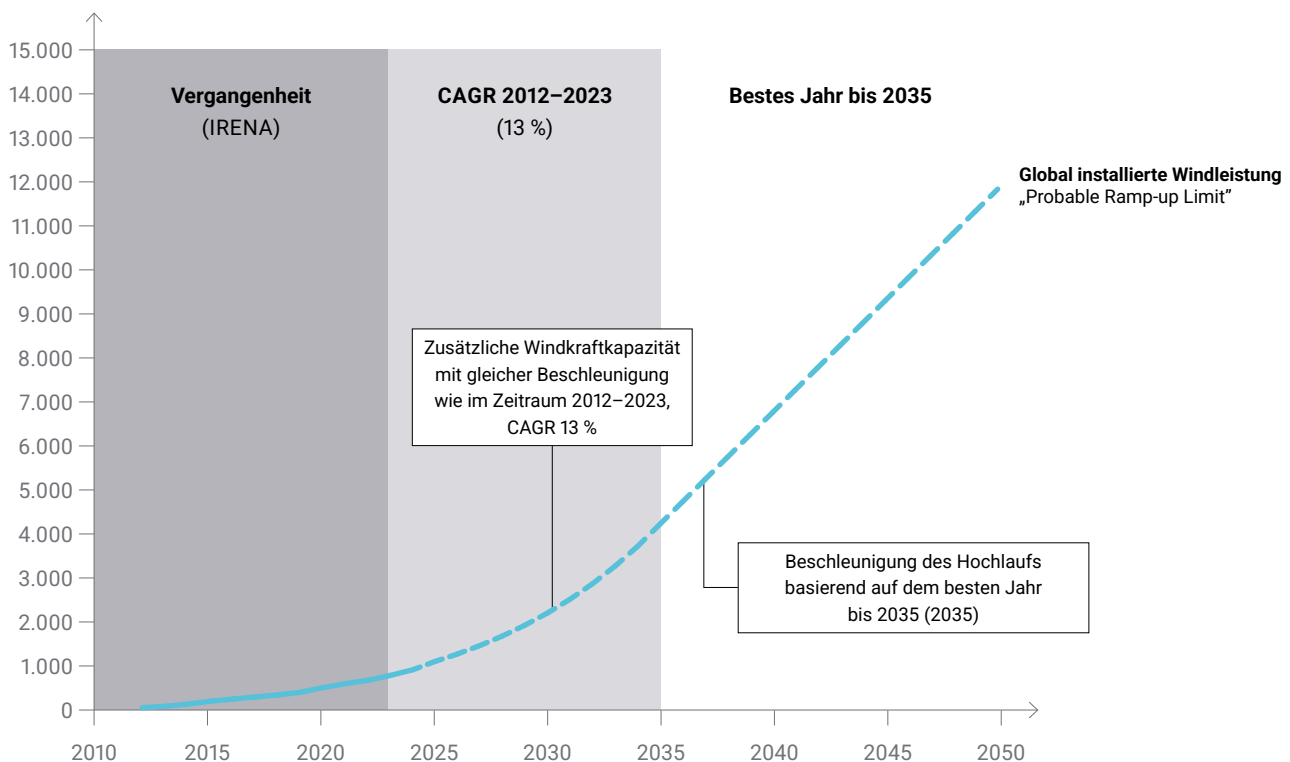


Abbildung 35: Weltweit installierte Kapazität von Windkraftausrüstungen in GW: Szenario „Probable Ramp-up Limit“. Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³

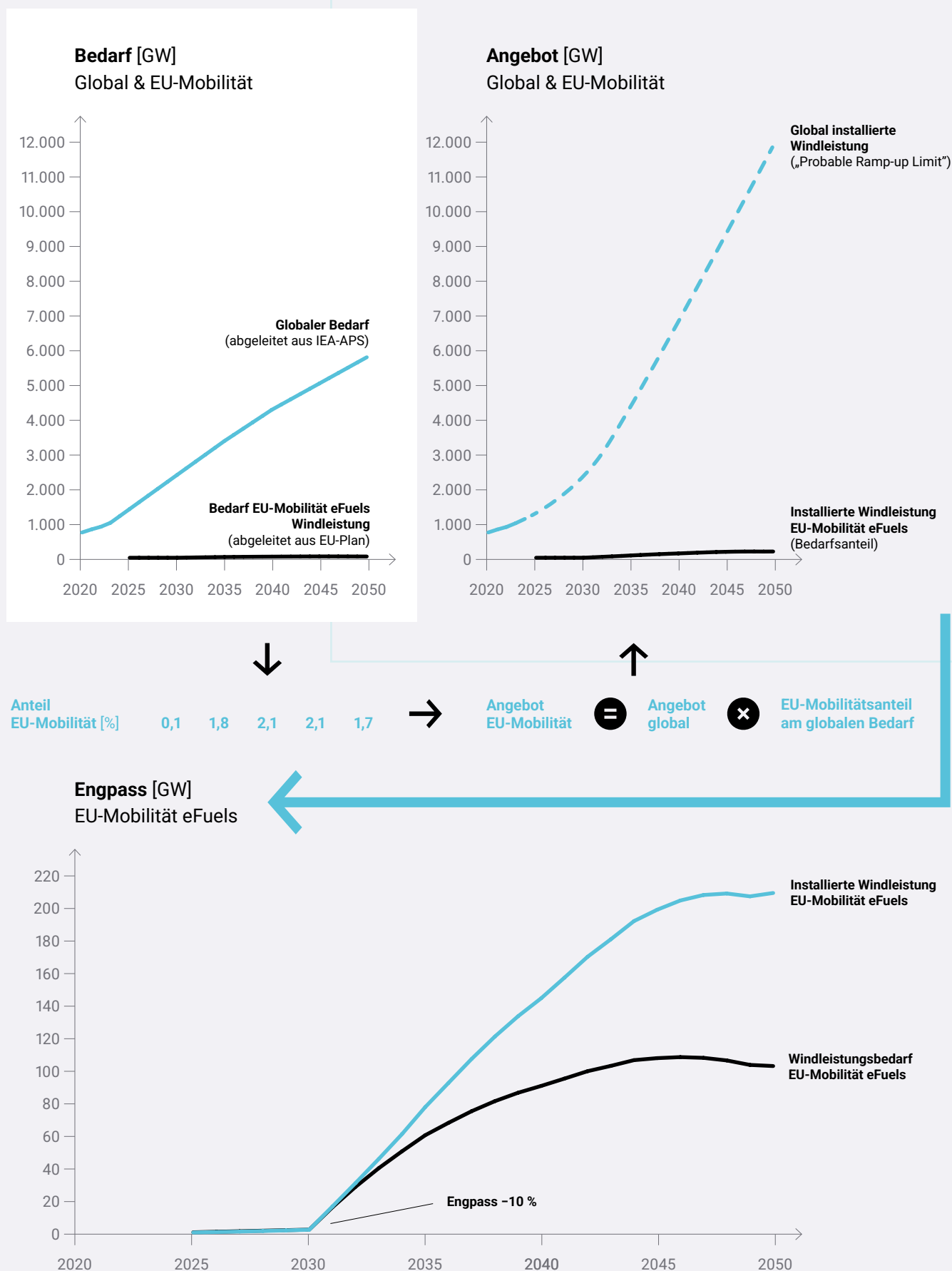


Abbildung 36: Ansatz zur Identifizierung von Engpässen für eFuels in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von Windkraftausrüstungen in GW.
 Quelle: IEA World Energy Outlook 2023²³

von der installierten Kapazität im Jahr 2023, bereitgestellt von IRENA, wurden Datenpunkte für 2030, 2035, 2040 und 2050 aus IEA-Daten extrahiert, wobei zwischen ihnen eine lineare Interpolation angewendet wurde.

Wie in → **Abschnitt 4.1.3.4.** beschrieben, wurde die Nachfrage nach installierter Windkraft für die Nutzung von eFuels in der EU-Mobilität gemäß dem „EU Ambition“-Szenario modelliert. Für jedes Jahr wurde der Anteil der globalen Nachfrage berechnet, der der EU-Mobilität zugeschrieben wird – beispielsweise 2,1 % im Jahr 2040 – und auf die in Abbildung 35 abgeleitete Versorgung angewendet.

Diese Annahme impliziert keinen bevorzugten Zugang für die EU-Mobilität gegenüber anderen Regionen und Sektoren, ebenso wenig für die eFuel-Produktion gegenüber anderen Anwendungen wie grünem Wasserstoff oder

der Erzeugung erneuerbarer Energien. Bis 2030 bleibt die eFuel-Nachfrage in der EU-Mobilität unter dem „EU Ambition“-Szenario marginal, was den geringen Anteil der für diese Anwendung zugewiesenen Windkraftausrüstungsversorgung erklärt. Ab 2030 beginnt die eFuel-Nachfrage anzusteigen, wodurch der Anteil der für diese Nutzung vorgesehenen Windkraftausrüstungen wächst. Insgesamt begrenzt der Bedarf an Windkraftkapazität in mehreren Märkten und Sektoren den Anteil der für die eFuel-Produktion in der EU-Mobilität verfügbaren Ausrüstungen.

Schließlich wurde die Versorgung mit Windkraftausrüstungen mit der Nachfrage für die eFuel-Anwendung in der EU-Mobilität verglichen, um industrielle Engpässe oder Chancen zur Beschleunigung des eFuel-Hochlaufs zu identifizieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 37 dargestellt.

24 WINDKRAFTAUSRÜSTUNG

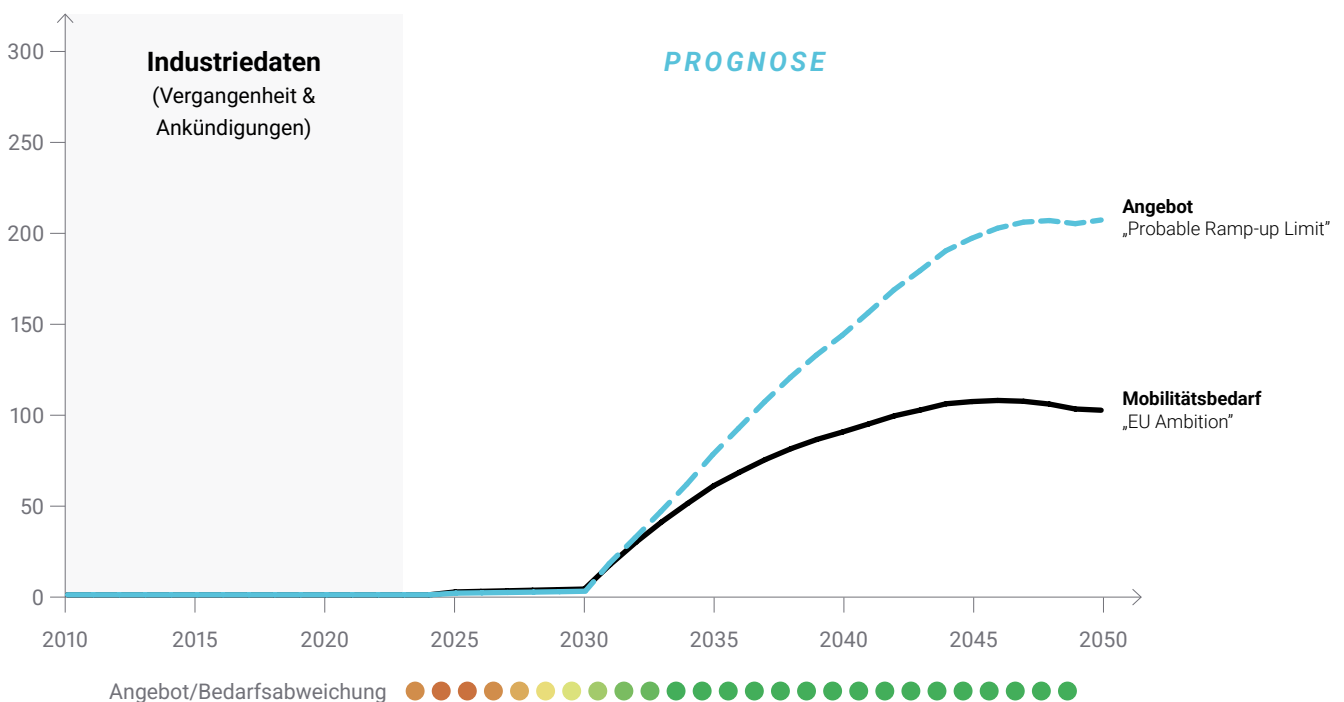


Abbildung 37: Vergleich von Angebot und Nachfrage für eFuels in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von Windkraftausrüstungen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Ab 2030 werden keine weiteren Einschränkungen durch die Verfügbarkeit von Windkraftausrüstungen erwartet, was bedeutet, dass der eFuel-Hochlauf intensiviert werden könnte – sofern andere Engpassfaktoren dies zulassen.

Gemäß dem „EU Ambition“-Szenario wird erwartet, dass die Kapazitätsnachfrage für Windkraftausrüstungen zur eFuel-Produktion in der EU-Mobilität in den nächsten fünf Jahren niedrig bleibt. In diesem Zeitraum wird unter dem „EU Ambition“-Szenario ein moderates Versorgungsdefizit von rund 10 % prognostiziert, verursacht durch einen starken Anstieg der globalen Nachfrage nach erneuerbaren Energien. Da die eFuel-Produktion dieselbe Lieferkette nutzt, könnte dieser Engpass ihren Hochlauf beeinträchtigen.

Nach 2030 beschleunigt sich die eFuel-Nachfrage in der EU-Mobilität, aber die globale Verfügbarkeit von Windkraftausrüstungen wächst noch schneller als die weltweite Nachfrage, wodurch sich die Versorgungseinschränkungen in allen Märkten und Sektoren verringern. Ab 2030 werden keine weiteren Einschränkungen durch die Verfügbarkeit von Windkraftausrüstungen erwartet, was bedeutet, dass der eFuel-Hochlauf intensiviert werden könnte – sofern andere Engpassfaktoren dies zulassen.

Der zwischen 2025 und 2030 identifizierte moderate Engpass wird den Hochlauf von eFuels in der EU-Mobilität beeinflussen. Der potenzielle Beitrag eines beschleunigten eFuel-Hochlaufs nach 2030 wird in → **Kapitel 5** unter dem „Industrial eFuel Potential“-Szenario analysiert. Während sich diese Engpassanalyse auf die industrielle Machbarkeit konzentriert, werden zusätzliche limitierende Faktoren wie Investitionssicherheit und Regulierung in → **Kapitel 6** behandelt.

4.2.3. Elektrolyseausrüstungen für die eFuel-Produktion

In der Engpassbewertung wurde die Verfügbarkeit von Elektrolyseausrüstungen als potenzieller limitierender Faktor für den Hochlauf von grünem Wasserstoff und eFuels untersucht. Während das globale Angebot für beide Anwendungen identisch ist, hängt der Einfluss der Verfügbarkeit von Elektrolyseausrüstungen von der Kritikalität anderer Engpässe ab. Beispielsweise könnte die Verfügbarkeit von Elektrolyseausrüstungen den Hochlauf von eFuels nicht begrenzen, wenn andere Engpassfaktoren in der eFuel-Lieferkette kritischer sind. Umgekehrt könnte sie zu einem limitierenden Faktor für grünen Wasserstoff werden, wenn andere Einschränkungen weniger bedeutend sind. Aus diesem Grund wurde die Bewertung für beide Anwendungen parallel durchgeführt. Dieses Beispiel konzentriert sich auf die Verfügbarkeit von Elektrolyseausrüstungen für die eFuel-Produktion.

Gemäß dem in → **Abschnitt 4.1.** beschriebenen Ansatz wurde der Hochlauf basierend auf der historischen Elektrolyseur-Produktionskapazität bis 2024 und den Branchenankündigungen für 2030 prognostiziert, wie im IEA Global Hydrogen Review 2024³⁴ berichtet. Zwischen diesen Datenpunkten wurde die Produktionskapazität linear interpoliert. Um die Vergleichbarkeit mit der installierten Elektrolysekapazität sicherzustellen, die für die

eFuel-Produktion erforderlich ist, wurde die globale Elektrolyseur-Produktionskapazität in die weltweit installierte Elektrolysekapazität umgerechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 38 dargestellt.

Für den Zeitraum 2030–2035 wurde das „Probable Ramp-up Limit“-Szenario basierend auf beschleunigten Kapazitätserweiterungen unter Verwendung der CAGR aus dem Zeitraum 2025 bis 2030 prognostiziert. Beispielsweise wird für 2030 eine weltweit installierte Elektrolysekapazität von 628 GW gemäß den Ankündigungen erwartet. Die Anwendung einer CAGR von 39 % – abgeleitet aus dem Zeitraum 2025–2030 – ergibt 873 GW im Jahr 2031.

Ab 2036 wird das Hochlauflimit durch die maximal beobachtete jährliche Kapazitätser-

weiterung vor 2035 definiert. Das beste Jahr für die weltweite Elektrolyseur-Produktion wird voraussichtlich 2035 sein, mit einer Erweiterung um 916 GW im Vergleich zu 2034. Die Annahme, dass sich dieses „beste Jahr“ im Jahr 2036 wiederholt, führt zu einer installierten Elektrolysekapazität von 4.178 GW im Jahr 2036, ausgehend von 3.262 GW im Jahr 2035. Dieselbe jährliche Erweiterung wird für jedes Jahr von 2036 bis 2050 angenommen.

Die Identifizierung potenzieller Engpässe in der eFuel-Versorgung für die EU-Mobilität aufgrund der Verfügbarkeit von Elektrolyseurausrüstungen wurde gemäß dem in Abbildung 39 dargestellten Ansatz bewertet.

Die Analyse wurde durch den Vergleich von Nachfrage und Angebot durchgeführt, wobei

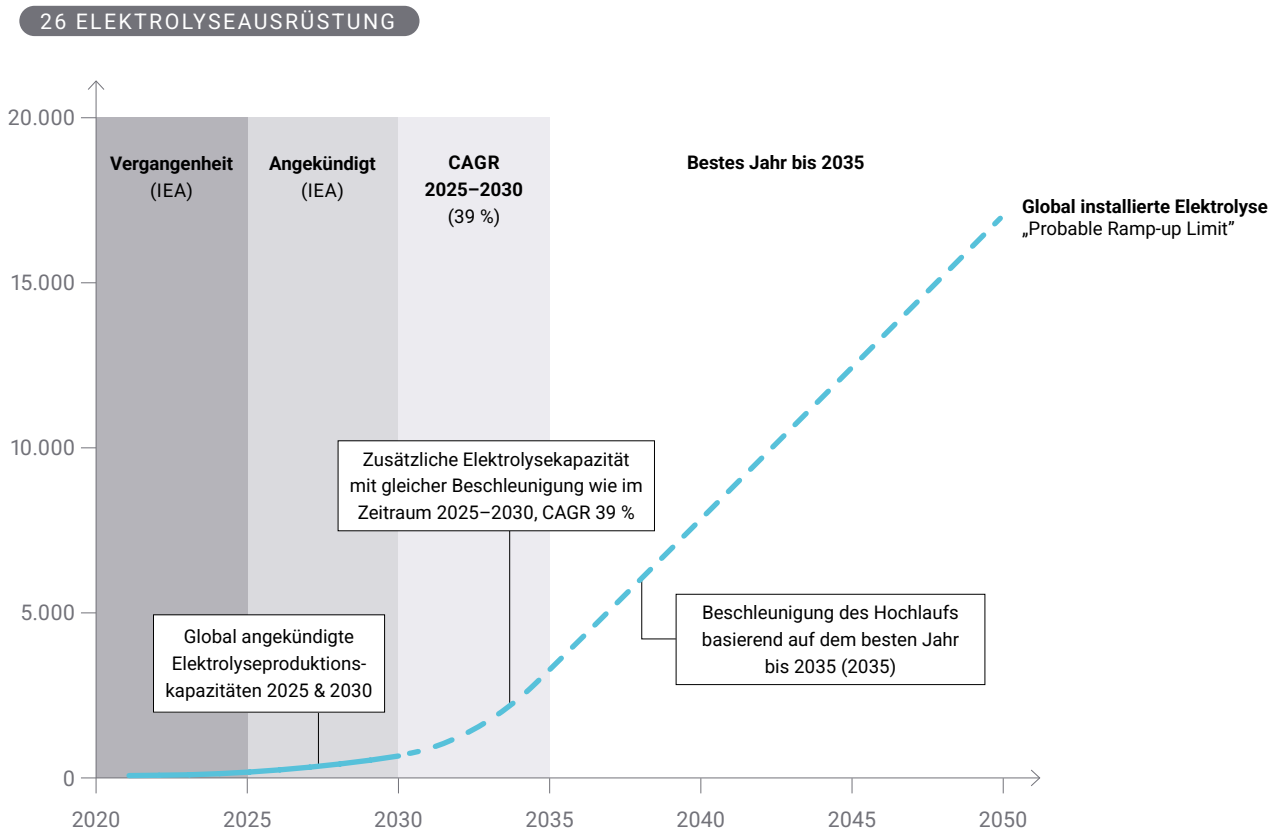


Abbildung 38: Weltweit installierte Elektrolyseausrüstungskapazität in GW: Szenario „Probable Ramp-up Limit“. Quelle: IEA Global Hydrogen Review 2024³⁴

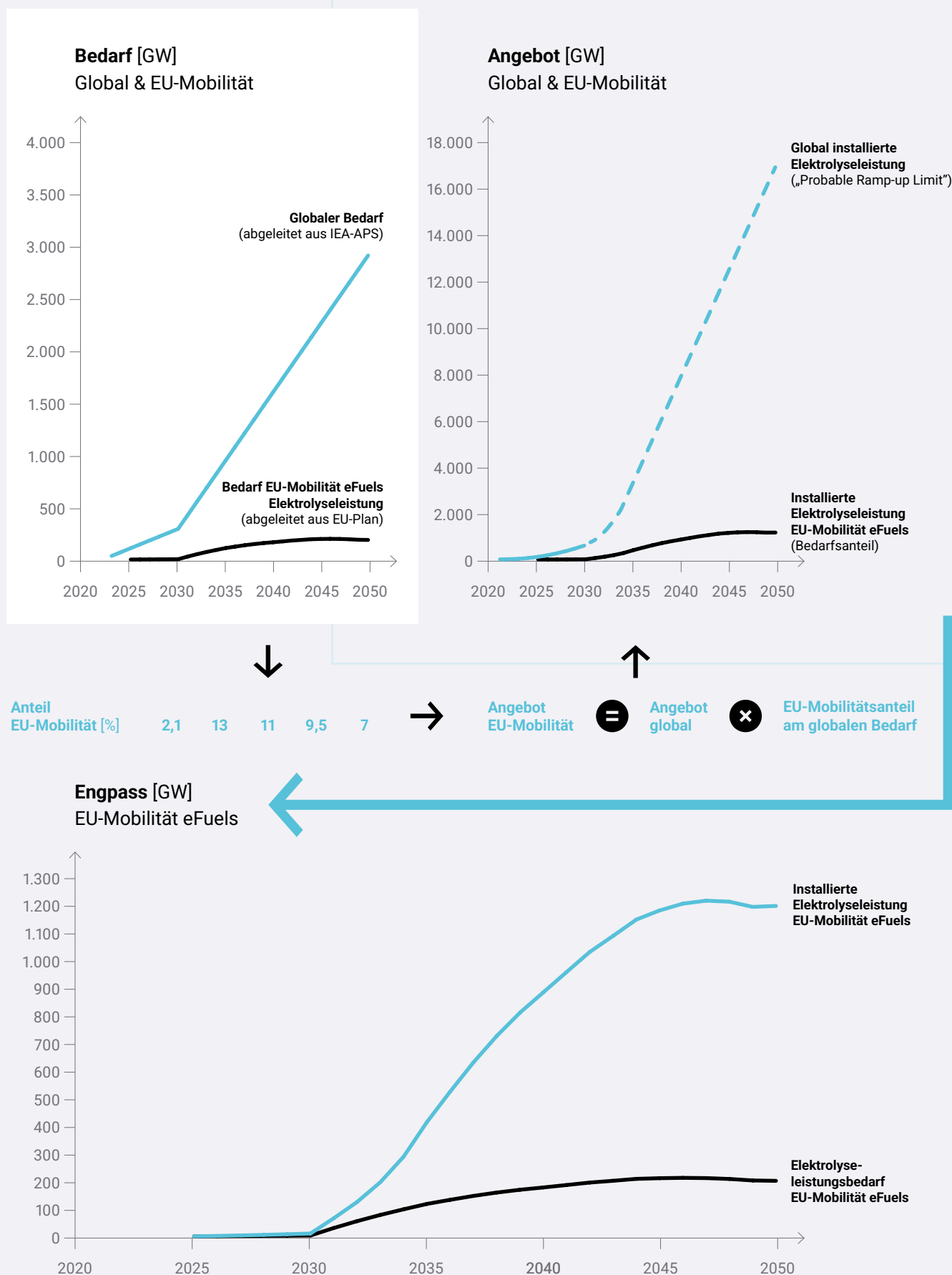


Abbildung 39: Ansatz zur Identifizierung von Engpässen für eFuels in der EU-Mobilität, installierte Elektrolyseausstattungskapazität in GW.
Quelle: IEA World Energy Outlook 2023²³

der Fokus auf der installierten Elektrolysekapazität lag. Die weltweite Nachfrage nach installierter Elektrolysekapazität wurde aus der prognostizierten Nachfrage nach grünem Wasserstoff im IEA-„Announced Pledges“-Szenario²³ abgeleitet, wobei zwischen den angegebenen Datenpunkten für 2022, 2030 und 2050 eine lineare Interpolation angewendet wurde.

Wie in → **Abschnitt 4.1.3.4.** beschrieben, wurde die Nachfrage nach installierter Elektrolysekapazität für die Nutzung von eFuels in der EU-Mobilität gemäß dem „EU Ambition“-Szenario modelliert. Jedes Jahr bestimmt der Anteil der weltweiten Nachfrage den Anteil des globalen Angebots, um einen proportionalen

Zugang zu Elektrolyseausrüstungen über Länder und Sektoren hinweg sicherzustellen.

Daraus ergibt sich, dass die Entwicklung des Angebots an Elektrolyseausrüstungen, das für die eFuel-Produktion in der EU-Mobilität vorgesehen ist, eng mit der eFuel-Nachfrage im „EU Ambition“-Szenario verknüpft ist.

Schließlich wurde das Angebot an Elektrolyse-ausrüstungen mit der Nachfrage für die eFuel-Anwendung in der EU-Mobilität verglichen, um industrielle Engpässe oder Chancen zur Beschleunigung des eFuel-Hochlaufs zu identifizieren. Die Ergebnisse, basierend auf der installierten Elektrolysekapazität, sind in Abbildung 40 dargestellt.

26 ELEKTROLYSEANRÜSTUNG

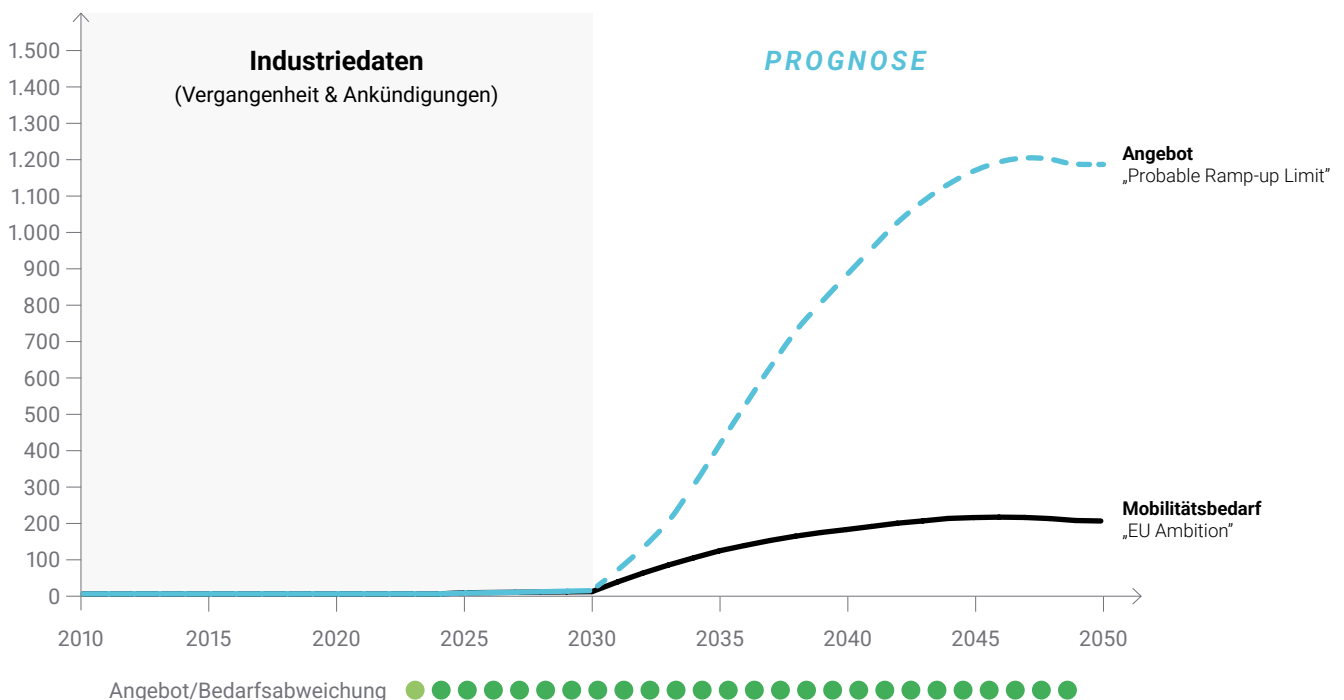


Abbildung 40: Vergleich von Angebot und Nachfrage für eFuels in der EU-Mobilität, installierte Elektrolyseanlagen in GW: Szenario „EU Ambition“.



Gemäß dem „EU Ambition“-Szenario wird die Nachfrage nach Elektrolyseausstattungs-kapazität für die eFuel-Produktion in der EU-Mobilität voraussichtlich bis 2030 gering bleiben und sich dann im Einklang mit dem Anstieg der eFuel-Nachfrage, der im selben Szenario modelliert wurde, beschleunigen. Die von der Europäischen Kommission prognostizierte Stagnation der eFuel-Nachfrage ab 2045 führt zu einem Plateau bei der installierten Elektrolysekapazität.

Aus Sicht der Elektrolyseur-Produktion bedeutet dies, dass für die eFuel-Produktion in der EU-Mobilität keine zusätzlichen Elektrolyse-ausrüstungen erforderlich sein werden – abgesehen von Anlagenmodernisierungen –, da die bestehenden Anlagen ausreichen, um die Nachfrage zu decken. Der im „Probable Ramp-up Limit“-Szenario modellierte Hochlauf der Elektrolyseur-Produktionskapazität führt nicht zu Engpässen für die eFuel-Produktion in der EU-Mobilität. Im Gegenteil: Er schafft Spielraum für eine Beschleunigung der eFuel-Produktion ab 2030.

Der im „Probable Ramp-up Limit“-Szenario modellierte Hochlauf der Elektrolyseur-Produktionskapazität führt nicht zu Engpässen für die eFuel-Produktion in der EU-Mobilität.

Dieser Aspekt und seine Implikationen werden in → **Kapitel 5** im Rahmen des „Industrial eFuel Potential“-Szenarios detailliert untersucht. Während sich die Engpassanalyse auf die industrielle Machbarkeit konzentriert, werden zusätzliche limitierende Faktoren wie Investitionssicherheit und Regulierung in → **Kapitel 6** behandelt.

4.2.4. Installation von eFuel-Anlagen

Zusätzlich zu erneuerbarer Energie und der Verfügbarkeit von Elektrolyseausstattungen wurde die Geschwindigkeit der weltweiten Installation von eFuel-Produktionsanlagen als potenzieller limitierender Faktor für den Hochlauf der eFuel-Produktion für die EU-Mobilität bewertet. Gemäß der in → **Abschnitt 4.1.** dargestellten Methodik wurde das Hochlauf-limit für diesen Engpassfaktor auf globaler Ebene prognostiziert, basierend auf den historischen eFuel-Produktionskapazitäten bis 2024 und Branchenankündigungen bis 2030, abgeleitet aus dem Porsche Consulting eFuel Project Tracker. Diese Ankündigungen wurden mit Industriedaten der eFuel Alliance⁵, der IEA⁶, and des Methanol Institute⁷ validiert. Die identifizierten Aktivitäten wurden detailliert analysiert, wobei die Ergebnisse in → **Kapitel 6** dargestellt sind.

Bis 2030 wird eine eFuel-Produktion von 80 Milliarden Litern Benzinäquivalent angekündigt, einschließlich sowohl Power-to-Liquid als auch Power-to-Gas-Aktivitäten. Zwischen 2030 und 2035 wird angenommen, dass das Hochlauf-limit der CAGR des Zeitraums 2025–2030 folgt – 66 % –, was zu einer weltweiten Produktionskapazität von 990 Milliarden Litern Benzinäquivalent bis 2035 führt, entsprechend 16 % des weltweiten Ölverbrauchs im Jahr 2023 laut Daten von FuelsEurope³⁵.

Nach 2035 wird das Hochlauf-limit durch die maximal beobachtete jährliche Kapazitätserweiterung vor 2035 definiert. Der schnellste

27 eFUEL-ANLAGENINSTALLATION

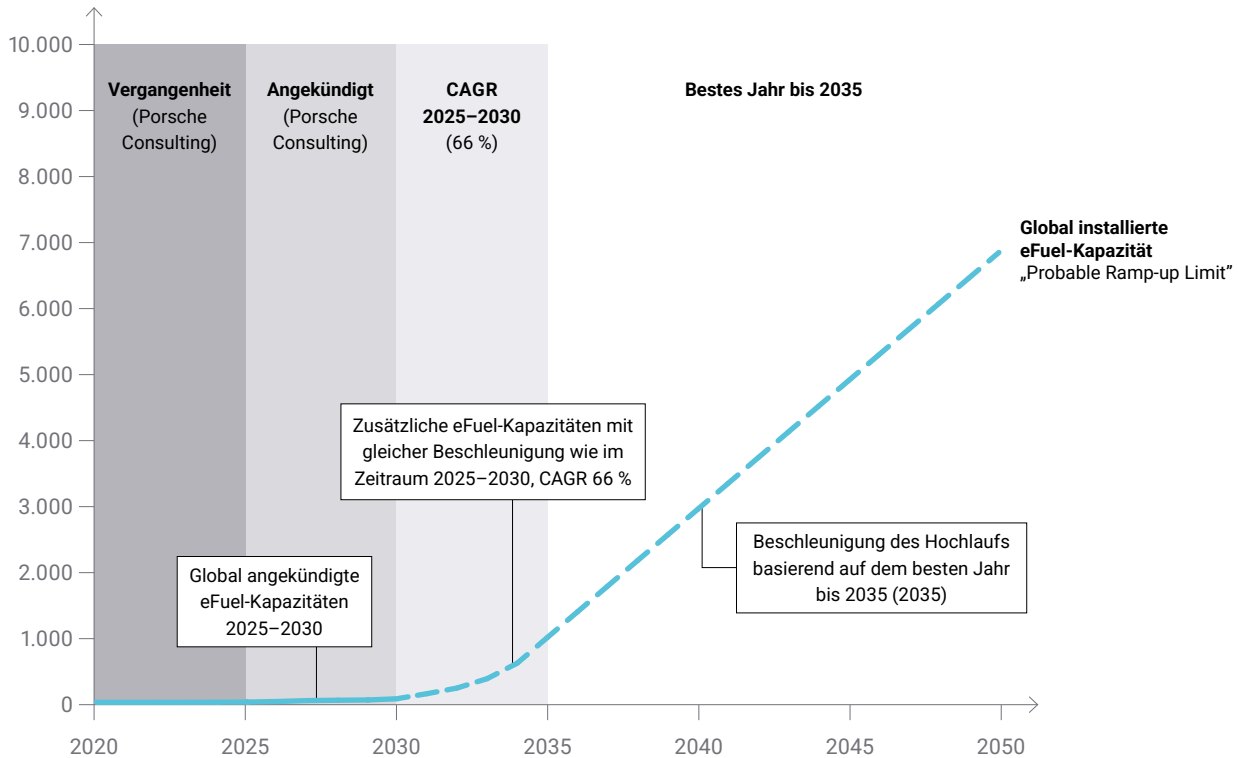


Abbildung 41: Weltweit installierte jährliche eFuel-Produktionsanlagen-Kapazität in Milliarden Litern Benzinäquivalent: Szenario „Probable Ramp-up Limit“.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, Methanol Institute⁷, IEA Hydrogen Infrastructure Database⁶

Hochlauf der eFuel-Produktion wird für 2035 prognostiziert, mit einer Erweiterung um 392 Milliarden Liter Benzinäquivalent. Ab 2036 wird angenommen, dass sich diese jährliche Erweiterung jedes Jahr wiederholt. Die globalen Angebots-Ergebnisse für das „Probable Ramp-up Limit“-Szenario sind in Abbildung 41 dargestellt.

Die Identifizierung potenzieller Engpässe in der eFuel-Versorgung für die EU-Mobilität aufgrund der Geschwindigkeit der Installation von eFuel-Anlagen wurde gemäß dem in Abbildung 42 dargestellten Ansatz bewertet.

Die quantitative Engpassbewertung basierte auf dem Vergleich der Geschwindigkeit der weltweiten Installation von eFuel-Anlagen mit

der globalen eFuel-Nachfrage. Die weltweite eFuel-Nachfrage wurde unter Verwendung des IEA-„Announced Pledges“-Szenarios²³ und einer linearen Interpolation zwischen den verfügbaren Datenpunkten prognostiziert. Wie in → **Abschnitt 4.1.3.4.** beschrieben, wurde die erforderliche eFuel-Produktionskapazität für die EU-Mobilität jährlich im Energiemodell über alle in dieser Studie analysierten Mobilitätssektoren hinweg gemäß dem „EU Ambition“-Szenario modelliert. Jedes Jahr bestimmt der Anteil der EU-Mobilität an der weltweiten Nachfrage den entsprechenden Anteil am globalen eFuel-Angebot. Dieser Ansatz stellt sicher, dass der Zugang zu eFuel-Produktionsanlagen proportional zur Nachfrage erfolgt und eine angemessene Verteilung der Kapazitäten über Länder und Sektoren ermöglicht.

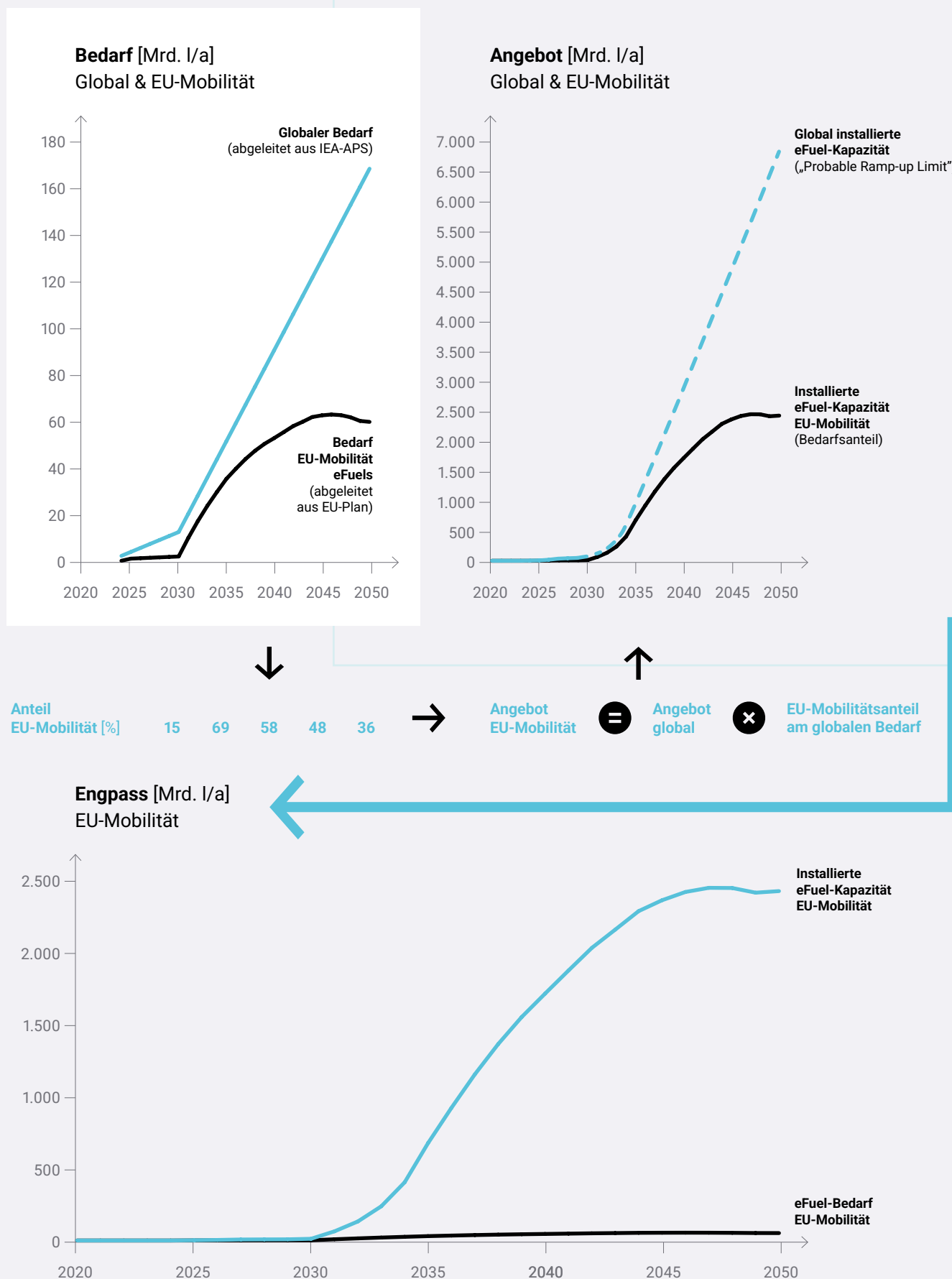


Abbildung 42: Ansatz zur Identifizierung von Engpässen für eFuels in der EU-Mobilität, installierte jährliche eFuel-Produktionsanlagen-Kapazität in Milliarden Litern Benzinäquivalent.
Quelle: IEA World Energy Outlook 2023²³

Basierend auf globalen Ankündigungen, die aus dem IEA APS abgeleitet wurden, bleibt die weltweite Ambition zum Hochlauf der eFuel-Produktion bis 2040 gering. Folglich würde die EU-Mobilität mehr als 50 % der weltweiten Nachfrage beanspruchen, um das „EU Ambition“-Szenario der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission zu erfüllen. Nach 2040 sinkt der Nachfrageanteil der EU-Mobilität, da andere Länder ihre Hochlaufpläne beschleunigen und die Nachfrage der EU-Mobilität stagniert – unter der Annahme erfolgreicher Reduktionen des Verbrauchs flüssiger Kraftstoffe durch die Elektrifizierung. Infolgedessen wird erwartet, dass der Anteil der EU-Mobilität am globalen Angebot bis 2040 hoch bleibt und danach abnimmt.

Die daraus resultierende verfügbare eFuel-Produktionskapazität für die EU-Mobilität wurde

mit der Nachfrage der EU-Mobilität verglichen, um potenzielle industrielle Engpässe oder Chancen zur Beschleunigung des eFuel-Hochlaufs zu identifizieren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 43 dargestellt.

Gemäß dem „EU Ambition“-Szenario wird die realisierbare Geschwindigkeit der Installation von eFuel-Anlagen für die EU-Mobilität voraussichtlich bis 2030 gering bleiben und sich dann beschleunigen, sobald die eFuel-Nachfrage im selben Szenario steigt. Aus Sicht der industriellen Machbarkeit werden keine Engpässe erwartet, die das Erreichen des „EU Ambition“-Szenarios verhindern. Die Verfügbarkeit der Ausrüstungen für erneuerbare Energien wird bis 2030 als der limitierendste Faktor in der eFuel-Lieferkette angesehen, wie in → **Abschnitt 4.2.2.** detailliert beschrieben. Dies schafft Spielraum für eine Beschleunigung

27 eFUEL-ANLAGENINSTALLATION

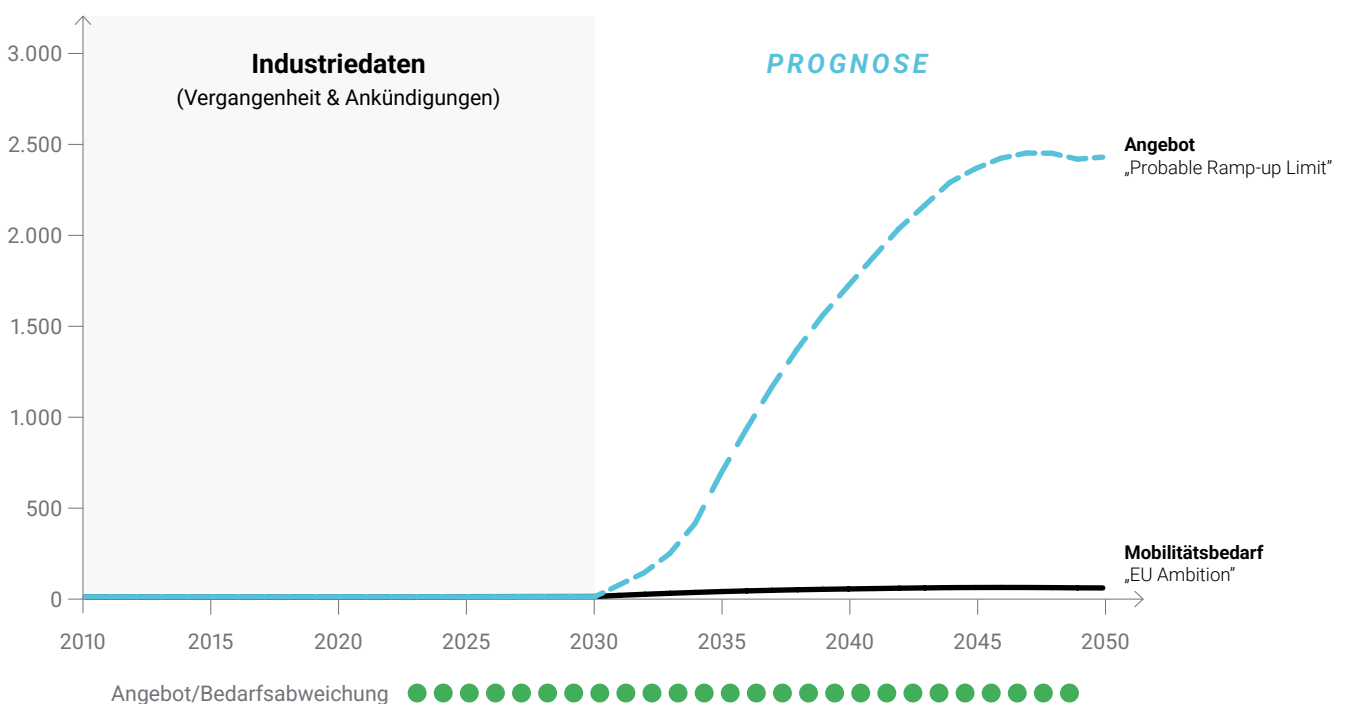


Abbildung 43: Vergleich von Angebot und Nachfrage für eFuels in der EU-Mobilität, installierte jährliche eFuel-Produktionsanlagen-Kapazität in Milliarden Litern Benzinäquivalent: Szenario „EU Ambition“.



der eFuel-Produktion nach 2030, deren Implikationen in → **Kapitel 5** im Rahmen des „Industrial eFuel Potential“-Szenarios umfassend untersucht werden. Während sich die Engpassanalyse auf Faktoren der industriellen Machbarkeit konzentriert, werden zusätzliche Einschränkungen wie Investitionssicherheit und regulatorische Rahmenbedingungen in → **Kapitel 6** behandelt.

4.3. Überblick über Ergebnisse und Sensitivitäten

Nach Abschluss der industriellen Engpassbewertung für alle 27 Faktoren wurden die Ergebnisse analysiert, um Implikationen innerhalb jedes Bereichs der Lieferkette zu identifizieren. Abbildung 44 zeigt potenzielle Angebotsdefizite über alle industriellen Engpassfaktoren hinweg, basierend auf dem „EU Ambition“-Szenario für die Nachfrage und dem „Probable Ramp-up Limit“-Szenario für das Angebot.

In der Batterielieferkette werden bis 2044 unter dem „EU Ambition“-Szenario Engpässe erwartet, hauptsächlich aufgrund begrenzter Lithium- und Nickelabbaukapazitäten, mit Defiziten von etwa 30 % bzw. 20 % im betrachteten Zeitraum. Wie in → **Abschnitt 4.2.** für Lithium hervorgehoben, treiben ambitionierte Hochlaufpläne für PHEVs und BEVs in der EU und weltweit einen starken Anstieg der Rohstoffnachfrage entlang der Batterielieferkette. Aufgrund langer Vorlaufzeiten und begrenzter Projektankündigungen in der Bergbauindustrie wird erwartet, dass der Hochlauf der Primärversorgung bis 2035 eingeschränkt bleibt. Nach 2035 könnten zusätzliche Kapazitäten verfügbar werden, während die Nickel-Nachfrage mit dem Übergang zu nickelfreien Zellchemien voraussichtlich zurückgeht. Bis 2040 trägt die wachsende Bedeutung der Sekundärmaterialversorgung sowie die weitreichende Elektrifizierung in mehreren globalen Regionen, einschließlich der EU, dazu bei, den Druck auf die Lieferkette bis 2045 zu verringern. Nach

2047 könnte die Verfügbarkeit von Lithium und Nickel die im „EU Ambition“-Szenario angenommenen Nachfrageniveaus übersteigen.

Um das „EU Ambition“-Szenario zu erreichen, werden auch die Lieferketten für Kobalt und batteriegerechten Graphit unter Druck geraten, wenngleich nur moderate Engpässe prognostiziert werden, mit einem Angebotsdefizit von bis zu 5 %. Anoden- und Kathoden-Aktivmaterialien werden voraussichtlich nicht die Geschwindigkeit der Elektrifizierung in der EU-Mobilität begrenzen. Ebenso wird die Produktionskapazität für Batteriezellen wahrscheinlich keine Einschränkung der industriellen Machbarkeit darstellen, obwohl andere Faktoren wie Investitionssicherheit den Hochlauf verlangsamen könnten. Zusammenfassend könnten die Lieferketten für Lithium und Nickel den Hochlauf von BEVs und PHEVs bis 2047 verzögern. Die Implikationen für die Flottenumstellung und die Klimaziele werden in → **Abschnitt 4.4.** analysiert.

In der Lieferkette für erneuerbaren Strom werden moderate Hochlaufbegrenzungen über mehrere Engpassfaktoren hinweg erwartet. Kurzfristig könnte die Versorgung mit Ausrüstungen für erneuerbare Kraftwerke im Hinblick auf das ambitionierte Szenario der Europäischen Kommission unter Druck geraten, bis neue Produktionskapazitäten die Situation entschärfen – bis 2027 für Photovoltaik und bis 2030 für Windkraft. Bis 2035 wird die Installation von Windkraftanlagen voraussichtlich der limitierendste Faktor für den Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung in der EU sein. Diese Einschränkungen können nicht durch einen schnelleren Hochlauf der Photovoltaik-Leistung kompensiert werden, da auch die Installationskapazität bis 2031 unter Druck bleibt. Da Strom über mehrere Sektoren hinweg geteilt wird, wirkt sich dies bis 2035 auf den Anteil des für die Mobilität verfügbaren erneuerbaren Stroms aus und damit auf das Tempo der Dekarbonisierung.

Langfristig könnte die Netzkapazität Schwierigkeiten haben, mit der steigenden Stromnachfrage Schritt zu halten, die durch Mobilität und die Elektrifizierung anderer Sektoren wie Wärme und Industrie getrieben wird. Ohne signifikante Verbesserungen bei Hochlauf-

geschwindigkeit und Effizienz wird ein Kapazitätsdefizit von bis zu 20 % erwartet. Aufgrund kurzer Vorlaufzeiten und der hohen Ambition angekündigter Aktivitäten werden industrielle Einschränkungen für die öffentliche Ladeinfrastruktur nicht erwartet.

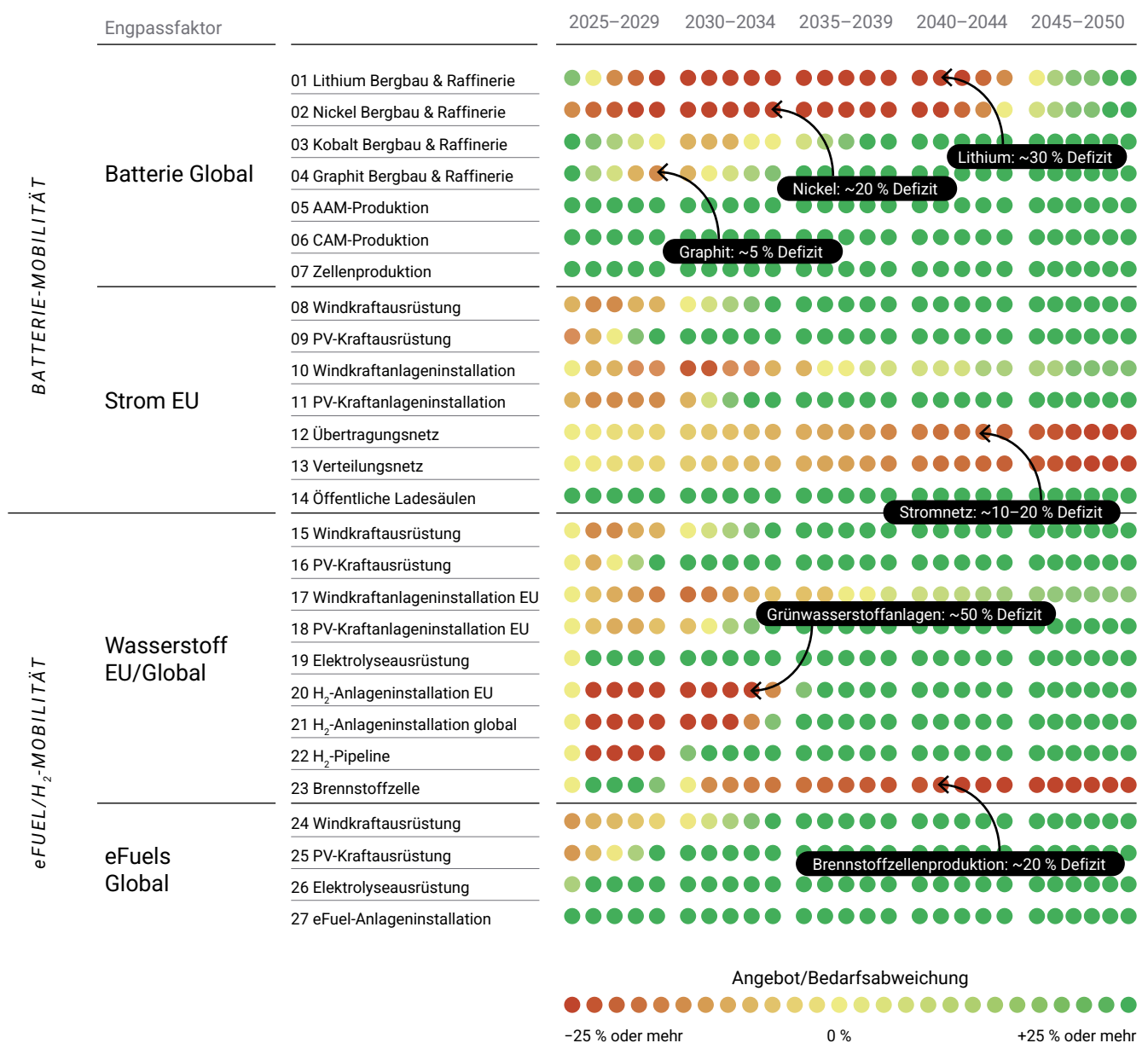


Abbildung 44: Abweichungen von Angebot und Nachfrage der Engpassfaktoren in %: Szenario „EU Ambition“ und „Probable Ramp-up Limit“. AAM: Anoden-Aktivmaterial | CAM: Kathoden-Aktivmaterial | PV: Photovoltaik



In der Batterielieferkette werden bis 2044 unter dem „EU Ambition“-Szenario Engpässe erwartet, hauptsächlich aufgrund begrenzter Lithium- und Nickelabbaukapazitäten, mit Defiziten von etwa 30 % bzw. 20 % im betrachteten Zeitraum. [...] Nach 2047 könnte die Verfügbarkeit von Lithium und Nickel die im „EU Ambition“-Szenario angenommenen Nachfrageniveaus übersteigen.



Die Engpassanalyse zeigt, dass die Lieferketten für grünen Wasserstoff erheblich unter Druck geraten werden, hauptsächlich aufgrund des langsameren Hochlaufs der Produktionsanlagen für grünen Wasserstoff sowohl in der EU als auch in anderen Regionen im Vergleich zu dem Tempo, das im „EU Ambition“-Szenario erforderlich ist. Dies führt bis 2033 zu einem geschätzten Defizit von 50 % bei der Versorgung mit grünem Wasserstoff. Etwa die Hälfte der geplanten Produktionskapazität für grünen Wasserstoff soll sich auf europäische Wind- und Photovoltaikanlagen stützen, was bis 2035 zusätzliche Einschränkungen verursacht – ähnlich den Engpässen, die für die Versorgung mit erneuerbarem Strom identifiziert wurden. Darüber hinaus wird erwartet, dass der Wasserstofftransport bis 2029 durch das Tempo des Ausbaus der Pipeline-Infrastruktur innerhalb der EU begrenzt wird. Während dies wasserstoffbetriebene Schiffe, die leichter Zugang zu importiertem grünem Wasserstoff haben, möglicherweise nicht beeinträchtigt, könnte es die Einführung in anderen Mobilitätssegmenten erheblich verzögern. Wenn globale Elektrolyseur-Hersteller ihre angekündigten Pläne umsetzen und das prognostizierte Tempo beibehalten, wird nicht erwartet, dass die Elektrolyseausrüstung den Hochlauf von grünem Wasserstoff in der EU einschränkt.

Aktuelle Industrieankündigungen deuten darauf hin, dass die Brennstoffzellen-Lieferkette noch nicht darauf vorbereitet ist, die Kapazitäten bereitzustellen, die erforderlich sind, um das „EU Ambition“-Szenario zu erfüllen.

Die Engpassanalyse der globalen eFuel-Lieferkette zeigt, dass die Deckung der EU-Mobilitätsnachfrage nach eFuels bis 2030 eine Herausforderung darstellen wird, hauptsächlich aufgrund des Mangels an Ausrüstung für erneuerbare Energien und der begrenzten Erweiterungen der eFuel-Produktionskapazität. Ab 2030 wird erwartet, dass zusätzliche

Anlageninstallationen und eine erhöhte Reaktionsfähigkeit der Hersteller von Ausrüstung für erneuerbare Energien den Hochlauf beschleunigen. Die Verfügbarkeit von Elektrolyseausrüstung wird voraussichtlich die Umsetzung des „EU Ambition“-Szenarios nicht behindern, insbesondere weil andere Länder einen späteren Hochlauf von eFuels und grünem Wasserstoff planen. Das aktuelle „EU Ambition“-Szenario lässt Spielraum für eine beschleunigte Einführung von eFuels bis 2050. Die Auswirkungen werden in → **Kapitel 5** im Detail unter dem „Industrial eFuel Potential“-Szenario bewertet.

Um die Robustheit der Engpassanalyse sicherzustellen, wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die sich auf zwei Dimensionen konzentrieren. Die erste Dimension ist die industrielle Hochlaufgrenze, für die zwei Szenarien für jeden Engpassfaktor untersucht wurden, wie in → **Abschnitt 4.1.** eingeführt: das „Probable Ramp-up Limit“-Szenario und das „Progressive Ramp-up Limit“-Szenario. Die zweite Dimension betrifft den Anteil der Versorgung, der der EU-Mobilität zugeordnet wird. Es wurde angenommen, dass die für die EU-Mobilität vorgesehene Versorgung proportional zu ihrem Nachfrageanteil ist. Diese Sensitivitätsanalyse berücksichtigt eine potenzielle Abweichung von dieser Annahme um ± 30 %. Die Ergebnisse sind in Abbildung 45 dargestellt.

Die Sensitivitätsanalyse bestätigt das Fortbestehen der zentralen Engpässe, die im Basis-szenario „Probable Ramp-up Limit“ und „Fair Share“ identifiziert wurden.

Im konservativsten Fall, in dem die EU-Mobilität 30 % weniger Versorgung im Rahmen des „Probable Ramp-up Limit“-Szenarios erhält, verschärfen sich die Engpässe und halten länger an. Beispielsweise erreichen die Defizite bei Lithium und Nickel in den 2030er-Jahren bis zu 60 %, während Graphit und Kobalt bis 2040 für den Hochlauf von BEVs kritisch



HOCHLAUFGESCHWINDIGKEIT

PROBABLE

2025–2029 2030–2034 2035–2039 2040–2044 2045–2050

EU-MOBILITÄTSANTEIL

-30 %



BATTERIE-MOBILITÄT

eFUEL/H₂-MOBILITÄT

FAIR SHARE



BATTERIE-MOBILITÄT

eFUEL/H₂-MOBILITÄT

+30 %



BATTERIE-MOBILITÄT

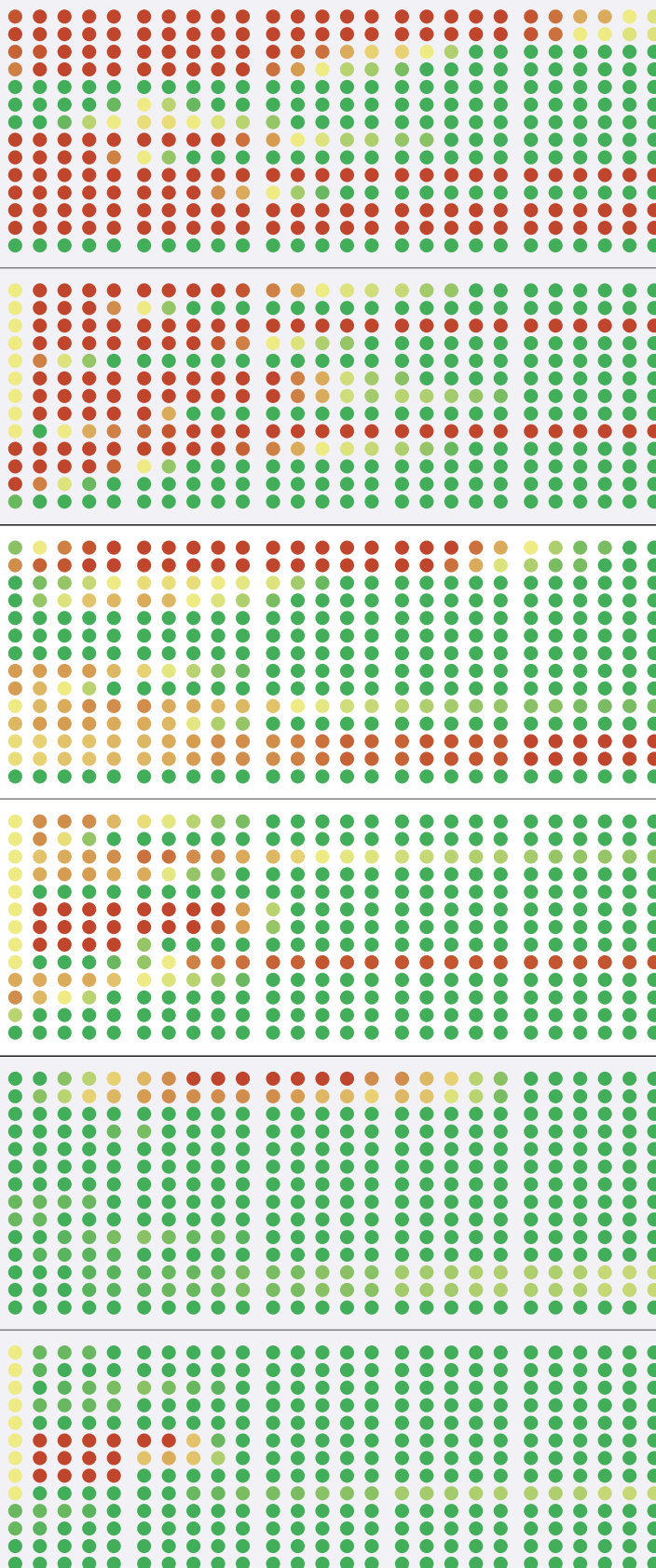
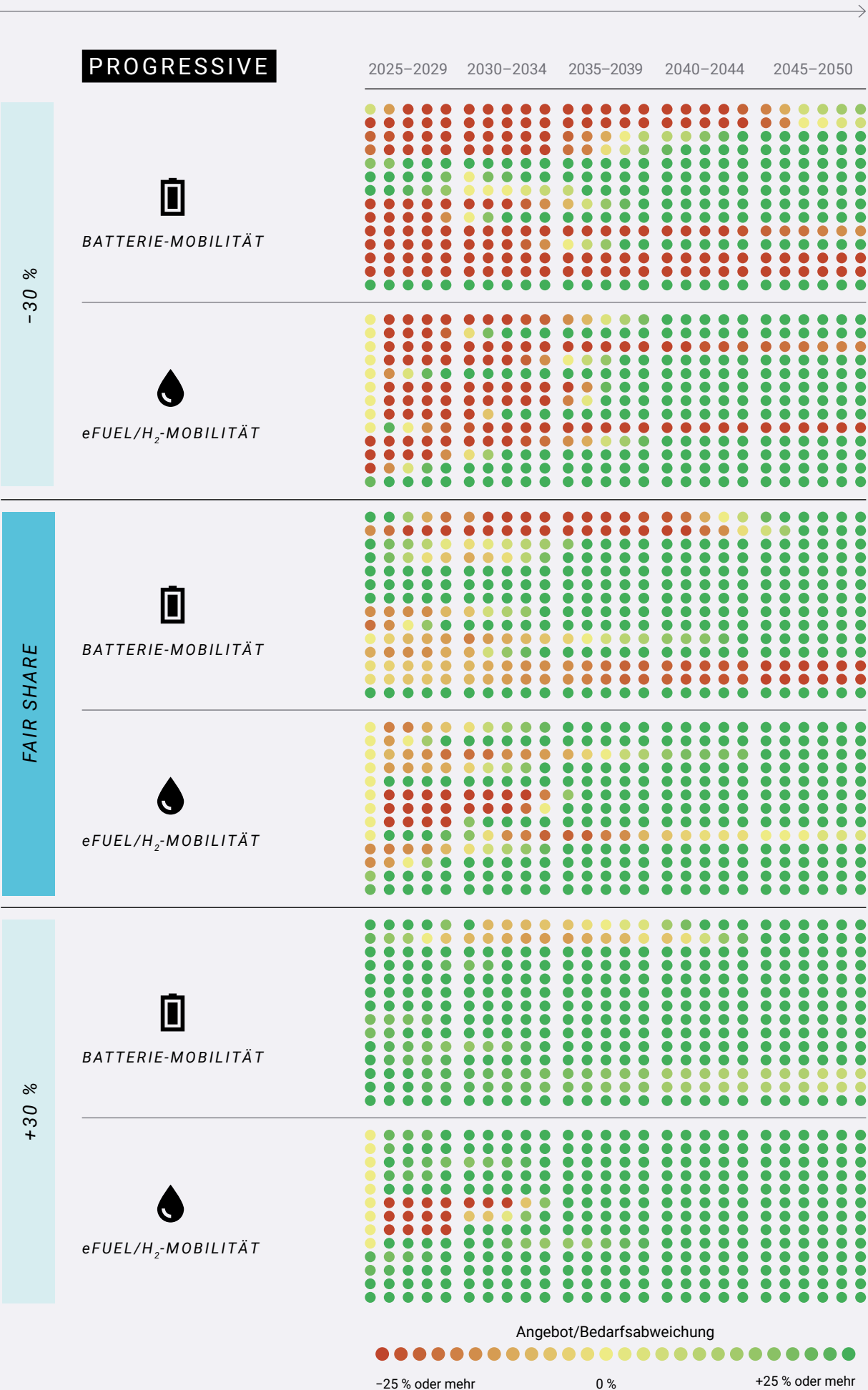
eFUEL/H₂-MOBILITÄT

Abbildung 45: Sensitivitäten bei Abweichungen von Angebot und Nachfrage der Engpassfaktoren in %: Szenario „EU Ambition“.



werden, mit Versorgungslücken von bis zu 30 % in den am stärksten eingeschränkten Jahren. Die Versorgung mit Anoden- und Kathoden-Aktivmaterialien sowie die Batterie-zellenproduktion bleibt in diesem Szenario engpass-frei. In der Lieferkette für erneuerbaren Strom verschärfen sich globale Engpässe bei Windkraftausrüstungen, mit Defiziten von bis zu 30 % bis 2035. Während des gesamten Zeitraums wird die Installationsgeschwindigkeit von Windkraftanlagen in der EU als kritischer Faktor für die Nutzung erneuerbarer Energien in BEVs prognostiziert, was zu Versorgungslücken bei Windkraft von bis zu 40 % führt. Ähnliche Herausforderungen treten in der Lieferkette für grünen Wasserstoff auf, bedingt durch globale Engpässe bei Windkraftausrüstungen und einen langsamen Hochlauf von Kraftwerken in der EU. Engpässe bei der Installation von Wasserstoffanlagen sind stärker ausgeprägt als im Basisszenario und führen in den frühen Hochlaufjahren zu einem Versorgungsdefizit von 80 %, bevor sich die Lage bis 2038 entspannt. Für eFuels könnte der Hochlauf durch die Verfügbarkeit globaler Wind- und Photovoltaikausrüstungen bis 2036 begrenzt sein – verglichen mit 2030 im Basisszenario – mit Versorgungslücken von über 30 % bis 2030.

Im Gegensatz dazu werden in einem stark progressiven Szenario, in dem die EU-Mobilität 30 % mehr Versorgung erhält und die industrielle Kapazität sich gemäß dem „Progressive Ramp-up Limit“-Szenario entwickelt, mehrere Engpässe im Vergleich zum Basisszenario entschärft. Beispielsweise stellen die Verfügbarkeit von Kobalt und Graphit kein Risiko mehr für die Elektrifizierungszeitpläne dar. Allerdings bleiben die Lieferketten für Lithium und Nickel unter Druck, mit Defiziten von 5-10 % zwischen 2030 und 2035. In diesem Szenario verschwinden alle Engpässe in den Lieferketten für erneuerbaren Strom und eFuels, während die Installationsgeschwindigkeit von

Wasserstoffanlagen bis 2032 weiterhin kritisch für die EU-Mobilität bleibt.

Insgesamt bestätigt die Sensitivitätsanalyse die Robustheit der industriellen Engpässe, die im „Probable Ramp-up Limit“-Szenario mit einem „Fair Share“ der Versorgung für die EU-Mobilität identifiziert wurden. Während zusätzliche limitierende Faktoren – wie Regulierung, geopolitische Dynamiken, Kundenverhalten, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhersehbare wirtschaftliche Ereignisse – die im „EU Ambition“-Szenario angenommene Transformation verzögern könnten, wurden industrielle Engpässe quantifiziert und ihre Auswirkungen auf die Antriebs- und Energiewende in der EU-Mobilität in den folgenden Abschnitten bewertet.

4.4. Angepasste Neuzulassungen und Bestandsflottenentwicklung für die Straßenmobilität

Das „Bottleneck-adjusted“-Szenario wurde entwickelt, um die Geschwindigkeit der Mobilitätswende der EU zu bewerten, falls industrielle Engpässe nicht gemindert werden können. In diesem Szenario wird das Transformationstempo angepasst, um den Druck auf die Lieferketten zu reduzieren und gleichzeitig deren Auslastung zu maximieren. Lieferketten, die als potenziell ausbaufähig identifiziert wurden, werden bis zu ihren maximalen Kapazitäten hochgefahren – mit Ausnahme von eFuels, für die Beschleunigungsmöglichkeiten in → **Kapitel 5** detailliert beschrieben sind. Dieses Szenario stellt keine realistische Branchenprognose dar, da zusätzliche externe Faktoren den Hochlauf über die Antriebs- und Energieversorgungsketten beeinflussen – wie regulatorische Rahmenbedingungen, geopolitische Entwicklungen, Verbrauchertrends, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhersehbare wirtschaftliche Ereignisse. Stattdessen beschreibt das „Bottleneck-adjusted“-Szenario

den maximal möglichen Hochlauf, der unter Berücksichtigung der industriellen Einschränkungen erreicht werden kann. Abbildung 46 zeigt die Anteile der Antriebsarten innerhalb

des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen unter den „EU Ambition“ und „Bottleneck-adjusted“-Szenarien. Im „Bottleneck-adjusted“-Szenario wurden die Neuzulassungen

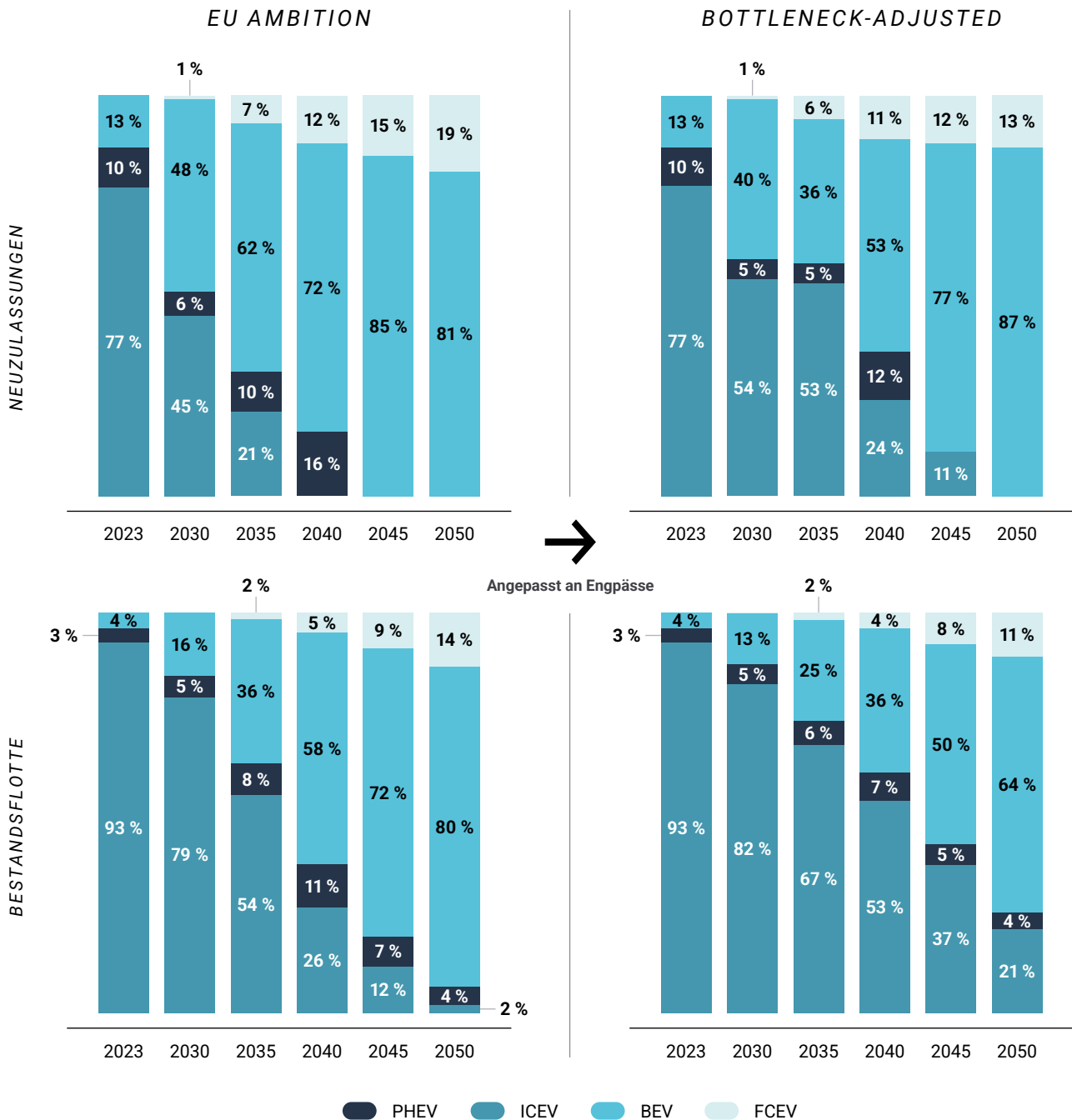


Abbildung 46: Anteile der Antriebsarten in der Pkw-Bestandsflotte und bei Neuzulassungen: Szenario „EU Ambition“ vs. „Bottleneck-adjusted“.



für jede Antriebsart auf Basis der Verfügbarkeit der Lieferketten bestimmt, gemäß dem in → **Abschnitt 4.1.4.** beschriebenen Ansatz, und die resultierenden Bestandsflottenanteile entsprechend berechnet.

Aufgrund industrieller Engpässe in der Versorgung mit Batterierohstoffen wird prognostiziert, dass die Neuzulassungen von BEVs deutlich langsamer wachsen als im Szenario der Europäischen Kommission, insbesondere zwischen 2030 und 2045. Weitere Aspekte – wie regulatorische Entwicklungen, geopolitische Dynamiken, Konsumverhalten, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhersehbare wirtschaftliche Ereignisse – könnten den Hochlauf entlang der Lieferketten zusätzlich verzögern. Die größte Lücke wird für 2035 erwartet, wobei BEVs weniger als 40 % Marktanteil erreichen, verglichen mit über 60 % unter „EU Ambition“. Bis 2040 bleibt eine Differenz von 20 % bei den Neuzulassungen zwischen den beiden Szenarien bestehen. Diese Verlangsamung wird durch industrielle Engpässe verursacht, die durch den gleichzeitig geplanten Hochlauf von BEVs in der EU und anderen globalen Regionen entstehen.

Hinsichtlich der Bestandsflottenzusammensetzung wird der Hochlauf von BEVs im Pkw-Segment voraussichtlich um etwa fünf Jahre verzögert. Unter der Annahme, dass die Mobilitätsbedarfe – und damit die Bestandsflottengröße – auf dem aktuellen Niveau bleiben, wird diese Verzögerung durch andere Antriebstechnologien wie ICEVs ausgeglichen.

Während die Neuzulassungen von BEVs voraussichtlich bis 2045 eingeschränkt bleiben, könnte danach ein beschleunigter Hochlauf erfolgen, sodass bis 2050 ein Anteil von 87 % an den Neuzulassungen erreicht wird, verglichen mit 81 % im „EU Ambition“-Szenario. Trotz dieses langfristigen Potenzials wird prognostiziert, dass der BEV-Bestandsflotten-

anteil bis 2050 nur 64 % erreicht und damit unter dem Zielwert von 80 % bleibt. Ebenso führen Engpässe in der Brennstoffzellen-Lieferkette zu einem geringeren FCEV-Bestandsflottenanteil im Jahr 2050 – 11 % gegenüber 14 % unter „EU Ambition“. Folglich bleibt der Anteil von ICEVs und PHEVs in der Bestandsflotte höher als geplant, bei etwa 60 % im Jahr 2040 und 25 % im Jahr 2050, verglichen mit 37 % und 6 % im „EU Ambition“-Szenario.

Aufgrund industrieller Engpässe in der Versorgung mit Batterierohstoffen wird prognostiziert, dass die Neuzulassungen von BEVs deutlich langsamer wachsen als im Szenario der Europäischen Kommission. [...] Weitere Aspekte – wie regulatorische Entwicklungen, geopolitische Dynamiken, Konsumverhalten, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhersehbare wirtschaftliche Ereignisse – könnten den Hochlauf entlang der Lieferketten zusätzlich verzögern.

Ebenso wurde die realisierbare Durchdringung neuer Antriebsarten angepasst, um den Druck auf die Antriebslieferketten im Lkw- und Bussegment zu verringern, wie in Abbildung 47 dargestellt.

Im Lkw- und Bussegment folgt die im „EU Ambition“-Szenario modellierte Transformation der Antriebsarten einem ähnlichen Muster wie im Pkw-Segment. Engpässe in den globalen Batterielieferketten setzen den



Abbildung 47: Anteile der Antriebsarten in der Lkw- und Busbestandsflotte und bei Neuzulassungen: Szenario „EU Ambition“ vs. „Bottleneck-adjusted“.



Hochlauf von BEVs in der Lkw- und Busmobilität unter Druck. Dies führt zu einer verzögerten Dominanz von Elektrofahrzeugen in diesem Segment, mit bis zu fünf Jahren Verzögerung bei den Neuzulassungen im „Bottleneck-adjusted“-Szenario. Die Berücksichtigung von Lieferkettenengpässen reduziert die BEV-Anteile bei den Neuzulassungen von 21 % auf 11 % im Jahr 2035 und von 31 % auf 23 % im Jahr 2040. Folglich wird die gleiche Verzögerung bei der BEV-Durchdringung der Bestandsflotte erwartet, mit 14 % gegenüber 24 % im Jahr 2040 und 27 % gegenüber 36 % im Jahr 2045.

Das Lkw- und Bussegment profitiert jedoch von spezifischen Vorteilen, die den Druck auf den BEV-Hochlauf verringern. Während für BEVs langfristig prognostiziert wird, dass sie die Marktanteile dominieren, spielen wasserstoffbetriebene Fahrzeuge ebenfalls eine

bedeutende Rolle und erreichen bis 2050 fast 40 % der Neuzulassungen. Zudem erfolgt die BEV-Transformation später als im Pkw-Segment. Das bedeutet, dass der Hochlauf von batterieelektrischen Lkw und Bussen weniger stark von der kritischen Phase für Batterielieferketten zwischen 2025 und 2035 betroffen ist. Mit anderen Worten: Dieses Segment benötigt intensiven Zugang zu Batterielieferketten, wenn andere Segmente und globale Märkte ihren BEV-Hochlauf bereits abgeschlossen haben. Diese Dynamik könnte sich ändern, falls andere Segmente ihre Ambitionen überarbeiten und die BEV-Einführung verzögern.

Da nickelbasierte Zellchemien in diesem Segment keinen großen Anteil am Batteriemarkt ausmachen, ergeben sich die Einschränkungen hauptsächlich aus der Lithium-Lieferkette. Die wachsende Verfügbarkeit von Sekundärmaterialien bis 2040, ermöglicht durch den frühen BEV-Hochlauf in der Pkw-Mobilität, reduziert den Druck auf die Primärmaterial-Lieferketten für Lkw und Busse zusätzlich. Nach 2045 kann der BEV-Hochlauf erneut beschleunigt werden, da der Druck auf die Lieferketten nachlässt. Durch die Nutzung dieser Vorteile und die schnelle Flottenerneuerung – bei einer durchschnittlichen Fahrzeuglebensdauer von acht Jahren – kann die bis 2045 aufgebaute Verzögerung bis 2050 aufgeholt werden, mit einem BEV-Bestandsflottenanteil im „Bottleneck-adjusted“-Szenario, der nahezu so hoch ist wie im „EU Ambition“-Szenario. Einschränkungen in der Brennstoffzellen-Lieferkette spiegeln sich in einem geringeren FCEV-Bestandsflottenanteil im Jahr 2050 wider – 28 % gegenüber 31 % im „EU Ambition“-Szenario.

Selbst wenn sich das Lkw- und Bussegment schneller erholt, führt ein verzögerter Ausstieg aus ICEVs zwangsläufig zu einem langsameren Ausstieg aus flüssigen Kraftstoffen als von der Europäischen Kommission mit Blick auf die Klimaziele geplant.

Selbst wenn sich das Lkw- und Bussegment schneller erholt, führt ein verzögerter Ausstieg aus ICEVs zwangsläufig zu einem langsameren Ausstieg aus flüssigen Kraftstoffen als von der Europäischen Kommission mit Blick auf die Klimaziele geplant.

4.5. Resultierender Energiebedarf im Verkehrssektor

Ähnlich wie die in Abbildung 21 dargestellte Prognose des Energiebedarfs im „EU Ambition“-Szenario der Europäischen Kommission wurden die Energiebedarfsprojektionen auf Basis des „Bottleneck-adjusted“-Szenarios für die vier Mobilitätssektoren modelliert – Pkw, Lkw und Busse, Schifffahrt und Luftfahrt. Das „Bottleneck-adjusted“-Szenario zeigt, dass die Verzögerung beim Hochlauf der BEV durch eine fortgesetzte Nutzung flüssigkraftstoffbasierter Verbrennungsmotoren im Straßenverkehr ausgeglichen wird. Folglich erfolgt der Ausstieg aus flüssigen Kraftstoffen langsamer als von der Europäischen Kommission prognos-

tiziert. Zur Quantifizierung dieses Effekts vergleicht Abbildung 48 beide Szenarien mit Fokus auf die Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen, wobei Strom, Wasserstoff, CNG und LNG ausgeschlossen sind. Im „EU Ambition“-Szenario wurden die Energiebedarfsprojektionen aus der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission abgeleitet. Im Gegensatz dazu berücksichtigt das „Bottleneck-adjusted“-Szenario eine langsamere Flottentransformation, die sich aus industriellen Engpässen in den Batterie- und Brennstoffzellen-Lieferketten ergibt.

Wie in → **Kapitel 3** beschrieben, zielt das von der Europäischen Kommission abgeleitete „EU Ambition“-Szenario auf eine deutliche Reduzierung des Einsatzes flüssiger

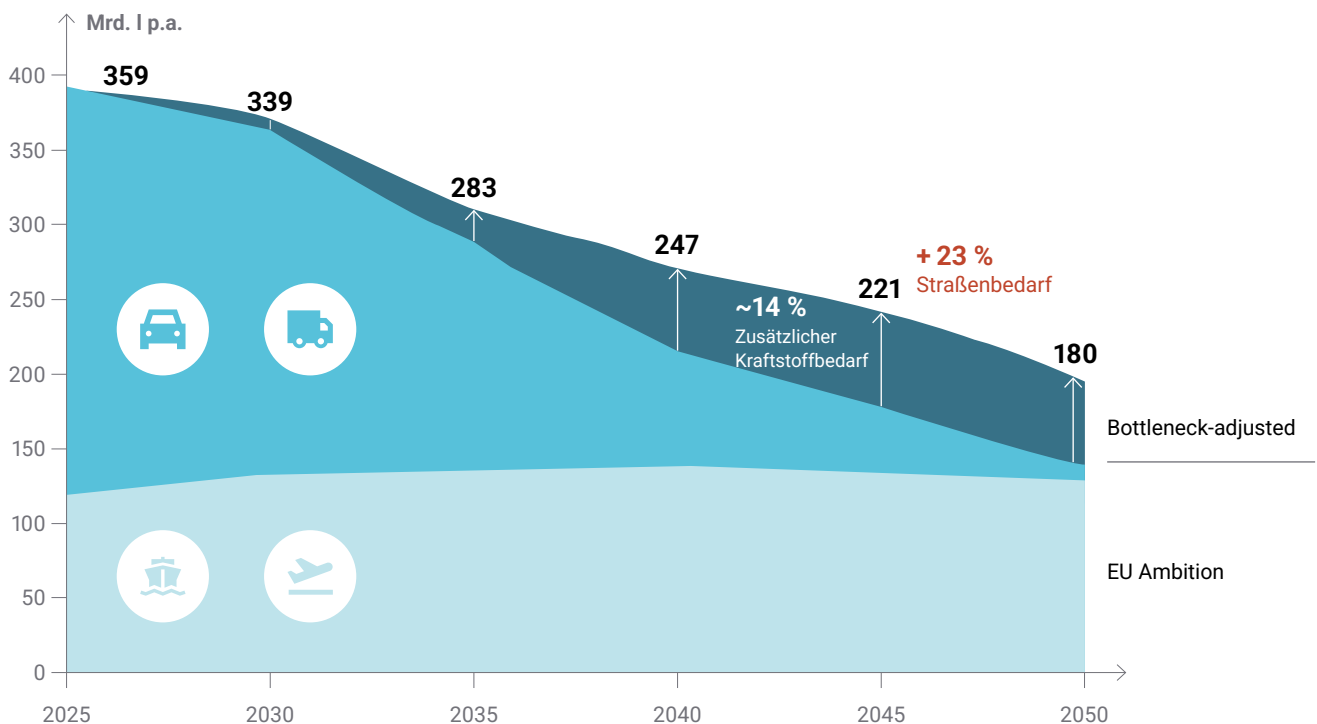


Abbildung 48: Jährliche Nachfrage nach Flüssigkraftstoffen in der EU-Mobilität: Szenario „EU Ambition“ vs. „Bottleneck-adjusted“. Umfang: Benzin, Diesel, Schweröl, Methanol, Ammoniak und Kerosin | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent

Kraftstoffe in der Straßenmobilität bis 2050 ab, getrieben durch einen ambitionierten BEV-Hochlauf vor 2040. Laut EU-Plan wird erwartet, dass der Bedarf an flüssigen Kraftstoffen in den Segmenten Schifffahrt und Luftfahrt leicht ansteigt, da ICEVs dort weiterhin den dominanten Antrieb darstellen und die Mobilitätsnachfrage in diesen Sektoren voraussichtlich zunimmt.

Im „Bottleneck-adjusted“-Szenario wird prognostiziert, dass der gesamte Bedarf an flüssigen Kraftstoffen über den Zeitraum von 25 Jahren kumuliert um 14 % höher liegt als im „EU Ambition“-Szenario, wobei sich die Lücke bis 2045 vergrößert, bevor sie sich wieder verringert, da die Engpässe in der Batterielieferkette nachlassen. Da die Segmente Schifffahrt und Luftfahrt nicht von

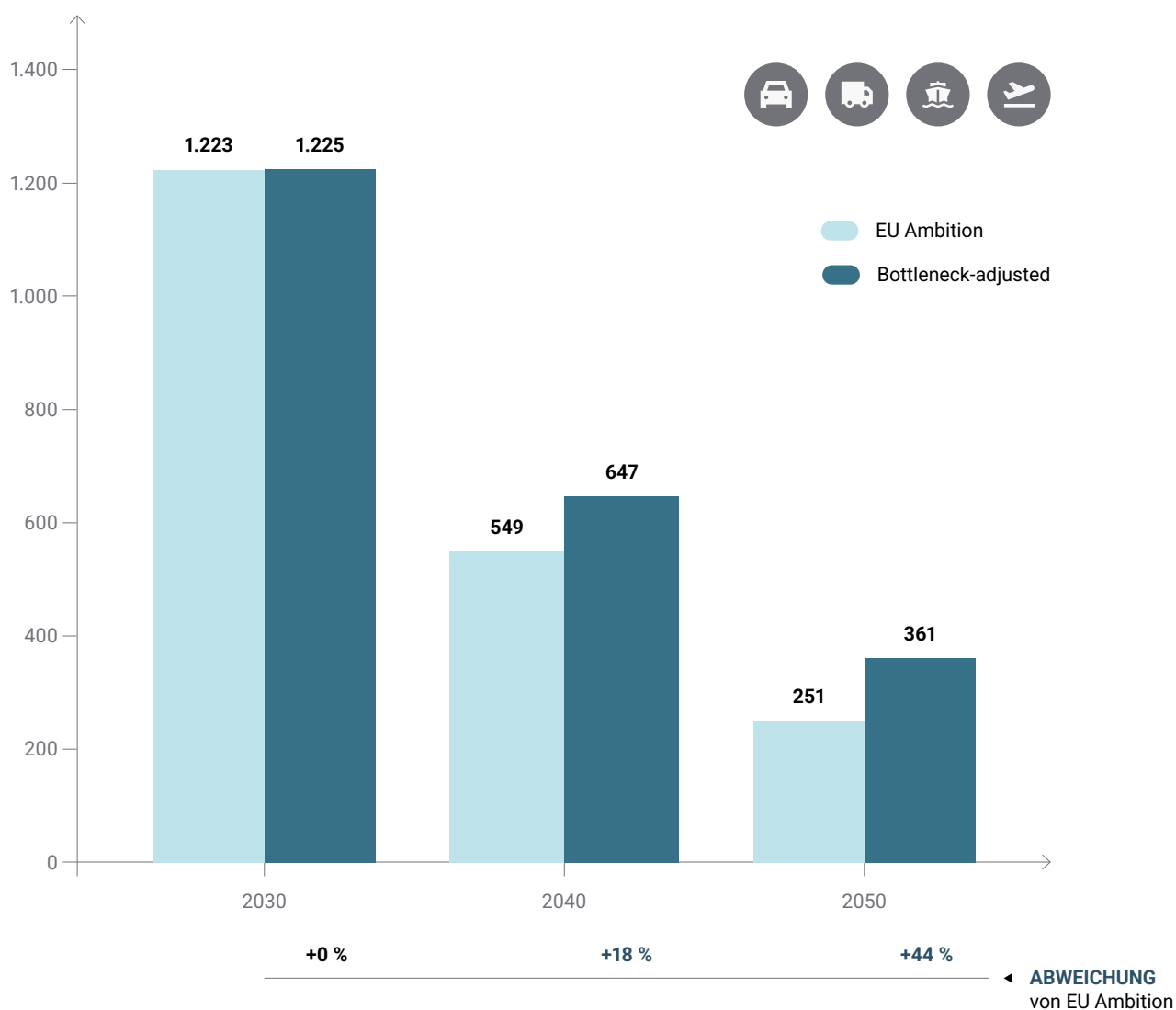


Abbildung 49: Jährliche Lebenszyklus-CO₂-Emissionen in der EU-Mobilität in Millionen Tonnen CO₂/a: Szenario „EU Ambition“ vs. „Bottleneck-adjusted“.

Wenn die Antriebswende nicht so schnell voranschreitet wie von der Europäischen Kommission geplant, bleibt der Kraftstoffbedarf deutlich über den Erwartungen. [...] Dies könnte zu verzögerten CO₂-Einsparungen führen.

Verzögerungen bei der Elektrifizierung betroffen sind, wird der Anstieg des Bedarfs an flüssigen Kraftstoffen im Vergleich zum „EU Ambition“-Szenario durch die Verzögerung des BEV-Hochlaufs in der Straßenmobilität verursacht, wo der kumulierte Bedarf an flüssigen Kraftstoffen voraussichtlich um 23 % höher liegt als im EU-Plan.

Wenn die Antriebswende nicht so schnell voranschreitet wie von der Europäischen Kommission geplant, bleibt der Kraftstoffbedarf deutlich über den Erwartungen – und überschreitet bis 2050 in der Straßenmobilität 60 Milliarden Liter Benzinäquivalent, verglichen mit weniger als 10 Milliarden Litern im Plan. Dies könnte zu verzögerten CO₂-Einsparungen führen.

4.6. Resultierende jährliche CO₂-Emissionen im Verkehrssektor

Gemäß dem in → **Abschnitt 3.2.3.** beschriebenen Lebenszyklusansatz wurden die Emissionen für das „EU Ambition“-Szenario und das „Bottleneck-adjusted“-Szenario berechnet. Dies umfasst Emissionen aus der Fahrzeugproduktion, der gesamten Energielieferkette und der Fahrzeugnutzung. Die jährlichen CO₂-Emissionen für die vier in dieser Studie analysierten Mobilitätsflotten werden für beide Szenarien in Abbildung 49 verglichen. Im „Bottleneck-adjusted“-Szenario wurde das zusätzliche industrielle Potenzial von eFuels, das in der Engpassanalyse identifiziert wurde,

nicht berücksichtigt; dieser Aspekt wird in → **Kapitel 5** detailliert untersucht.

Infolgedessen führt der in → **Abschnitt 4.5.** hervorgehobene erhöhte Bedarf an flüssigen Kraftstoffen im „Bottleneck-adjusted“-Szenario zu langsameren CO₂-Einsparungen im Vergleich zum „EU Ambition“-Szenario, wobei die Emissionen das Ziel im Jahr 2040 um 18 % und im Jahr 2050 um 44 % überschreiten. Diese zusätzlichen Emissionen resultieren aus der verlängerten Nutzung von ICEVs in der EU-Mobilität und wirken sich direkt auf die Tank-to-Wheel-Emissionen aus. Dies erschwert zusätzlich das Erreichen des Reduktionsziels von 90 % bis 2040 und der Klimaneutralität bis 2050, da bereits in → **Abschnitt 3.5.** zusätzlicher Handlungsbedarf für die im „EU Ambition“-Szenario modellierte Transformation identifiziert wurde.

Zusammenfassend zeigt die Bewertung der industriellen Engpässe in Bezug auf die von der Europäischen Kommission entworfene Transformation, die als „EU Ambition“-Szenario bezeichnet wird, eine potenzielle Verzögerung bei der Antriebs- und Energiewende mit direkten Auswirkungen auf CO₂-Einsparungen und das Erreichen der Klimaziele. Die Bewertung der industriellen Machbarkeit offenbart jedoch auch Chancen, den Hochlauf von eFuels im Vergleich zum „EU Ambition“-Szenario zu beschleunigen. Der Beitrag dieses zusätzlichen Potenzials wurde in → **Kapitel 5** quantifiziert und analysiert. 💧



*eFuel-Marktpotenzial:
Szenario „Industrial eFuel
Potential“*

Das „Bottleneck-adjusted“-Szenario wurde entwickelt, um einen realisierbaren Pfad für die Antriebs- und die Energiewende unter Berücksichtigung industrieller Einschränkungen aufzuzeigen. Dieses Szenario spiegelt sowohl potenzielle Verzögerungen als auch Beschleunigungen in der Transformation für jeden Engpassfaktor wider – mit Ausnahme derjenigen innerhalb der eFuel-Lieferkette. Bisher hat die Analyse vor allem Einschränkungen und mögliche Beschleunigungen in den Lieferketten für Batterien, erneuerbaren Strom und grünen Wasserstoff hervorgehoben.

In diesem Kapitel bewerten wir, wie Engpässe in der eFuel-Lieferkette die gesamte Energiewende beeinflussen. Ziel ist es, die Rolle von eFuels bei der Dekarbonisierung der EU-Mobilität zu quantifizieren, unter der Annahme, dass sie sich gemäß dem „Probable Ramp-up Limit“-Szenario, wie in → **Abschnitt 4.1.2.** eingeführt. Während nachhaltige Biofuels ebenfalls eine bedeutende Rolle spielen werden – und finanzielle sowie politische Faktoren weiterhin entscheidend für den erfolgreichen Hochlauf beider Märkte sind –, konzentriert sich dieses Szenario auf die vollständige Nutzung des industriellen Hochlaufpotenzials von eFuels innerhalb der EU-Mobilität.



5.1. Methodik, Modellierung und Datenerhebung

Um den potenziellen Beitrag von eFuels zur Dekarbonisierung der EU-Mobilität zu bewerten, wurde das „Industrial eFuel Potential“-Szenario eingeführt. Dieses Szenario baut auf dem „Bottleneck-adjusted“-Szenario, erläutert in → **Abschnitt 4.1.4.**, auf und geht davon aus, dass der Hochlauf von eFuels in der EU-Mobilität dem „Probable Ramp-up Limit“-Szenario, wie in → **Abschnitt 4.1.2.** eingeführt, folgt.

Basierend auf den Versorgungskurven im „Probable Ramp-up Limit“-Szenario wurden eFuel-Quoten mithilfe eines Bottom-up-Ansatzes berechnet, wobei die Konsistenz mit den allgemeinen Annahmen des „EU Ambition“-Szenarios gewahrt blieb. Mehrere Engpassfaktoren beeinflussen die eFuel-Lieferkette – wie die Verfügbarkeit von Wind- und Photovoltaik-ausrüstungen, Elektrolyseausrüstungen sowie die Installationsgeschwindigkeit von eFuel-Produktionsanlagen. Jedes Jahr wird der am stärksten limitierende Engpassfaktor herangezogen, um das „Industrial eFuel Potential“-Szenario zu erstellen.

Beispielsweise wird für das Jahr 2032 im „EU Ambition“-Szenario eine eBenzin-Quote von 5 % prognostiziert, während das „Industrial eFuel Potential“-Szenario darauf hinweist, dass sie maximal 9 % erreichen könnte. Dieser Wert ergibt sich aus dem restriktivsten Engpass in der eFuel-Lieferkette für dieses Jahr: der Verfügbarkeit von Wind- und Photovoltaik-ausrüstungen. Verglichen mit der im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED)¹⁵ für das Jahr 2030 festgelegten Mindestquote von 1 % für eFuels/RFNBO weichen die Projektionen für 2032 in den „EU Ambition“- und „Industrial eFuel Potential“-Szenarien deutlich ab. Unter optimalen regulatorischen Rahmenbedingungen zeigt das „Industrial eFuel Potential“-Szenario jedoch, dass ein entsprechender Hochlauf industriell realisierbar ist. Empfeh-

lungen zur Optimierung der regulatorischen Rahmenbedingungen werden in → **Kapitel 7** ausführlich dargestellt. Es ist wichtig zu betonen, dass das Szenario „Industrial eFuel Potential“ keine realistische Branchenprognose darstellt, da externe Faktoren – wie regulatorische Entwicklungen, geopolitische Dynamiken, Konsumverhalten, gesellschaftliche Akzeptanz und unvorhersehbare wirtschaftliche Ereignisse – den Hochlauf entlang der Lieferketten maßgeblich beeinflussen.

Am Beispiel der Windkraftausrüstungen bestimmt das Modell zunächst die maximal realisierbare installierte Windkapazität, die für die eFuel-Produktion in der EU-Mobilität vorgesehen ist, basierend auf der Verfügbarkeit der Anlagen wie in → **Abschnitt 4.2.2.** beschrieben. Nach Berücksichtigung des Anteils der globalen Versorgung, der anderen Märkten und Anwendungen zugeordnet wird, beträgt die installierte Windkapazität für eFuels in der EU-Mobilität im Jahr 2032 31 GW. Die Hinzufügung der installierten Photovoltaikkapazität, die nach derselben Methode berechnet wird, ergibt eine gesamte erneuerbare Stromkapazität von 85 GW, die der eFuel-Produktion für die EU-Mobilität gewidmet ist.

Gemäß dem „Probable Ramp-up Limit“ für Elektrolyseausrüstungen könnte die installierte Elektrolysekapazität im Jahr 2032 127 GW_{el} erreichen. Da dies die verfügbare erneuerbare Stromkapazität übersteigt, wird erneuerbare Energie zum limitierenden Faktor für die eFuel-Produktion in diesem Jahr. Die installierte Kapazität wird dann zwischen Fischer-Tropsch- und Methanol-Syntheserouten aufgeteilt, konsistent mit den Kraftstoffbedarfsanteilen im „EU Ambition“-Szenario. Unter dieser Annahme werden eBenzin und eMethanol über die Methanol-Synthese hergestellt, während eDiesel und eSAF über Fischer-Tropsch produziert werden. Obwohl Abweichungen möglich sind, zeigen aktuelle Projekte einen klaren Trend zu diesem Ansatz.

Auf Basis dieser Annahmen entfallen im Jahr 2032 im „EU Ambition“-Szenario zusammen 53 % der eFuel-Nachfrage auf eBenzin und eMethanol. Daher wird derselbe Anteil auf die Methanolroute im „Industrial eFuel Potential“-Szenario angewendet. Anschließend werden die eFuel-Mengen unter Verwendung von Anlageneffizienzdaten aus dem Porsche Consulting eFuel Cost Model und unter der Annahme einer durchschnittlichen jährlichen Betriebsdauer von 5.000 Stunden berechnet, wie in → **Abschnitt 4.1.3.4.** eingeführt. Die Produktion wird zwischen eMethanol und eBenzin gemäß den Bedarfsanteilen aus dem „EU Ambition“-Szenario aufgeteilt – 53 % eBenzin und 47 % eMethanol im Jahr 2032. Ebenso werden eDiesel- und eSAF-Mengen aus der Fischer-Tropsch-Route abgeleitet. Das resultierende eFuel-Volumen im Jahr 2032 ist höher, wenn

das „Probable Ramp-up Limit“ für die Installationsgeschwindigkeit von eFuel-Anlagen berücksichtigt wird; daher wird erneuerbare Energie zum limitierenden Faktor für die eFuel-Produktion in diesem Jahr. Dieser Prozess wird jährlich wiederholt, um das „Industrial eFuel Potential“-Szenario zu erstellen.

5.2. eFuel-Hochlauf: Szenario „Industrial eFuel Potential“ vs. „EU Ambition“

Um den realisierbaren industriellen Hochlauf der eFuel-Kapazitäten zu quantifizieren, wurden mehrere Faktoren auf globaler Ebene bewertet. Basierend auf Prognosen für die Installation von eFuel-Kapazitäten und die Versorgung mit Ausrüstung für erneuerbare Energien sowie Produktionsprozesse wie Elektrolyse wurde der Hochlauf von eFuels mithilfe des

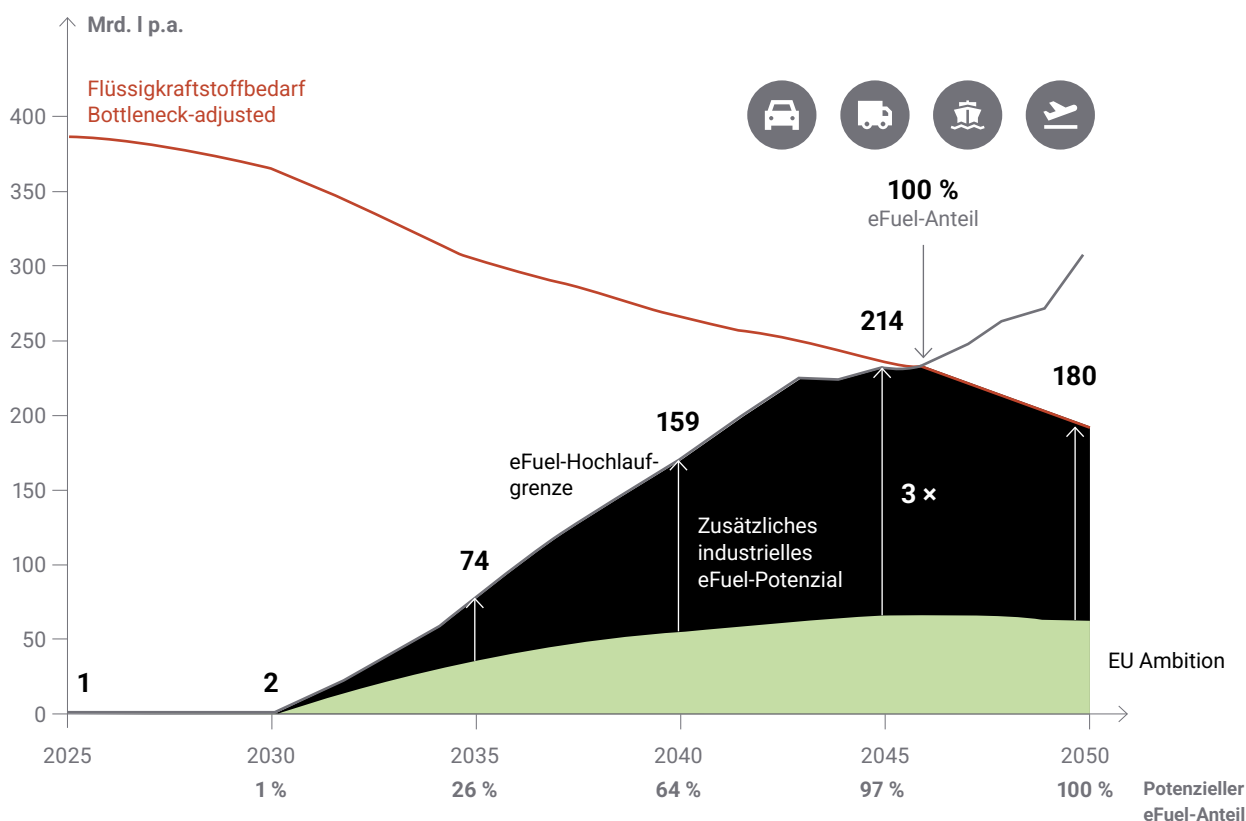


Abbildung 50: Jährliche Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen in der EU-Mobilität im Szenario „Bottleneck-adjusted“ und eFuel-Hochlauf: Szenario „EU Ambition“ vs. „Industrial eFuel Potential“.

Umfang: Benzin, Diesel, Schweröl, Methanol, Ammoniak und Kerosin | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent

in → **Abschnitt 5.1.** beschriebenen Ansatzes modelliert. Dies wird in Abbildung 50 als „Industrial eFuel Potential“-Szenario bezeichnet.

Der dargestellte Hochlauf repräsentiert den Anteil der globalen eFuel-Versorgung, der der EU-Mobilität zugeordnet ist, proportional zu ihrem Anteil an der weltweiten eFuel-Nachfrage. Kapazitäten, die anderen Sektoren und Märkten zugeordnet sind, wurden ausgeschlossen. Für die EU-Mobilität vergleicht Abbildung 50 den eFuel-Hochlauf im „Industrial eFuel Potential“-Szenario mit dem „EU Ambition“-Szenario, wie es aus der Folgenabschätzung der Europäischen Kommission abgeleitet wurde.

Gemäß dem „EU Ambition“-Szenario wird zwischen 2030 und 2040 ein signifikanter Hochlauf von eFuels in der Mobilität erwartet, wobei die Nachfrage auf über 50 Milliarden Liter Benzinäquivalent über die vier Mobilitätssegmente ansteigt. Nach 2045 wird prognostiziert, dass die eFuel-Nachfrage stagniert, basierend auf der Annahme, dass sich die Antriebswende beschleunigt und dadurch die Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen für die Straßenmobilität über diesen Zeitpunkt hinaus minimal wird. Darüber hinaus wird erwartet, dass nachhaltige Biofuels – obwohl hier nicht dargestellt – eine wesentliche Rolle bei der Reduzierung der CO₂-Emissionen im Rahmen des „EU Ambition“-Szenarios spielen.

Das „Industrial eFuel Potential“-Szenario zeigt, dass sich im Vergleich zum Szenario der Europäischen Kommission ein rund dreifach höheres eFuel-Potenzial erschließen ließe. Infolgedessen könnte der eFuel-Markt bis 2045 auf 200 Milliarden Liter Benzinäquivalent anwachsen und im darauffolgenden Jahr eine eFuel-Quote von 100 % erreichen – unter der Annahme eines verzögerten Ausstiegs aus flüssigen Kraftstoffen in der Straßenmobilität, konsistent mit dem „Bottleneck-adjusted“-Szenario aus → **Abschnitt 4.5.**

Das „Industrial eFuel Potential“-Szenario zeigt, dass sich im Vergleich zum Szenario der Europäischen Kommission ein rund dreifach höheres eFuel-Potenzial erschließen ließe.

Wie in → **Abschnitt 5.1.** erläutert, wurde der eFuel-Hochlauf für jeden Kraftstofftyp berechnet, wobei die Konsistenz mit den jeweiligen Bedarfsanteilen im „EU Ambition“-Szenario gewahrt blieb. Die Ergebnisse sind für eBenzin, eDiesel für die Straßenmobilität, Marine eFuel* und eSAF in Abbildung 51 zusammengefasst.

Das „Industrial eFuel Potential“-Szenario zeigt im Vergleich zum „EU Ambition“-Szenario einen stärkeren Hochlauf über alle Kraftstofftypen hinweg. Bis 2030 verhindern Einschränkungen bei der Verfügbarkeit von Ausrüstungen für erneuerbare Energien, dass die eFuel-Produktion über das „EU Ambition“-Szenario hinaus beschleunigt wird. Nach 2030 lassen die Engpässe in den Lieferketten nach, wodurch sich der Hochlauf beschleunigen kann.

Gemäß der industriellen Machbarkeitsbewertung könnten Marine eFuels und eBenzin fossile Kraftstoffe bis 2042 vollständig ersetzen, während eDiesel und eSAF bis 2046 eine Quote von 100 % erreichen. Die Verzögerung bei eDiesel und eSAF ist hauptsächlich auf die Priorisierung des maritimen Sektors durch die Europäische Kommission für den Hochlauf von eFuels zurückzuführen, wodurch die Kapazitätszuweisung gemäß dem in

* Marine eFuel umfasst eDiesel, eMethanol, und eAmmoniak.

EU-Flüssigkraftstoffbedarf vs. eFuel-Hochlauf [Mrd. l p.a.]

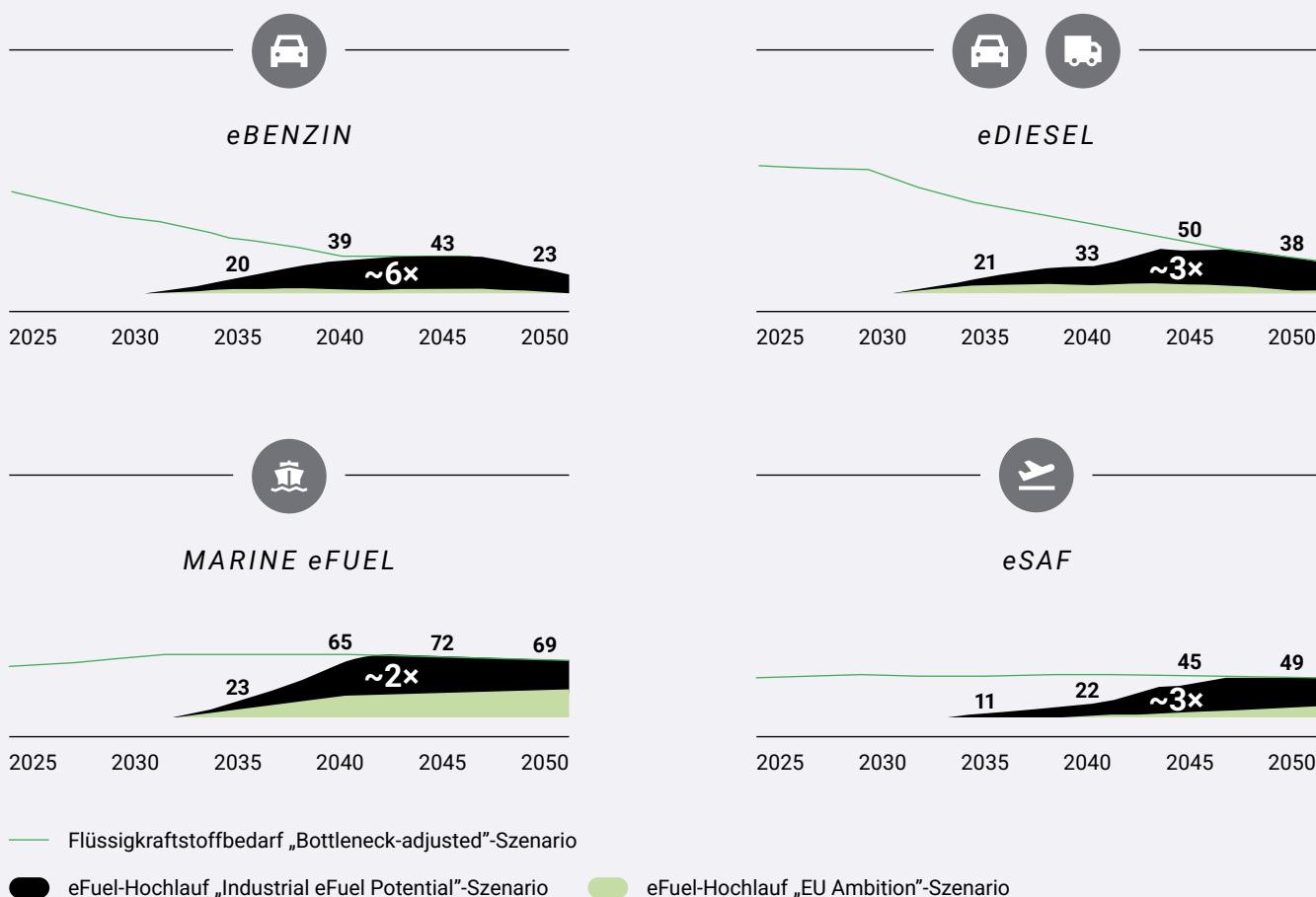


Abbildung 51: Jährliche Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen nach Kraftstoffart in der EU-Mobilität im Szenario „Bottleneck-adjusted“ und eFuel-Hochlauf: Szenario „EU Ambition“ vs. „Industrial eFuel Potential“. Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent | eDiesel bezieht sich auf die Verwendung von eDiesel in der Straßenmobilität, Marine-eFuel umfasst eDiesel, eMethanol und eAmmoniak | SAF: Sustainable Aviation Fuel

→ **Abschnitt 5.1.** beschriebenen Ansatz stärker auf eMethanol und eMethanol-basierte Produkte verschoben wird. Infolgedessen steigen die kumulierten Mengen für eBenzin um das Sechsfache, für Straßen-eDiesel und eSAF um das Dreifache und für Marine eFuels – einschließlich eDiesel, eMethanol und eAmmoniak – um das Zweifache.

Der deutliche Anstieg der eBenzin-Mengen wird nicht nur durch zusätzliches industrielles Potenzial entlang der Lieferkette getrieben, sondern auch durch die längere Präsenz von ICEVs im „Bottleneck-adjusted“-Szenario, die eine höhere Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen im Pkw-Bestand im Vergleich zum

„EU Ambition“-Szenario aufrechterhält.

Ähnliche Ergebnisse gelten für eDiesel, was eine verzögerte Transformation im Lkw- und Bussegment widerspiegelt, wenn auch mit moderaterem Rückstand.

Ab 2045 führt die sinkende Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen in der Straßenmobilität zu einer reduzierten eFuel-Nachfrage. Überschüssige eFuel-Kapazitäten gelten jedoch nicht als gestrandete Investitionen, da erwartet wird, dass sie andere Sektoren und Märkte versorgen – insbesondere angesichts der Tatsache, dass der Hochlauf der EU-Mobilität deutlich vor den in anderen Regionen angekündigten Plänen liegt.

Zusammenfassend zeigt die industrielle Machbarkeitsbewertung eindeutig, dass der eFuel-Hochlauf im Vergleich zum „EU Ambition“-Szenario beschleunigt werden könnte, was potenziell ihren Beitrag zur Erreichung der Klimaziele erhöht – ein äußerst vorteilhaftes Ergebnis, falls sich die Antriebswende verzögert.

5.3. Resultierende jährliche CO₂-Emissionen im Verkehrssektor

Die Analyse der industriellen Engpässe legt nahe, dass sich die Transformation des Antriebs in der Straßenmobilität aufgrund von Einschränkungen in der Batterie-Lieferkette um etwa fünf Jahre verzögern könnte. Im Gegensatz dazu könnten eFuels dreimal schneller hochlaufen als im „EU Ambition“-Szenario prognostiziert. Diese Erkenntnisse erfordern eine detaillierte Bewertung ihrer Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen und die Fähigkeit, Klimaziele zu erreichen.

Die CO₂-Emissionen wurden für vier Mobilitätsflotten berechnet: Pkw, Lkw und Busse, Schifffahrt sowie Luftfahrt. Die Berechnung umfasst den gesamten Fahrzeuglebenszyklus, wie in → **Abschnitt 3.2.3.** beschrieben. Abbildung 52 vergleicht die resultierenden jährlichen CO₂-Emissionen in den folgenden Szenarien: „EU Ambition“, „Bottleneck-adjusted“ und „Industrial eFuel Potential“*.

Die Analyse zeigt, dass die Beschleunigung des eFuel-Hochlaufs auf sein volles industrielles Potenzial eine schnellere Dekarbonisierung der EU-Mobilität ermöglichen kann – sogar im Vergleich zum „EU Ambition“-Szenario. Bis 2030 begrenzen Hochlauf-Engpässe die Möglichkeiten für zusätzliche CO₂-Einsparungen durch eFuels. Der Effekt des beschleunigten Hochlaufs nach 2030 wird jedoch bis 2040 deutlich, mit 170 Millionen Tonnen eingespartem CO₂ im Vergleich zum „Bottleneck-adjusted“-Szenario. Im „Industrial eFuel Potential“-Szenario ist eine CO₂-Reduktion von 14 % gegenüber dem „EU Ambition“-Szenario

* Abgeleitet aus dem „Bottleneck-adjusted“-Szenario und unter Berücksichtigung des zusätzlichen industriellen Potenzials von eFuels, wie in → **Abschnitt 5.1.** eingeführt.

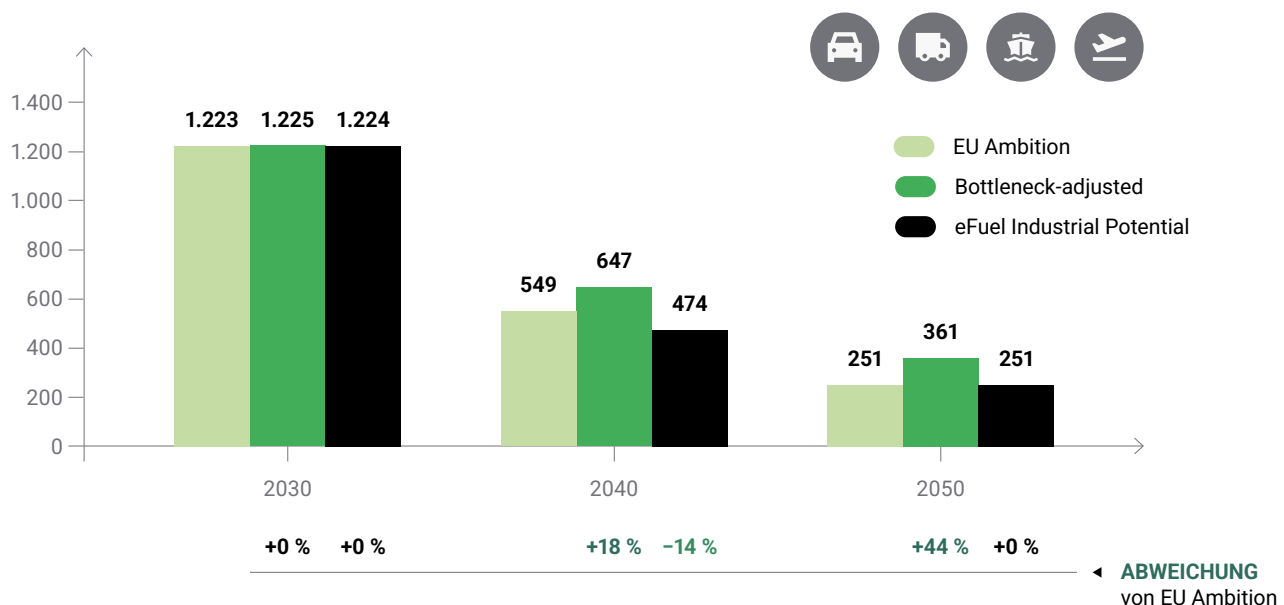


Abbildung 52: Jährliche Lebenszyklus-CO₂-Emissionen in der EU-Mobilität in Millionen Tonnen CO₂/a: Szenario „EU Ambition“ vs. „Bottleneck-adjusted“ vs. „Industrial eFuel Potential“.

erreichbar. Mit anderen Worten: Die Nutzung des vollen Potenzials von eFuels kompensiert mehr als den Anstieg der CO₂-Emissionen um 18 %, der durch die verzögerte Antriebswende verursacht wird. Bis 2050 konvergieren die Szenarien „EU Ambition“ und „Industrial eFuel Potential“ auf dasselbe Emissionsniveau, da in beiden Fällen der größte Teil des Energiebedarfs durch erneuerbare Quellen gedeckt wird. Die verbleibenden Emissionen sind hauptsächlich mit der Energieversorgung verbunden, insbesondere den Well-to-Tank-Emissionen.

5.4. Einhaltung des CO₂-Budgets in den analysierten Szenarien

Die Pariser Klimakonferenz von 2015 legte ein globales Ziel fest, die Erwärmung auf 1,75 °C (oder deutlich unter 2 °C) über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Um dies zu erreichen, hob der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in seinem Bericht von 2018² hervor, dass der Anstieg der globalen Temperatur direkt mit der atmosphärischen CO₂-Konzentration verknüpft ist. Das bedeutet, dass die Festlegung jährlicher Emissionsziele allein nicht ausreicht, um ein Temperaturziel zu erreichen; vielmehr müssen die kumulativen anthropogenen CO₂-Emissionen überwacht werden.

Dementsprechend leitete der IPCC ein globales CO₂-Budget ab, das natürliche Kohlenstoffsinken und potenzielle Klimakipppunkte berücksichtigt. Der Bericht schätzte, dass ab dem 1. Januar 2018 etwa 1.400 Gt CO₂ verfügbar blieben, um die Überschreitung der 1,75 °C-Schwelle mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % zu vermeiden. Nach Abzug der globalen CO₂-Emissionen bis 2024³ beträgt das Restbudget Anfang 2025 noch etwa 700 Gt CO₂.

Die Zuweisung eines proportionalen Anteils dieses Budgets an die EU basierend auf der Bevölkerungsgröße und anschließend an die

EU-Mobilität basierend auf ihrem Emissionsanteil unter den EU-Sektoren⁴ ergibt rund 19 Gt CO₂, die ab 2025 für die EU-Mobilität verfügbar sind. Diese Zuweisung umfasst Lebenszyklus-Emissionen: Fahrzeugproduktion, Energieversorgung (Well-to-Tank) und Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel).

Um den Fortschritt in Richtung Klimaziele in der EU-Mobilität zu bewerten, wurden die kumulativen CO₂-Emissionen berechnet und mit dem ab 2025 zugewiesenen Restbudget verglichen. Drei Szenarien wurden analysiert und sind in Abbildung 53 dargestellt: „EU Ambition“, „Bottleneck-adjusted“ und „Industrial eFuel Potential“*.

Das „EU Ambition“-Szenario erfüllt das CO₂-Budget für das 1,75 °C-Ziel ungefähr, unter der Annahme, dass bis 2050 Klimaneutralität erreicht wird – im Einklang mit dem europäischen Klimaziel. Die jährlichen Lebenszyklus-CO₂-Emissionen zeigen jedoch, dass das Erreichen der Klimaneutralität bis 2050 zusätzliche Maßnahmen erfordert – entweder innerhalb des Mobilitätssektors oder durch Kompensationen in anderen Sektoren. Im „Bottleneck-

* Abgeleitet aus dem „Bottleneck-adjusted“-Szenario und unter Berücksichtigung des zusätzlichen industriellen Potenzials von eFuels, wie in → [Abschnitt 5.1.](#) eingeführt.

Die Beschleunigung des eFuel-Hochlaufs auf das volle industrielle Potenzial kann zusätzliche Emissionen aus der verzögerten Antriebswende ausgleichen und so die Einhaltung des CO₂-Budgets ermöglichen.

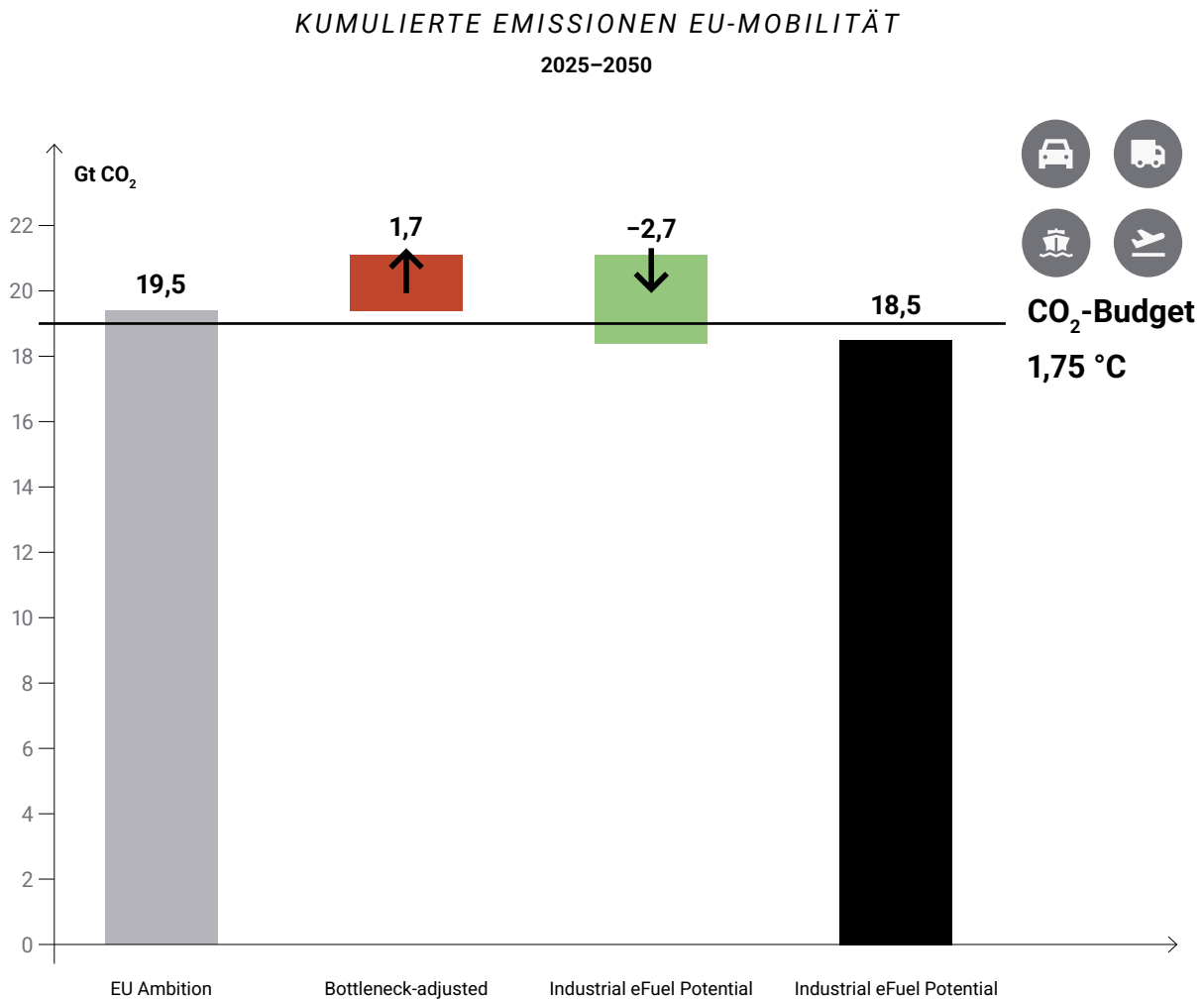


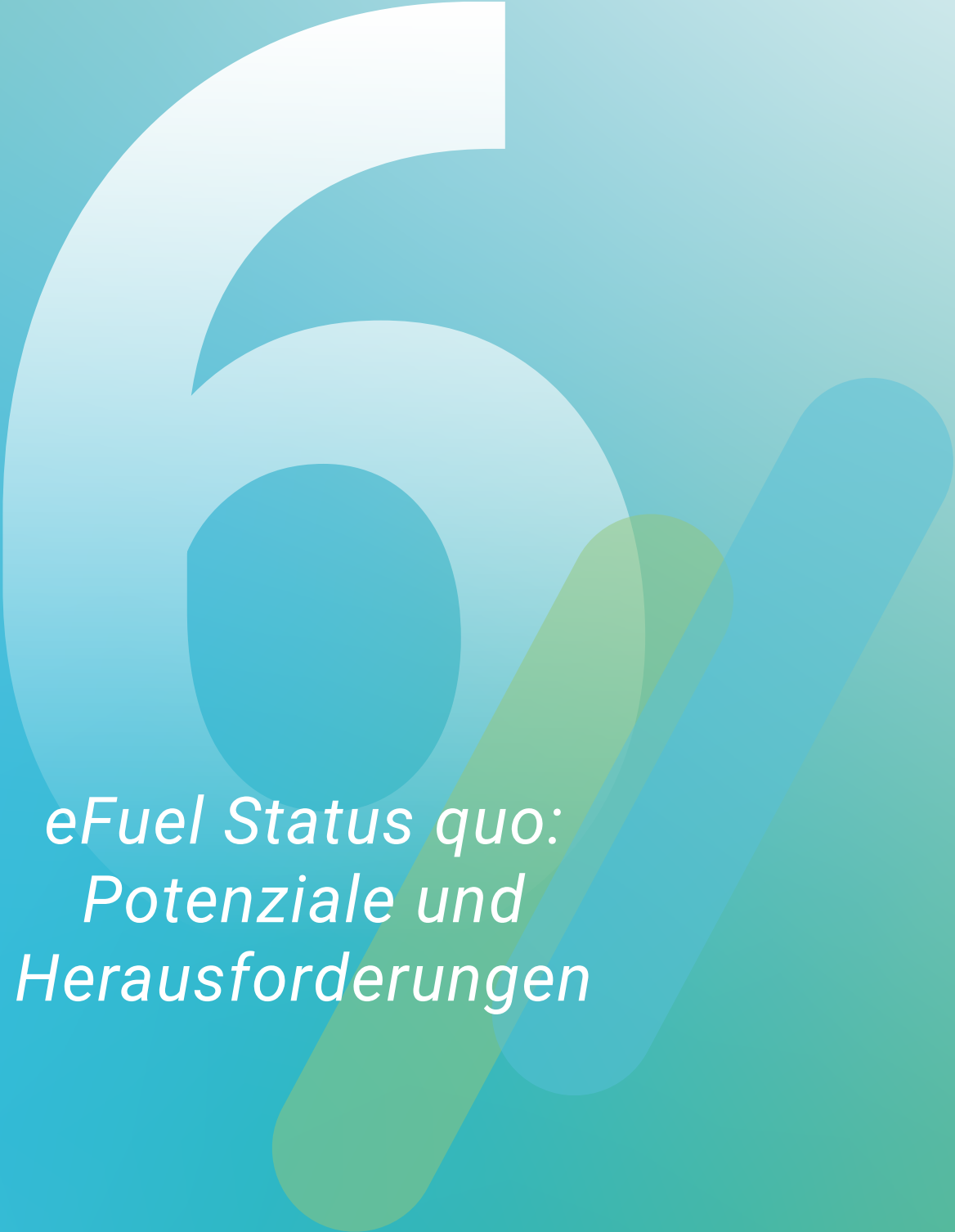
Abbildung 53: Kumulierte Lebenszyklus-CO₂-Emissionen in der EU-Mobilität in Milliarden Tonnen CO₂ (Gt): Szenario „EU Ambition“ vs. „Bottleneck-adjusted“ vs. „Industrial eFuel Potential“.

adjusted“-Szenario könnte die erhöhte Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen in der Straßenmobilität aufgrund der verzögerten Antriebswende die kumulativen Emissionen um bis zu 1,7 Gt CO₂ erhöhen und damit das Budget für die EU-Mobilität überschreiten. Die Beschleunigung des eFuel-Hochlaufs auf das volle industrielle Potenzial kann zusätzliche Emissionen aus der verzögerten Antriebswende ausgleichen und so die Einhaltung des CO₂-Budgets ermöglichen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass eFuels aus Sicht der industriellen Machbarkeit

als zentraler Hebel zur Erreichung der Klimaziele dienen können – selbst wenn sich die Antriebswende in der EU-Mobilität verzögert. Diese Erkenntnisse basieren ausschließlich auf der industriellen Machbarkeit des eFuel-Hochlaufs und berücksichtigen keine zusätzlichen limitierenden Faktoren wie regulatorische Rahmenbedingungen oder wirtschaftliche Entwicklungen. → **Kapitel 6** bietet einen Überblick über die aktuellen Pläne der Industrie sowie die Herausforderungen, die bewältigt werden müssen. ⚡



An abstract graphic featuring a large, light blue number '6' on the left. To its right are several overlapping shapes: a light blue circle, a green circle, and two elongated, rounded rectangular shapes in shades of blue and green. The background is a gradient from light blue at the top to a darker teal at the bottom.

eFuel Status quo: Potenziale und Herausforderungen



Gemäß den Ergebnissen aus → **Kapitel 5** können eFuels – neben anderen Lösungen – erheblich zur Erreichung der Klimaziele in der EU-Mobilität beitragen. Die Ausnutzung dieses Potenzials erfordert jedoch umfassende Maßnahmen auf globaler Ebene. Dieses Kapitel bewertet den aktuellen Status der globalen eFuel-Industrie auf Grundlage der Identifizierung und Analyse angekündigter Produktionsprojekte.



6.1. Methodik und Datenerhebung

In den letzten Jahren haben globale Ankündigungen zu eFuel-Produktionsprojekten deutlich zugenommen. Um diese Entwicklungen nachzuverfolgen, hat Porsche Consulting eine Datenbank erstellt, um Projektdaten zu analysieren – mit Fokus auf Kraftstofftypen, regionalen Unterschieden, beteiligten Akteuren und Entwicklungsstadien. Diese Ankündigungen wurden anhand von Industriedaten der eFuel Alliance⁵, der IEA⁶, und des Methanol Institute⁷ validiert.

Für diese Analyse werden eFuels ausschließlich als auf grünem Wasserstoff* basierende Kraftstoffe definiert; Projekte, die andere Wasserstoffquellen nutzen – wie blauen, pinken, grauen, braunen oder schwarzen Wasserstoff** – sind ausgeschlossen. Unter mehr als 500 geprüften Projekten lag der Fokus auf jenen, die eine Produktionsaufnahme bis 2030 planen, sowie auf Kraftstofftypen, die in diesem Zeitraum für die EU-Mobilität am relevantesten sind: eAmmoniak, eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan und eDiesel.

Die in diesem Kapitel dargestellten Daten basieren auf offiziellen Ankündigungen von eFuel-Projektentwicklern, wobei der tatsächliche Hochlauf von der erfolgreichen Umsetzung dieser Projekte abhängt. Abbildung 54 veranschaulicht den Detaillierungsgrad, der in der für diese Analyse entwickelten Datenbank erfasst wurde.

* Abgeleitet aus erneuerbarem Strom.

** Jeweils abgeleitet aus Erdgas durch Dampfreformierung in Kombination mit Carbon Capture and Storage (CCS), atomkraftbasiertem Strom, Erdgas durch Dampfreformierung, Braunkohle (Lignite) und Steinkohle (Black Coal).



Abbildung 54: Überblick über die in der eFuel-Projektdatenbank analysierten Dimensionen.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker | SAF: Sustainable Aviation Fuel | FEED: Front-End Engineering Design



Aktuelle Projektankündigungen weisen auf ein starkes Wachstum des eFuel-Angebots in den nächsten fünf Jahren hin, wobei bis 2030 insgesamt 76 Milliarden Liter Benzinäquivalent geplant sind. Abbildung 55 zeigt den prognostizierten globalen Produktionsanteil nach Kraftstofftyp im Jahr 2030, basierend auf offiziellen Ankündigungen.

Die Ergebnisse zeigen eine klare Dominanz von Projekten, die die Produktion von eAmmoniak planen und 73 % des prognostizierten Volumens ausmachen, gefolgt von eMethanol mit einem Anteil von 21 %. Andere Kraftstoffe werden voraussichtlich bis zu 2 % des Marktes repräsentieren. Diese starke Dominanz von eAmmoniak ist größtenteils auf das Haber-Bosch-Verfahren zurückzuführen, das bereits weit verbreitet für die konventionelle Ammoniakproduktion genutzt wird. Dadurch ist die technische Reife im Vergleich zu anderen eFuels höher, und die Kostenwettbewerbsfähigkeit der eAmmoniak-Produktion hängt in erster Linie vom Preis für grünen Wasserstoff im Verhältnis zu anderen Wasserstoffquellen ab – eine Bedingung, die in Regionen mit kostengünstiger erneuerbarer Energie erreichbar ist.

Während die geplante eAmmoniak-Produktion bis 2030 andere Kraftstofftypen übertrifft, wird nicht erwartet, dass die Nachfrage vor 2030 vom Mobilitätssektor getrieben wird. Im Jahr 2022 stellte die Düngemittelproduktion den größten Ammoniak-Nachfragesektor dar, gefolgt von industriellen Anwendungen wie Textilien, Kühlung und die Pharmaindustrie. Schiffskraftstoffe machten weniger als 1 % der Ammoniaknachfrage aus, wie in Abbildung 56 dargestellt.

Unter den vier in dieser Studie analysierten Mobilitätssegmenten wird erwartet, dass eAmmoniak vor allem im maritimen Sektor relevant wird. Allerdings befinden sich Ammoniakmotoren noch in der Entwicklung, und

*Aktuelle Projektankündigungen
weisen auf ein starkes Wachstum
des eFuel-Angebots in den
nächsten fünf Jahren hin.*

eine großflächige Einführung wird vor 2030 nicht erwartet. Im Gegensatz dazu werden andere Antriebe bereits in die maritime Flotte integriert. Daher wurde eAmmoniak in diesem Kapitel nicht weiter untersucht, da sich die Analyse auf den Mobilitätssektor bis 2030 konzentriert.

6.2. Angekündigter eFuel-Hochlauf nach Kraftstoff und Region

Basierend auf aktuellen Ankündigungen wird erwartet, dass das eFuel-Angebot bis 2030 erheblich skaliert, mit rund 300 Projekten, die für den Mobilitätssektor relevant sind. Eine globale jährliche Kapazität von 20 Milliarden Litern Benzinäquivalent wurde angekündigt, wobei alle Regionen zum Hochlauf beitragen – insbesondere China und Europa. Abbildung 57 bietet einen geografischen Überblick über angekündigte Produktionsprojekte und hebt Kapazitäten hervor, die 30 Millionen Liter* pro Jahr überschreiten.

* Benzinäquivalent.

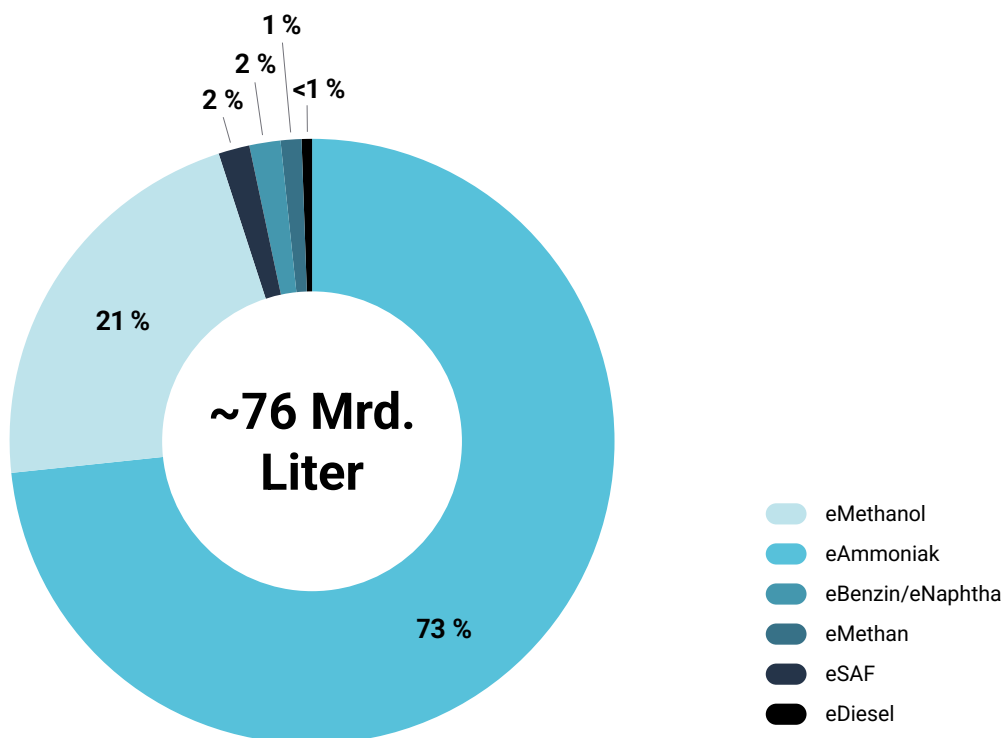


Abbildung 55: Anteil der weltweit angekündigten eFuel-Produktion nach Kraftstoffart im Jahr 2030.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, IEA⁶, Methanol Institute⁷ | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent | SAF: Sustainable Aviation Fuel

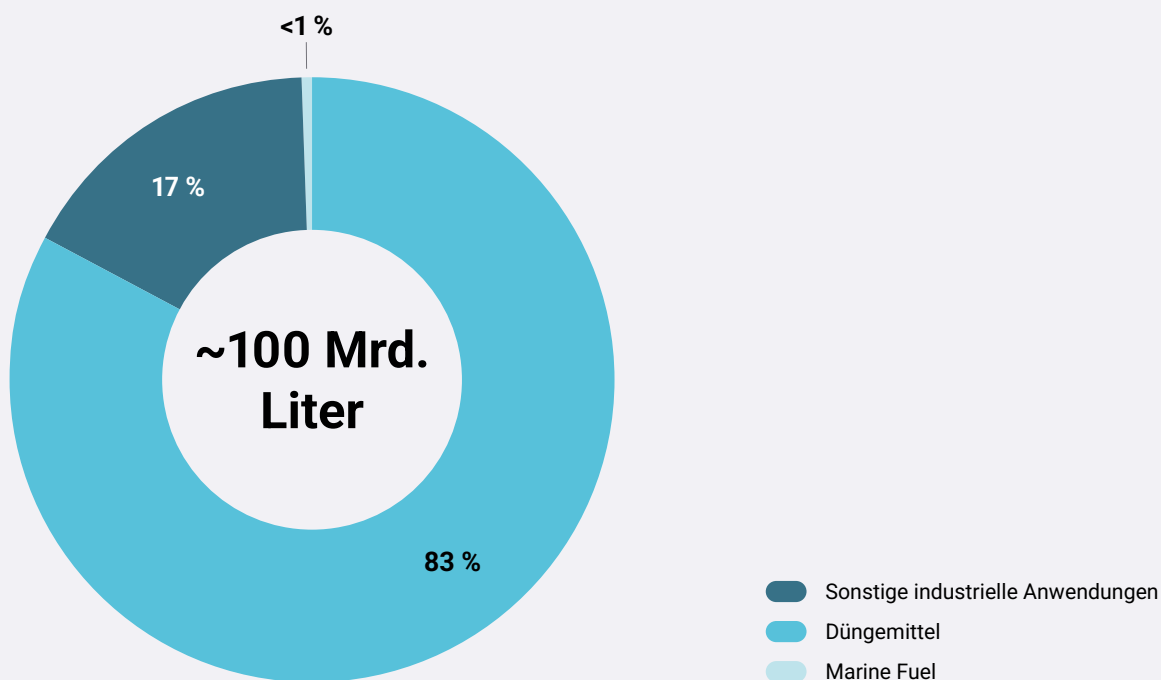


Abbildung 56: Anteil der weltweiten Ammoniaknachfrage nach Anwendung im Jahr 2022.

Quelle: IRENA Innovation Outlook 2022: Renewable Ammonia³⁶ | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent | Sonstige industrielle Anwendungen umfassen Textilien, Kühlung, Sprengstoffe oder die Pharmaindustrie

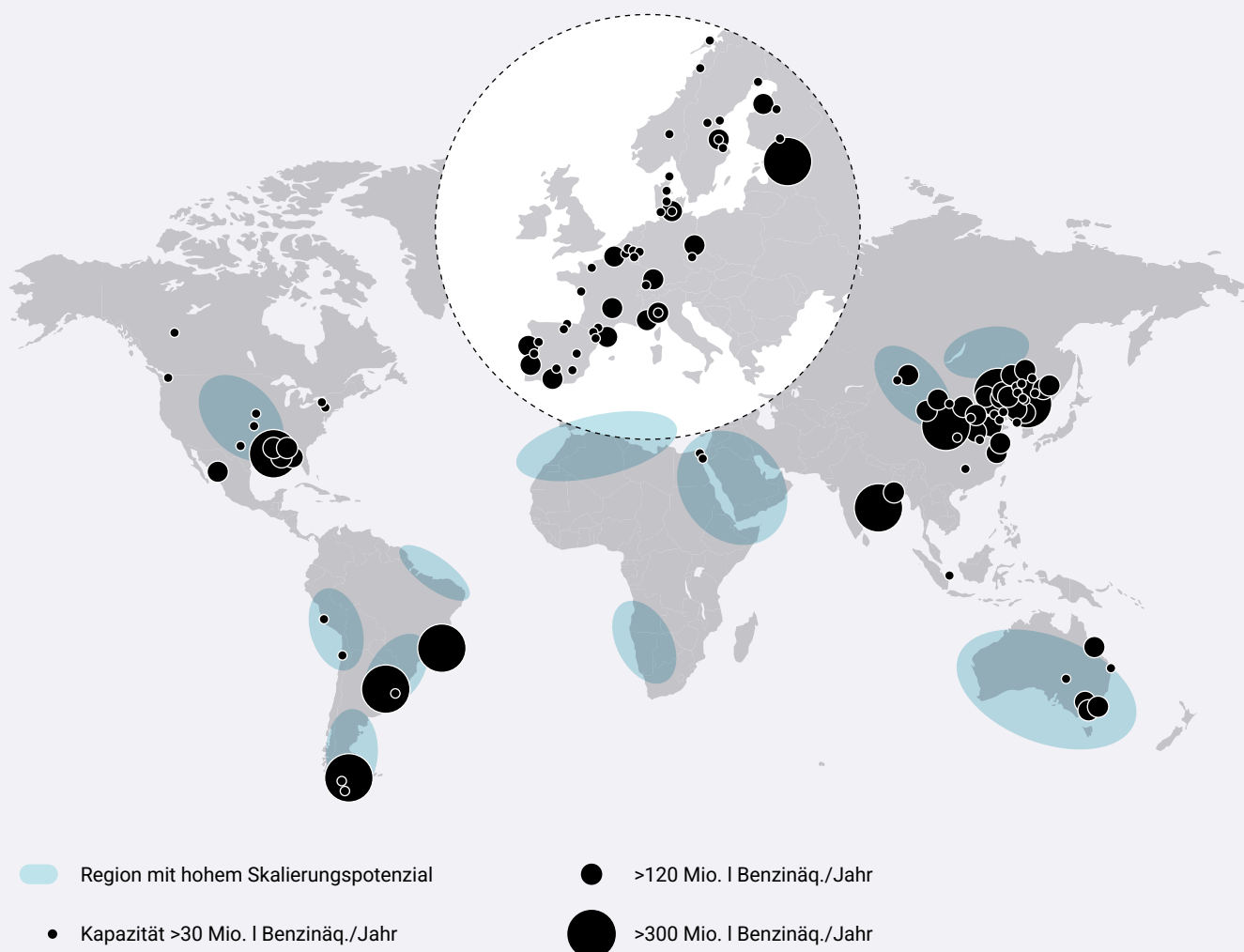


Abbildung 57: Weltweit angekündigte eFuel-Produktionsprojekte im Jahr 2030 nach Kapazität.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, IEA⁶, Methanol Institute⁷ | Umfang: eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan, eDiesel, Karte mit Offenlegung von Projekten mit jährlichen Produktionskapazitäten über 30 Millionen Liter Benzinäquivalent | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent | SAF: Sustainable Aviation Fuel

Die Karte zeigt eine große Bandbreite im Produktionsmaßstab. Europäische Projekte zielen derzeit auf eine kleine bis mittlere Produktionsmenge ab, während Regionen wie China und Südamerika eine großskalige Produktion anstreben, wobei mehrere Projekte jährliche Kapazitäten von über 300 Millionen Litern Benzinäquivalent überschreiten. Diese Regionen profitieren von günstigeren Bedingungen für erneuerbare Energien, was eine kostengünstige Produktion im großen Maßstab ermöglicht. Im Gegensatz dazu stellt die für erneuerbare Kraftwerke erforderliche Fläche in dieser Größenordnung eine kritische

Einschränkung in dicht besiedelten Gebieten dar, in denen die Verfügbarkeit von Land begrenzt ist.

Bis 2030 wird erwartet, dass viele neue Akteure in den eFuel-Markt eintreten. Abbildung 58 bietet einen Überblick über ihre prognostizierten Marktanteile sowie die Verteilung der Kraftstofftypen, die bis 2030 für den Hochlauf geplant sind.

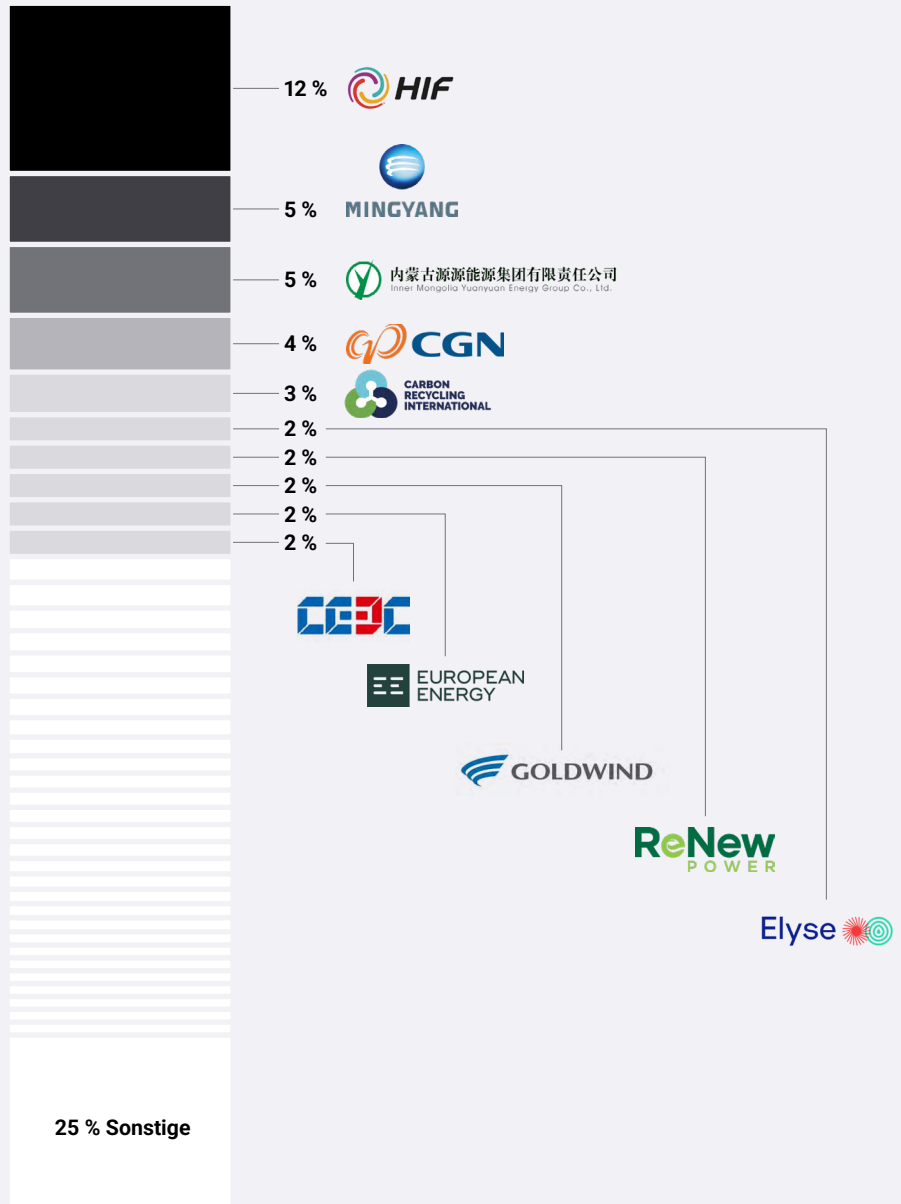
Laut Industrieankündigungen wird erwartet, dass HIF Global die eFuel-Produktion anführt und bis 2030 12 % der globalen Kapazität

PRO AKTEUR

2030

eFuel-Projekt-Kapazitäten

~20 Mrd. l



PRO KRAFTSTOFFART

- eMethanol
- eBenzin/eNaphtha
- eMethan
- eSAF
- eDiesel

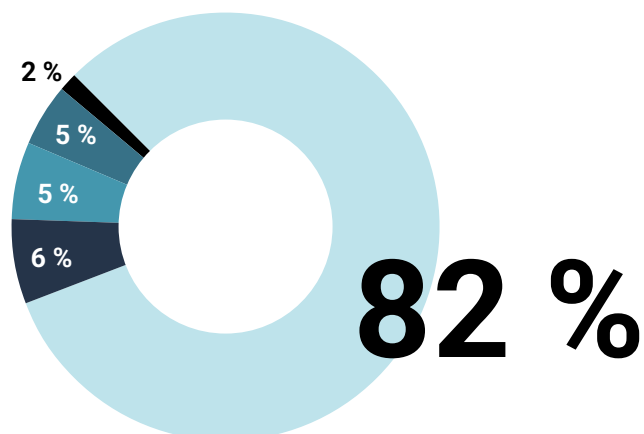


Abbildung 58: Marktanteil der eFuel-Produktion nach Akteur und Kraftstoffart basierend auf weltweit angekündigter Produktion im Jahr 2030. Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, IEA⁶, Methanol Institute⁷ | Umfang: eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan, eDiesel | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent | SAF: Sustainable Aviation Fuel



ausmacht, mit mehreren Skalierungsprojekten in Südamerika, den USA und Australien. Wichtige Akteure in China planen – und in einigen Fällen sind sie bereits im Bau befindlich – eMethanol-Anlagen in der Inneren Mongolei, wobei sie kostengünstige erneuerbare Energie nutzen und 18 % der weltweit angekündigten Produktion bis 2030 repräsentieren. Weitere aufstrebende Akteure sind unter anderem European Energy mit Sitz in Dänemark, das Skalierungsprojekte in Europa plant. Insgesamt wurden mehr als 120 Unternehmen identifiziert, die eFuel-Hochlaufpläne bis 2030 verfolgen, was zu einer stark fragmentierten Angebotslandschaft führt.

Die Datenbank zeigt einen starken Fokus auf eMethanol, das 82 % der angekündigten Kapazität bis 2030 ausmacht – insbesondere in China, wo Methanol als Mittel zur Verringerung der Ölabhängigkeit und zur Dekarbonisierung des Straßenverkehrs und der Schifffahrt betrachtet wird. Darüber hinaus dient eMethanol als flexibler Plattformkraftstoff für alle Mobilitätssegmente.

Andere Kraftstoffe – wie eSAF, eBenzin/ eNaphtha und eMethan – sind ebenfalls für den Hochlauf geplant, wobei jeder etwa 5 % der prognostizierten eFuel-Produktion bis 2030 repräsentiert, während eDiesel nicht priorisiert wird und hauptsächlich als Nebenprodukt in angekündigten Projekten erscheint. Für eSAF wird bis 2030 ein erhebliches Wachstum erwartet, und das Marktgleichgewicht könnte sich langfristig zu seinen Gunsten verschieben. Außerdem kann eMethanol in eBenzin oder eSAF umgewandelt werden – ein Detail, das in aktuellen Ankündigungen nicht immer spezifiziert wird und den Marktanteil der Kraftstofftypen bis 2030 beeinflussen könnte.

Abbildung 59 schätzt den potenziellen Anteil der EU-Mobilität, der durch die weltweit angekündigte jährliche Kapazität von 20 Milliarden

Eine globale jährliche Kapazität von 20 Milliarden Litern Benzinäquivalent wurde angekündigt, wobei alle Regionen zum Hochlauf beitragen – insbesondere China und Europa. [...] Bis 2030 wird erwartet, dass viele neue Akteure in den eFuel-Markt eintreten.

Litern im Jahr 2030 abgedeckt werden könnte. Für jedes Mobilitätssegment wurden bei der Berechnung des potenziellen Angebots über globale Projekte nur relevante Kraftstofftypen berücksichtigt. Beispielsweise wurden für die Pkw-Flotte nur angekündigte Kapazitäten von eBenzin und eDiesel einbezogen.

Darüber hinaus geht die Analyse davon aus, dass alle weltweit angekündigten Kapazitäten ausschließlich der EU-Mobilität gewidmet sind – ein Szenario, das nicht der Realität entspricht, da die globale Produktion auch andere Sektoren und Märkte bedienen wird. So wird eMethanol nicht nur im europäischen Schiffsverkehr, sondern auch in der chemischen Industrie genutzt. Dennoch liefert diese Annahme einen Hinweis auf die Größenordnung der angekündigten Produktion innerhalb der eFuel-Industrie.

Auf Basis dieses Ansatzes könnten etwa 1 % der EU-Pkw-Mobilität durch eFuels aus globalen Ankündigungen gedeckt werden. Wenn die Projekte realisiert werden, könnten die globale

eDiesel- und eSAF-Produktion theoretisch 2,5 % des Kraftstoffbedarfs sowohl in Lkw- und Busflotten als auch in der Luftfahrt decken. Der Beitrag von eMethanol könnte deutlich höher ausfallen, mit mehr als 16 Milliarden Litern Benzinäquivalent, die bis 2030 prognostiziert werden – genug, um nahezu 24 % des Flüssigkraftstoffbedarfs im maritimen Sektor zu decken, wie aus dem „EU Ambition“-Szenario abgeleitet. Diese Schätzungen zeigen, dass das Ausmaß der aktuellen Produktionsankündigungen für 2030 einen bedeutenden Beitrag zur Dekarbonisierung der Mobilität leisten könnte, insbesondere im Schifffahrtssektor.

Wie in Abbildung 57 gezeigt, wird die eFuel-Produktion in globalem Maßstab geplant, wobei mehrere Regionen zum Hochlauf beitra-

gen. Abbildung 60 zeigt die regionalen Anteile der angekündigten Produktion für jeden Kraftstofftyp. Insgesamt wird erwartet, dass China mit 43 % der globalen Kapazität führt, gefolgt von Europa mit 28 %, Nordamerika mit 13 % und Südamerika mit 8 %.

Mit einer jährlichen Produktion von 16,3 Milliarden Litern wird prognostiziert, dass eMethanol den Markt bis 2030 dominiert, hauptsächlich getrieben durch China – wo mehr als die Hälfte der angekündigten Kapazität konzentriert ist – und Europa, das etwa ein Viertel der globalen Produktion ausmacht. Bei eSAF-Projekten führt Europa mit 84 % der weltweit angekündigten Kapazität. Südamerika entwickelt sich zur Schlüsselregion für den Hochlauf von eBenzin und hält bis 2030 einen Marktanteil von 77 %. Regionen wie

				
Globales eFuel-Angebot (2030)	~1,5 Mrd. l eBenzin/eNaphtha + eDiesel	~1,2 Mrd. l eDiesel + eMethan	~1,3 Mrd. l eSAF	~16,3 Mrd. l eMethanol
Max. Anteil Kraftstoffbedarf	0,9 % ~ 161 Mrd. l Kraftstoffbedarf in EU-Flotte	2,4 % ~ 49 Mrd. l Kraftstoffbedarf in EU-Flotte	2,5 % ~ 52 Mrd. l Kraftstoffbedarf in EU-Flotte	23,6 % ~ 69 Mrd. l Kraftstoffbedarf in EU-Flotte

Abbildung 59: Transformationspotenzial in der EU-Mobilität basierend auf weltweit angekündigter eFuel-Produktion 2030.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, IEA⁶, Methanol Institute⁷, Folgenabschätzungsbericht der Europäischen Kommission¹ | Umfang: eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan, eDiesel | Annahme: Alle weltweit angekündigten Kapazitäten sind für die Versorgung der EU-Mobilität vorgesehen | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent | SAF: Sustainable Aviation Fuel



Patagonien und die Atacama-Wüste bieten enormes Potenzial für Wind- und Solarenergie, was eine kostengünstige eFuel-Produktion ermöglicht. Da die Nachfrage nach eBenzin in den meisten Importregionen weniger gefördert wird als die anderer Kraftstoffe, erhöht die geringere Zahlungsbereitschaft die Notwendigkeit für Standorte mit niedrigen Energiekosten, wodurch Südamerika zu einem strategischen Hub für eBenzin-Exporte im

Jahr 2030 wird. Die angekündigte eMethan-Produktion wird mit einem Anteil von 56 % von Europa dominiert, wobei ihre regionale Verteilung stärker diversifiziert ist als bei anderen Kraftstofftypen und Nordamerika, Südamerika sowie weitere globale Regionen umfasst. Die eDiesel-Produktion ist zwischen Europa (69 %) und Nordamerika (30 %) aufgeteilt, hauptsächlich als Nebenprodukt des Hydrocracking-Prozesses in eSAF-Anlagen.

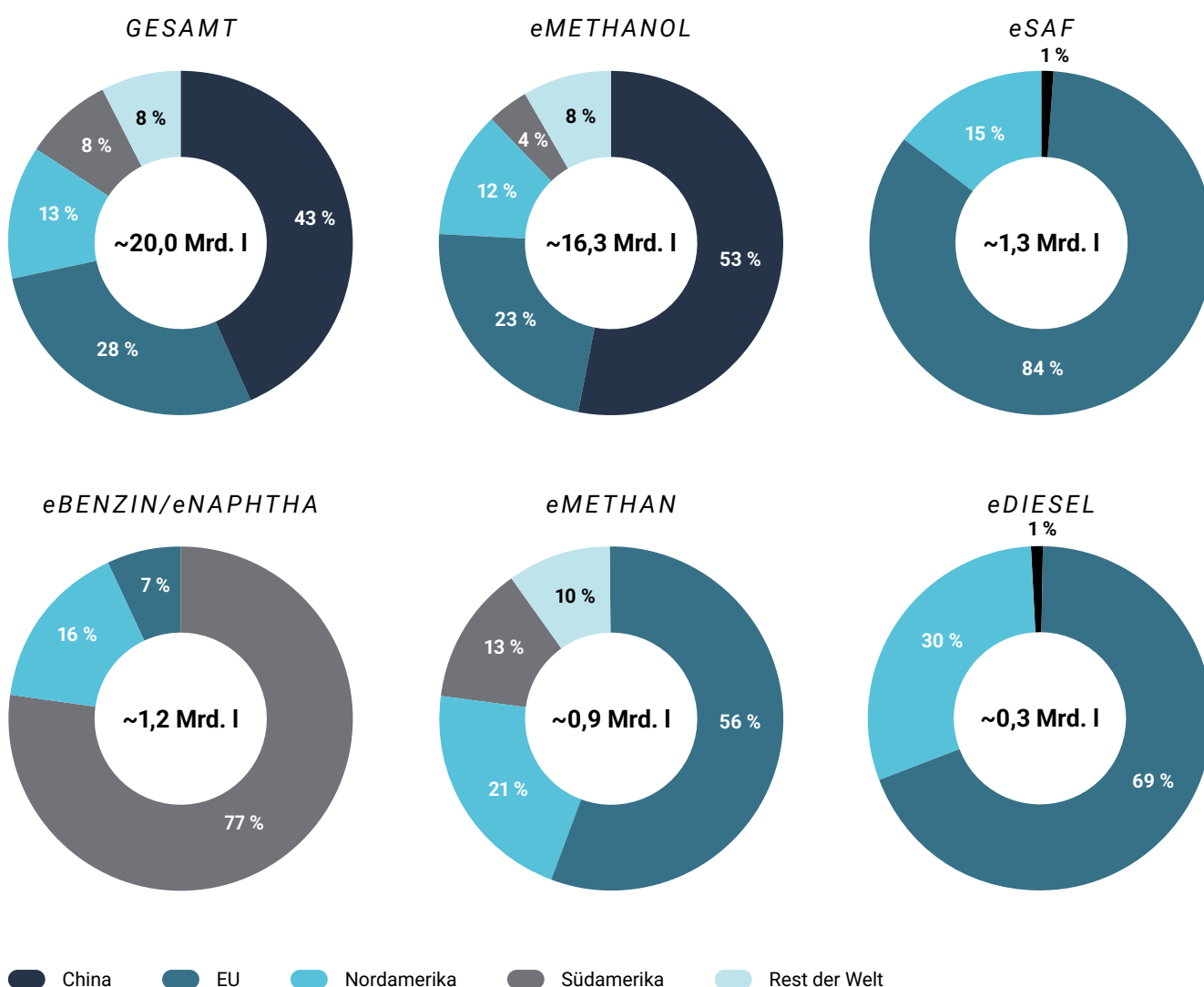


Abbildung 60: Anteil der angekündigten eFuel-Produktion nach Region im Jahr 2030.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, IEA⁶, Methanol Institute⁷ | Umfang: eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan, eDiesel | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent | SAF: Sustainable Aviation Fuel

Mit einer jährlichen Produktion von 16,3 Milliarden Litern wird prognostiziert, dass eMethanol den Markt bis 2030 dominiert, hauptsächlich getrieben durch China – wo mehr als die Hälfte der angekündigten Kapazität konzentriert ist – und Europa, das etwa ein Viertel der globalen Produktion ausmacht.



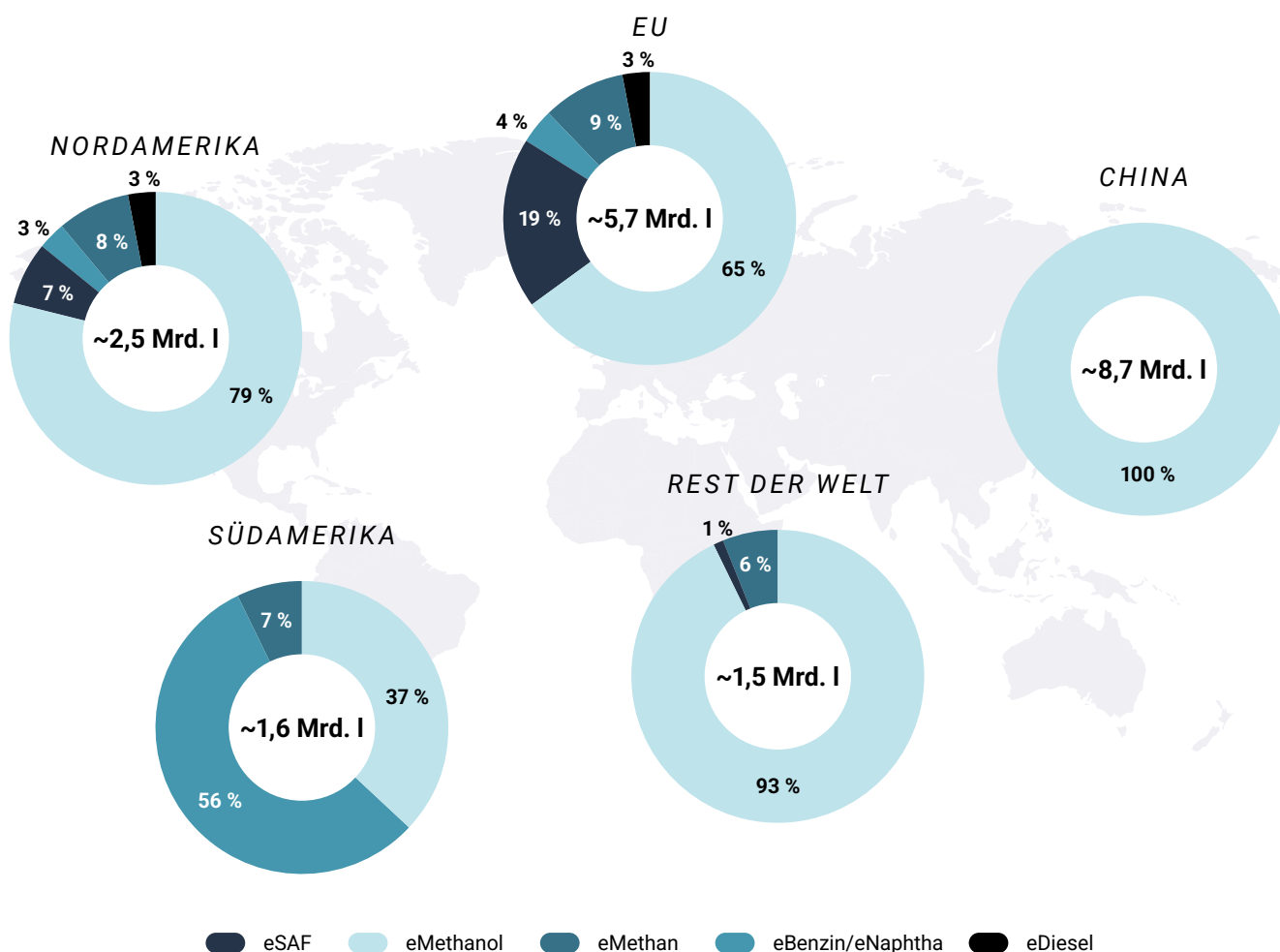


Abbildung 61: Anteil der angekündigten eFuel-Produktion nach Kraftstofftyp im Jahr 2030.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, IEA⁶, Methanol Institute⁷ | Umfang: eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan, eDiesel | Kraftstoffvolumen in Milliarden Litern Benzinäquivalent | SAF: Sustainable Aviation Fuel

Diese Ergebnisse verdeutlichen unterschiedliche regionale Prioritäten bei der Auswahl der Kraftstofftypen. Abbildung 61 veranschaulicht das Produktionsportfolio für jede Region.

China plant einen exklusiven und großskaligen Hochlauf von eMethanol mit einer angekündigten jährlichen Kapazität von 8,7 Milliarden Litern für 2030. Neben der Unterstützung von CO₂-Reduktionen im Straßen- und Schiffsverkehr bietet eMethanol China die Möglichkeit, die Abhängigkeit von Ölimporten durch lokale Beschaffung zu verringern und gleichzeitig sein Potenzial für erneuerbare Energien zu nutzen.

Europa verfolgt mit einem Produktionsanteil von 28 % und 5,7 Milliarden Litern, die für 2030 angekündigt sind, eine stärker diversifizierte Strategie: 65 % der Kapazität für eMethanol, 19 % für eSAF und 9 % für eMethan. Die angekündigten Kapazitäten für eBenzin und eDiesel bleiben marginal. Dieses Portfolio spiegelt den regulatorischen Fokus Europas auf die Dekarbonisierung der Schiff- und Luftfahrt wider, in denen eMethanol, eMethan und eSAF eine Schlüsselrolle spielen werden.

Nordamerika, die drittgrößte Region mit einem Anteil von 13 % und geplanten 2,5 Milliarden Litern, konzentriert 79 % seiner Kapazität auf eMethanol, während die Hochlaufpläne für eSAF, eMethan, eBenzin und eDiesel hinterherhinken.

Südamerika ist strategisch positioniert, um kostengünstige erneuerbare Energien für eine wettbewerbsfähige eBenzin-Produktion zu nutzen, und widmet 56 % der angekündigten Kapazität diesem Kraftstofftyp.

Im Rest der Welt dominiert eMethanol mit 93 % der angekündigten Kapazität bis 2030.

In jeder Region spiegelt die angekündigte Produktion die vorherrschenden Marktnachfragetrends wider, wie etwa die von der Europäischen Kommission gesetzten Prioritäten für den Hochlauf von eFuels in den Mobilitätssegmenten der Schifffahrt und Luftfahrt. Allerdings wird interkontinentaler Handel entscheidend sein, um Kosteneffizienzen zu erreichen und den globalen Hochlauf von eFuels zu sichern. Während die Ankündigungen für die globale eFuel-Produktion stark zugenommen haben und ambitionierte Hochlaufprojekte die Dekarbonisierung in mehreren Sektoren und Märkten ermöglichen könnten, bleibt der Weg bis 2030 unsicher.

Status der angekündigten eFuel-Kapazitäten für 2030

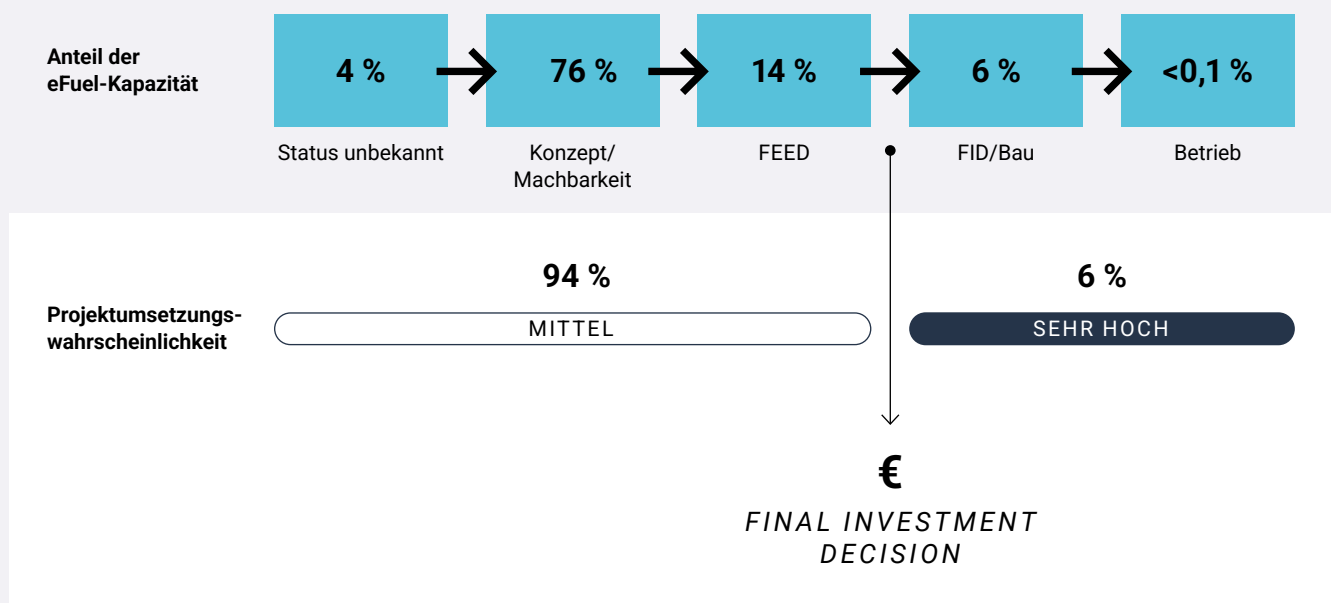


Abbildung 62: Aktueller Status der weltweit angekündigten eFuel-Kapazitäten für 2030.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, IEA⁶, Methanol Institute⁷ | Umfang: eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan, eDiesel | SAF: Sustainable Aviation Fuel | FEED: Front-End Engineering Design



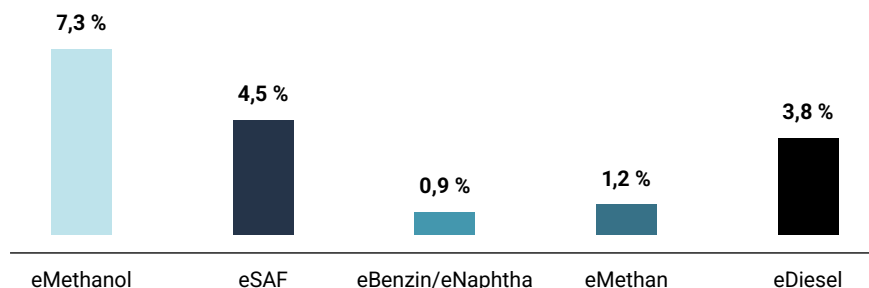
GESAMT



6 %

NACH BEWERTUNGSKATEGORIE

Nach Kraftstofftyp



Nach Region

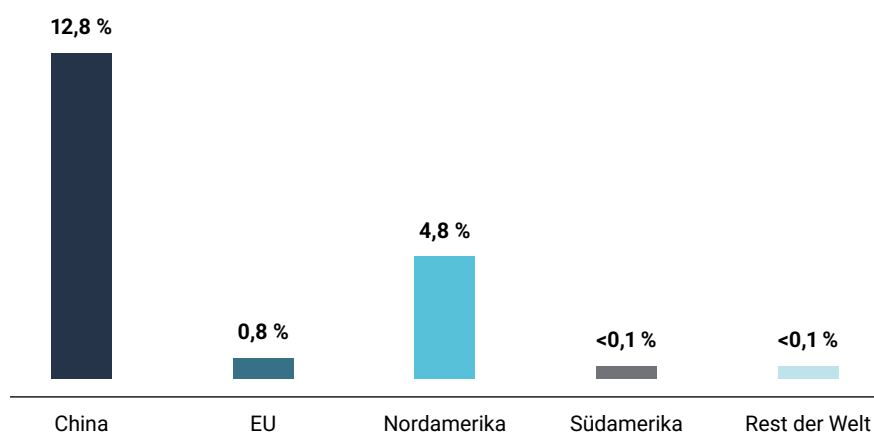


Abbildung 63: Aktuelle FID-Rate der weltweit angekündigten eFuel-Kapazitäten für 2030 nach Kraftstofftyp und Region.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Project Tracker, eFuel Alliance⁵, IEA⁶, Methanol Institute⁷ | Umfang: eMethanol, eSAF, eBenzin/eNaphtha, eMethan, eDiesel | SAF: Sustainable Aviation Fuel | FID: Final Investment Decision

6.3. Marktherausforderungen

Obwohl zahlreiche Akteure Pläne zur Skalierung der eFuel-Produktion bis 2030 angekündigt haben, könnten mehrere Herausforderungen diese Projekte verzögern. Ihre Entwicklungsstadien wurden überwacht und reichen von Konzept- oder Machbarkeitsstudien über Front-End Engineering Design (FEED), Final Investment Decision (FID), und Bau bis hin zum Betrieb.

Abbildung 62 zeigt den Status der weltweit geplanten eFuel-Kapazitäten, die bis 2030 die Produktion aufnehmen sollen, und veranschaulicht den Anteil der insgesamt angekündigten Kapazität nach Projektstadium.

Bislang wurde nur für 6 % der für 2030 geplanten eFuel-Kapazität die Finanzierung gesichert. Der Großteil dieser Kapazität befindet sich derzeit im Bau, während ein kleiner Anteil

bereits in Betrieb ist. Umgekehrt hat 94 % der angekündigten Kapazität noch nicht die Final Investment Decision (FID) erreicht. Ein erheblicher Anteil – 76 % der Gesamtkapazität – befindet sich in der Konzeptphase oder in Machbarkeitsstudien, während 14 % in der Phase von Engineering und Design sind oder auf Zusagen von Abnehmern und Investoren warten, um die Finanzierung zu sichern.

Der finanzielle Status der angekündigten Projekte wurde nach Kraftstofftyp und Region analysiert, um potenzielle Marktdynamiken zu identifizieren. Abbildung 63 vergleicht die FID-Rate der angekündigten Kapazitäten über diese beiden Dimensionen hinweg.

Die Gesamt-FID-Rate für angekündigte Kapazitäten, die bis 2030 in Betrieb gehen sollen, liegt derzeit bei 6 %, jedoch bestehen erhebliche Unterschiede zwischen den Kraftstofftypen. eMethanol führt mit der höchsten FID-Rate von 7,3 %, gefolgt von eSAF mit 4,5 % und eDiesel mit 3,8 %. Für eBenzin/eNaphtha und eMethan liegt die FID-Rate jeweils bei rund 1 %. Diese Werte deuten auf eine stärkere finanzielle Sicherheit für eMethanol- und eSAF-Projekte hin, die durch größere politische und regulatorische Unterstützung in globalen Märkten begünstigt werden. Die FID-Rate für eDiesel spiegelt die erfolgreiche Finanzierung von eSAF-Anlagen wider, bei denen eDiesel ein Nebenprodukt ist.

Auch regionale Unterschiede sind bemerkenswert. Die Kapazitäten in China weisen mit 12,8 % die höchste FID-Rate auf, gefolgt von Nordamerika mit 4,8 %, während weniger als 1 % der europäischen Kapazitäten für 2030 eine gesicherte Finanzierung haben. Andere Regionen liegen unter 0,1 %. In China wird das hohe Potenzial für erneuerbare Energien und die langfristige Finanzierungssicherheit durch die politische Motivation verstärkt, CO₂-Emissionen zu reduzieren und die Energie-

Bislang wurde nur für 6 % der für 2030 geplanten eFuel-Kapazität die Finanzierung gesichert. [...] Derzeit sind 87 % der weltweit finanzierten eFuel-Kapazität in China geplant.

unabhängigkeit durch eMethanol zu erhöhen. Folglich sind derzeit 87 % der weltweit finanzierten eFuel-Kapazität in China geplant. Im Gegensatz dazu spiegelt die niedrige FID-Rate Europas fehlende langfristige regulatorische Sicherheit wider.

Zusammenfassend bleibt die Final Investment Decision eine entscheidende Hürde für die eFuel-Industrie. Die kommenden Monate werden ausschlaggebend sein, um den Betrieb vor 2030 zu starten, da Bau und Inbetriebnahme bis zu vier Jahre dauern können. Regulatorische Unsicherheit ist ein wesentlicher Faktor, der Abnehmer und Investoren davon abhält, langfristige Verpflichtungen einzugehen. Ein unterstützender regulatorischer Rahmen und robuste Hochlauf-Strategien sind entscheidend, um eFuel-Investitionen freizusetzen. 💧



*Schlussfolgerungen
und Empfehlungen für
einen erfolgreichen
eFuel-Hochlauf*



Die im Szenario 3 des Folgenabschätzungsberichts der Europäischen Kommission von 2024 modellierte Mobilitätstransformation – das „EU Ambition“-Szenario – wird voraussichtlich aufgrund von Engpässen in der Batterieversorgungskette verzögert. Die industrielle Machbarkeitsbewertung von eFuels zeigt jedoch das Potenzial, den eFuel-Hochlauf ab 2030 zu beschleunigen, um die Klimaziele zu erreichen. Trotz dieses Potenzials offenbart der aktuelle Status der eFuel-Industrie erhebliche Schwächen, insbesondere einen Mangel an Finanzierung für europäische Projekte.



Die Europäische Union hat einen umfassenden regulatorischen Rahmen für eFuels geschaffen, der mehrere Instrumente zur Förderung von Nachfrage und Angebot im Mobilitätssektor umfasst – insbesondere in der Schiff- und Luftfahrt. Dennoch bestehen weiterhin Herausforderungen bei der Freisetzung von Projektfinanzierungen, selbst mit diesen Instrumenten. Auf der Angebotsseite ist das langfristige Projektrisiko aufgrund von Beschränkungen bei der eFuel-Produktion und sich entwickelnden Anforderungen erhöht, die Unsicherheit über die zukünftige Konformität für erste Projekte schaffen. Auf der Nachfrageseite fehlen langfristige Abnahmeverpflichtungen, da die aktuellen Nachfrageprognosen aufgrund unzu-

reichender Quoten niedrig bleiben. Darüber hinaus konzentriert sich die Regulierung hauptsächlich auf die Schifffahrt- und Luftfahrtsegmente, beispielsweise durch die Festlegung von Verpflichtungen für Flugzeugbetreiber, die begrenzt in der Lage sind, langfristige Volumenverträge einzugehen. Infolgedessen stimmen die Risikoniveaus für Produktion und Abnahme nicht mit den Erwartungen der Investoren überein, was eine wesentliche Hürde für die Projektfinanzierung darstellt.

Abbildung 64 zeigt mehrere Maßnahmen, die dazu beitragen können, Projektrisiken sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite zu mindern.



Abbildung 64: Erforderliche regulatorische Maßnahmen in der Europäischen Union zur Förderung der Finanzierung von eFuel-Projekten.



Auf der Angebotsseite ist die Angleichung langfristiger eFuel-Produktionskriterien entscheidend. Insbesondere sollten die Anforderungen an die zeitliche Korrelation mit der Versorgung durch erneuerbare Energien flexibler gestaltet werden, um die Marktentwicklung zu stärken. Die Einführung von Bestandschutzregelungen (Grandfathering) für erste Projekte – falls sich Produktionsstandards ändern – könnte langfristige Angebotsrisiken für Abnehmer und Erlösrisiken für Investoren verringern. Darüber hinaus könnte die Integration unvermeidbarer industrieller CO₂-Quellen in die Produktionsstandards für eFuels den Hochlauf beschleunigen, insbesondere in Regionen mit begrenztem Zugang zu biogenen Quellen. Die Einführung international anerkannter Nachhaltigkeitszertifikate für CO₂-Quellen würde die Nachhaltigkeit importierter eFuels sicherstellen und Importe aus Regionen mit kostengünstiger erneuerbarer Energie unterstützen.

Auf der Nachfrageseite können langfristige Abnahmeverpflichtungen durch die Erhöhung der eFuel-Quoten mit klaren langfristigen Projektionen und definierten Bedingungen für Nichtkonformität gesichert werden. Die Belohnung einer Übererfüllung der Quoten durch zusätzliche Multiplikatoren und Credit Banking könnte die Verpflichtungen weiter fördern.

Die Nutzung bestehender Förderprogramme – wie SAF-Allowances, EU Innovation Fund und European Hydrogen Bank – ist entscheidend. Insbesondere kann der Wettbewerb mit anderen förderfähigen Technologien durch die Einführung dedizierter Budgets für Schiff- und Luftfahrt in Auktionen der European Hydrogen Bank verringert werden. Innerhalb des EU-Emissionshandelssystems (ETS) würde die Erhöhung der Anzahl von Allowances spezifisch für eSAF-Projekte den Fluggesellschaften helfen, eSAF-Kosten auszugleichen, den Wettbewerb mit bioSAF zu reduzieren und die

Attraktivität von eSAF-Abnahmeverträgen zu steigern. Darüber hinaus würde die Zuteilung von eSAF-Allowances für die gesamte Dauer des Abnahmevertrags – anstatt jährlich – langfristige Erlössicherheit im Rahmen des ETS bieten. Darüber hinaus kann die Anerkennung der eFuel-Nutzung in anderen Mobilitätssektoren die Nachfrage verstärken. Beispielsweise wäre die Einführung einer eFuel-Anrechnung in den CO₂-Standards für die Straßenmobilität – wie bereits in der Schweiz umgesetzt – wirksam. Insgesamt würde diese Maßnahme Skaleneffekte fördern, Investitionskosten senken und Investitions- sowie Abnehmerisiken durch branchenübergreifende Risikoteilung mindern.

Darüber hinaus sind robuste Hochlauf-Strategien entscheidend, um Finanzierungslücken zu schließen.

Erstens ist die Senkung der eFuel-Produktionskosten entscheidend, um sich an der Zahlungsbereitschaft potenzieller Abnehmer auszurichten. Im Fall von eMethanol übersteigen die potenziellen Kostensenkungen 80 %, wie in Abbildung 65 dargestellt. Dies kann durch eine Skalierung der Produktion erreicht werden, um von günstigeren Investitionsausgaben (Capex) zu profitieren. Der Standort der Anlage spielt dabei eine entscheidende Rolle: Eine höhere Verfügbarkeit erneuerbarer Energien ermöglicht eine kleinere Anlagenkapazität bei gleicher Jahresproduktion und senkt dadurch die Capex. Ein optimaler Standort unterstützt zudem einen stabilen Anlagenbetrieb, indem er eine konstante Energielast für Syntheseprozesse bereitstellt, den Bedarf an Energiespeicherung reduziert und die Capex weiter senkt. Zusätzliche Kostensenkungen können durch die Integration fortschrittlicher Technologien in die Produktion erzielt werden. Beispielsweise sind Wärmerückgewinnungssysteme entscheidend, um hohe Wärmekosten in abgelegenen Regionen zu vermeiden

und die Wirtschaftlichkeit von Direct Air Capture bei niedrigen Energiekosten erheblich zu verbessern. Effizientere und flexiblere Syntheseprozesse ermöglichen eine bessere Nutzung schwankender erneuerbarer Energien. Ebenso kann ein flexibles Speichermanagement die Effizienz der Anlage steigern und den

Bedarf an Energie- und Materialspeicherung verringern, was weitere Capex-Vorteile schafft. Der Zugang zu diesen fortschrittlichen Technologien erfordert robuste Partnerschaftsstrategien und eine vertikale Integration innerhalb der Ausrüstungswertschöpfungskette.

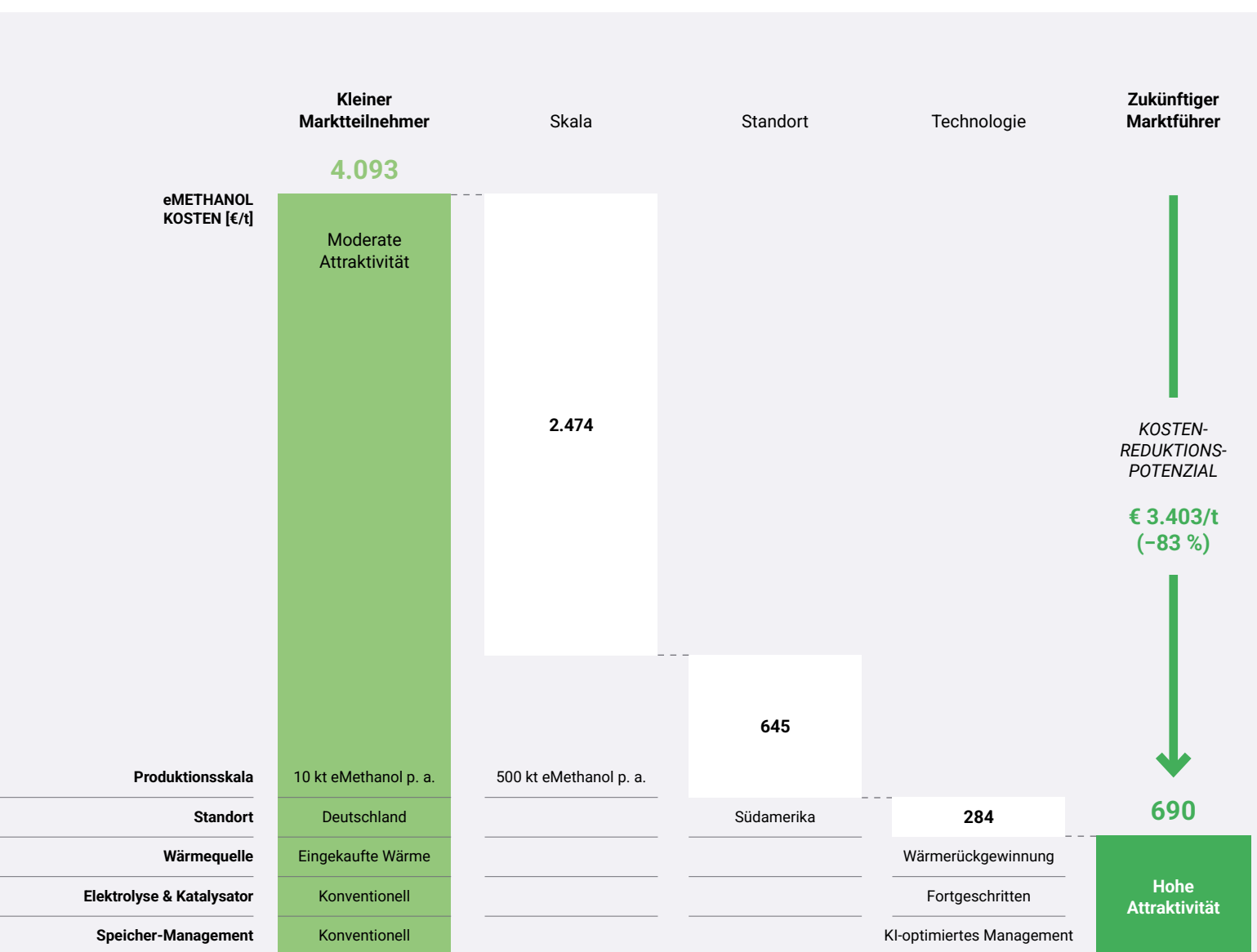


Abbildung 65: eFuel-Kostensenkungshebel zur Erreichung einer Marktführerschaft bis 2040, in €/t eMethanol.

Quelle: Porsche Consulting eFuel Cost Model | Annahmen für einen Marktführer im Jahr 2040: Onshore-Windkraftanlagen mit 3,6 MW und 5.872 Volllaststunden; gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten (Weighted Average Cost of Capital, WACC) von 10 %; CO₂-Quelle: Direct Air Capture; Transport- und Distributionskosten bis Hamburg berücksichtigt

Zweitens kann die Optimierung von Skalierung, Standort und Technologie aufgrund zusätzlicher Unsicherheiten im Vergleich zu Standard-Setups höhere Projektrisiken mit sich bringen. Intelligente Skalierung sollte Skaleneffekte, Standort und Technologie nutzen und gleichzeitig das Investitionsrisiko steuern, indem das optimale Gleichgewicht zwischen Risiko und Rendite identifiziert wird. Die Einführung neuer Technologien muss innerhalb der Skalierungsstrategie antizipiert werden, und ein modulares Anlagendesign sollte übernommen werden, um Flexibilität in der Anlagenkonfiguration zu gewährleisten.

Drittens ist die Sicherung von Abnahmeverpflichtungen entscheidend, um langfristige Erlöse für Investoren zu gewährleisten. Dies kann durch branchenübergreifende Abnahmeallianzen gestärkt werden, die Risikoteilungsstrukturen schaffen, indem sie individuelle Abnahmemengen begrenzen und gleichzeitig von Kostenvorteilen durch Skaleneffekte profitieren. Eine branchenübergreifende Abnahme ermöglicht zudem die vollständige Nutzung aller Produkte und minimiert zusätzliche Raffinerungskosten für Zielprodukte. Langfristige regulatorische Unsicherheit kann durch die Anpassung der Produktion an die branchenspezifische Nachfrage im Zeitverlauf entsprechend regulatorischen Entwicklungen gemindert werden. Dies erfordert Anlagendesigns mit flexiblen Produktausgaben. Darüber hinaus kann eine Multi-Anlagen-Versorgungsstrategie Technologie- und Kostenrisiken für Abnehmer reduzieren. Neue Anlagen können später der Versorgungsgruppe hinzugefügt werden, um zukünftige Technologieverbesserungen und Kostensenkungen zu realisieren.

Viertens sollten eFuel-Anlagen strategisch so platziert werden, dass das Potenzial für erneuerbare Energien maximiert und geopolitische Risiken minimiert werden. Globale Subventionsmöglichkeiten sollten genutzt und die

Förderfähigkeit für Subventionsprogramme sichergestellt werden, um die Rentabilität zu verbessern. Die Schaffung von Synergien mit bestehender Infrastruktur – wie kommerziellen Häfen, Schifffahrtsrouten und Raffinerien – ist entscheidend, um die Versorgung mit eFuels zu sichern und den gesamten Scale-up-Plan zu unterstützen.

Zusammenfassend erfordert die Steigerung der Attraktivität von eFuel-Projekten sowie die Förderung von Abnahme- und Finanzierungszusagen die Nutzung bestehender regulatorischer Instrumente. Entscheidend sind pragmatische Produktionsstandards, eine gestärkte Nachfrage durch ambitionierte Quoten in der RED, ReFuelEU Aviation und FuelEU Maritime sowie eine technologieneutrale CO₂-Flottenregulierung für neue Fahrzeuge. Die Investitionsattraktivität lässt sich durch die Zusammenarbeit zwischen eFuel-Produzenten und branchenübergreifenden Abnehmern stärken, indem Kostensenkungen mit Skalierungsstrategien kombiniert und Risikoteilungsstrukturen implementiert werden. Zusammen mit einem robusten und verlässlichen regulatorischen Rahmen sind diese Maßnahmen entscheidend, um den eFuel-Hochlauf in Europa zu ermöglichen und ihren Beitrag zur Erreichung der Klimaziele zu maximieren. ⚡

Entscheidend sind pragmatische Produktionsstandards, eine gestärkte Nachfrage durch ambitionierte Quoten in der RED, ReFuelEU Aviation und FuelEU Maritime sowie eine technologieneutrale CO₂-Flottenregulierung für neue Fahrzeuge.





Anhang A – Literatur

- 1 European Commission, „A Assessment Report, Europe’s 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52024SC0063>.
- 2 Intergovernmental Panel on Climate Change, „Global Warming of 1.5°C,” 2018. [Online].
Verfügbar: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf.
- 3 Our World in Data, „CO₂ emissions,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>.
- 4 European Environment Agency, „Greenhouse Gases Data Viewer,” 2025. [Online].
Verfügbar: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/greenhouse-gases-viewer-data-viewers?activeTab=8a280073-bf94-4717-b3e2-1374b57ca99d>.
- 5 Fuel Alliance, „eFuels Production Map,” [Online].
Verfügbar: <https://www.efuel-alliance.eu/efuels/efuels-production-map>.
- 6 International Energy Agency, „Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database#>.
- 7 Methanol Institute, „Renewable Methanol,” 2025. [Online].
Verfügbar: <https://methanol.org/renewable/>.
- 8 European Environment Agency, „Greenhouse gas emissions from transport in Europe,” 2025. [Online].
Verfügbar: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>.
- 9 Umweltbundesamt, „Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf den Weg zu einem treibhausgas-neutralen Verkehr,” IFEU, 2024. [Online].
Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-umweltbilanz-von-kraftfahrzeugen>.
- 10 ACEA, „New EU car registrations,” [Online].
Verfügbar: <https://www.acea.auto/figure/new-passenger-car-registrations-in-eu/>.
- 11 GOV UK, „Greenhouse gas reporting, conversion factors,” 2022. [Online].
Verfügbar: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022>.
- 12 European Commission, „Commission Delegated Regulation,” 2023. [Online].
Verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1184>.
- 13 World Nuclear Association, „Carbon Dioxide Emissions From Electricity,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity#:~:text=Life%20cycle%20emissions%20of%20electricity%20options&text=In%20March%202022%20the%20UN%27s,will%20need%20to%20be%20decarbonized>.
- 14 Ember, „European Electricity Review,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2024/>.
- 15 European Commission, „Renewable Energy Directive,” [Online].
Verfügbar: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en.

- 16 Airbus, „Report of the Board of Directors,” 2023. [Online].
Verfügbar: <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2024-04/Airbus%20SE%20Report%20of%20Board%20of%20Directors%20%20FY2023%20%281%29.pdf>.
- 17 Samsung Heavy Industries, „Data Center,” [Online].
Verfügbar: https://www.samsungshi.com/ESG/Eng/sub5.aspx#sub5_5.
- 18 Eurostat, „SHARES Database,” 2025. [Online].
Verfügbar: [https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/energy/database/additional-data#Kurzbeurteilung%20der%20erneuerbaren%20Energiequellen%20\(Short%20Assessment%20of%20Renewable%20Energy%20Sources%20%E2%80%93%20SHARES\)](https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/energy/database/additional-data#Kurzbeurteilung%20der%20erneuerbaren%20Energiequellen%20(Short%20Assessment%20of%20Renewable%20Energy%20Sources%20%E2%80%93%20SHARES)).
- 19 European Commission, „FuelEU Maritime,” [Online].
Verfügbar: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime_en.
- 20 European Commission, „ReFuelEU Aviation,” [Online].
Verfügbar: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en.
- 21 European Commission, „EU Hydrogen Strategy,” 2022. [Online].
Verfügbar: https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen_en.
- 22 S. Link, A. Stephan, D. Speth, P. Plötz, „Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification,” Nature Energy, [Online].
Verfügbar: <https://www.nature.com/articles/s41560-024-01531-9#:~:text=The%20average%20BET%20battery%20capacity,600%20kWh%20from%202030%20onwards..>
- 23 International Energy Agency, „World Energy Outlook,” 2023. [Online].
Verfügbar: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
- 24 Renewables Ninja, „Hourly climate data,” 2019. [Online].
Verfügbar: <https://www.renewables.ninja/>.
- 25 ENTSOE, „Ten-Year Network Development Plan Scenario Report,” 2020. [Online].
Verfügbar: <https://2020.entsos-tyndp-scenarios.eu/>.
- 26 International Energy Agency, „Electricity Grids and Secure Energy Transitions,” 2023. [Online].
Verfügbar: <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions>.
- 27 International Energy Agency, „Global EV Outlook, Trends in electric vehicle charging,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-vehicle-charging>.
- 28 European Parliament, „Alternative fuel infrastructures for heavy-duty vehicles,” TRAN Committee, 2021. [Online].
Verfügbar: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690901/IPOL_STU\(2021\)690901_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690901/IPOL_STU(2021)690901_EN.pdf).
- 29 European Commission, „REPowerEU,” 2022. [Online].
Verfügbar: https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en.
- 30 International Energy Agency, „The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions,” 2023. [Online].
Verfügbar: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>.
- 31 International Energy Agency, „Global Critical Minerals Outlook,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>.



- 32 European Parliament and Council, „Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries,” 2023. [Online].
Verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>.
- 33 International Renewable Energy Agency, „Wind Energy Data,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy#:~:text=Wind%20turbine%20capacity%20has%20increased,and%208%2D12%20MW%20offshore>.
- 34 International Energy Agency, „Global Hydrogen Review,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
- 35 FuelsEurope, „Statistical Report,” 2025. [Online].
Verfügbar: <https://www.fuelseurope.eu/publications/publications/statistical-report-2025>.
- 36 International Renewable Energy Agency, „Innovation Outlook: Renewable Ammonia,” 2022. [Online].
Verfügbar: <https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Ammonia>.
- 37 Benchmark Mineral Intelligence, „Anode Supply and Capacity Assessment,” 2024.
- 38 International Energy Agency, „Electric Vehicles Battery Demand,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-vehicles-battery-demand-by-region-2023-2035>.
- 39 Wood Mackenzie, „Cathode Market Insights and Trends,” 2024.
- 40 Porsche Consulting, „Battery Cell Supply Data,” 2024.
- 41 PEM RWTH Aachen, „Battery Cell Supply Data,” 2023.
- 42 FVV, „Future Fuels: FVV Fuel Study IVb,” [Online].
Verfügbar: https://www.fvv-net.de/fileadmin/Stories/Wie_schnell_geht_nachhaltig/FVV_H1313_1452_Future_Fuels_FVV_Fuel_Study_IVb_2022-12.pdf.
- 43 Bundesnetzagentur, „Öffentliche Ladeinfrastruktur,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html>.
- 44 European Commission, „European Alternative Fuels Observatory,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/general-information/news/new-study-accelerating-eu-electric-vehicle-charging-infrastructure-roll>.
- 45 International Energy Agency, „Global EV Data Explorer,” 2024. [Online].
Verfügbar: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>.
- 46 International Energy Agency, „Global Hydrogen Review,” 2023. [Online].
Verfügbar: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>.

Anhang B – Autoren

Studienkoordinatoren:

Ralf Diemer, eFuel Alliance e. V.,
Chief Executive Officer
diemer@efuel-alliance.eu

Dr. Tobias Block, eFuel Alliance e. V.,
Chief Strategy Officer
block@efuel-alliance.eu

Co-Autoren:

Dr. Lukas Mauler, Porsche Consulting GmbH,
Associate Partner

Corentin Prié, Porsche Consulting GmbH,
Manager

Anhang C – Begutachtung

Eine detaillierte Überprüfung der Methodik sowie der zugrunde liegenden Datenannahmen wurde von SFA (Oxford) durchgeführt, einer Beratungsfirma mit ausgewiesener Expertise in kritischen Rohstoffen und Metallen, die für die Energiewende und erneuerbare Energien – einschließlich grünem Wasserstoff – von zentraler Bedeutung sind. SFA (Oxford) verfügt über proprietäre Datenbanken und bietet strategische Analysen entlang der gesamten Rohstoffwertschöpfungskette an. Der Kundenkreis umfasst auf der Angebotsseite große Bergbauunternehmen und Explorationsgesellschaften, auf der Nachfrageseite Automobil- und Batteriehersteller sowie auf der Finanzierungsseite Investmentbanken. Darüber hinaus verfügt SFA (Oxford) über spezifisches Fachwissen in der Wertschöpfungs-

fungskette von grünem Wasserstoff, das insbesondere für Anlagen- und Ausrüstungsanbieter bereitgestellt wird.

Für die vorliegende Analyse wurden die relevanten Daten und Annahmen sorgfältig geprüft und stichprobenartig mit internen Quellen von SFA (Oxford) quervalidiert. Zudem wurde die Methodik hinsichtlich ihrer logischen Abfolge und Konsistenz überprüft. SFA (Oxford) bestätigte, dass die aus der Analyse abgeleiteten Schlussfolgerungen insgesamt plausibel und robust sind.





Anhang D – Abkürzungen

AAM: Anoden-Aktivmaterial	IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
CAGR: Compound Annual Growth Rate	LFP: Lithium Iron Phosphate
CAM: Kathoden-Aktivmaterial	LMFP: Lithium Iron Manganese Phosphate
CCS: Carbon Capture and Storage	LNG: Liquefied Natural Gas
CNFV: Carbon-Neutral Fuel Vehicle	LNMO: Lithium Nickel Manganese Oxide
CNG: Compressed Natural Gas	NCA: Nickel Cobalt Aluminum
BEV: Battery Electric Vehicle	NMC: Nickel Manganese Cobalt
FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle	PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle
FEED: Front-End Engineering Design	PV: Photovoltaik
FID: Final Investment Decision	RED: Renewable Energy Directive
FT: Fischer-Tropsch	RFNBO: Renewable Fuel of Non-Biological Origin
GT: Gross Tonnage	SAF: Sustainable Aviation Fuel
HICEV: Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle	TCO: Total Cost of Ownership
ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle	WACC: Weighted Average Cost of Capital

Anhang E – Detaillierte Ergebnisse der Engpassanalyse

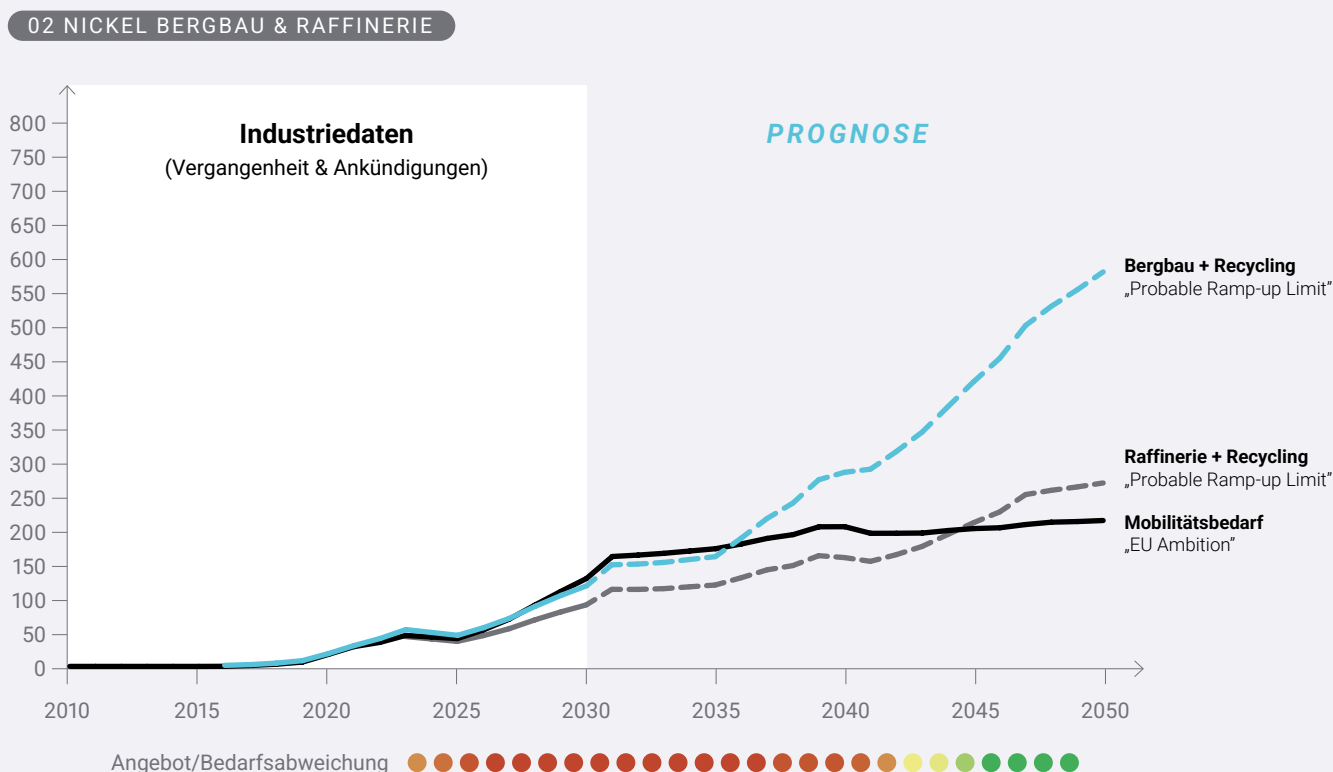


Abbildung 66: Vergleich der jährlichen Nickelsonversorgung und -Nachfrage in kt/a in der EU-Mobilität: Szenario „EU Ambition“.
Quelle: IEA Global Critical Minerals Outlook 2024³⁰

03 KOBALT BERGBAU & RAFFINERIE

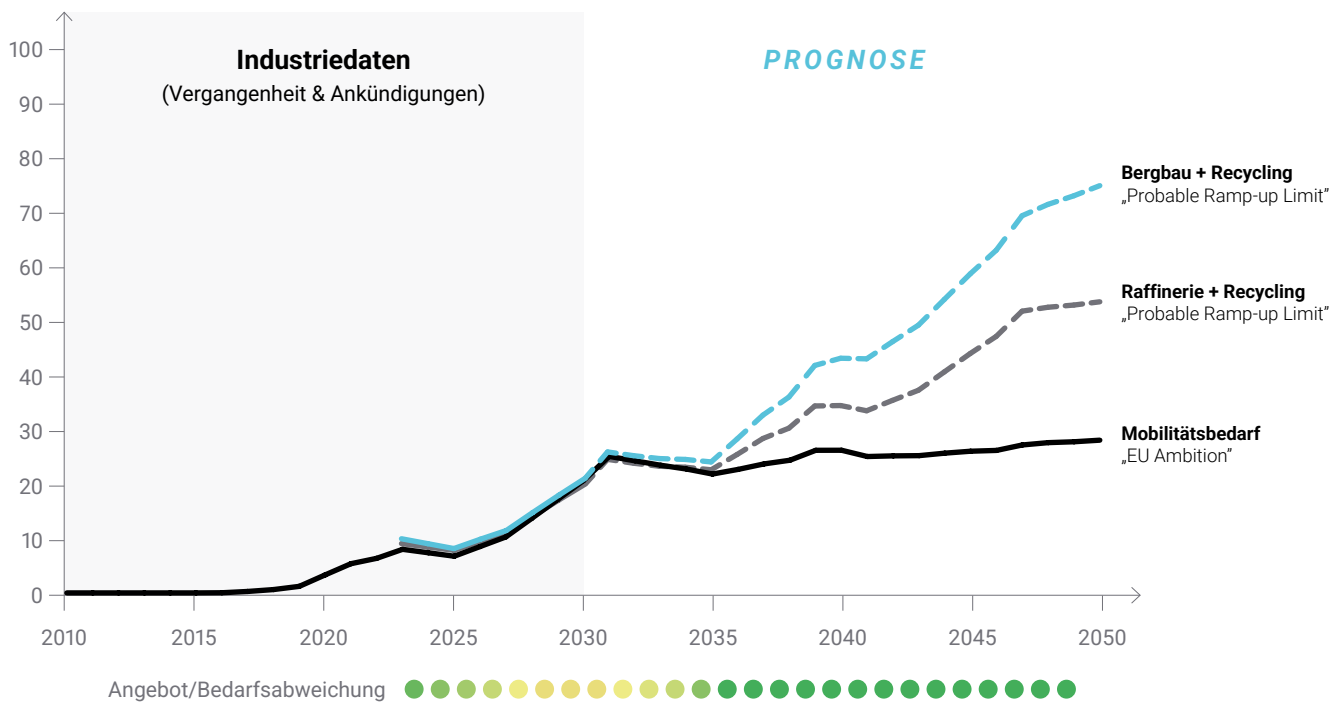


Abbildung 67: Vergleich der jährlichen Kobaltversorgung und -Nachfrage in kt/a in der EU-Mobilität: Szenario „EU Ambition“.
Quelle: IEA Global Critical Minerals Outlook 2024³⁰

04 GRAPHIT BERGBAU & RAFFINERIE

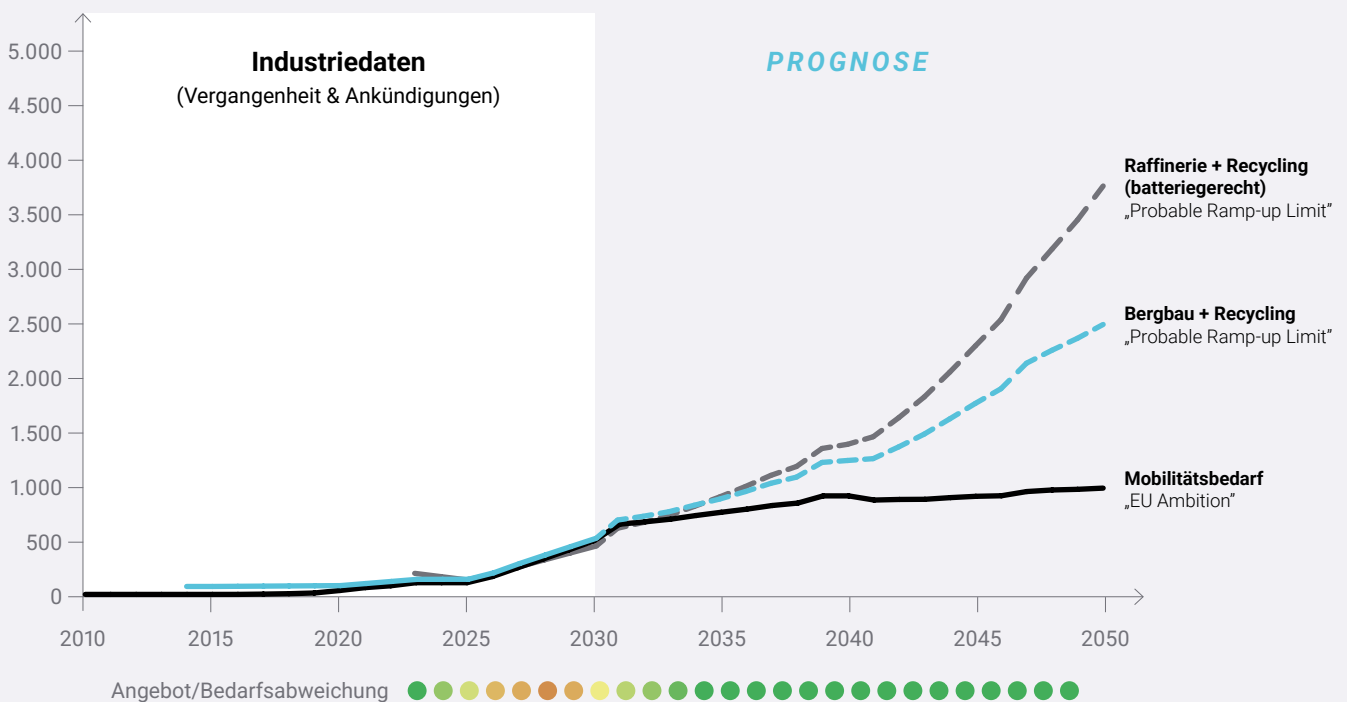


Abbildung 68: Vergleich der jährlichen Graphitversorgung und -Nachfrage in kt/a in der EU-Mobilität: Szenario „EU Ambition“.
Quelle: IEA Global Critical Minerals Outlook 2024³⁰

05 AAM-PRODUKTION

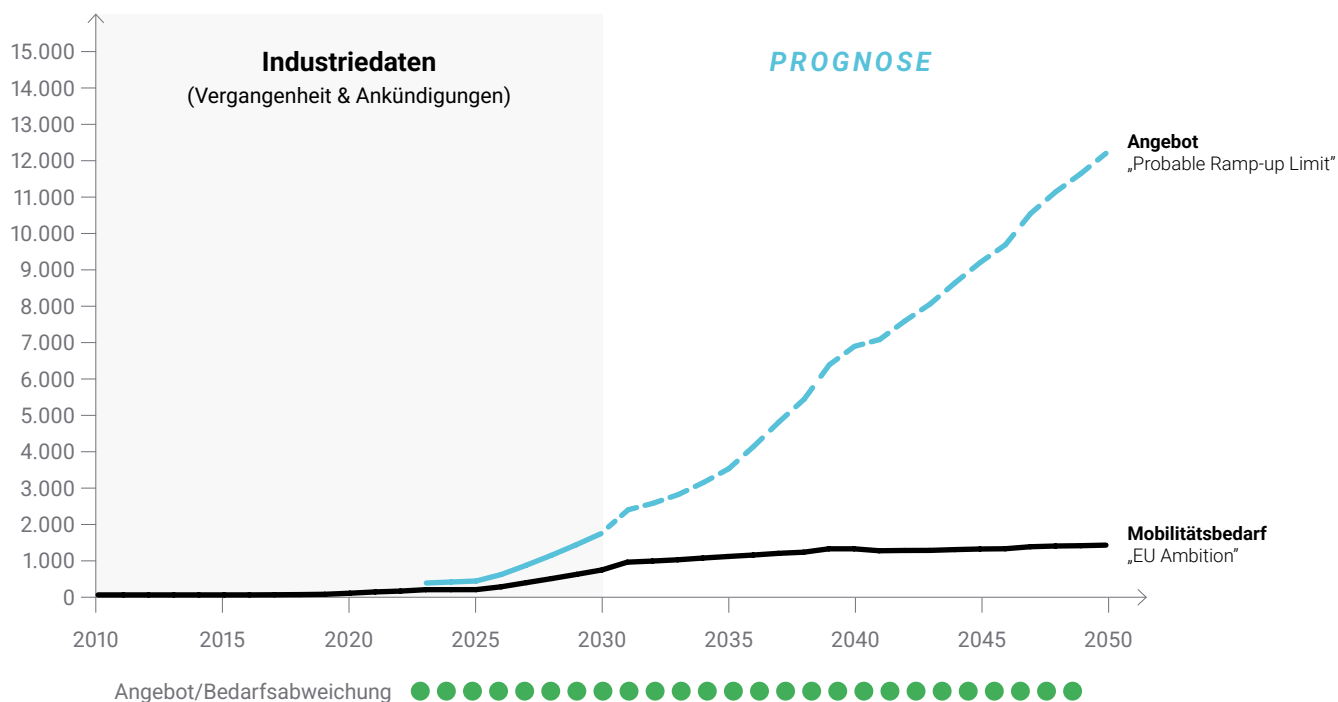


Abbildung 69: Vergleich der jährlichen AAM-Versorgung und -Nachfrage in kt/a in der EU-Mobilität: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: Benchmark Mineral Intelligence Anode Supply Data³⁷, Electric Vehicles Battery Demand IEA 2024³⁸ | AAM: Anoden-Aktivmaterial

06 CAM-PRODUKTION

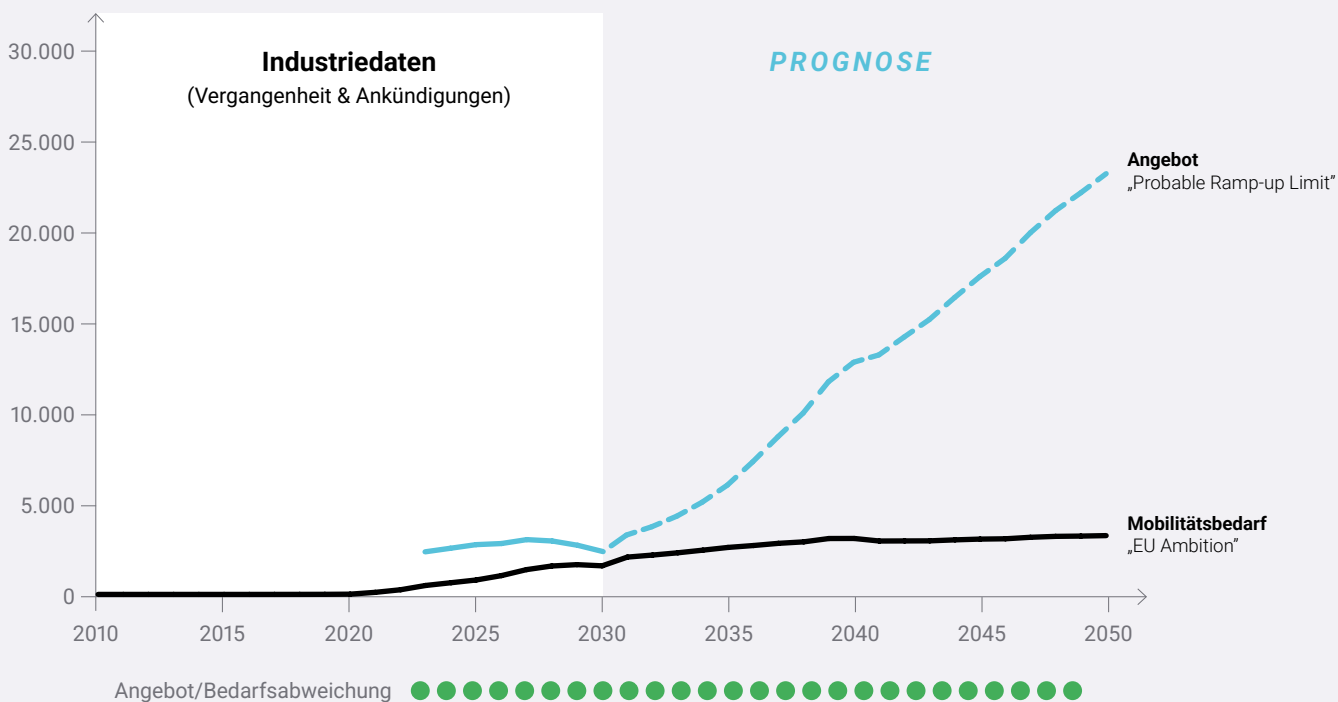


Abbildung 70: Vergleich der jährlichen CAM-Versorgung und -Nachfrage in kt/a in der EU-Mobilität: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: Wood Mackenzie Cathode Supply Data³⁹, Electric Vehicles Battery Demand IEA 2024³⁸ | CAM: Kathoden-Aktivmaterial

07 ZELLENPRODUKTION

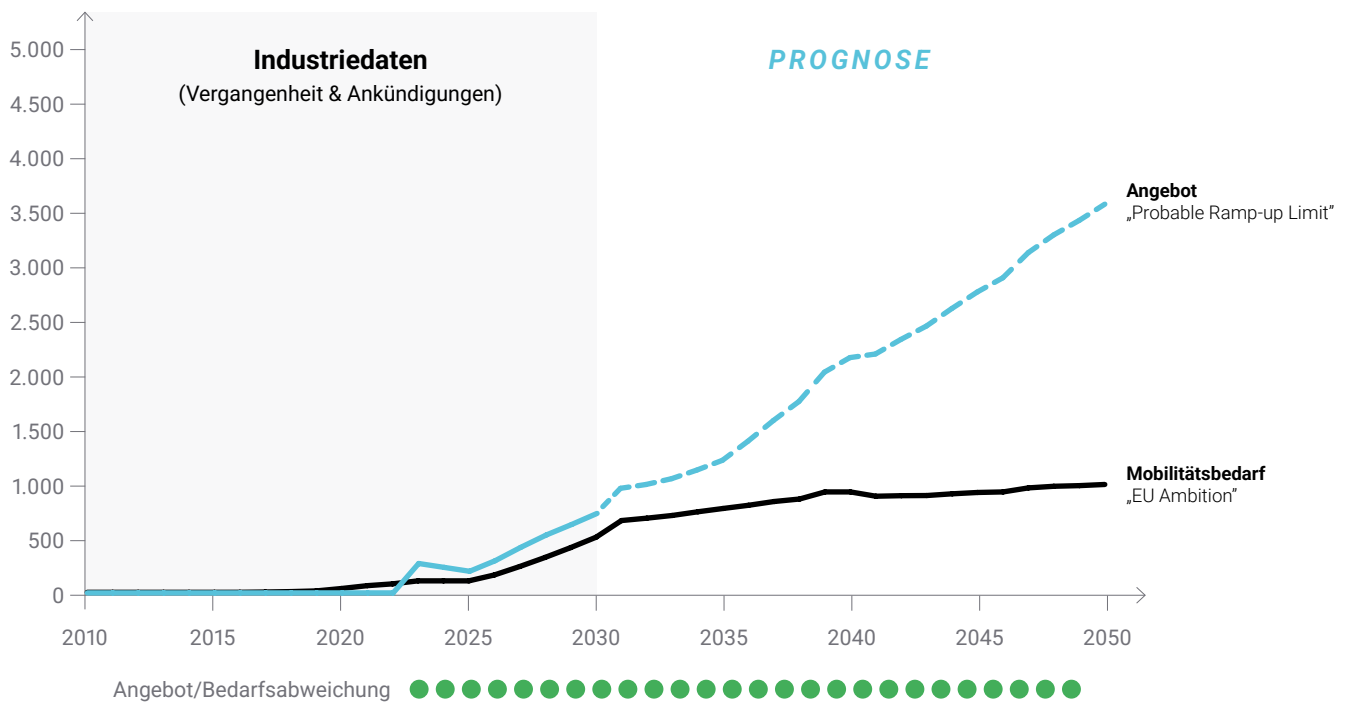


Abbildung 71: Vergleich der jährlichen Batteriezell-Versorgung und -Nachfrage in GWh/a in der EU-Mobilität: Szenario „EU Ambition“. Quelle: Porsche Consulting Battery Cell Supply Data⁴⁰, PEM RWTH Aachen Battery Cell Supply Data⁴¹, Electric Vehicles Battery Demand IEA 2024³⁸

08 WINDKRAFTAUSRÜSTUNG

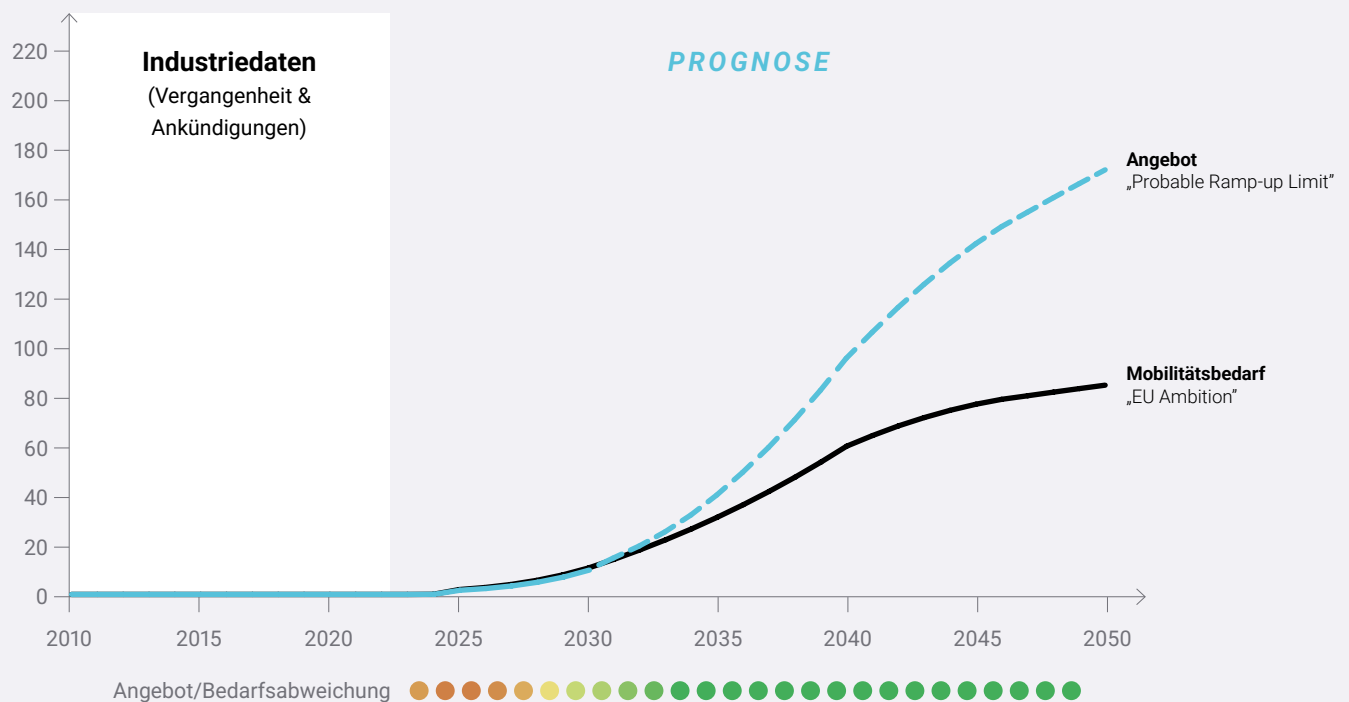


Abbildung 72: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach erneuerbarem Strom in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von Windkraftausrüstungen in GW: Szenario „EU Ambition“. Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³, IEA World Energy Outlook 2023²³

09 PV-KRAFTAUSRÜSTUNG

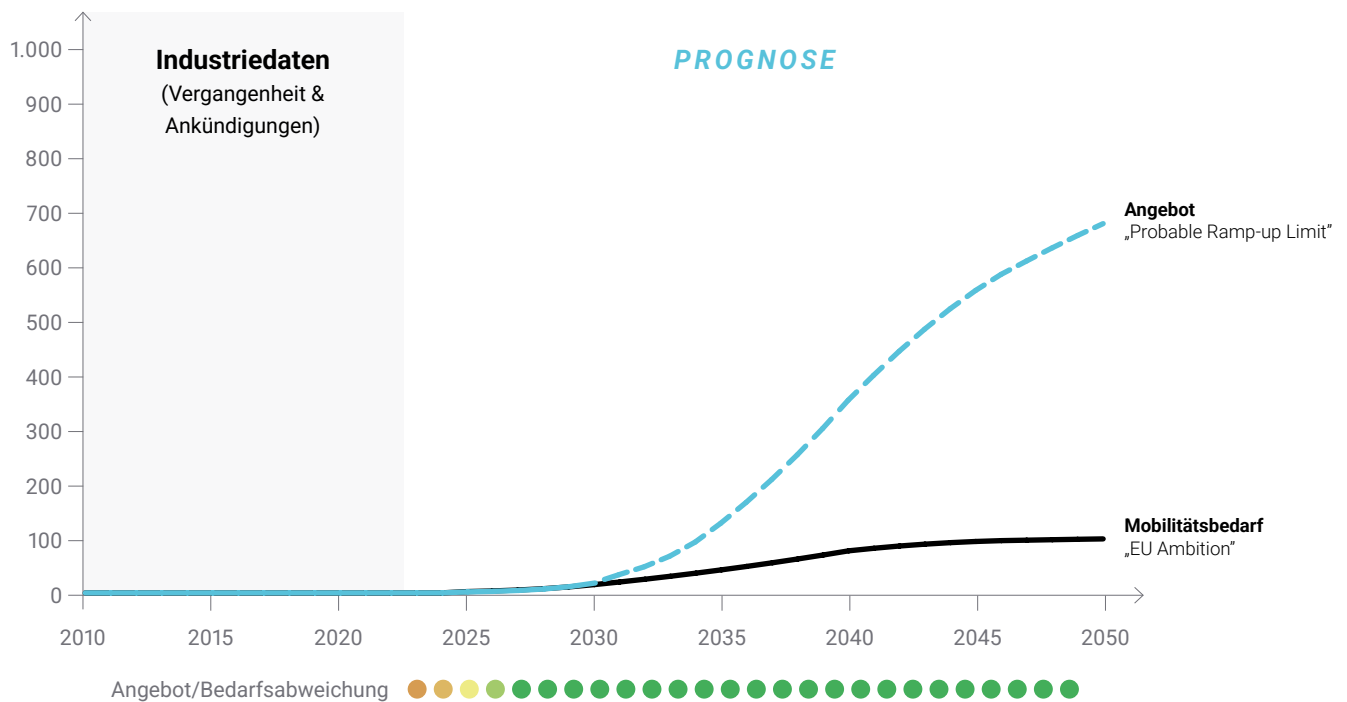


Abbildung 73: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach erneuerbarem Strom in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von PV-Kraftausrüstungen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³, IEA World Energy Outlook 2023²³ | PV: Photovoltaik

10 WINDKRAFTANLAGENINSTALLATION

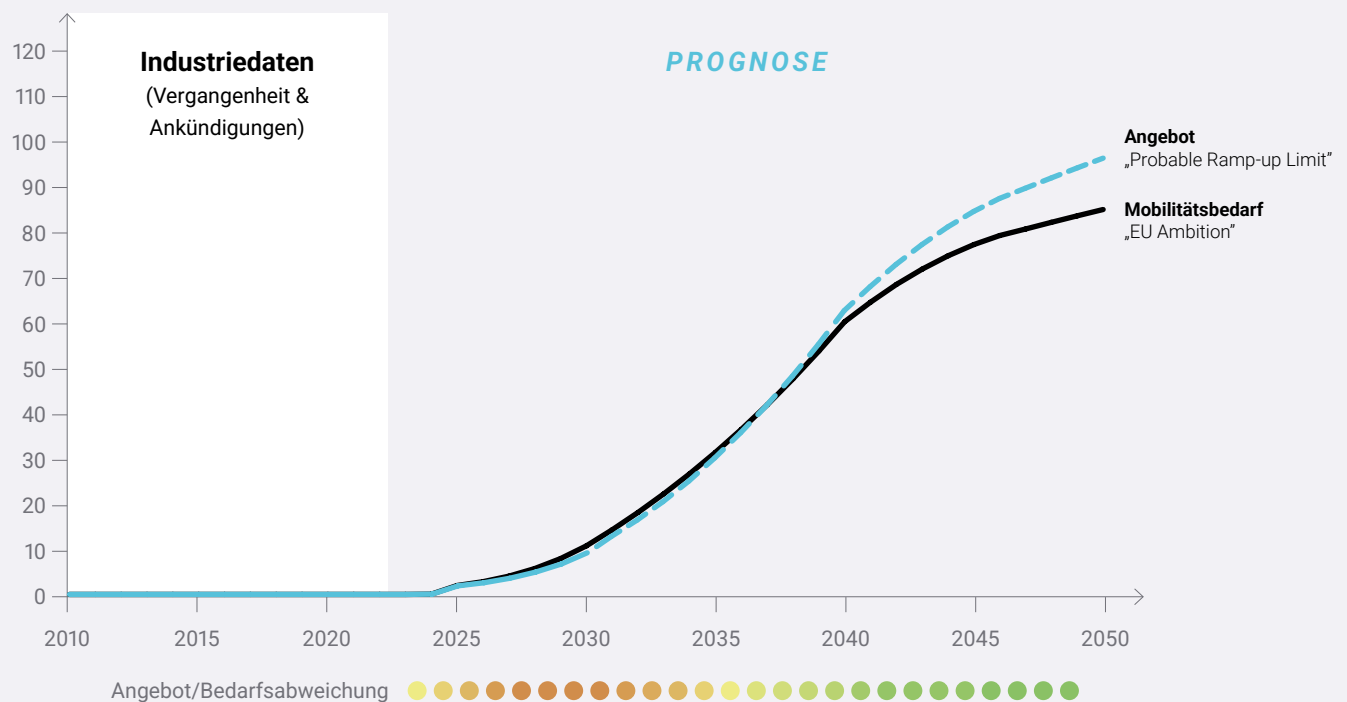


Abbildung 74: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach erneuerbarem Strom in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von Windkraftanlagen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³, IEA World Energy Outlook 2023²³

11 PV-KRAFTANLAGENINSTALLATION

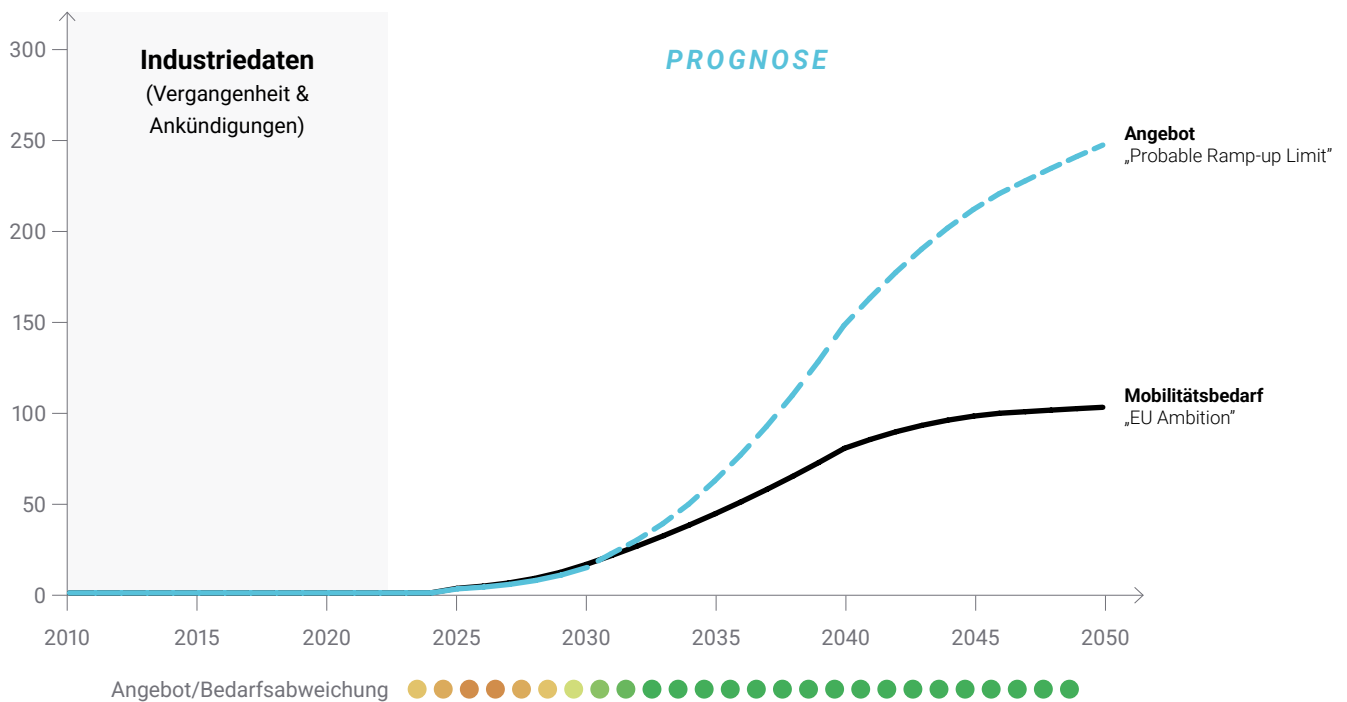


Abbildung 75: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach erneuerbarem Strom in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von PV-Kraftanlagen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³, IEA World Energy Outlook 2023²³ | PV: Photovoltaik

12 ÜBERTRAGUNGSNETZ

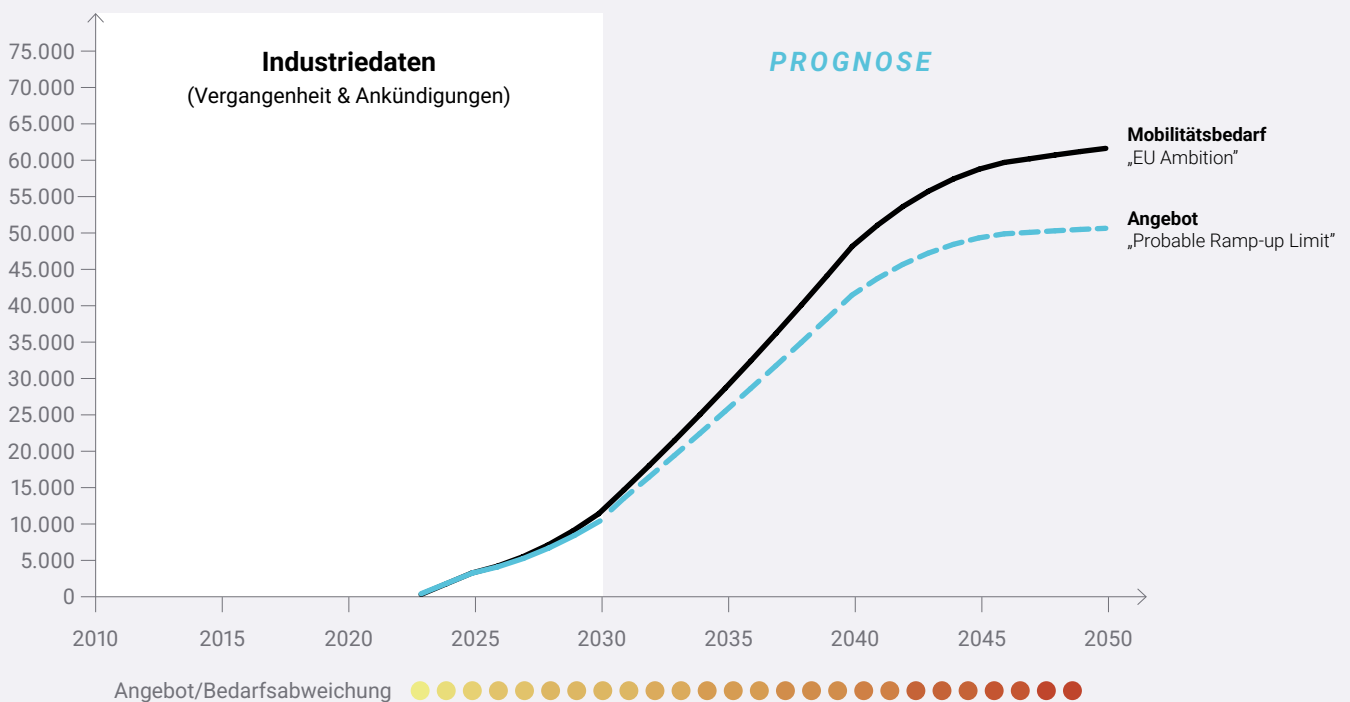


Abbildung 76: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach Strom in der EU-Mobilität, installierte Übertragungsnetzlänge in km: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: FVV Fuel Study IVb⁴², ENTSOE TYNDP Report of 2020²⁵, IEA World Energy Outlook 2023²³

13 VERTEILUNGSNETZ

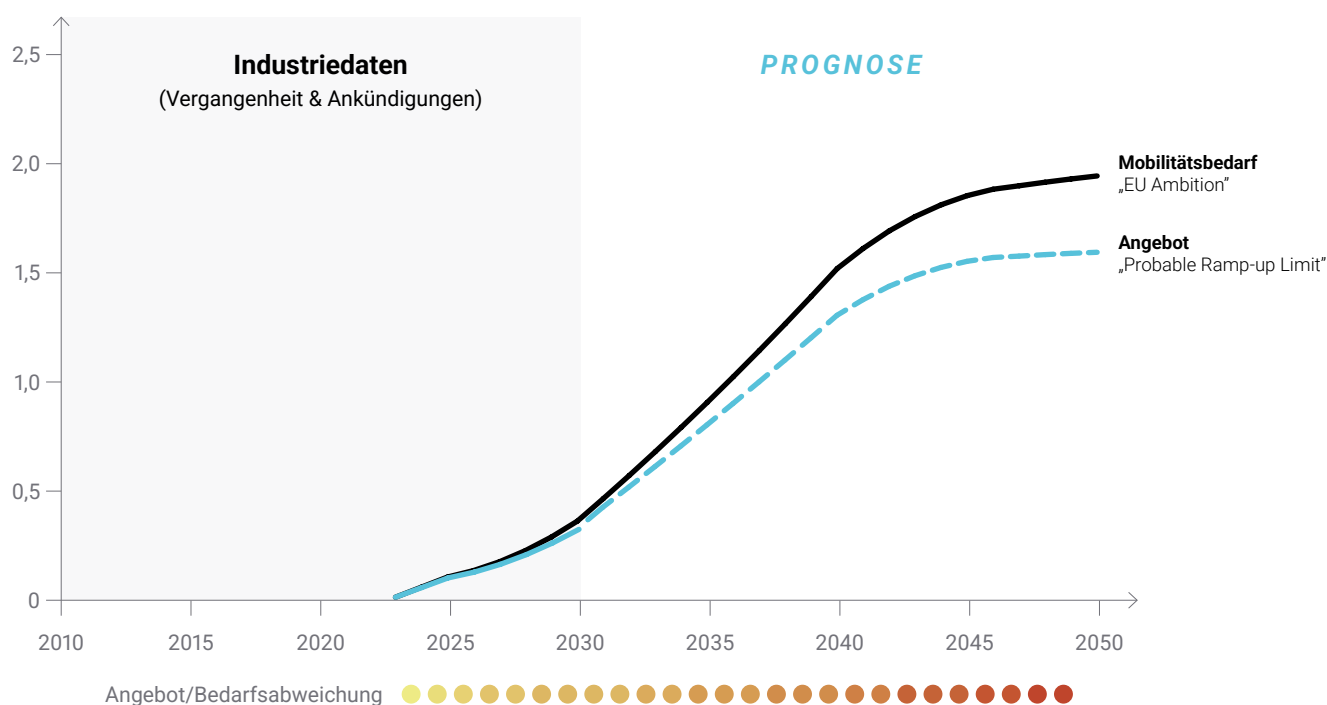


Abbildung 77: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach Strom in der EU-Mobilität, installierte Verteilungsnetzlänge in Mio. km: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: FVV Fuel Study IVb⁴², IEA Electricity Grids and Secure Energy Transition Report 2023²⁶, IEA World Energy Outlook 2023²³

14 ÖFFENTLICHE LADESÄULEN

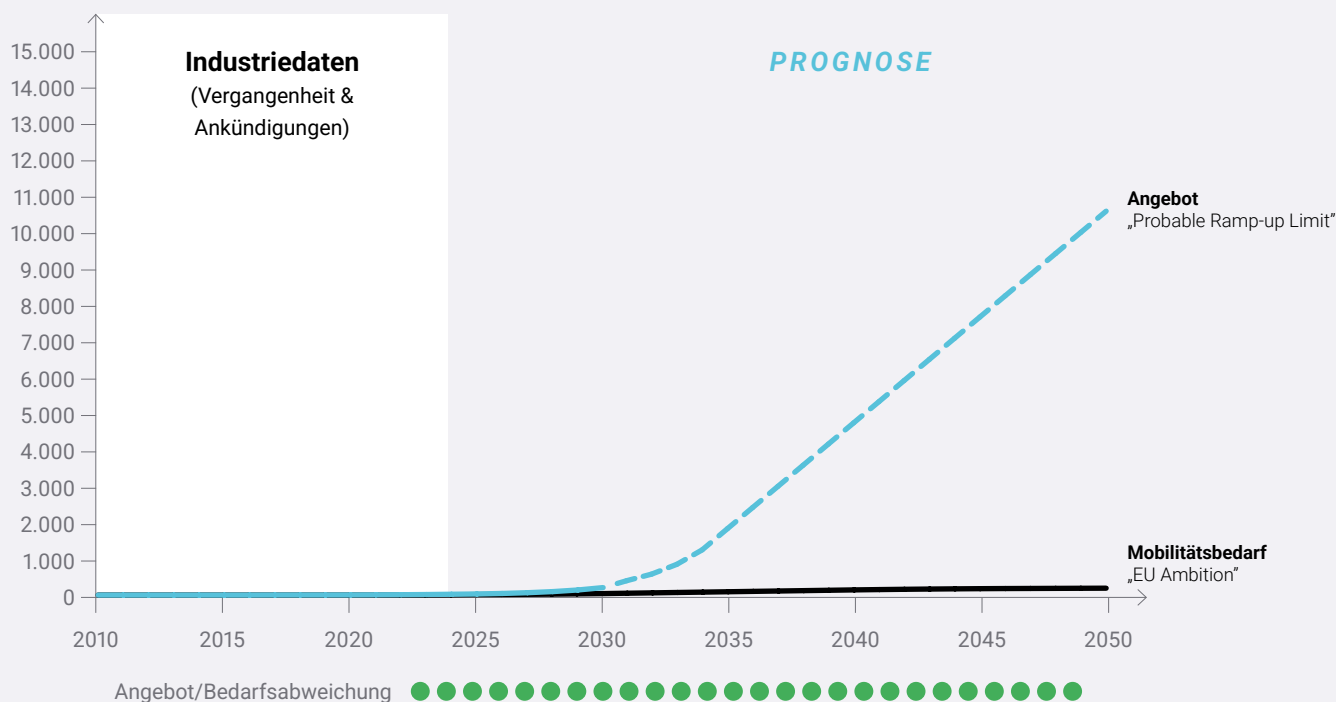


Abbildung 78: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach Strom in der EU-Mobilität, installierte öffentliche Ladeleistung in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: Bundesnetzagentur Öffentliche Ladeinfrastruktur 2024⁴³, Europäische Kommission 2024⁴⁴, IEA Global EV Outlook 2024²⁷, Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR) for Heavy Duty 2021²⁸

15 WINDKRAFTAUSRÜSTUNG

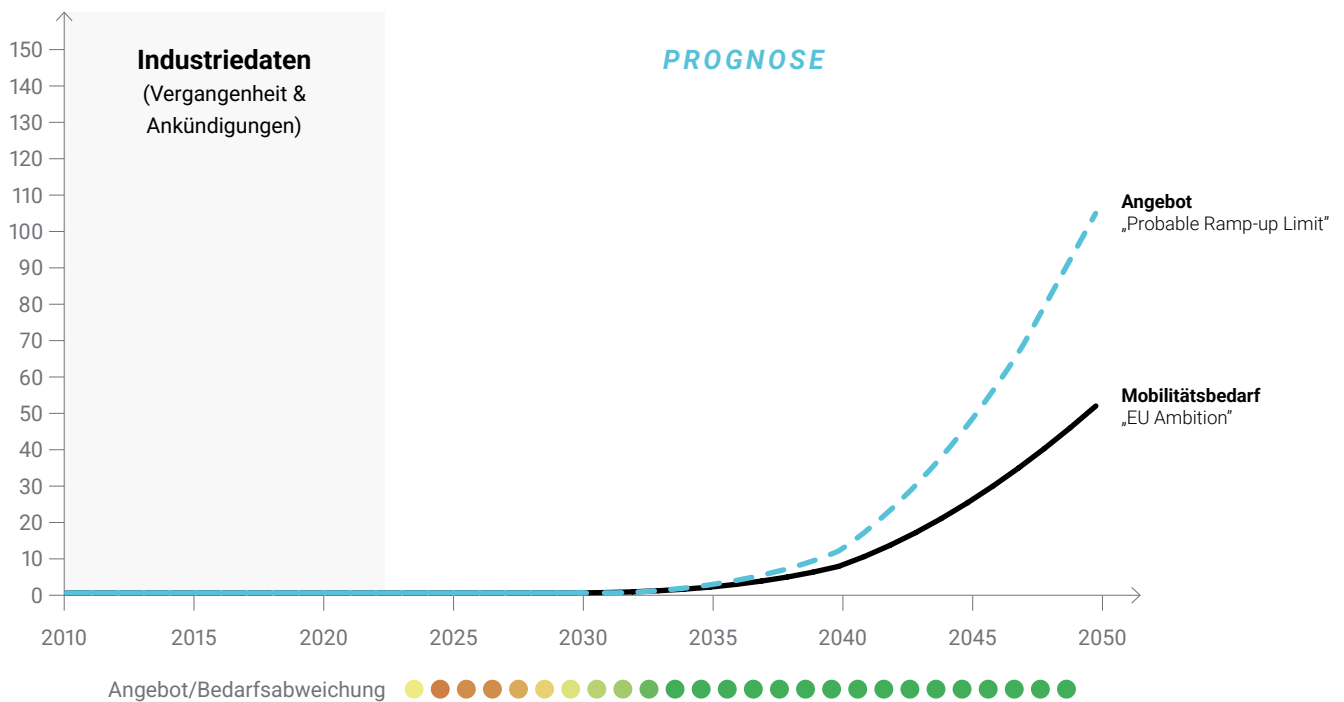


Abbildung 79: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach grünem Wasserstoff in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von Windkraftausrüstungen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³, IEA World Energy Outlook 2023²³

16 PV-KRAFTAUSRÜSTUNG

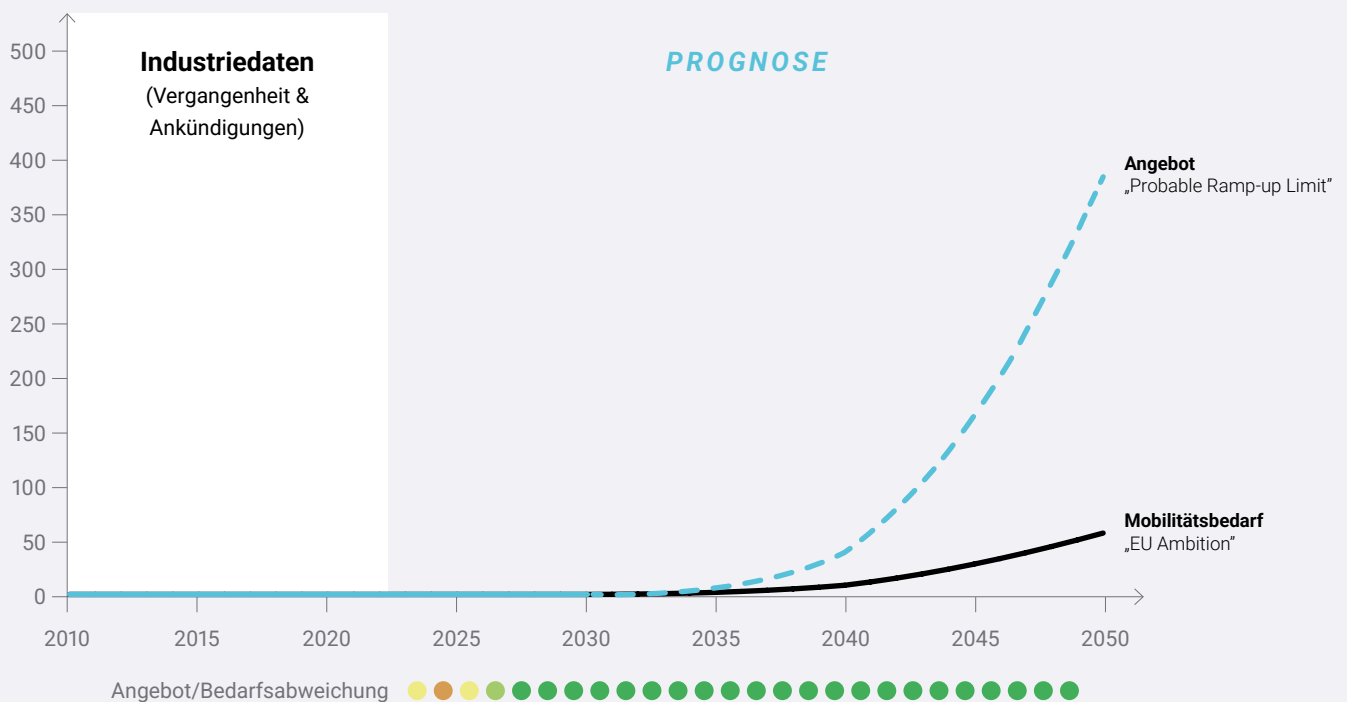


Abbildung 80: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach grünem Wasserstoff in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von PV-Kraftausrüstungen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³, IEA World Energy Outlook 2023²³ | PV: Photovoltaik

17 WINDKRAFTANLAGENINSTALLATION EU

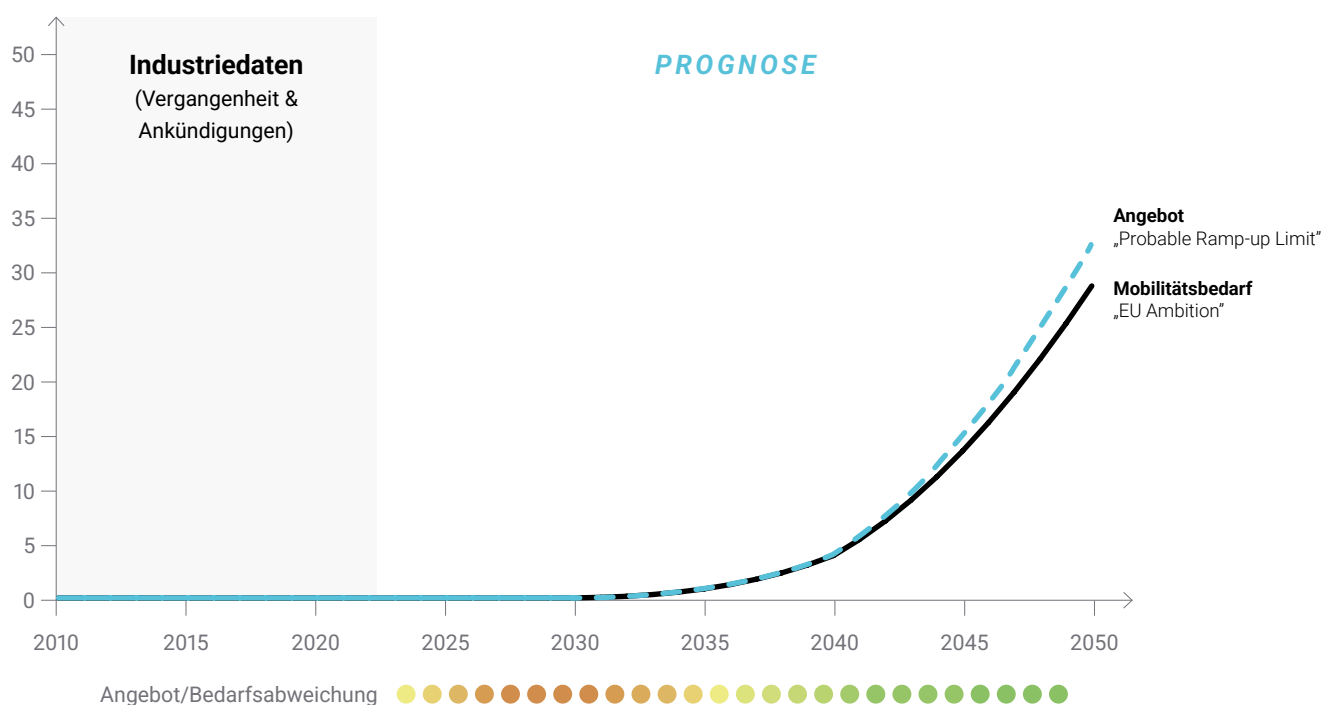


Abbildung 81: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach grünem Wasserstoff in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von Windkraftanlagen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³, IEA World Energy Outlook 2023²³

18 PV-KRAFTANLAGENINSTALLATION EU

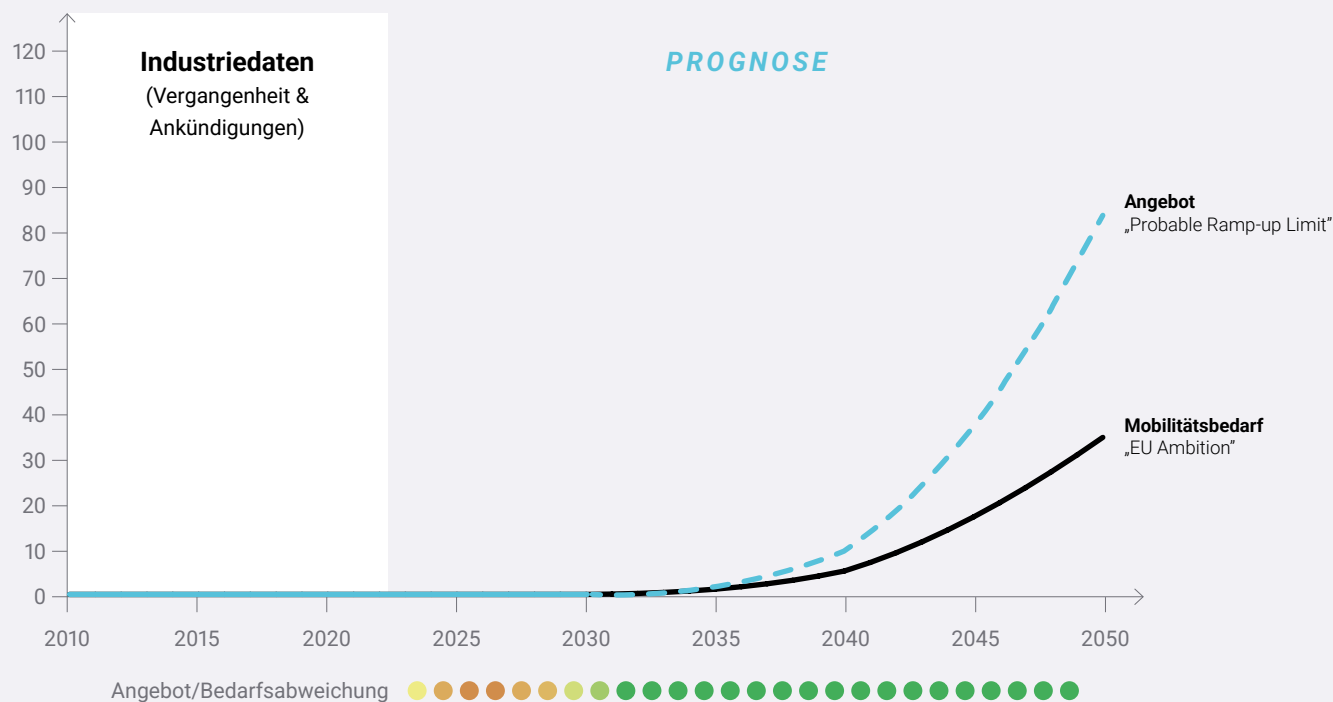


Abbildung 82: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach grünem Wasserstoff in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von PV-Kraftanlagen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³, IEA World Energy Outlook 2023²³ | PV: Photovoltaik

19 ELEKTROLYSEAUSTRÜSTUNG

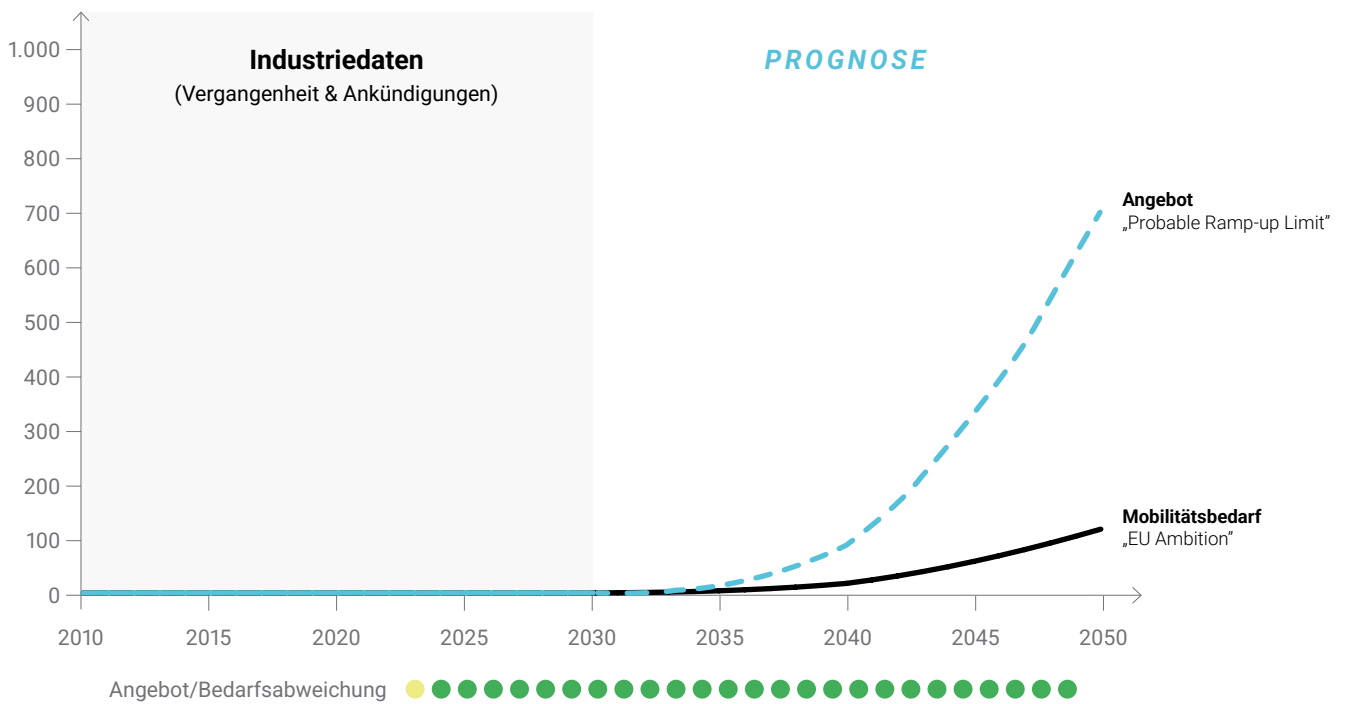


Abbildung 83: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach grünem Wasserstoff in der EU-Mobilität, installierte Elektrolyseausrüstungen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IEA Global Hydrogen Review 2024³⁴, IEA World Energy Outlook 2023²³

20 H₂-ANLAGENINSTALLATION EU

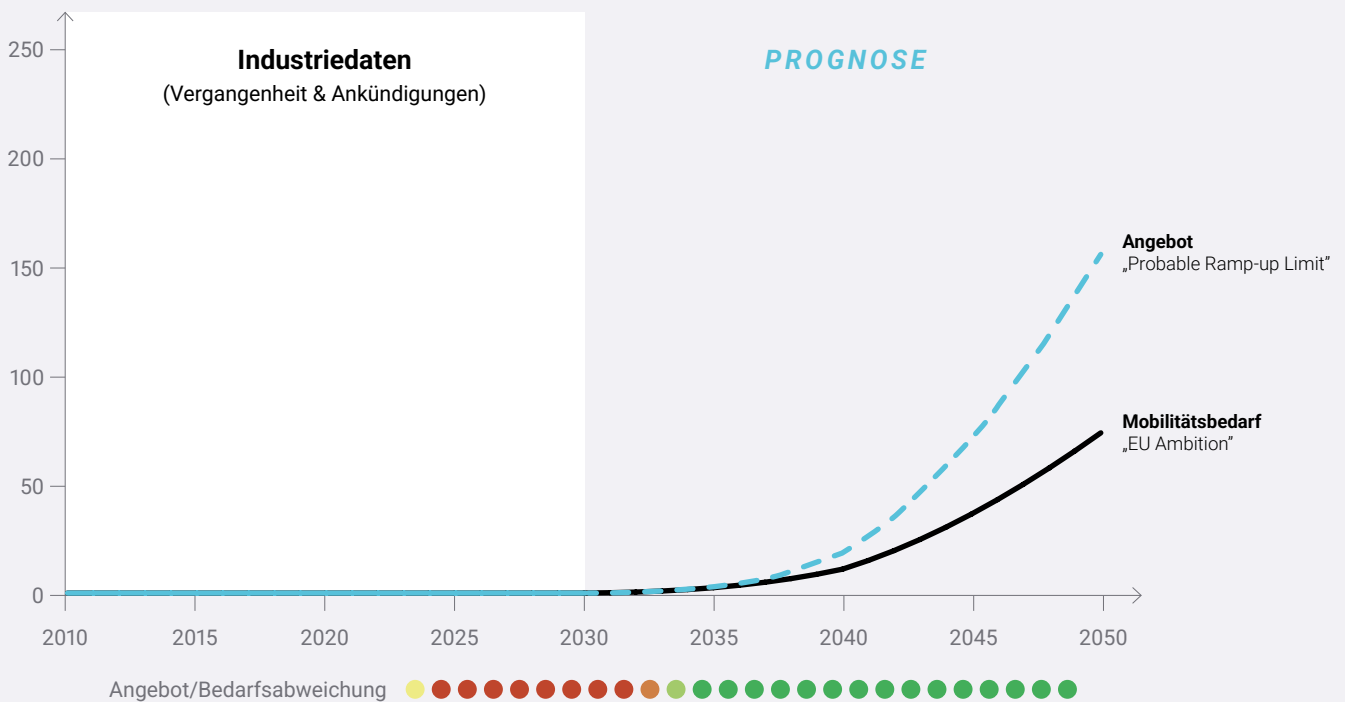


Abbildung 84: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach grünem Wasserstoff in der EU-Mobilität, installierte EU-Produktionskapazität für grünen Wasserstoff in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: Porsche Consulting Green Hydrogen Project Tracker, IEA Hydrogen Infrastructure Database⁶, EU Hydrogen Strategy 2022²¹, REPowerEU Plan 2022²⁹, IEA World Energy Outlook 2023²³

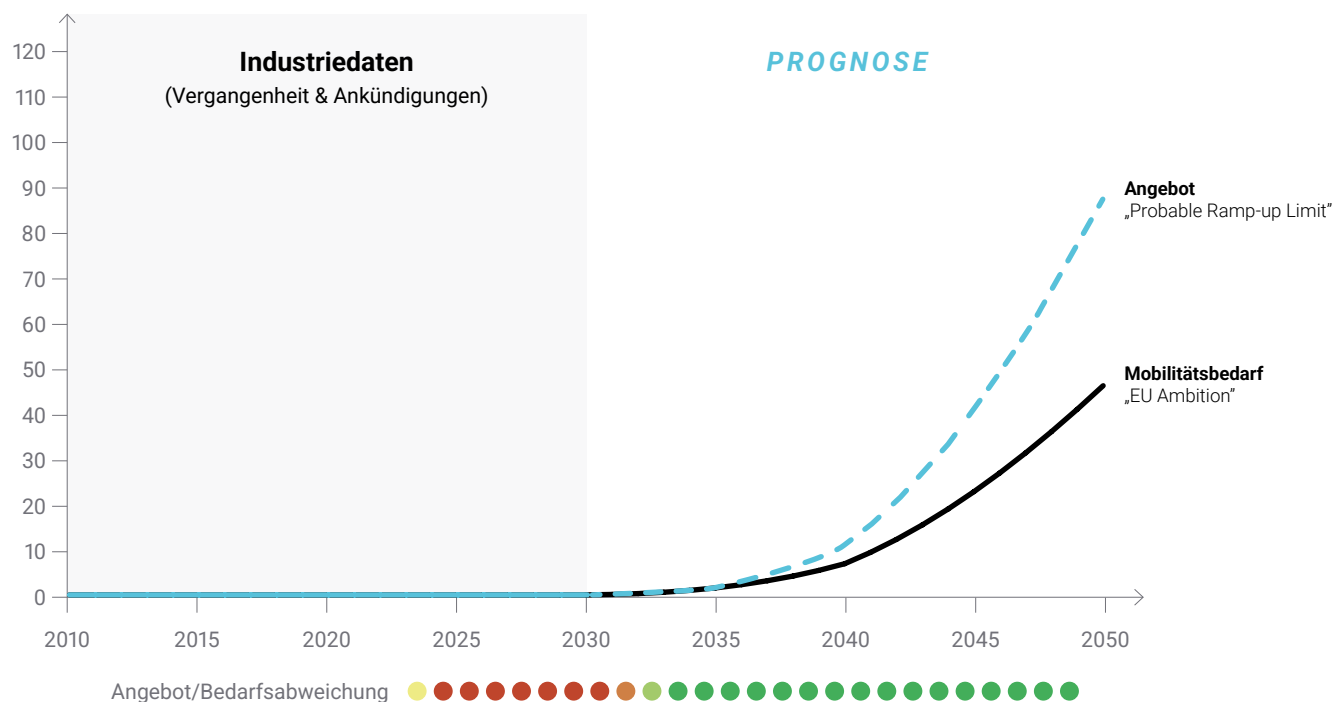
21 H₂-ANLAGENINSTALLATION GLOBAL

Abbildung 85: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach grünem Wasserstoff in der EU-Mobilität, global installierte Produktionskapazität für grünen Wasserstoff in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: Porsche Consulting Green Hydrogen Project Tracker, IEA Hydrogen Infrastructure Database⁶, IEA World Energy Outlook 2023²³

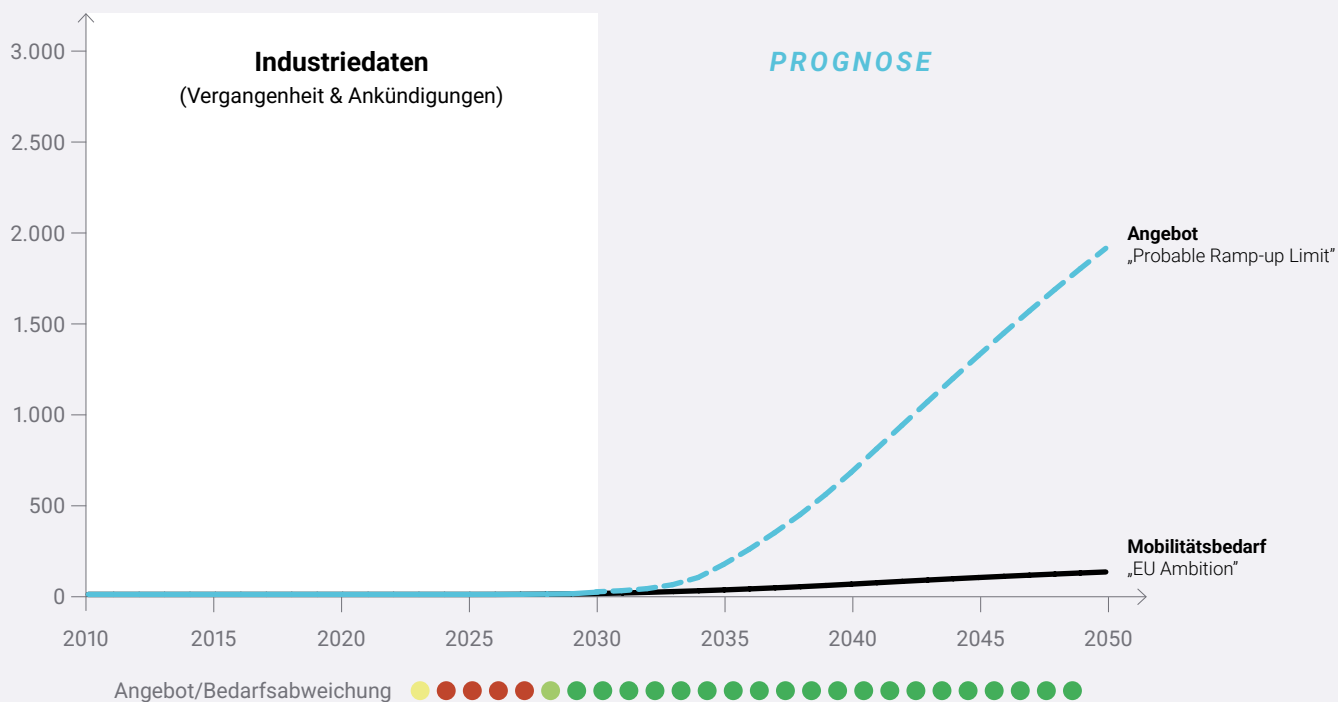
22 H₂-PIPELINE

Abbildung 86: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach grünem Wasserstoff in der EU-Mobilität, globale installierte Wasserstoff-Pipeline-Länge in Tsd. km: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IEA Hydrogen Infrastructure Database⁶, EU Hydrogen Strategy 2022²¹, REPowerEU Plan 2022²⁹, IEA World Energy Outlook 2023²³

23 BRENNSTOFFZELLE

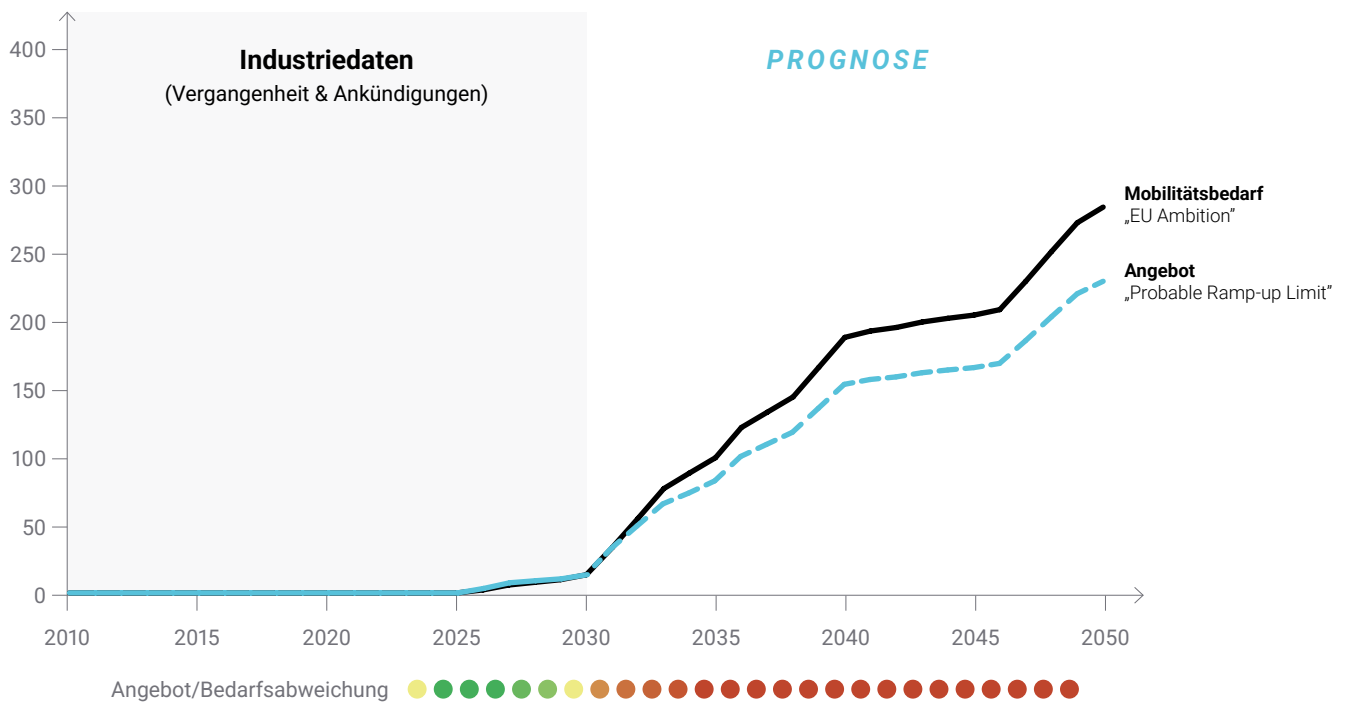


Abbildung 87: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach Brennstoffzellen in der EU-Mobilität, kumulierte Brennstoffzellenausrüstung in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: OEM industry benchmarks, IEA Global EV Data Explorer 2024⁴⁵, IEA Global Hydrogen Review 2023⁴⁶

25 PV-KRAFTAUSRÜSTUNG

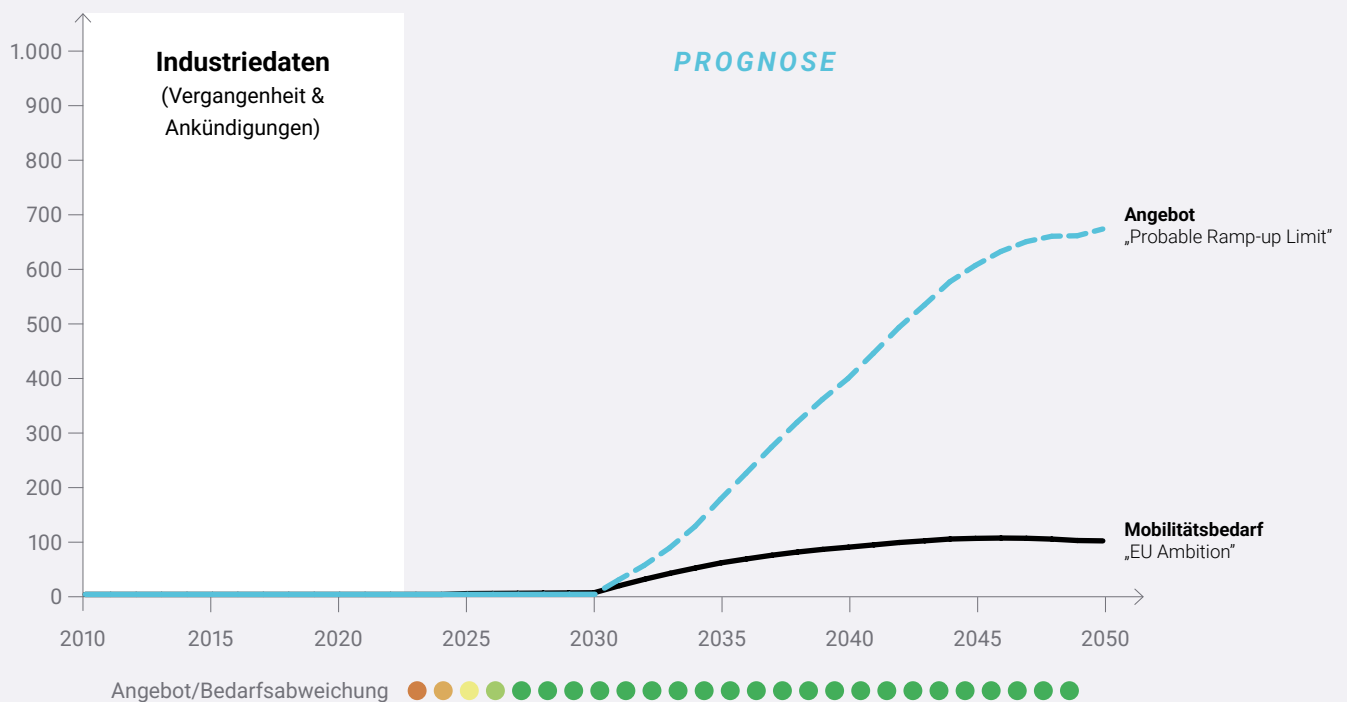


Abbildung 88: Vergleich von Angebot und Nachfrage nach eFuels in der EU-Mobilität, installierte Kapazität von PV-Kraftausrüstungen in GW: Szenario „EU Ambition“.

Quelle: IRENA Wind Energy Data 2024³³, IEA World Energy Outlook 2023²³ | PV: Photovoltaik



ZUSAMMENGEFASST

- ▶ Verbrennungsmotoren (ICEVs) werden voraussichtlich in allen Mobilitätsbestandsflotten bis 2040 relevant bleiben, insbesondere in der Schifffahrt und Luftfahrt.
- ▶ Die ambitionierten Pläne der EU-Kommission für die breite Einführung von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) in der Straßenmobilität setzen die Batterie- und Energieversorgungsketten erheblich unter Druck. Gleichzeitige Hochlaufinitiativen in anderen Regionen könnten zu Engpässen führen und unterstreichen die Notwendigkeit strategischer Planung und langfristiger Investitionen.
- ▶ Wenn die Antriebstransformation in der Mobilität nicht so schnell voranschreitet wie von der EU geplant, bleibt die Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen höher als erwartet, was die CO₂-Einsparungen möglicherweise verzögert.
- ▶ Aus Sicht der industriellen Machbarkeit kann der eFuel-Hochlauf beschleunigt werden, um die Klimaziele zu erreichen – selbst wenn sich die Antriebstransformation in der Mobilität verzögert.
- ▶ Zahlreiche Projekte bereiten den Eintritt in den eFuel-Markt vor; sie stehen jedoch derzeit vor Finanzierungsherausforderungen. Das Erreichen der Final Investment Decision (FID) in den kommenden Monaten wird entscheidend sein, um den Betrieb bis 2030 zu ermöglichen. Die Freisetzung von eFuel-Projektfinanzierungen erfordert regulatorische Unterstützung und robuste Hochlaufstrategien.
- ▶ Um die Attraktivität von eFuel-Projekten zu erhöhen und Abnahme- sowie Finanzierungsverpflichtungen zu verstärken, können bestehende regulatorische Instrumente genutzt werden. Die Harmonisierung der Produktionsstandards für eFuels kann langfristige Konformitätsrisiken mindern, während die Erhöhung der eFuel-Quoten und die Einführung einer branchenübergreifenden eFuel-Anrechnung die Nachfrage sichern können.
- ▶ Abnahme- und Finanzierungsverpflichtungen für eFuels können zusätzlich durch die Zusammenarbeit zwischen eFuel-Produzenten und branchenübergreifenden Abnehmern gefördert werden, indem Kostensenkungen mit Skalierungsstrategien kombiniert und Risikoteilungsstrukturen implementiert werden.

