

Der Weg hin zu einer CO2-armen Mobilität – Neue Perspektiven zur Verkehrs- und Energiewende in Deutschland

White Paper Details & Berechnungen

Juni 2020

Die Verwendung dieser Studie und deren Inhalte ist für redaktionelle Zwecke honorarfrei.
Veröffentlichungen bitte unter Quellenangabe.
© Stahl Automotive Consulting GmbH & Co. KG

Agenda

Zusammenfassung, Zielsetzung und Vorgehensweise

Volumenprognose für Elektrofahrzeuge auf Basis der CO2-Emissionsziele

Ökologische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Ökonomische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Alternativen zur Elektromobilität

Synthetische Kraftstoffe sind geeigneter als die E-Mobilität, um die CO2-Emissionen im Verkehrssektor zu senken



In Deutschland werden Elektrofahrzeuge absehbar keinen sinnvollen Beitrag zur CO2-Einsparung leisten

- Um die CO2-Auswirkungen der E-Mobilität zu quantifizieren, werden **zwei Szenarien** betrachtet. Im **Basis-Szenario** wird ein **Wettbewerb von Elektromobilität und Kohleausstieg** unterstellt - im **Extrem-Szenario** wird **100% erneuerbare Energie** für das Laden von EVs angenommen
- Im **Basis-Szenario** erhöht E-Mobilität in Deutschland zwischen **2020** und **2030** die **CO2-Emissionen netto** um **40 Mio. t** – im **Extrem-Szenario** hingegen können **95 Mio. t CO2 eingespart** werden
- Gleichzeitig entstehen für die Elektromobilität bis 2030 **gesamtgesellschaftliche Kosten** von **47-75 Mrd. EUR**. Somit sind selbst im **Extrem-Szenario** die **CO2-Vermeidungskosten** von **400-700 EUR** **prohibitiv hoch**



Wasserstoff kann zu einer Reduzierung der CO2-Emissionen beitragen, ist jedoch mit erheblichen Umsetzungsrisiken verbunden

- Werden die **Mehrkosten der Elektromobilität** (~75 Mrd. EUR) für die **Subventionierung von Wasserstoff** aufgewendet, ließen sich auf diese Weise ca. **200 Mio. t CO2 einsparen**
- Ab **Anfang der dreißiger Jahre** wird eine **Kostenparität** zwischen **Wasserstoff** und fossilen Kraftstoffen erwartet – **Fahrzeugmehrkosten für FCEVs** müssen **auch nach diesem Zeitpunkt** gesamtgesellschaftlich getragen werden
- Eine **Konversion des Verkehrssektors** hin zu **Wasserstoff** erfordert die **Überwindung hoher technischer Hürden** und **hohe Investitionen** (Aufbau Produktions- und Distributionsinfrastruktur, Ersatz der Fahrzeugflotte) und stellt folglich eine **risikoreiche Alternative** dar



Synthetische Kraftstoffe können einen ökologisch und ökonomisch sinnvollen Beitrag zum Klimaschutz leisten

- Ein Teil der **Mehrkosten der Elektromobilität** (~73 Mrd. EUR) könnten alternativ für die **Subventionierung von synthetischen Kraftstoffen** verwendet werden.
- Bis 2030 ließen sich so **mit synthetischen Kraftstoffen** nahezu **600 Mio. t CO2 einsparen**, was einem signifikanten Beitrag zur CO2-Reduktion entspricht. **Ab der Kostenparität** betragen die **Einsparungen ca. 180 Mio. t CO2 p.a.**
- **Umsetzungsrisiken** bei synthetischen Kraftstoffen beschränken sich auf den Aufbau der **Produktionsinfrastruktur** in sonnenreichen Ländern und die Erzielung der notwendigen **Skaleneffekte** bei den **Kosten**

Agenda

Zusammenfassung, Zielsetzung und Vorgehensweise

Volumenprognose für Elektrofahrzeuge auf Basis der CO2-Emissionsziele

Ökologische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Ökonomische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Alternativen zur Elektromobilität

42% der Deutschen fühlen sich laut einer Umfrage im Dezember 2019 durch den Klimawandel bedroht

 **Kosten für Adaption und ggf. Verlagerung von Städten bei Steigung des Meeresspiegels**

 **Verstärkte Ausbreitung von Krankheiten aufgrund höherer Temperaturen**

 **Extreme meteorologische Phänomene, die u. a. Landwirtschaft und Gesundheit stark betreffen**

 **Verknappung des Angebots an Frischwasser in bestimmten Regionen**

 **Steigung der Grundnahrungsmittelpreise wegen häufigerer Ernteausfälle**

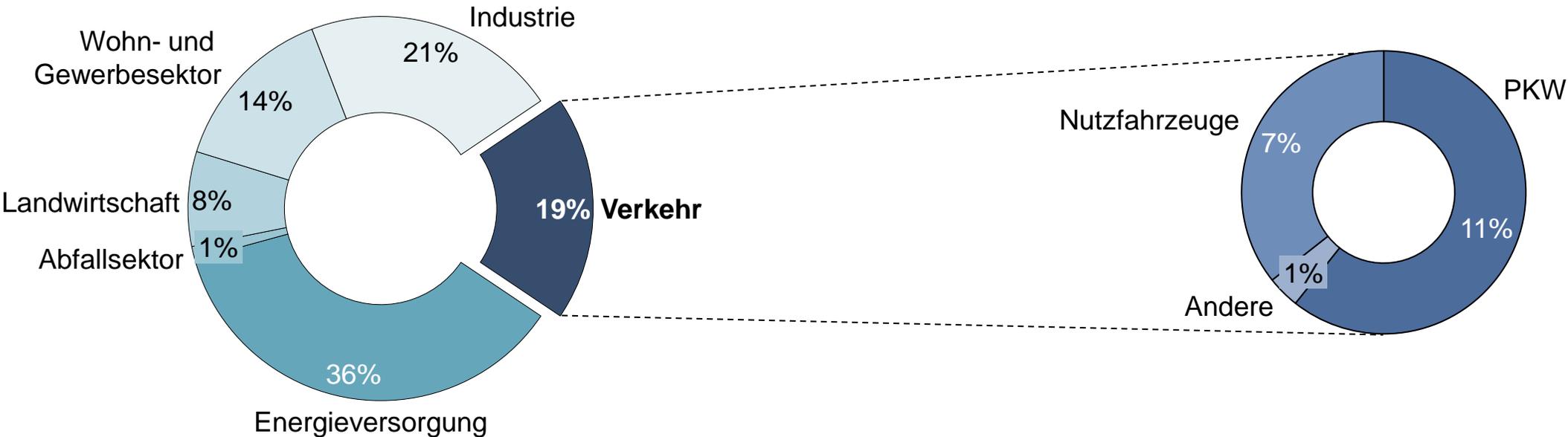
 **...**



Daher hat die **Politik** eine **Vielzahl von Maßnahmen** zur **CO2-Reduktion** ergriffen

Da der Verkehrssektor in einem erheblichen Maße zu den Gesamtemissionen beiträgt, muss er einen Beitrag zur CO2-Reduktion leisten

Treibhausgasemissionen nach Sektoren (DE, 2017)
in % der Gesamtemissionen (CO2-Äquivalente)



Gesamtemissionen:
905 Mio. t CO2-Äquivalente

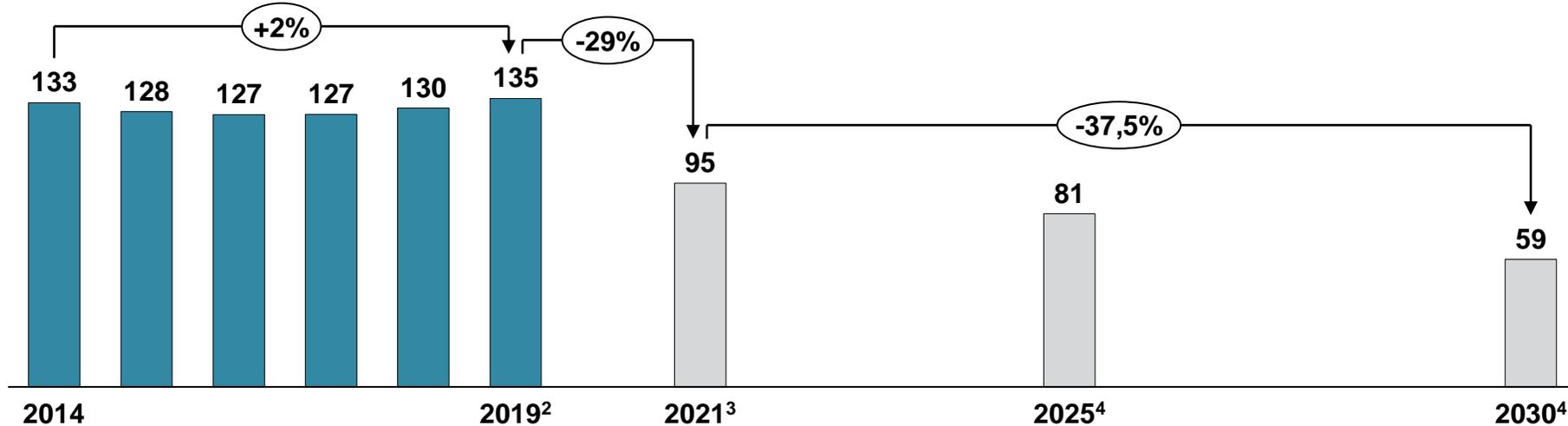
Emissionen aus Verkehr:
171 Mio. t CO2-Äquivalente

Um die Emissionen im PKW-Sektor zu reduzieren, hat die Politik mit der Einführung von CO₂-Grenzwerten und erheblichen Strafen bei deren Überschreitungen reagiert

Überblick der durchschnittlichen CO₂-Emissionswerte und -ziele (NEFZ) für PKW-OEMs in Deutschland bzw. Europa in g CO₂/km

■ Durchschnittliche Emissionswerte der Neuzulassungen (Deutschland)¹

■ Durchschnittliche Emissionsziele der Neuzulassungen (Europa)¹



Strafzahlungen betragen 95 EUR

- pro überschrittenes g CO₂/km
- pro neu zugelassenes Fahrzeug

- Die **Optimierung von Verbrennungsmotoren** hinsichtlich CO₂-Emissionen stößt aus technischer Sicht an die Grenzen
- Die **Erfüllung der CO₂-Ziele** erzwingt den **Umstieg auf neue Antriebstechnologien** (z.B. rein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug)

¹ Emissionswerte und -ziele sind jeweils herstellerspezifisch. Dargestellte Werte entsprechen herstellerübergreifenden Durchschnitten

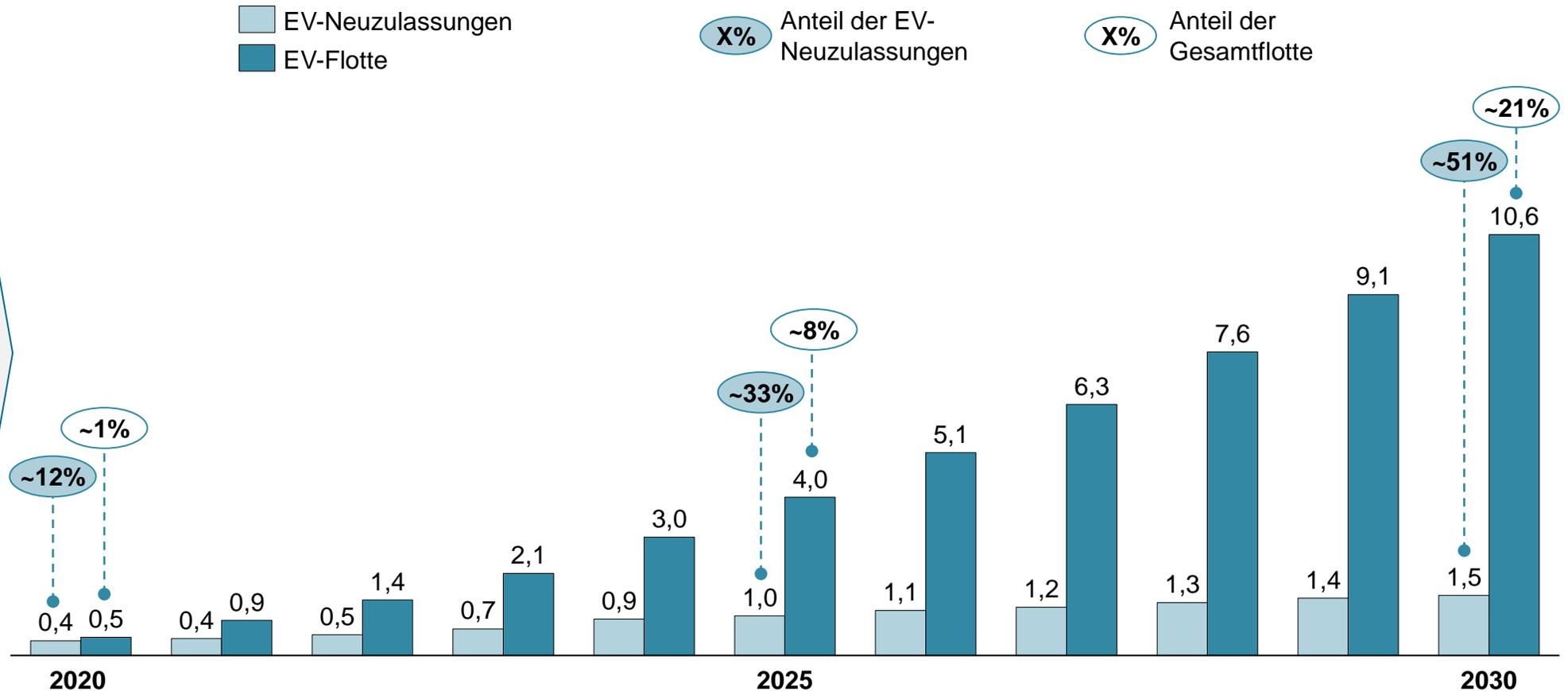
² NEFZ-Wert berechnet aus WLTP-Wert gemäß Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

³ „Phasing-in“ Effekt: Grenzwert von 95g CO₂/km gilt im Jahre 2020 für 95% der Neuzulassungen – ab 2021 werden 100% der neu zugelassenen Fahrzeuge berücksichtigt

⁴ Für die Jahre 2025 und 2030 berechnen sich die Grenzwerte als Verbesserung ggü. dem 2021 Wert um 15% bzw. 37,5%

Um CO₂-Emissionsziele zu erreichen, müssen im Jahr 2030 in Deutschland ~1,5 Mio. EVs neu zugelassen und eine Gesamtflotte von 10,6 Mio. EVs erreicht werden

Notwendige EV-Neuzulassungen und EV-Flotte in Deutschland, um Emissionsziele zu erreichen¹
in Mio. Fahrzeuge

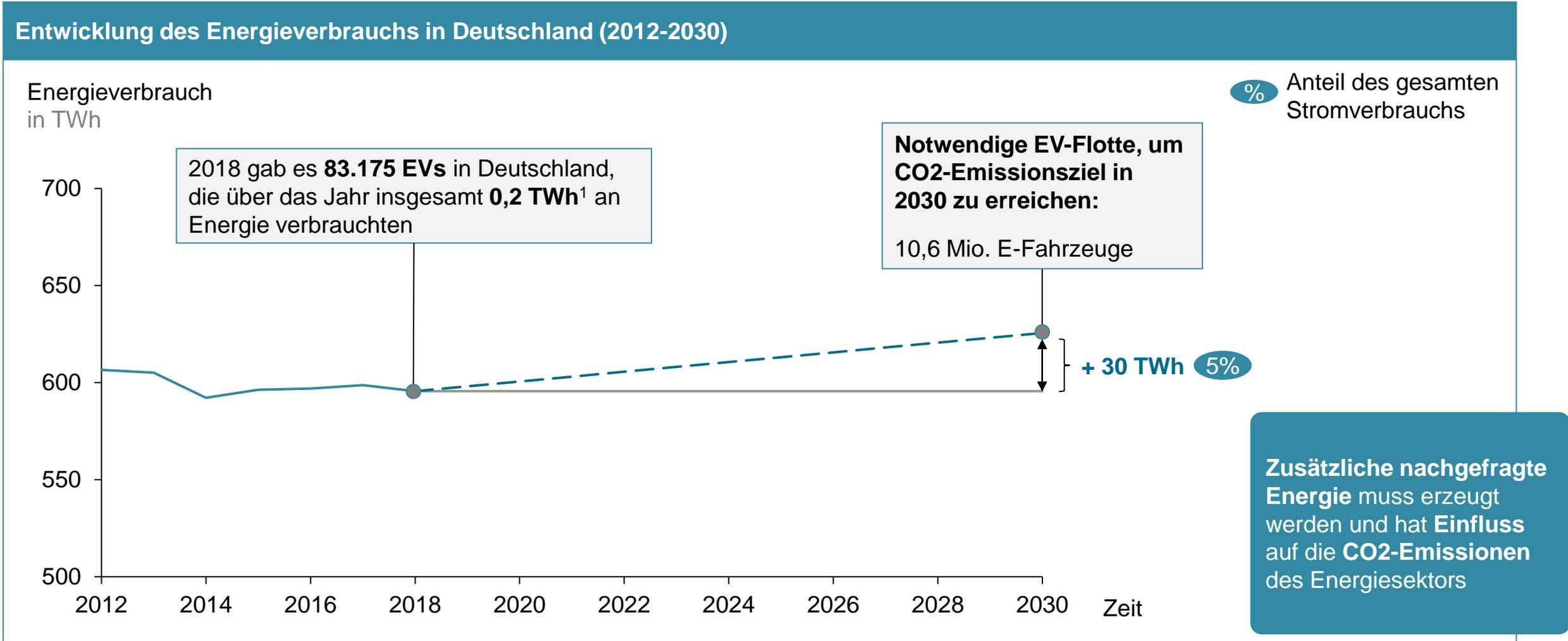


Annahmen

- OEMs müssen **Zielwerte für CO₂-Emissionen** von **81g CO₂/km** in **2025** und **59g CO₂/km** in **2030** erreichen
- Es wird angenommen, dass OEMs diese **Ziele erreichen** werden, um schwerwiegende **Strafzahlungen** zu vermeiden

¹ Annahmen: Neuzulassungen basieren auf Verkaufsprognosen für Deutschland; durchschnittliche Emissionen von 146g CO₂/km (WLTP) für Neufahrzeuge, da keine weiteren beträchtlichen Verbesserungen für den Verbrennungsmotor erwartet werden; Rechnung berücksichtigt Super-Credits (Faktor 1,67 für 2021 und 1,33 für 2022), aber keine Öko-Innovationen

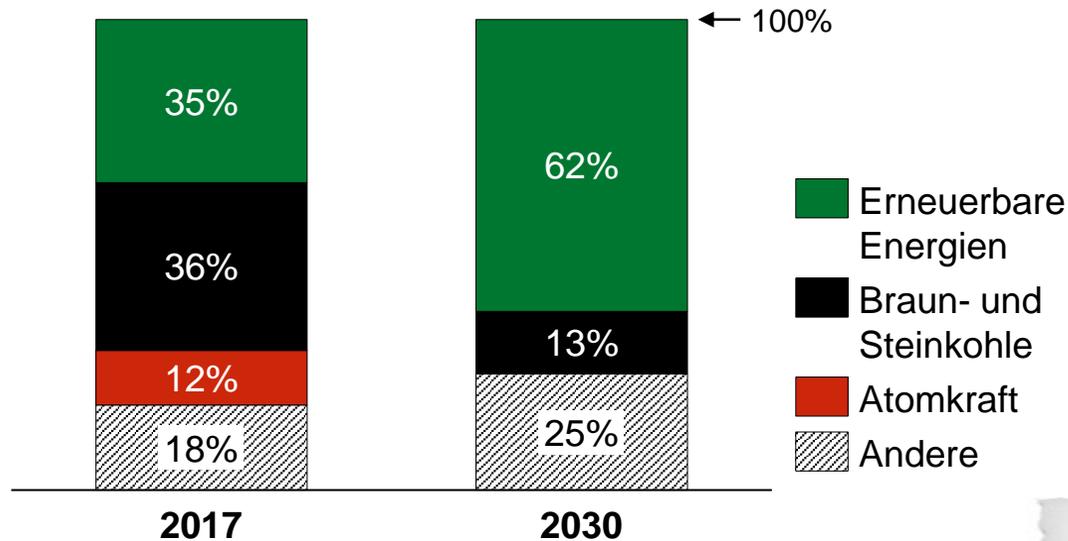
Durch EVs entsteht eine zusätzliche Energienachfrage, welche bis 2030 den deutschen Energieverbrauch um ca. 5% bzw. 30 TWh erhöhen wird



¹ Annahmen: Jährliche Fahrleistung = 13.727 km ; Durchschnittlicher EV-Verbrauch = 20,8 kWh / 100km, Herleitung im Anhang

Im Rahmen der Energiewende sollen Kohlekraftwerke mittelfristig vollständig durch erneuerbare Energien (EE) ersetzt werden

Netto-Stromerzeugung Deutschland nach Energieträgern
in % der gesamten Stromerzeugung



„Mittelfristig soll die Kohle komplett durch Erneuerbare Energien ersetzt werden“

Bundesregierung 2020

„Die erneuerbaren Energien sind das zentrale Element des neuen Stromerzeugungssystems, um das vorhandene, auf fossilen Energieträgern basierende, zu ersetzen“

BMWi 2019

„Der Ausbau der Erneuerbaren Energien auf 65 Prozent kann die wegfallenden Kohlestrommengen bis 2030 nahezu vollständig kompensieren“

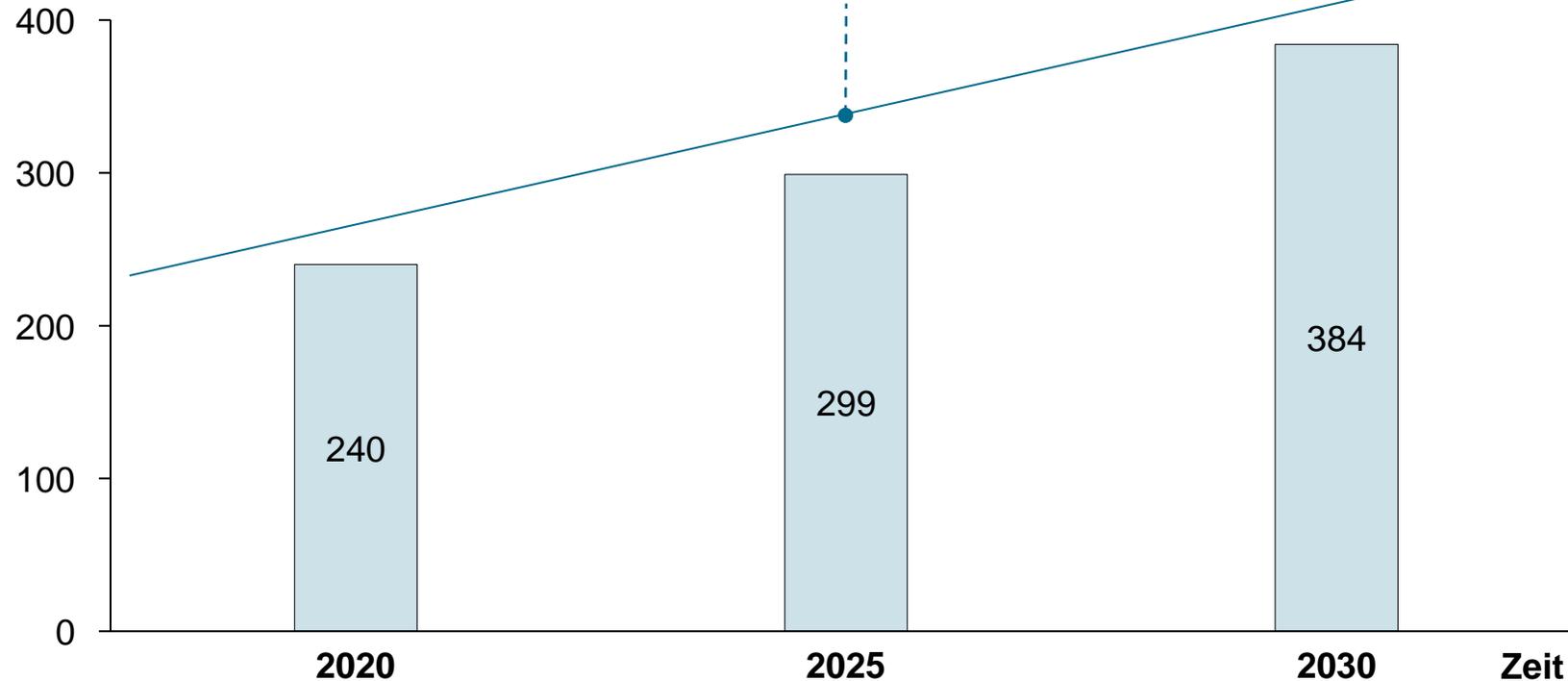
Agora Energiewende 2018

Kerngedanke der Energiewende ist es, Atom- und Kohlestromerzeugung durch erneuerbare Energien zu substituieren

Jedoch kann der Aufbau von erneuerbaren Energien aus einer Vielzahl von Gründen nicht deutlich beschleunigt werden – EE Erzeugungskapazitäten bleiben noch lange eine knappe Ressource

Entwicklung der Energieproduktion aus erneuerbaren Quellen in Deutschland

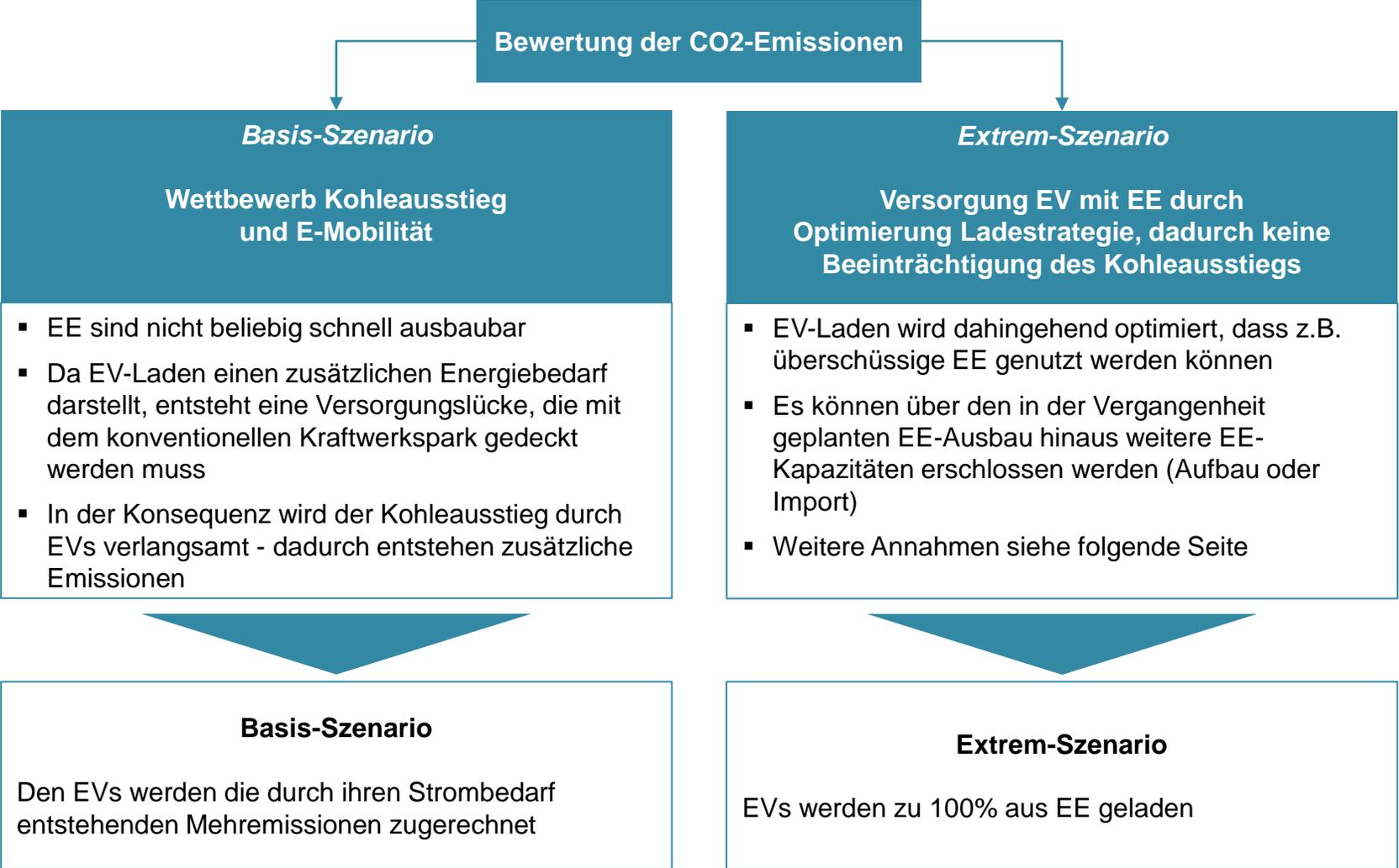
Gesamtproduktion erneuerbarer Energien in TWh



Prognostiziertes Wachstum der installierten **Kapazität an EE** ist **bereits optimistisch** und kann wahrscheinlich **nicht weiter beschleunigt werden**

- Der **Ausbau** der installierten Kapazität an erneuerbaren Energien wurde von **politischen Entscheidungsträgern geplant**
- Der **Ausbau** wird durch folgende Faktoren **limitiert**:
 - **Ressourcenknappheit**
 - **Genehmigungsverfahren**
 - **Gesellschaftliche Akzeptanz**

Zur Bewertung der CO2-Emissionen der E-Mobilität werden zwei Szenarien betrachtet



- Zur **exakten Modellierung** besteht noch **Forschungsbedarf**
- Wir gehen aufgrund der notwendigen **Annahmen** davon aus, dass der **reale Effekt** näher am **Basis-Szenario** liegen wird
- Die **Rechenlogik** für beide Szenarien ist **identisch**
- **Regulatorische** und **Strommarkteffekte** werden nicht **betrachtet**

Für das Extrem-Szenario sind eine Reihe von ambitionierten Annahmen erforderlich

Voraussetzung

- Die **abgeregelten EE** können **für EVs nutzbar gemacht werden**. Da diese in 2030 voraussichtlich nur **1/3 des** Energiebedarfes der EVs decken können, müssten noch weitere, **nicht anderweitig nutzbare EE verfügbar** sein (z.B. aus dem Ausland)
- Gleichzeitig müsste es trotz des **Übertragungsnetzausbaus Überschüsse** geben, die **im Netz nicht verwertet werden können**, jedoch als **Ladeenergie für EVs nutzbar** sind

Annahmen gesteuerte Ladeinfrastruktur

- Ein über die gegenwärtigen Pläne gesteigerter **Ladeinfrastrukturausbau** ermöglicht es, dass **EVs überwiegend mit dem Netz verbunden** sind. Damit wird die Voraussetzung geschaffen, die **unvorhersehbar anfallenden EE aufzunehmen**
- **Flächendeckende** Implementierung von **Managed Charging** mit einhergehenden **Einschränkungen zur Praktikabilität**: Sind keine EE verfügbar, so werden Fahrzeuge nicht geladen bzw. nur eine Mindestreichweite von 30 km garantiert¹
- Deutlich **geändertes Nutzerverhalten**: EV-Fahrer müssen ihre **Fahrzeuge** (freiwillig oder verpflichtend) wann immer möglich **an die Ladeinfrastruktur anschließen**

Kommentare

- **Wissenschaftliche Studien** zur Simulation des Effekts gehen von einer EV-Flotte aus, die deutlich kleiner ist, als in unserer Prognose
- Die mit diesen Annahmen verbundenen **Kostenimplikationen** sind **komplex** zu berechnen und nur in **sektorübergreifender Zusammenarbeit** zu bewerten. Sie **erhöhen** jedoch mit Sicherheit die in dieser Studie für die E-Mobilität **getroffenen Kostenannahmen**. Darüber hinaus werden wahrscheinlich auch noch zusätzliche **Netzausbaukosten anfallen**
- Es ist daher schwer **abschätzbar**, wieviel Prozent der sonst **nicht nutzbaren EE** auf diesem Wege tatsächlich für die **E-Mobilität verfügbar** gemacht werden können. Studien² gehen davon aus, dass damit die EV-Emissionen in 2030 so um bis zu 26% reduziert werden können

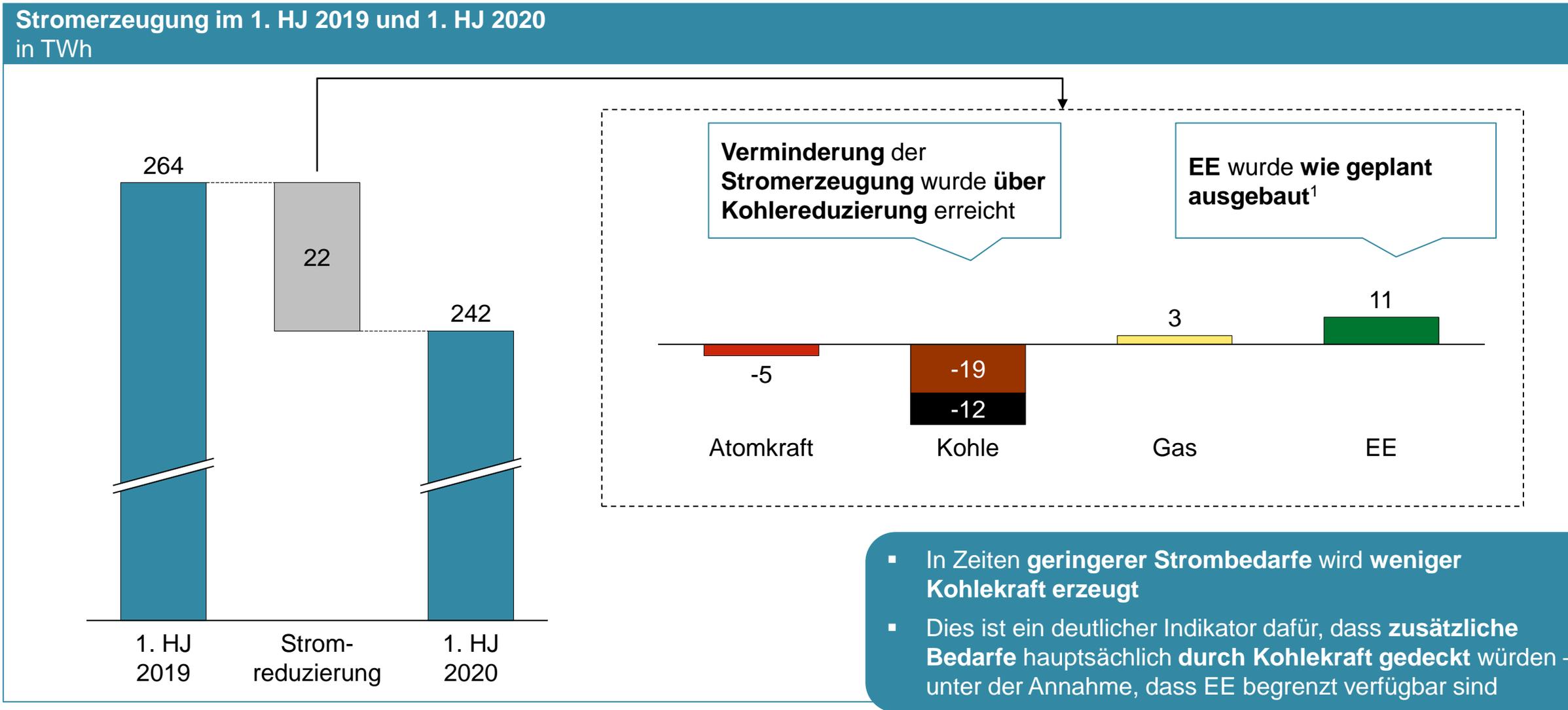
Verwendung als Extrem-Szenario in dieser Studie

- Wir haben für das **Extrem-Szenario** angenommen, dass **EVs zu 100% aus EE geladen werden**. Dabei wurden **keine zusätzlichen Kosten** z.B. für Netzinfrastuktur und notwendige Erhöhung der Anzahl Ladepunkte **berücksichtigt** und auch die damit verbundenen **Umsetzungs- und Akzeptanzrisiken vernachlässigt**

1 FfE – Projekt MONA 2030, Teilbericht Basisdaten

2 FfE - Ladesteuerung von Elektrofahrzeugen und deren Einfluss auf betriebsbedingte Emissionen

Der wegen der Corona-Krise gesenkte Strombedarf wurde hauptsächlich durch weniger Kohlekraft gedeckt – Dies zeigt, dass zusätzlicher Bedarf durch Kohlekraft gedeckt würde



¹ Nach Prognosen von Aurora Energy Research wird die Produktion aus EE jährlich durchschnittlich um 14,4 TWh zunehmen (2020-2030)

Agenda

Zusammenfassung, Zielsetzung und Vorgehensweise

Volumenprognose für Elektrofahrzeuge auf Basis der CO2-Emissionsziele

Ökologische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Ökonomische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Alternativen zur Elektromobilität

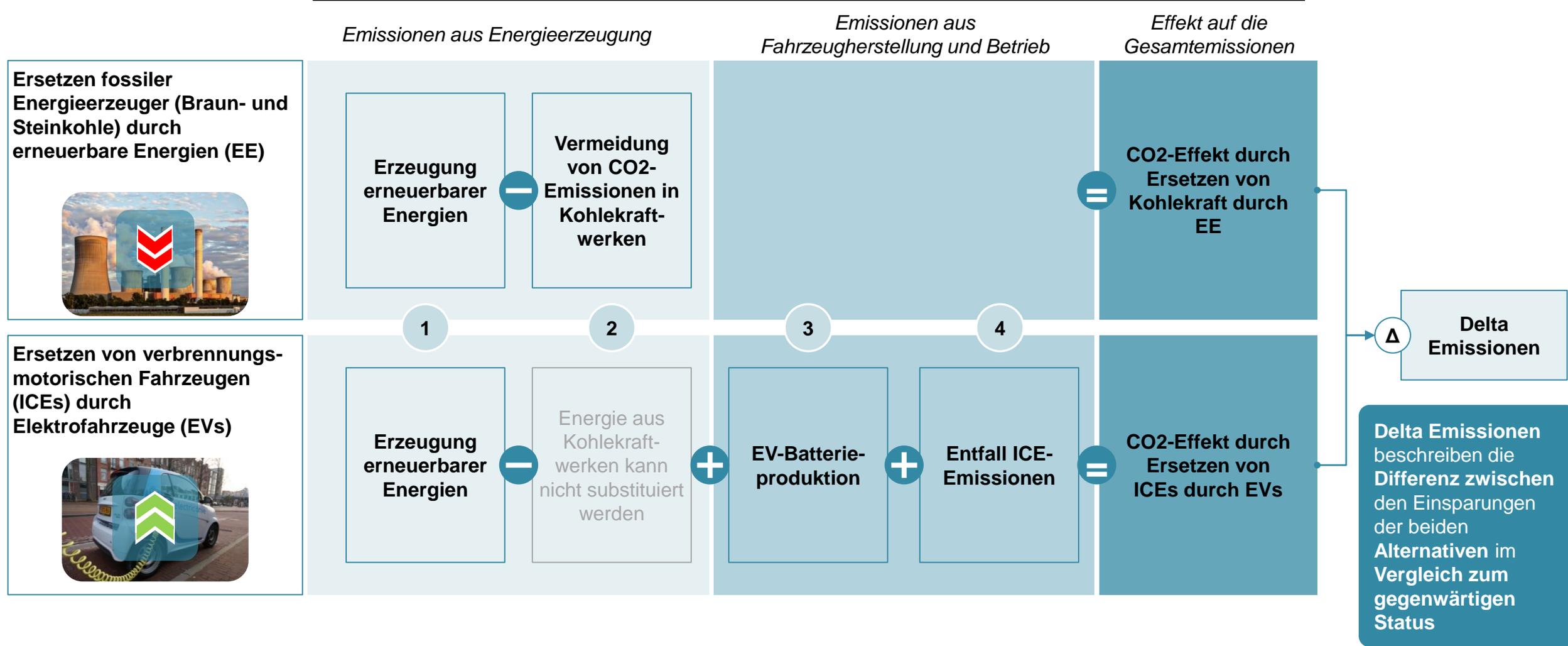
Im Basis-Szenario konkurrieren EVs mit der Reduktion fossiler Energieerzeugung (Braun- und Steinkohle), da erneuerbare Energie nur begrenzt verfügbar ist

Möglichkeiten für die Energieverwendung



Um den gesamten CO2-Effekt zu berechnen, müssen für beide Alternativen sämtliche Emissionen berücksichtigt werden

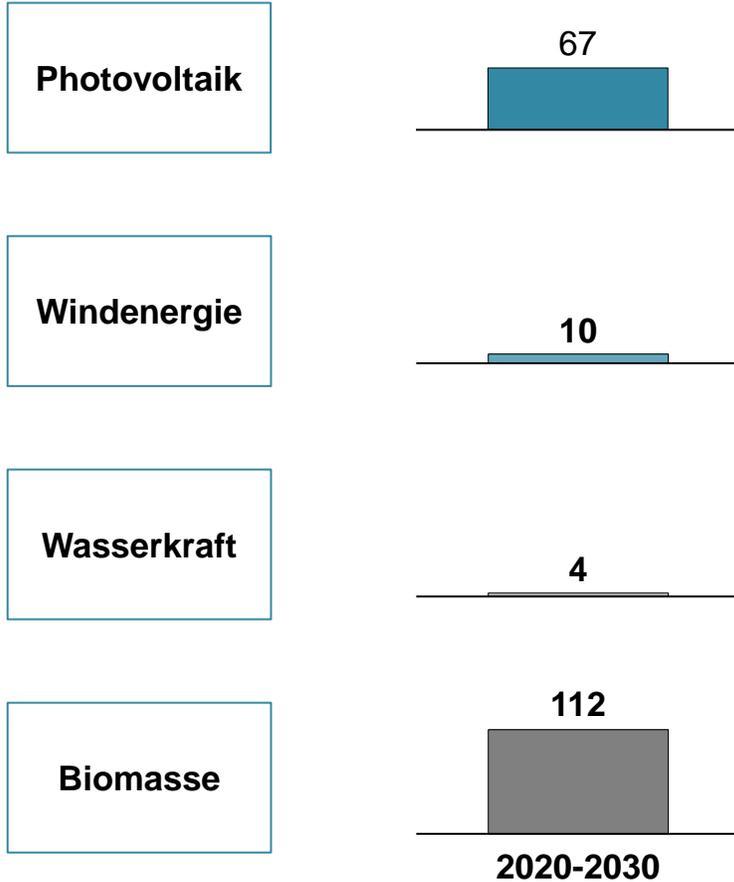
Vergleich der CO2-Emissionen - Deltabetrachtung zum gegenwärtigen Status



1

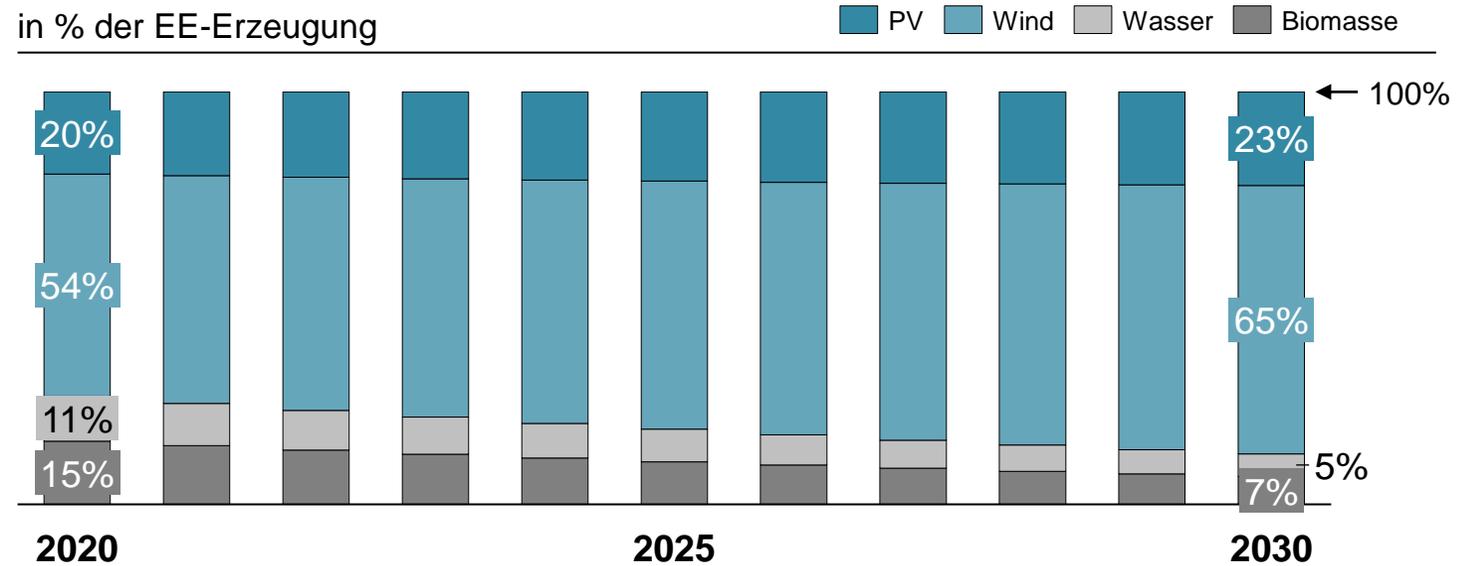
Die Produktion von 1kWh Strom aus erneuerbaren Energien verursacht im Jahre 2020 Emissionen von 36g CO2/kWh, diese sinken bis 2030 auf 29g CO2/kWh

Emissionen bei Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien¹ in g CO2/kWh

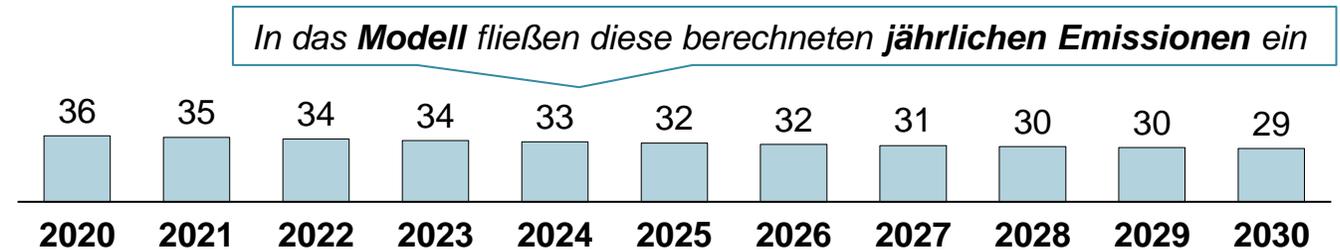


Entwicklung der installierten Leistung an erneuerbaren Energien

in % der EE-Erzeugung



Entwicklung der volumen-gewichteten Emissionen der erneuerbaren Energien in g CO2/kWh

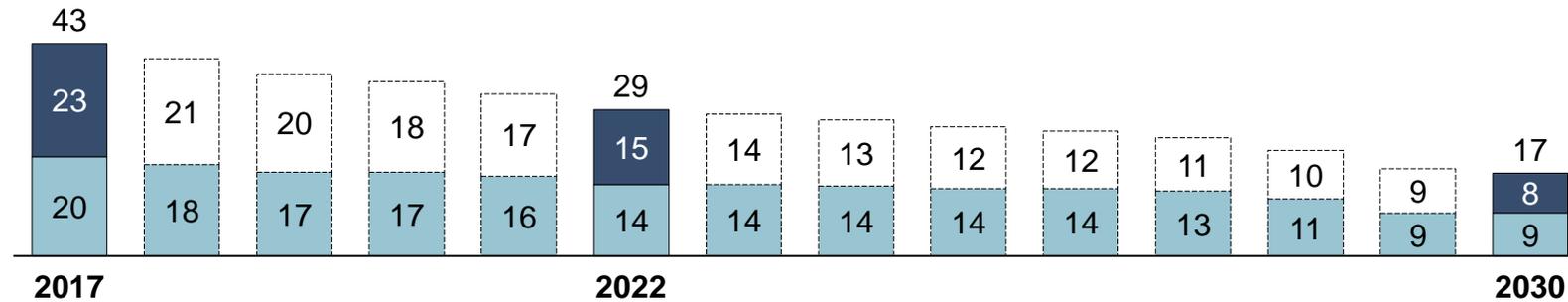


¹ Emissionen entstehen bei dem Bau der Anlagen bzw. im Rahmen der Energieerzeugung (z.B. Verbrennung von Biomasse). Es wird angenommen, dass diese bis 2030 konstant bleiben

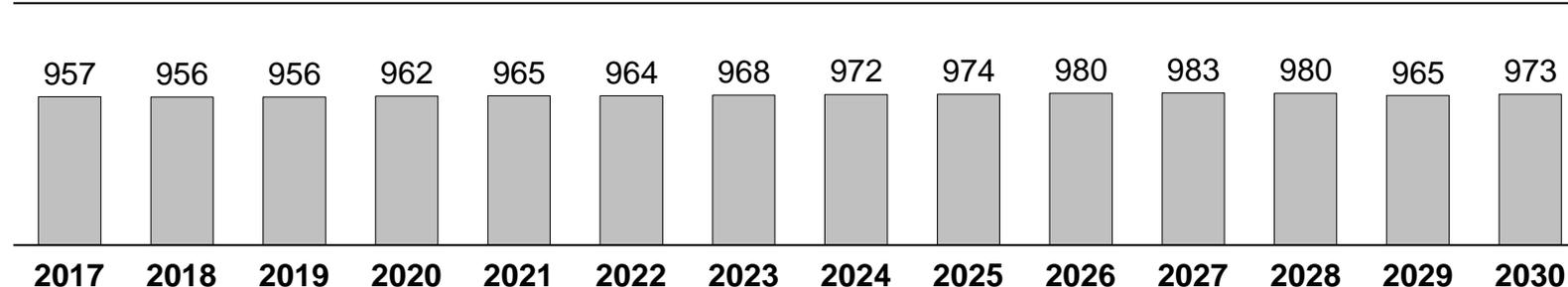
Entsprechend des Abschaltungsplans der Bundesregierung werden Kohlekraftwerke bis 2038 stillgelegt – Im Jahr 2030 verursacht die Erzeugung von 1kWh Kohlestrom 973g CO2

Abschaltungsplan der Kohlekraftwerke und resultierende volumen-gewichtete CO2-Emissionen von 1kWh Strom auf Kohlebasis in GW

- Steinkohlekraftwerkskapazitäten gemäß Kohleausstiegsplan
- Steinkohlekraftwerkskapazitäten (linear interpoliert)
- Braunkohlekraftwerkskapazitäten gemäß Kohleausstiegsplan bzw. Stilllegungspfad



Volumen-gewichtete Emissionen deutscher Kohlekraftwerke in g CO2/kWh



Annahmen

- **CO2-Emissionen** bei der Herstellung von **1kWh Strom** auf Basis fossiler Energieträger (2018):
 - **Steinkohle:** 813g CO2/kWh
 - **Braunkohle:** 1121g CO2/kWh
- Diese Emissionswerte bleiben nahezu **konstant über den betrachteten Zeitraum**

Für die **Substitutionsrechnung** werden **volumen-gewichtete Emissionen** der Kohlekraftwerke auf Jahresbasis herangezogen

3

Auf Basis der CO₂-Emissionen der EV-Batterieproduktion, EV-Batteriegröße und -Lebensdauer ergeben sich für das Jahr 2020 EV-Batterieemissionen von 33g CO₂/km bzw. 158g CO₂/kWh

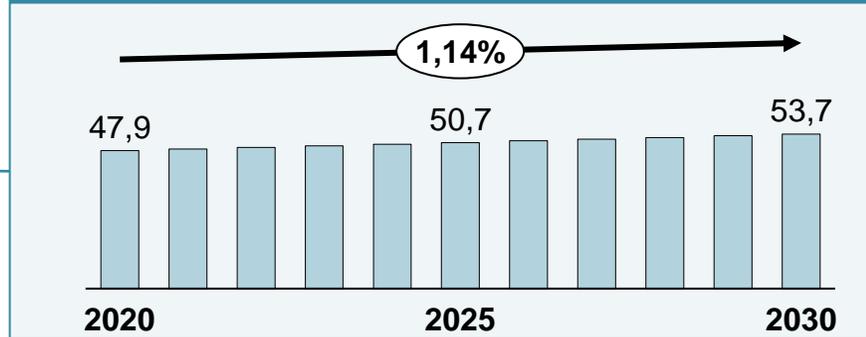
Annahmen

- Für die **Bewertung** der **Emissionen** in der **EV-Batterieproduktion** gehen wir von einem **optimistischen Szenario** aus und erwarten ein **deutliches Absinken** der CO₂-Emissionen im Vergleich zu heute
- Bis **2030** werden **EV-Batterien vollständig** mit **erneuerbaren Energien** produziert, Substitutionseffekt wird berücksichtigt
- EV-Batterieproduktion** in **Deutschland** verursacht **136-110kg CO₂/kWh_{Kapazität}**
- Durchschnittliche EV-Batteriegröße** der in Deutschland verkauften EVs betrug **47,4 kWh** (Q1-Q3 2019)
- EV-Batterie** wird während des **Fahrzeulebens nicht ersetzt**
- Recycling und Weiterverwendung** der **EV-Batterie** wird **nicht berücksichtigt**

CO₂-Emissionen durch die EV-Batterieproduktion¹ in kg CO₂/kWh_{Kapazität}



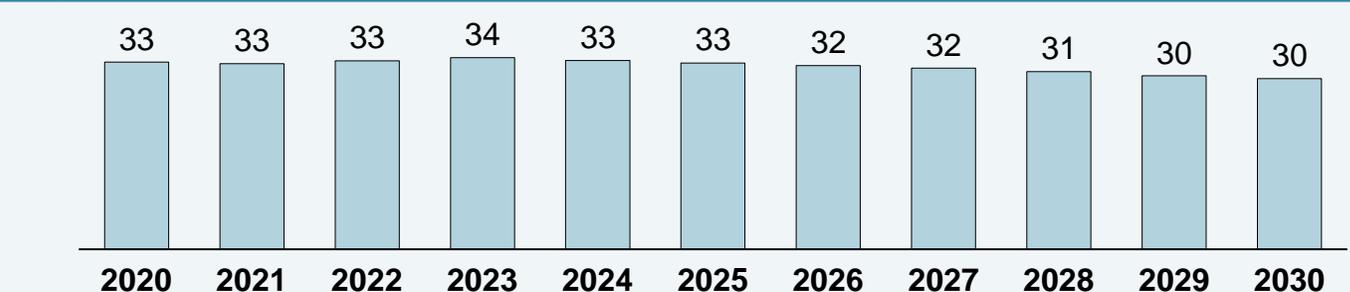
Entwicklung der durchschnittlichen EV-Batteriegröße² in kWh_{Kapazität}



EV-Batterielebensdauer in km

200.000

EV-Batterieemissionen pro km in g CO₂/km



¹ Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) und eigene Berechnung – siehe Anhang

² Berechnung der durchschnittlichen EV-Batteriegröße in 2019 basierend auf Veröffentlichung von Cleantechnica, Wachstumsrate basiert auf Statista

Der durchschnittliche Verbrauch von Diesel PKWs in Deutschland betrug 2019 5,5 l/100km (WLTP) - dies führt zu einer Emission von ~176g CO₂/km

Analyse des Kraftstoffverbrauchs von Diesel-Pkws (2019)

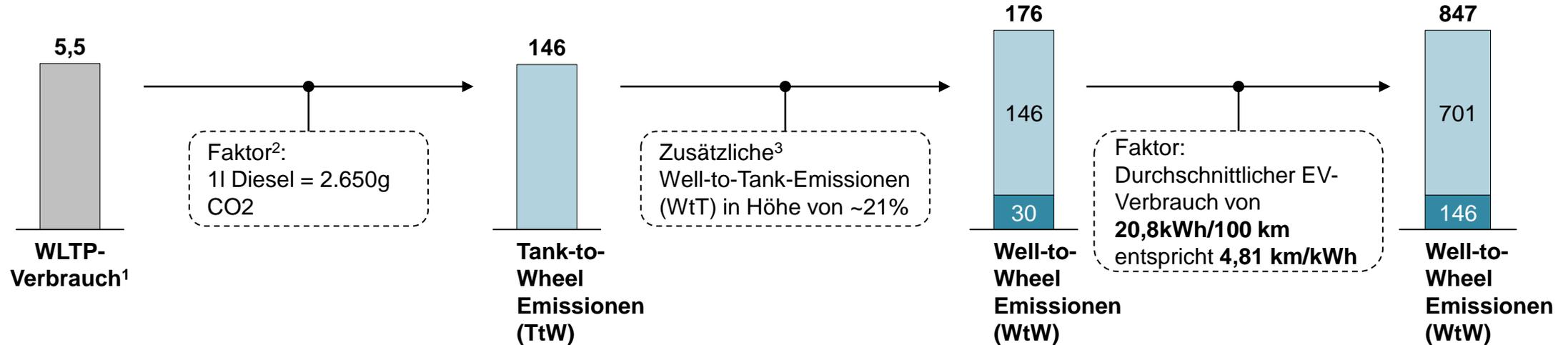
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch Diesel-Pkw in l/100km

Direkte Emissionen Diesel-Pkw (Tank-to-Wheel) in g CO₂/km

Gesamte Emissionen Diesel-Pkw (Well-to-Wheel) in g CO₂/km

Gesamte Emissionen (in kWh umgerechnet)⁴ in g CO₂/kWh

TtW Emissionen WtT Emissionen



Annahme: Emissionen für das Dieselfahrzeug bleiben konstant über den gesamten Untersuchungszeitraum, da eine weitere Optimierung von Verbrennungsmotoren hinsichtlich CO₂-Emissionen aus technischer Sicht an Grenzen stößt

1 Eigene Berechnung: Durchschnittliche CO₂-Emissionen der neu zugelassenen Diesel-Pkw in Deutschland

2 Umweltbundesamt: Pro Liter Diesel werden bei vollständiger Verbrennung 2,65 kg CO₂ freigesetzt

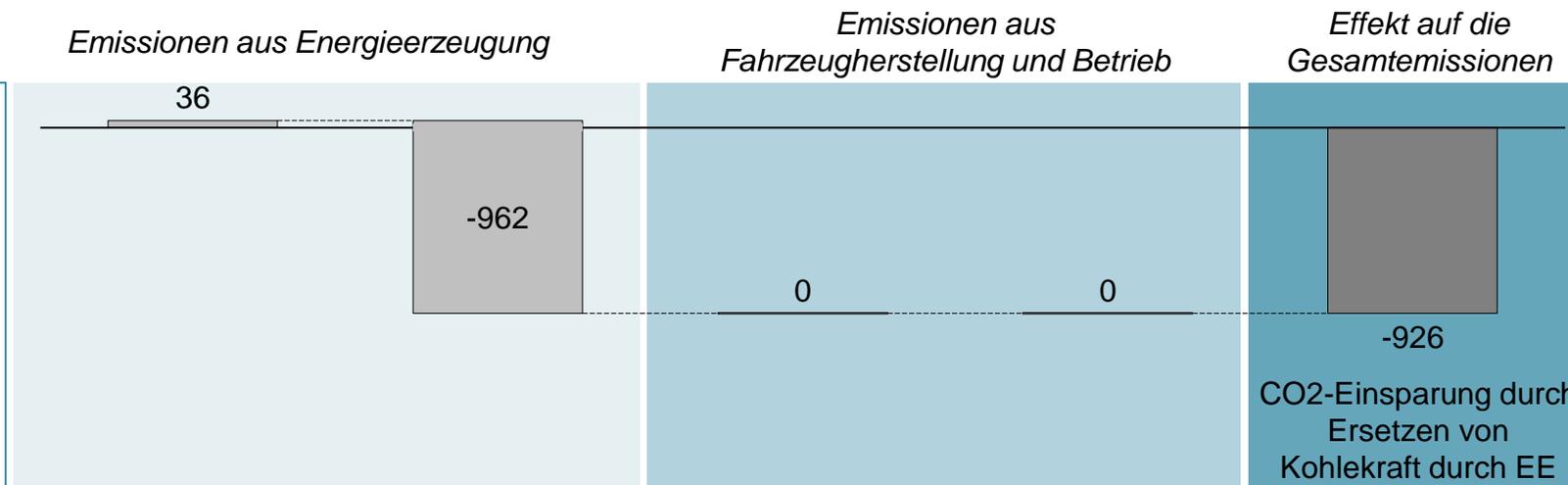
3 Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission: Zuschlag für vorgelagerte Aktivitäten (u.a. Raffination und Transport) auf die Tank-to-Wheel Emissionen von ~20,83%

4 Detaillierter Überblick zur Umrechnung von g CO₂/km in g CO₂/kWh im Anhang

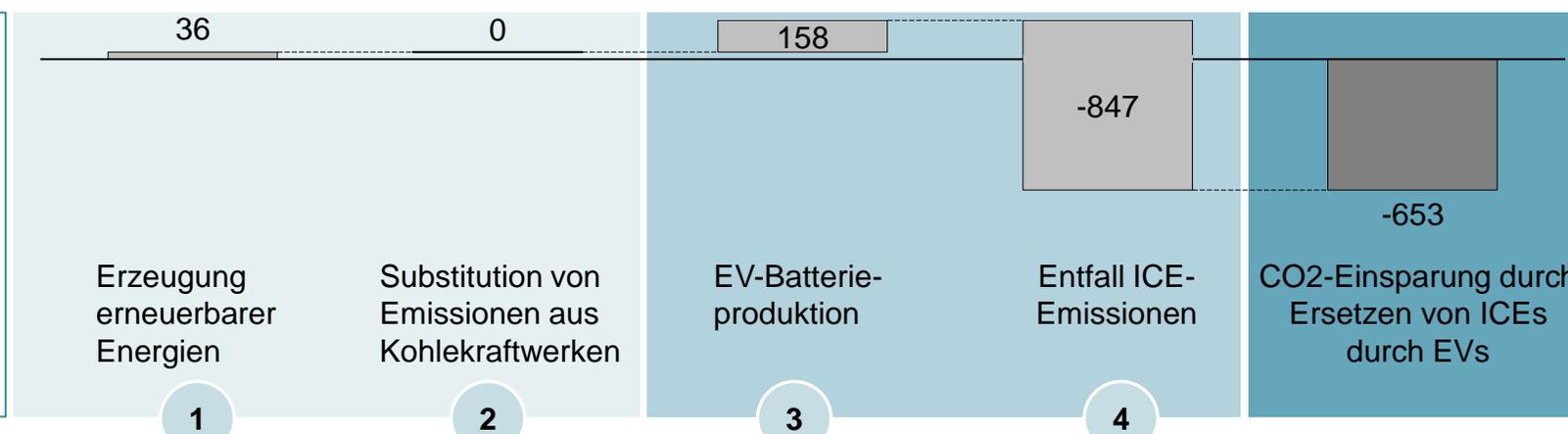
Können erneuerbare Energien Kohlestrom substituieren, ergibt sich ein höherer Einspareffekt als beim Ersetzen eines Verbrenners durch ein EV - Perspektive CO2/kWh

Vergleich der CO2-Emissionen¹
in g CO2/kWh

Ersetzen fossiler Energieerzeuger (Braun- und Steinkohle) durch erneuerbare Energien (EE)

Ersetzen von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen (ICE) durch Elektrofahrzeuge (EV)

Höhere CO2-Emissionen (Delta) durch das Beladen von EVs, anstatt der Substitution fossiler Energiequellen:
Δ 273g CO2/kWh (57g CO2/km)¹

Die Nutzung erneuerbarer Energien zur Abschaltung von Kohlekraftwerken spart mehr CO2-Emissionen ein, als die Ersetzung von Verbrennungsmotoren durch EVs

¹ Detaillierte Umrechnung von g CO2/kWh zu g CO2/km im Anhang; Es werden nur abweichende Emissionen zwischen EV und ICE betrachtet - Emissionen z.B. bei der Fahrzeugproduktion werden nicht beachtet, da diese annähernd identisch anfallen

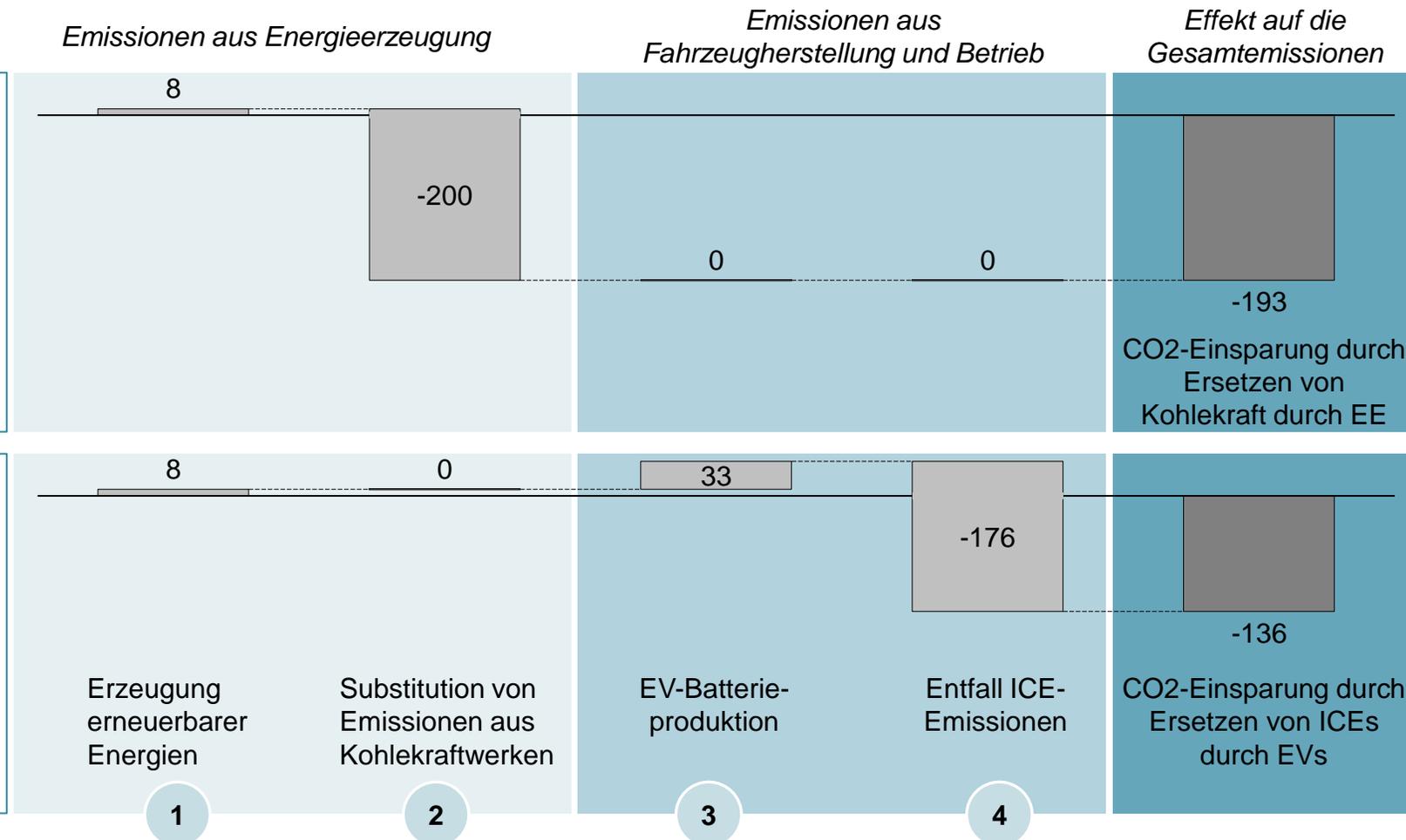
Können erneuerbare Energien Kohlestrom substituieren, ergibt sich ein höherer Einspareffekt als beim Ersetzen eines Verbrenners durch ein EV - Perspektive CO2/km

Vergleich der CO₂-Emissionen¹
in g CO₂/km

Ersetzen fossiler
Energieerzeuger (Braun- und
Steinkohle) durch
erneuerbare Energien (EE)



Ersetzen von verbrennungs-
motorischen Fahrzeugen
(ICE) durch Elektrofahrzeuge
(EV)

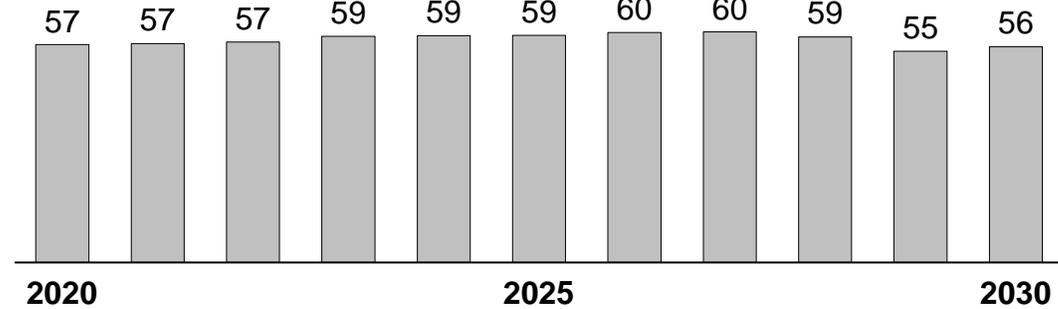


Δ +57g CO₂/km¹

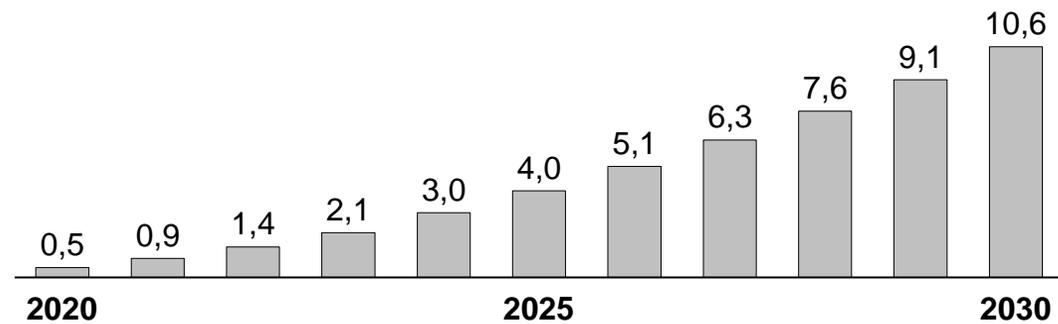
¹ Detaillierte Umrechnung von g CO₂/kWh zu g CO₂/km im Anhang

EVs werden Mehremissionen in Höhe von 8,2 Mio. t CO₂ in 2030 verursachen – Dies entspricht ca. dem Vierfachen der Emissionen des innerdeutschen Flugverkehrs

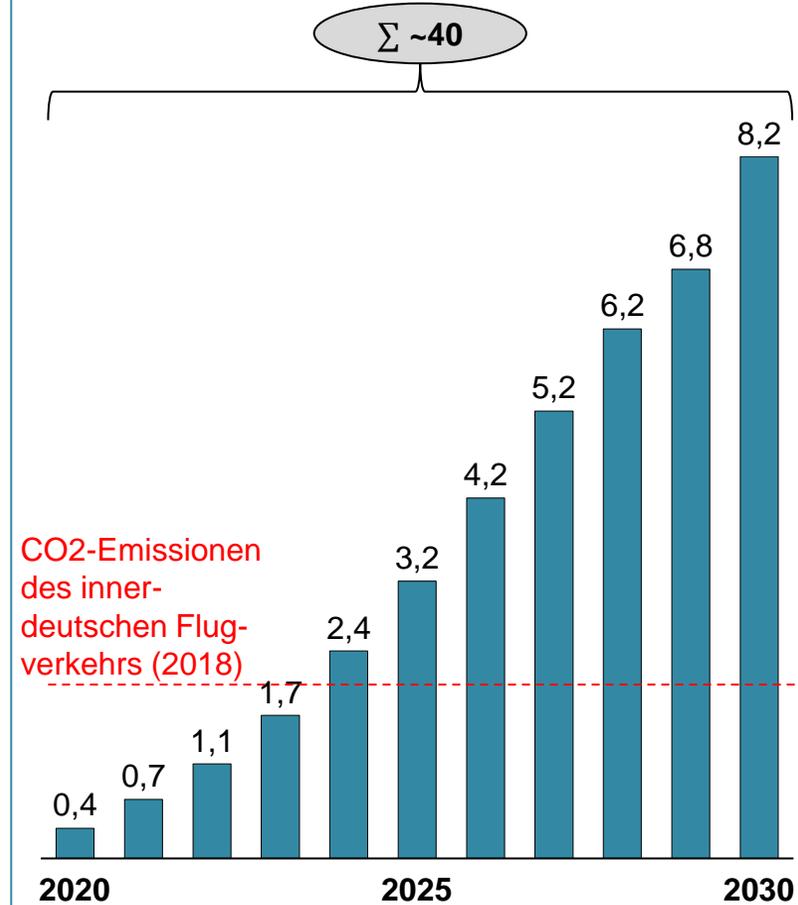
Deltabetrachtung: Zusätzliche CO₂-Emissionen von EVs
in g CO₂/km



EV-Flotte in Deutschland (2020-2030)
in Mio. Fahrzeugen



Anstieg der zusätzlichen Emissionen
in Mio. t CO₂



- Bei gemeinsamer Betrachtung von Energie- und Transportsektor erhöhen sich die CO₂-Emissionen durch die breite Einführung von EVs deutlich
- Von 2020 bis 2030 werden ~40 Mio. t mehr CO₂ emittiert

Strom-Zwischenspeicherung und Atomenergie verbessern die Bilanz der Elektromobilität nicht

Alternative	Begrenzender Faktor	Erklärung
 <p>Erneuerbare Energien speichern, um EVs zu laden</p>	<p>Kosten und CO2-Emissionen von Batterien</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Energiespeicherung kann die Nutzung von erneuerbaren Energien optimieren. In diesem Fall könnte die Energie aber auch, wenn benötigt, in das Netz eingespeist werden. Somit ergibt sich ein Wettbewerb zwischen Abschaltung von Kohlekraftwerken und Elektrofahrzeugen (Substitutionseffekt) ▪ Darüber hinaus fallen zusätzliche CO2-Emissionen und Kosten für die Batterien an
 <p>EVs mit Nuklearenergie laden</p>	<p>Akzeptanz</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Beladung der Elektrofahrzeuge mit Nuklearenergie führt im Vergleich zu erneuerbarer Energie aufgrund niedrigerer Stromgestehungskosten zu minimal geringeren Mehrkosten ▪ Auch hier könnte die erzeugte Energie für das Abschalten von Kohlekraftwerken genutzt werden, daher verbessert auch diese Maßnahme die CO2-Bilanz der EVs nicht

Beiden Alternativen ist es gemein, dass die Strommengen ebenso **konstant** ins **Netz** eingespeist werden und so **fossile Stromerzeugung ersetzt** werden kann. Daher **verbessern** sie den CO2-Ausstoß der Elektromobilität **nicht**

Agenda

Zusammenfassung, Zielsetzung und Vorgehensweise

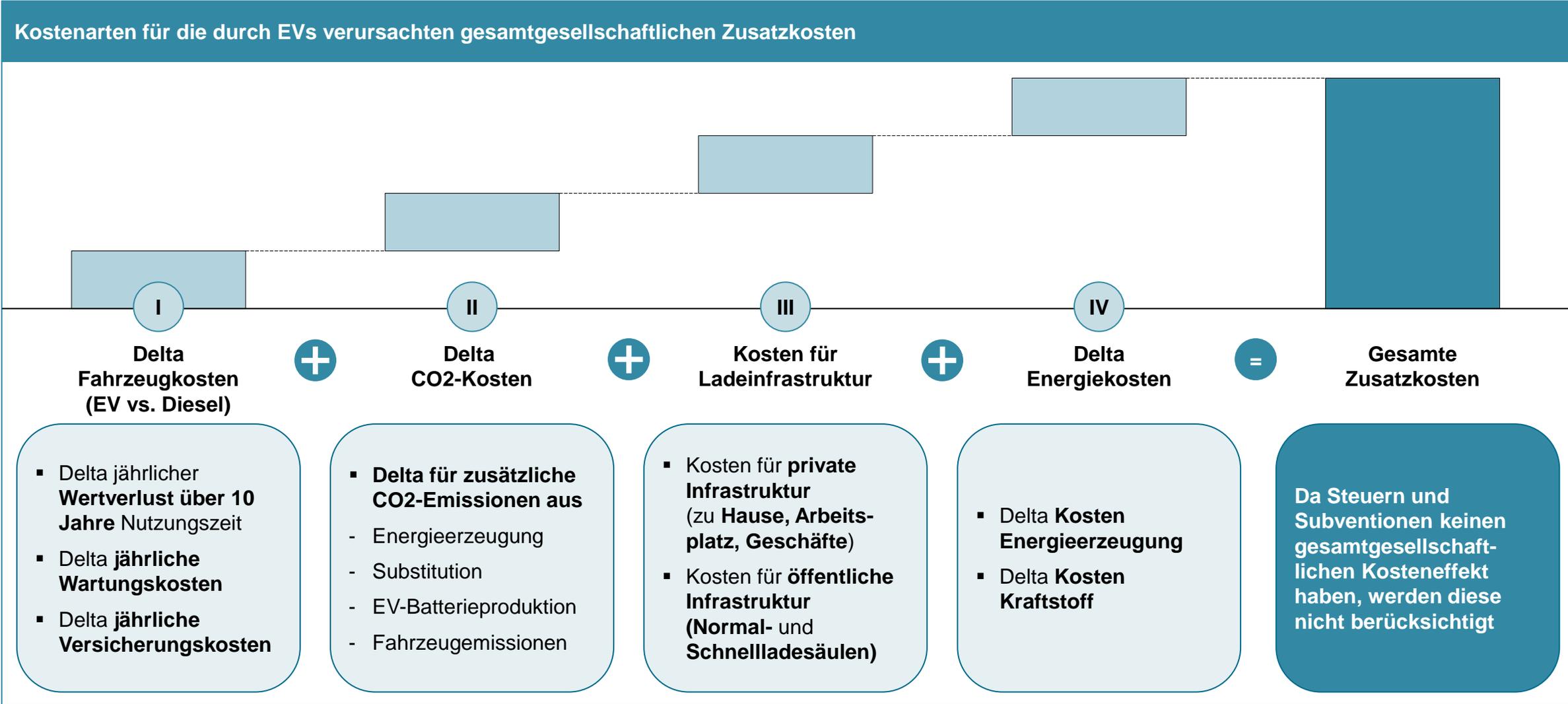
Volumenprognose für Elektrofahrzeuge auf Basis der CO2-Emissionsziele

Ökologische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Ökonomische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Alternativen zur Elektromobilität

Neben der ökologischen Perspektive ist auch eine Bewertung der gesamtgesellschaftlichen Kosten von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren notwendig



I Die Kosten für die Komponenten eines EVs sind ausschlaggebend für die gesamtwirtschaftliche Betrachtung und könnten sich unterschiedlich entwickeln

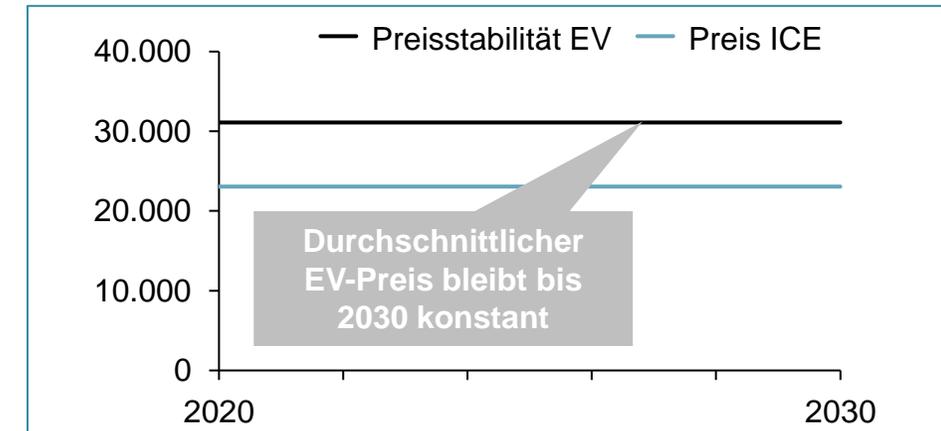
Mögliche Entwicklung des EV-Preises

Preisstabilität

Annahmen

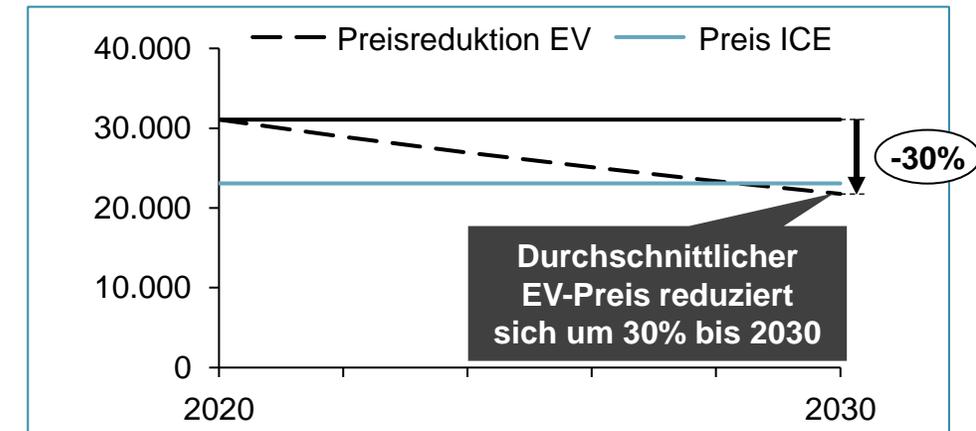
- **EV-Batteriekosten** werden in den nächsten 10 Jahren aufgrund von **Skaleneffekten sinken**
- **EV-Batteriegrößen** werden weiterhin **wachsen**
- **Insgesamt** werden sich diese **Effekte** wahrscheinlich **ausgleichen**, wie es in der **Vergangenheit der Fall war**

Entwicklung EV-Nettopreis¹ (beispielhaft für ID.3) in EUR



Preisrückgang

- Effekt der **sinkenden EV-Batteriekosten überwiegt Steigerung der EV-Batteriekapazitäten** und **EV-Preise sinken**
- In einem **extrem optimistischen Szenario** könnten die **Preise für EVs um ~30% bis 2030 sinken** – die Preise für EVs liegen 2030 somit knapp unterhalb der Preise für ICEs
- Diese **Ausprägung** ist aus unserer Sicht jedoch sehr **unwahrscheinlich**



¹ Für die gesamtgesellschaftliche Betrachtung der Kosteneffekte werden Nettopreise verglichen, da z.B. Steuern und Subventionen lediglich einen Umverteilungscharakter haben

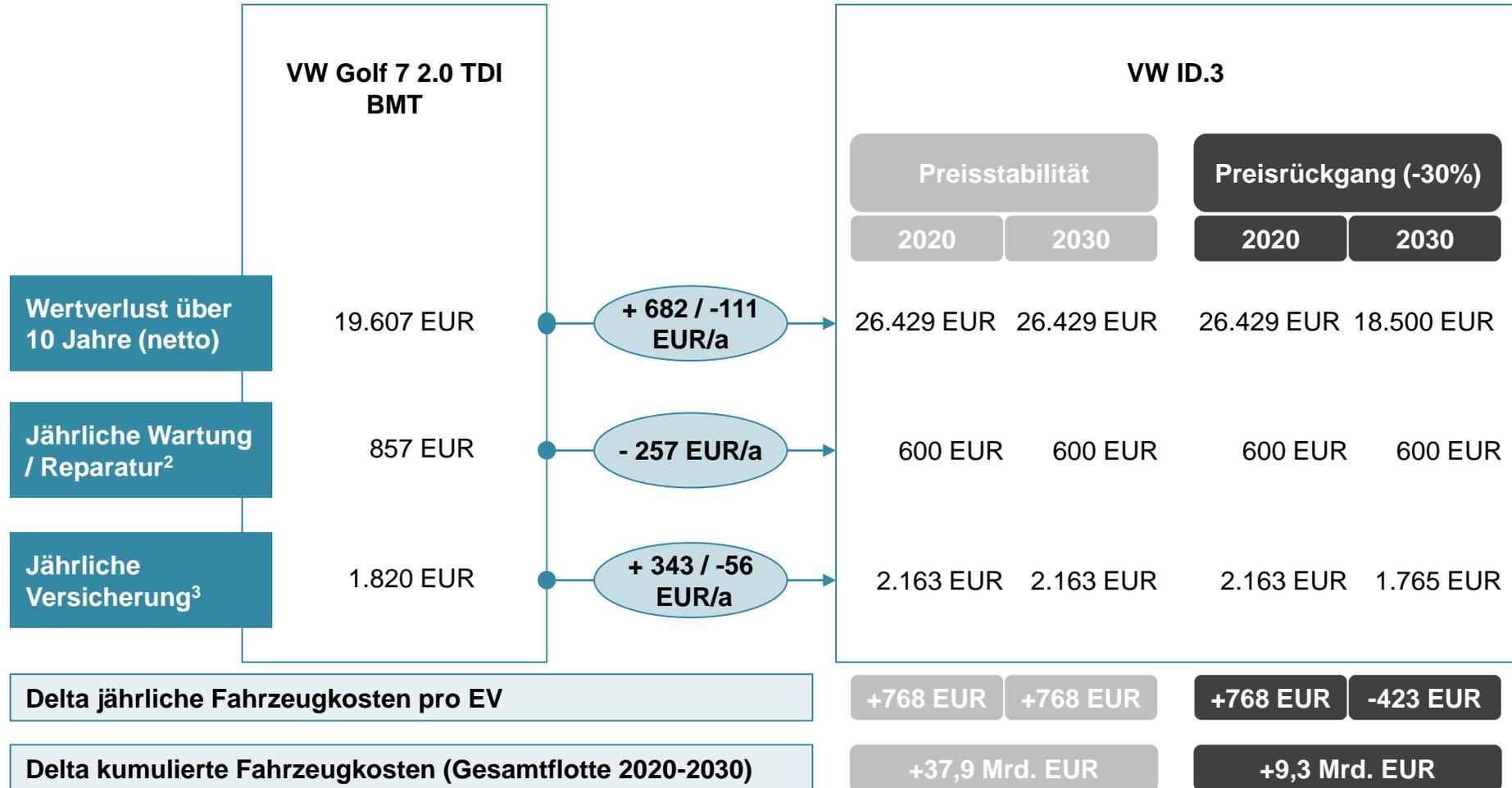
I Die Kostenanalyse zeigt auf Basis eines durchschnittlichen Fahrzeugs, dass bis 2030 für EVs zusätzliche gesamtgesellschaftliche Kosten in Höhe von ~9 bis ~38 Mrd. EUR entstehen

Annahmen¹

- **Restwert** der Fahrzeuge entspricht **15% des Listenpreises** nach 10 Jahren
- Versicherung beinhaltet **Haftpflichtversicherung** und **Vollkaskoversicherung³** (100% bei 500 Euro Selbstbeteiligung)

Mögliche Entwicklung EV-Preis:

- **Preisstabilität:** EV-Preis bleibt unverändert bis 2030 – EV-Batteriekostenpreise sinken, allerdings werden auch größere EV-Batterien erwartet
- **Preisrückgang:** EV-Preis wird bis 2030 um 30% reduziert (niedrigerer Preis als ICE)



1 Energie- bzw. Kraftstoffkosten werden bei den Energiekosten (IV) betrachtet

2 Für EVs werden ~70% der Wartungskosten von konventionellen Fahrzeugen angenommen; Risiko einer defekten EV-Batterie wird nicht betrachtet

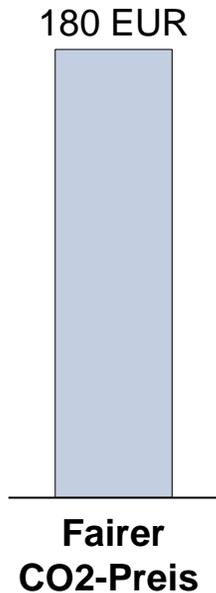
3 Haftpflichtversicherung identisch für Golf TDI und ID.3; Vollkaskoversicherung des ID.3 proportional höher als bei einem Golf TDI entsprechend dem Fahrzeugmehrpreis

II

Der faire Preis für CO2-Emissionen wird vom Umweltbundesamt auf 180 EUR/t CO2 geschätzt – dadurch ergeben sich durch EVs zusätzliche CO2-Kosten in Höhe von 7,2 Mrd. EUR

Kalkulation der CO2-Kosten der zusätzlichen Emissionen von EVs

Laut Umweltbundesamt verursacht 1 t CO2 Schäden in Höhe von ~180 EUR



CO2-Mehremissionen bzw. Einsparungen (2020-2030)
40 Mio. t CO2

CO2-Preis
180 EUR/t CO2



CO2-Mehrkosten durch EVs (2020-2030)
7,2 Mrd. EUR

Trotz des fiktiven Charakters der CO2-Kosten, müssen diese dennoch berücksichtigt werden da Mehremissionen entstehen

III Für den Betrieb von 10,6 Mio. EVs in 2030 müssen ausreichend öffentliche und private Ladepunkte installiert werden, resultierend in ~37 Mrd. EUR Gesamtkosten

Annahmen

Anzahl Ladepunkte nach VDA (basierend auf EU-AFID Richtlinie und Nationale Plattform Zukunft der Mobilität):

- **1,1 private Ladepunkte¹** pro EV
- **0,1 öffentliche Ladepunkte** pro EV
- **0,01 Schnellladepunkte** pro EV

Verteilung der privaten Ladepunkte:

- Darauf aufbauend, nehmen wir an, dass alle EVs, die über einen eigenen **Stellplatz verfügen**, eine **Wallbox (3,7 kW)** nutzen: **0,6** (60% der Haushalte haben einen eigenen Stellplatz²)
- Die **verbleibenden 0,5** werden von **Arbeitgebern, Geschäften, etc.** aufgebaut

Kosten für Ladepunkte:

- **Kosten** auf Basis **Ludwig-Bölkow Stiftung** (Details im Anhang) inklusive **Skaleneffekte³**

Kalkulation der Kosten für die Ladeinfrastruktur

Jährliche EV-Flotte
in Mio. EVs

Private 3,7 kW
Ladepunkte
pro EV
(zu Hause)

0,6 LP/EV

Kosten pro
privater
Ladepunkt
(zu Hause)

115 EUR/a

Private 11 kW
Ladepunkte
pro EV
(Arbeitsplatz,
Geschäfte)

0,5 LP/EV

Kosten pro
privater
Ladepunkt
(Arbeitsplatz,
Geschäfte)

1.000 EUR/a

Öffentliche
11 kW Normal-
ladepunkte
pro EV

0,1 LP/EV

Kosten pro
öffentlicher
Normallade-
punkt

1.000 EUR/a

Öffentliche
150 kW
Schnelllade-
punkte pro EV

0,01 LP/EV

Kosten pro
öffentlicher
Schnelllade-
punkt

13.000 EUR/a

Kumulierte Kosten für Ladeinfrastruktur
~37 Mrd. EUR



1 Exakter Wert: 1,125 Ladepunkte pro EV

2 Eigene Berechnung

3 Skaleneffekte: 15% Kostenreduktion bis 2030 bei Hardware und Wartung

E-Mobilität verursacht zusätzliche Kosten für den Netzausbau, die heute noch nicht exakt abgeschätzt werden können – erste Analysen gehen von 200-400 EUR pro E-Fahrzeug aus



Die E-Mobilität verursacht Kosten für den Ausbau des Nieder- und Mittelspannungsnetzes¹, die gesamtgesellschaftlich getragen werden müssen

- Mit zunehmender Anzahl an E-Fahrzeugen werden die **Grenzen des Stromnetzes** erreicht: **Überschreitungen** des zulässigen **Spannungsbandes** und der zulässigen **Stromgrenzen** erfordern **leistungsstärkere Leitungen** sowie **neue Ortsnetzstationen** und **Transformatoren**
- **Kosten** für diesen Ausbau werden **je nach Ladesteuerung** zwischen **200** und **400 EUR pro EV** geschätzt. Somit entstünden **bis 2030 zusätzliche Kosten** in Höhe von **0,5 bis 1 Mrd. EUR**

- Die **Höhe der Netzausbaukosten ist von** verschiedenen **Parametern** (u.a. Anzahl EVs, Anzahl, Leistung und Verteilung der Ladepunkte) und deren **künftigen Entwicklung abhängig** – daher ist eine **belastbare Abschätzung** zu diesem Zeitpunkt **nicht möglich**
- Aus diesem Grund wurden **diese Kosten** bei der Studie **nicht berücksichtigt**

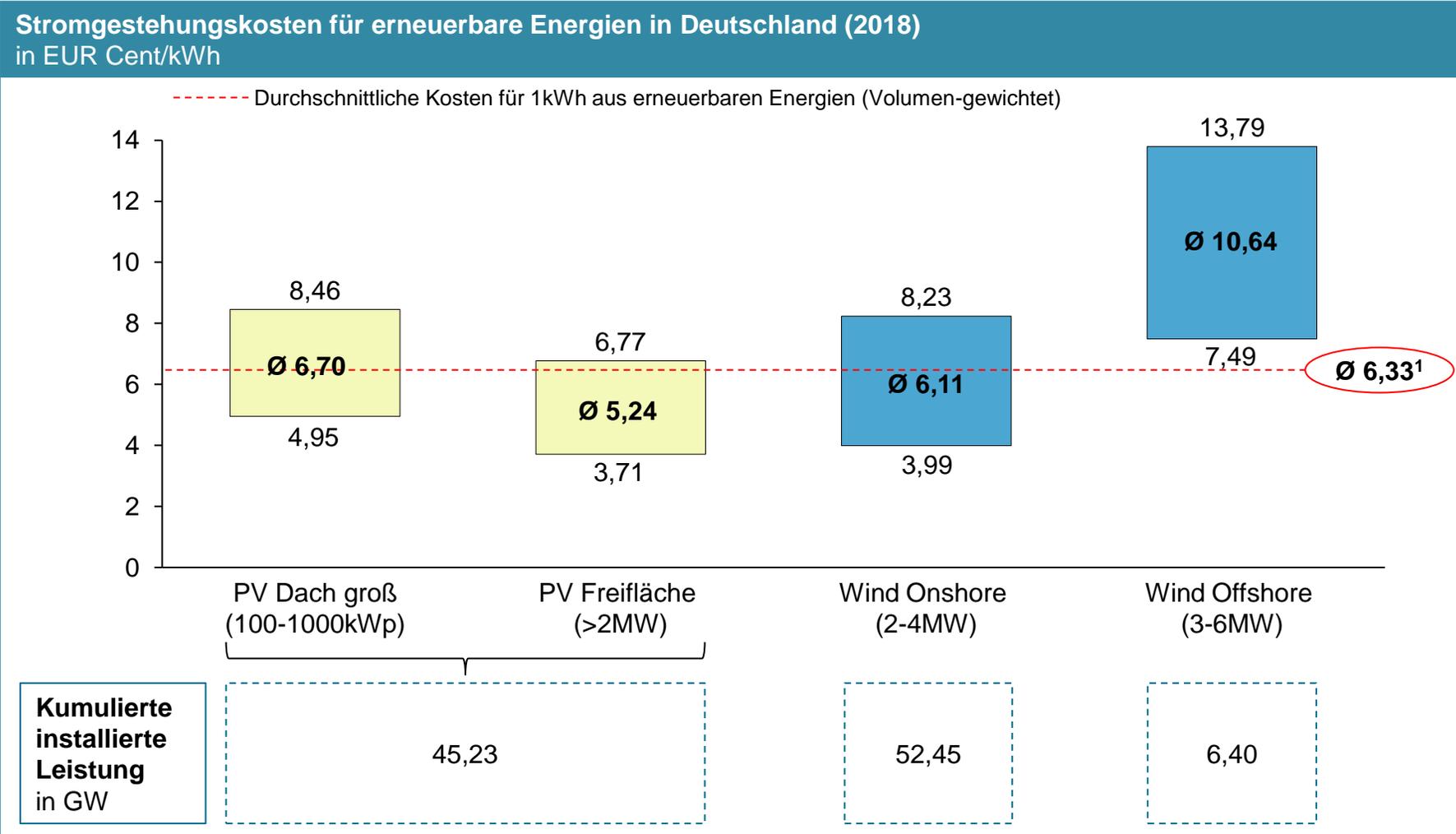
¹ Dorendorf et al.: E-Mobility Stresstest: E.ON Netze mit überschaubarem Aufwand bereit für die Mobilitätswende

Für die Berechnung werden optimistische Stromgestehungskosten für erneuerbare Energien von 6,3 Cent/kWh angenommen

Annahmen

Die **Kosten für EE** sind **optimistisch niedrig angenommen** und in der Realität vermutlich höher, da:

- **Konventionelle Kraftwerke** zum Ausgleich schwankender EE **bereitgehalten** werden
- Ein **Netzausbau** zur Nutzbarmachung der EE **notwendig** ist
- Die hier dargestellten Kosten unterstellen, dass die **gesamte** technisch mögliche **Erzeugungsmenge** (unter Rahmenbedingungen in Deutschland) **abgenommen werden kann**, was jedoch im Kontext der Energiewende eine **optimistische Annahme** ist



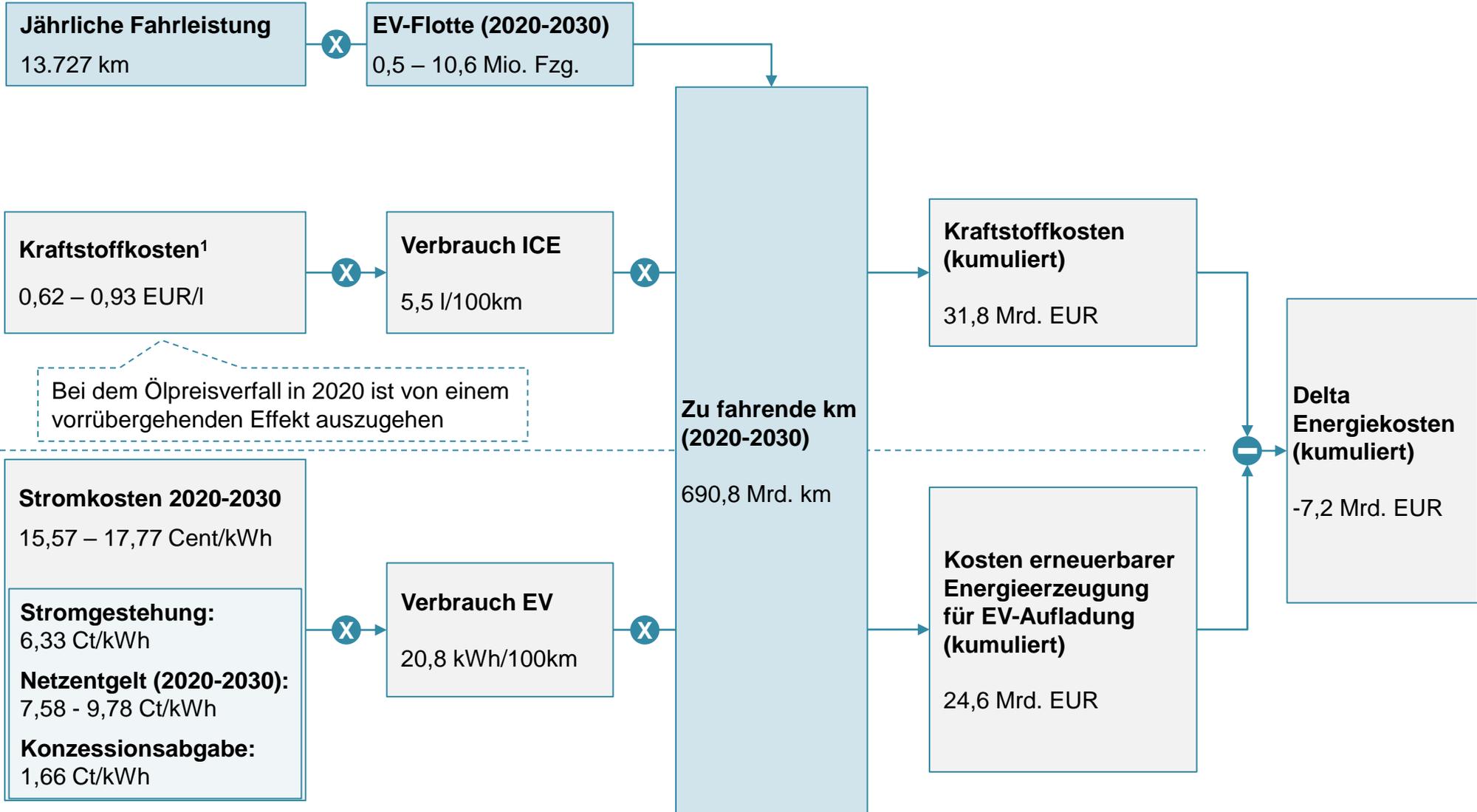
IV

Bei den Energiekosten haben EVs einen Vorteil von 7,2 Mrd. EUR gegenüber den verbrennungsmotorischen Fahrzeugen

Energiekosten für das Ersetzen fossiler Energieerzeuger (Braun- und Steinkohle) durch EE (weitere Nutzung von ICEs)



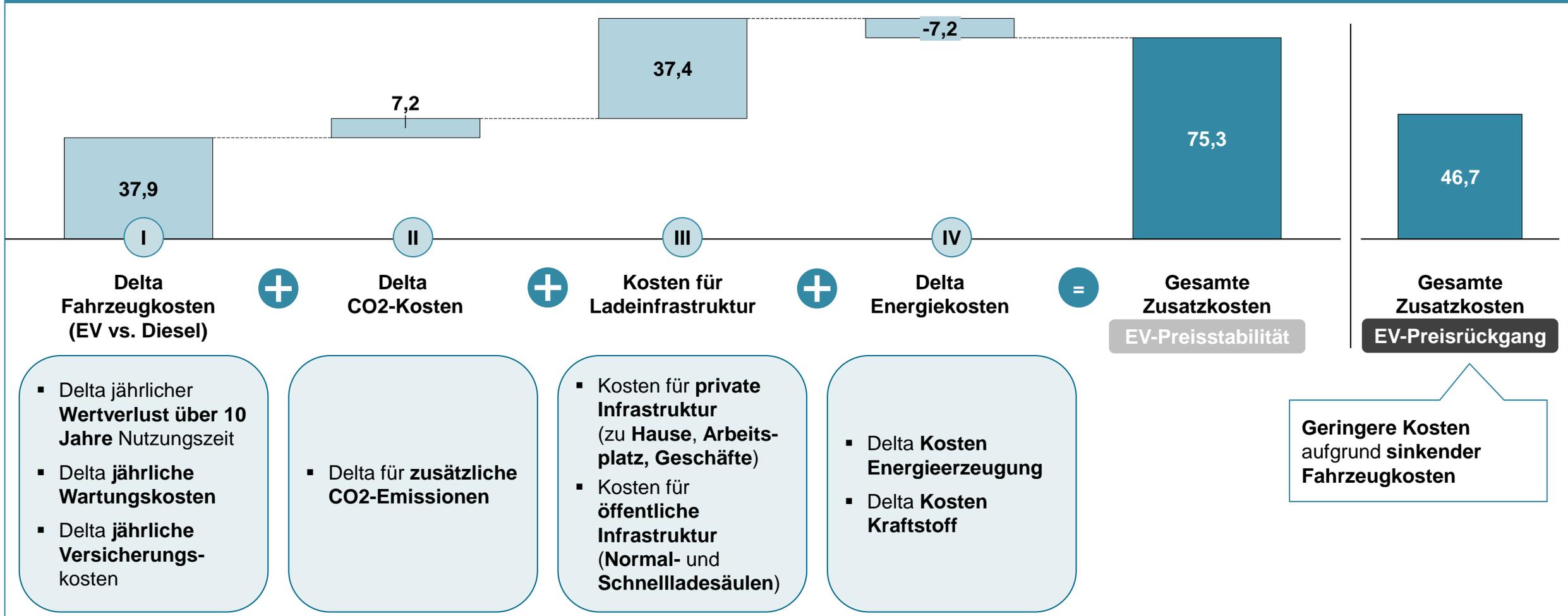
Energiekosten für das Ersetzen von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen durch Elektrofahrzeuge

1 Eigene Berechnung (Kosten ohne Steuerzusätze basierend auf prognostizierter Rohölpreisentwicklung)

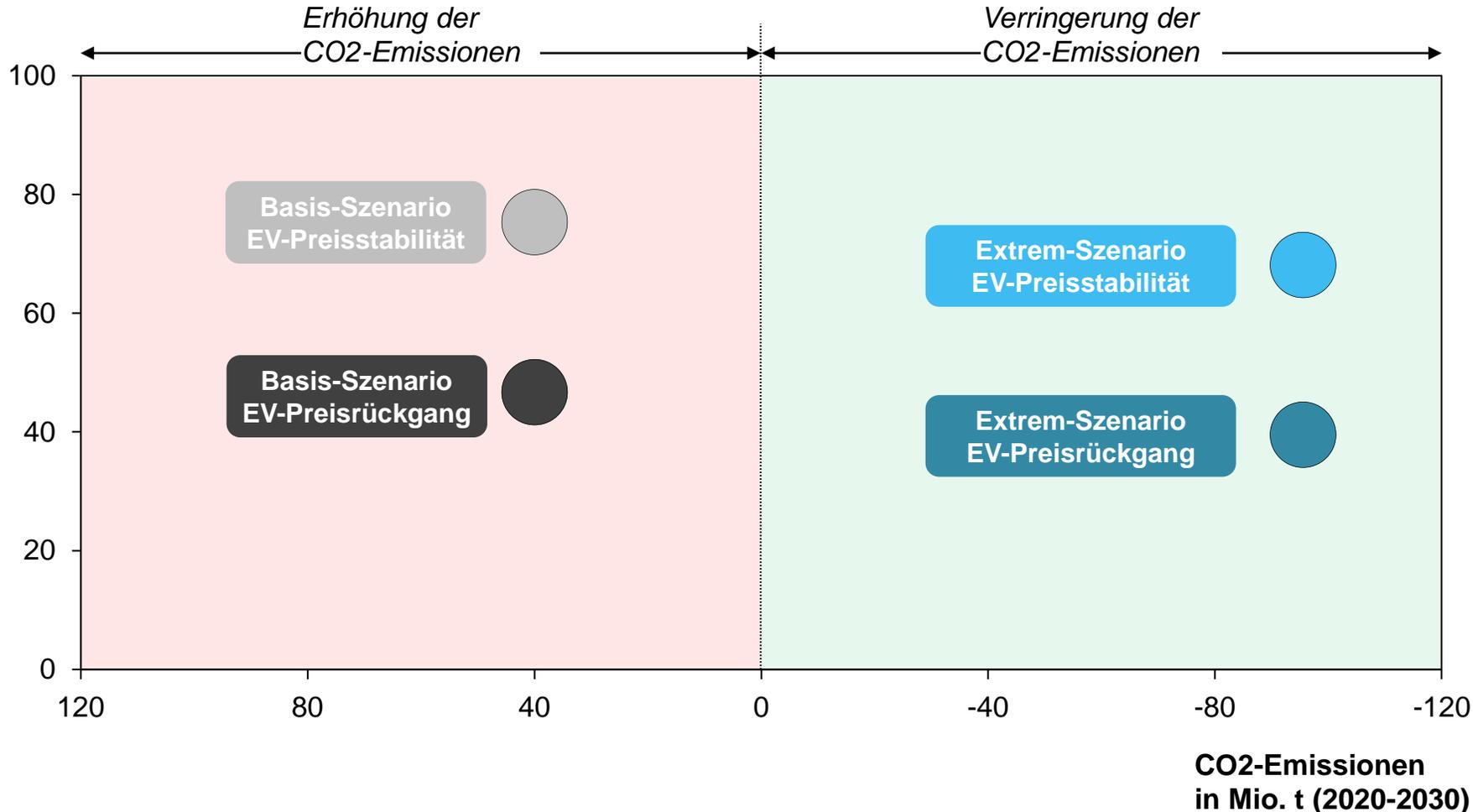
Bei Preisstabilität der EVs entstehen Gesamtkosten für die Elektromobilität von ~75 Mrd. EUR – Bei sinkenden EV-Preisen ~47 Mrd. EUR

Kostenarten für die durch EVs verursachten, gesamtgesellschaftlichen Zusatzkosten (2020-2030)
in Mrd. EUR



Die Analyse zeigt, dass die Elektromobilität voraussichtlich Mehremissionen und Mehrkosten verursacht und somit keinen sinnvollen ökologischen und ökonomischen Beitrag leistet

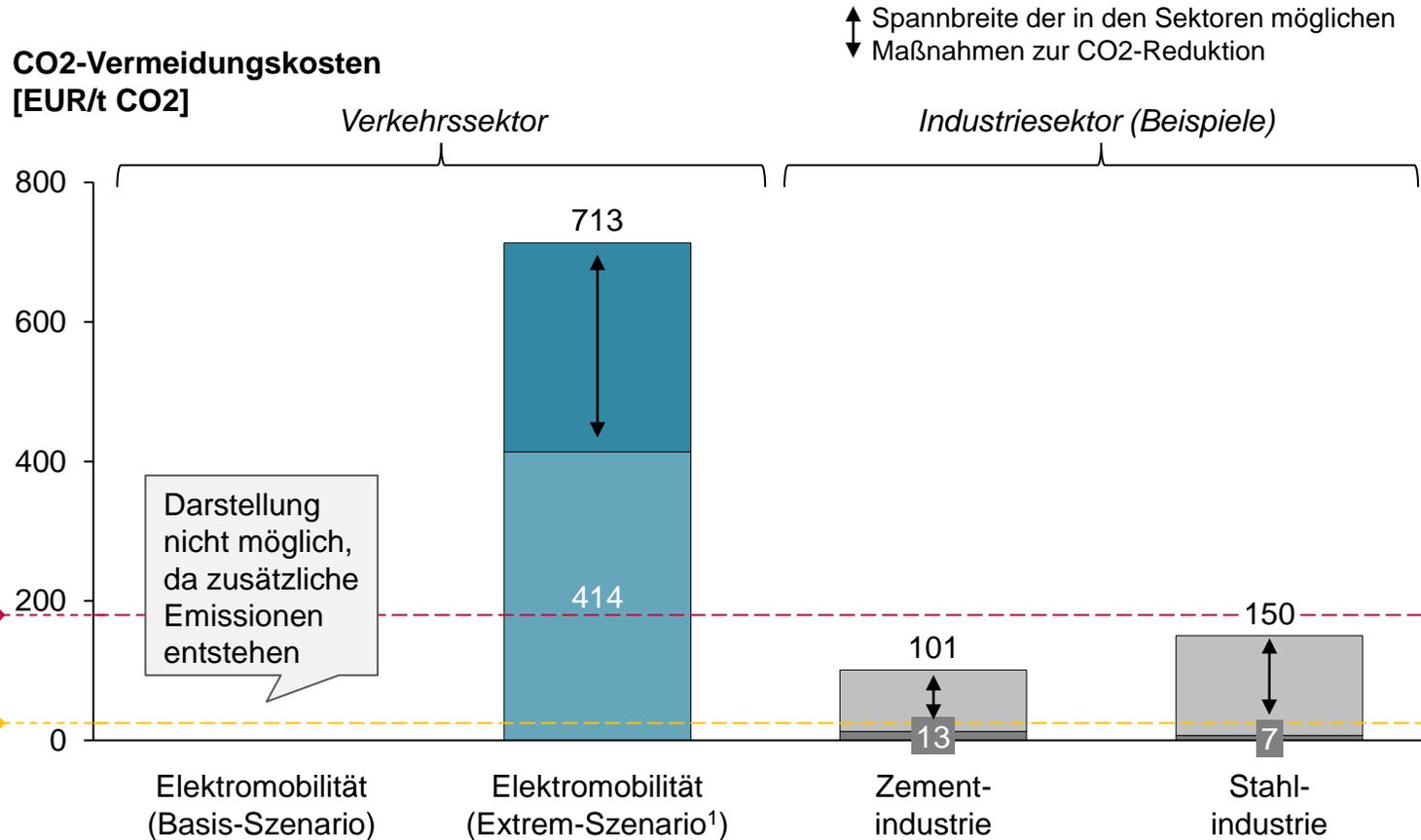
Gesamtgesellschaftliche Mehrkosten
in Mrd. EUR (2020-2030)



- Nutzung der erneuerbaren Energien zum **Aufladen von EVs** führt durch den **Substitutionseffekt** zu **zusätzlichen CO2-Emissionen** und **hohen Zusatzkosten** und stellt somit **keine sinnvolle Lösung** für den Verkehrssektor dar
- Im Extrem-Szenario entsteht ein positiver Effekt

Elektromobilität stellt keine sinnvolle Lösung zur CO2-Reduktion im Verkehrssektor dar – effizientere Alternativen sollten identifiziert werden

Kosten der Vermeidung von CO2-Emissionen in Deutschland
in EUR/t CO2



- **Elektromobilität** kann entweder **keine Emissionen einsparen** (Basis-Szenario) **oder** führt zu **prohibitiv hohen Vermeidungskosten** (Extrem-Szenario)
- Somit ist diese Lösung **ungeeignet**, da CO2-Emissionen in **anderen Sektoren effizienter** eingespart werden können
- Um dennoch **Emissionen im Verkehrssektor einzusparen**, sollten **Alternativen** betrachtet werden

¹ Im Extrem-Szenario wird angenommen, dass die gesamte Energie zum Laden von EVs aus nicht anderweitig nutzbaren erneuerbaren Energien stammt. 713 EUR/t CO2: EV-Preisstabilität; 414 EUR/t CO2: EV-Preisreduktion. Da die Kosten für die Nutzbarmachung der EE nicht enthalten sind, dürften die Vermeidungskosten höher liegen als hier dargestellt.

Agenda

Zusammenfassung, Zielsetzung und Vorgehensweise

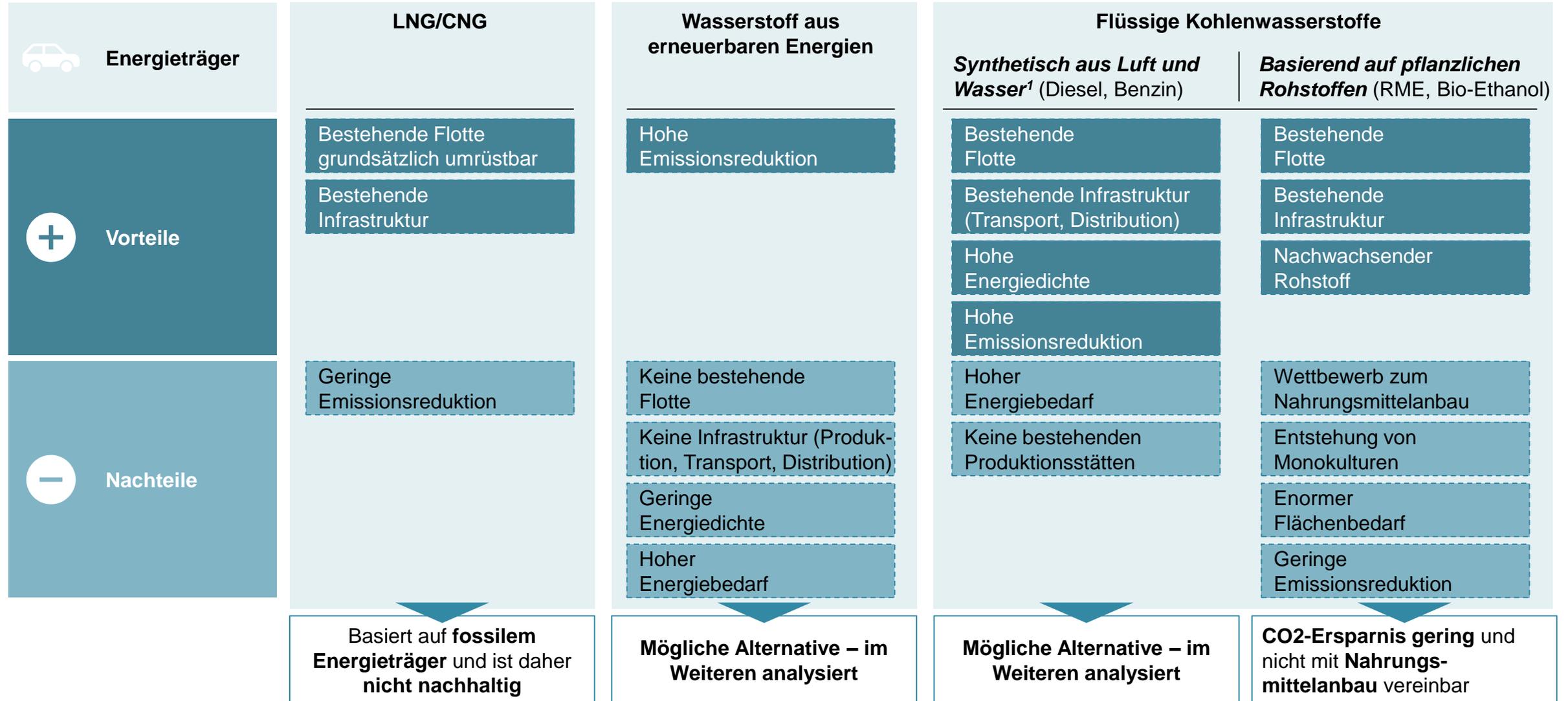
Volumenprognose für Elektrofahrzeuge auf Basis der CO2-Emissionsziele

Ökologische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Ökonomische Effekte von Elektromobilität im Vergleich zu ICE

Alternativen zur Elektromobilität

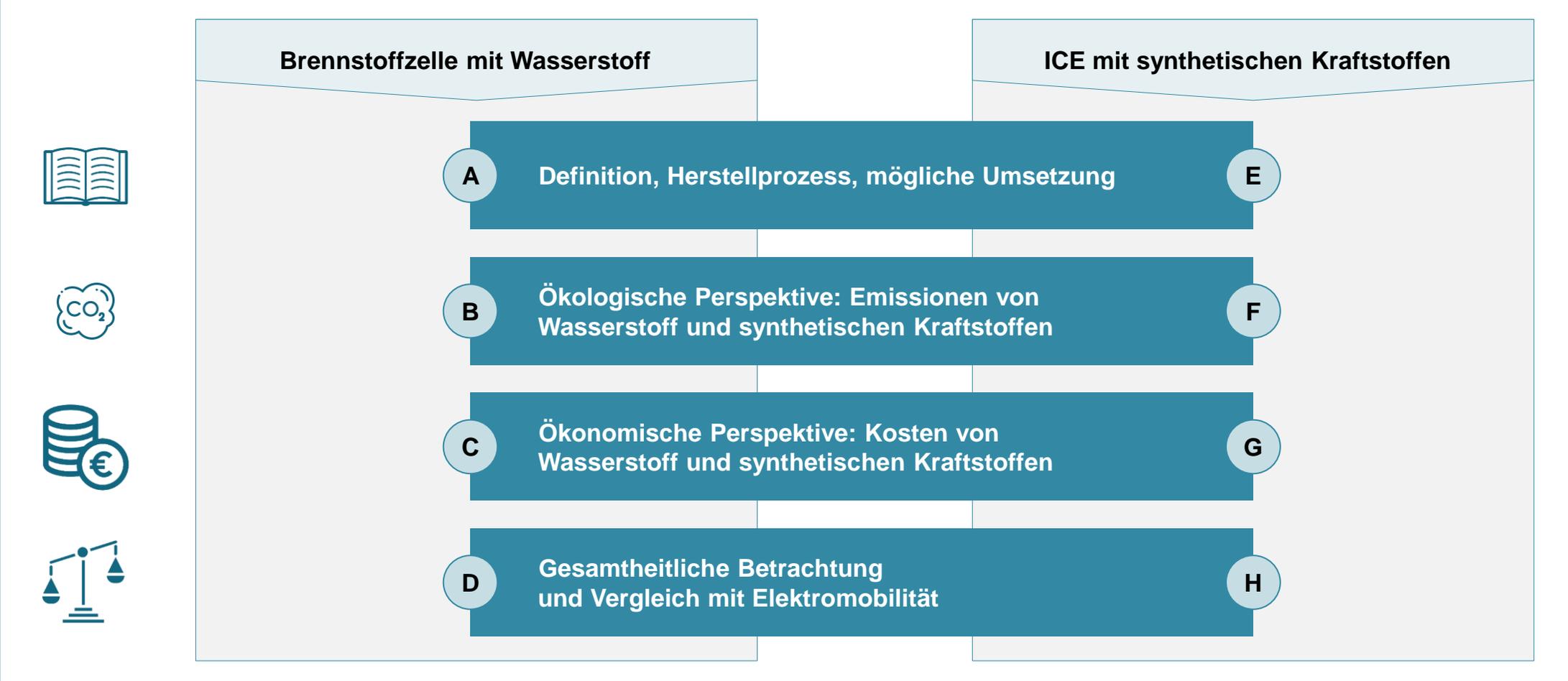
Am Markt existieren zahlreiche Alternativen zur Elektromobilität - Synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff werden in der Studie im Detail betrachtet



¹ Bei den synthetischen Kraftstoffen werden zunächst synthetisch erzeugtes Benzin, Diesel und Kerosin betrachtet – weitere synthetische Kraftstoffe (z.B. Methanol) auch möglich

Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe werden hinsichtlich ihrer ökologischen und ökonomischen Auswirkungen verglichen

Vorgehensweise für die Analyse der Alternativen



A Wasserstoff bringt einige Herausforderungen mit sich



Charakteristika Wasserstoff



Transport & Lagerung

- In kleinem Umfang, bestehende **Infrastruktur** für **Transport und Lagerung vorhanden** und **nutzbar**
- Für **großflächige Verwendung** weitere **Investitionen** (Transport- und Lagermöglichkeiten) **notwendig**



Vertrieb

- Vertrieb **über existierende Tankstellen** möglich. Aktuell ca. 100 öffentliche Tankstellen in Deutschland
- Für **großflächige Verwendung** weitere **Investitionen** (Ausbau Tankstellennetzwerk) **notwendig**



Fahrzeugbetrieb

- **Ersatz der bestehenden Fahrzeugflotte** notwendig
- **Technologie** jedoch **bereits erforscht** und in **Serienproduktion**
- **Höherer Wirkungsgrad** im Vergleich zu SynFuels

- Bei **Wasserstoff** werden **Investitionen** in den **Ausbau** des bestehenden Netzwerks nötig
- Darüber hinaus müsste die **Fahrzeugflotte** mit **neuen Fahrzeugen ersetzt** werden, was eine **hohe Kostenbelastung** für den H2-Kraftstoff in diesem Vergleich mit sich bringt

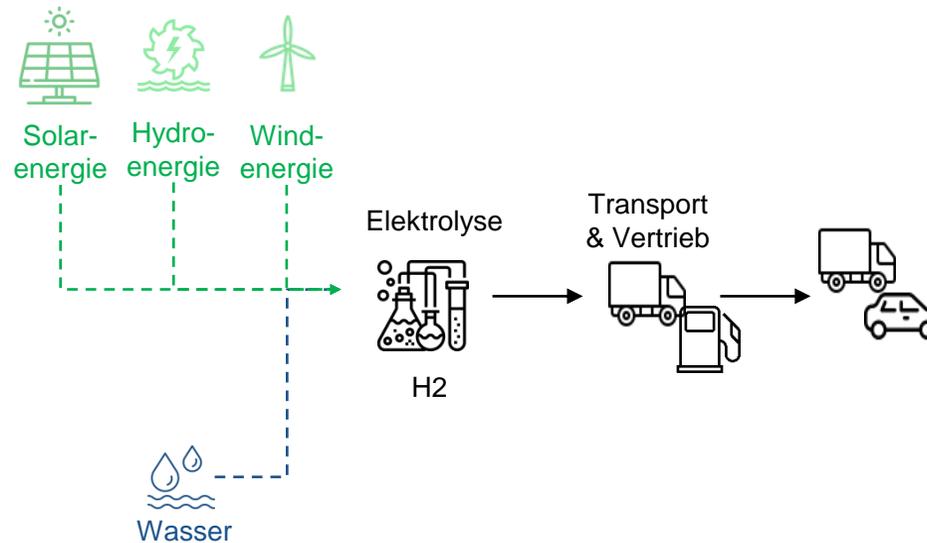
A

Die CO₂-freundlichste Herstellung von Wasserstoff basiert auf dem Elektrolyse-Prozess unter Zuhilfenahme von erneuerbaren Energiequellen



Herstellung Wasserstoff

- **Wasserstoff (H₂)** kann aus Wasser mittels **Elektrolyse** hergestellt werden
- Wird **ausschließlich erneuerbarer Strom** verwendet, weist per **Elektrolyse** erzeugter Wasserstoff **geringe Emissionen** auf
- **Indirekte Emissionen entstehen nur aus erneuerbaren Energien** bzw. Anlagenbau



Elektrolyseanlagen müssen für eine **großflächige Verwendung** weiter ausgebaut werden

Der Energiebedarf für die Herstellung von Wasserstoff kann z.B. durch Solarenergie in sonnenreichen Regionen gedeckt werden



Beispiel: Fukushima Hydrogen Energy Research Field – FH2R (Japan)



Bildrechte siehe Fußnote¹

- **Energiebedarf für Herstellung von Wasserstoff** kann durch riesige Solarparks gedeckt werden
- In Japan ist dies **bereits Realität (z.B. Solarpark FH2R)**
 - **Installation von 10MW Elektrolyseurkapazität**
 - **Energieversorgung** mit Hilfe eines **20MW Solarparks**
 - **Produktion von 1.200 Norm-Kubikmeter grünem Wasserstoff pro Stunde**
 - Betriebsaufnahme: **März 2020**
- Ähnliche **großindustrielle Anlagen** für die **Wasserstoffherstellung** entstehen derzeit auch in **Deutschland** (Refhyne Projekt) und den **Niederlanden** (NorthH2 Projekt)

Enorme Verfügbarkeit an **Solarenergie** in **sonnenreichen Regionen** wie **Nordafrika** würde es erlauben, den **großen Energiebedarf** für die **Herstellung von Wasserstoff** abzudecken und noch **größere Kapazitäten** aufzubauen

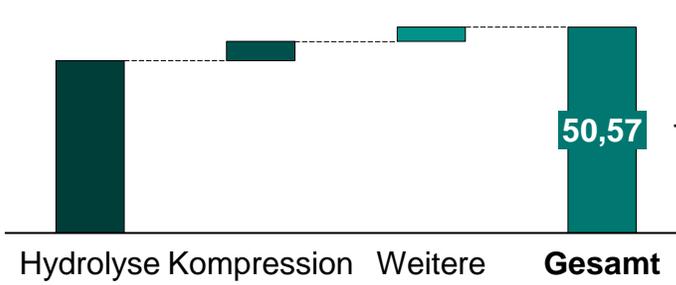
1: Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R); Copyright by New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO); https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100422.html

Bei der Nutzung solarthermischer Energie für die Herstellung verursacht Wasserstoff sehr geringe CO2-Emissionen

Perspektive für 2020³

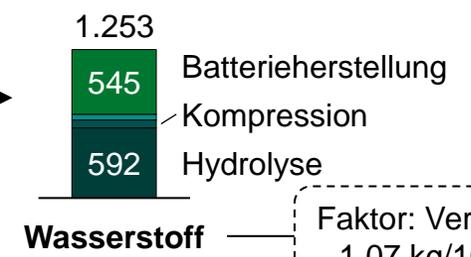
Berechnung der CO2-Ersparnis von Wasserstoff gegenüber fossilen Kraftstoffen

Energieverbrauch bei der Herstellung von Wasserstoff^{1,2,3}
in kWh_{Solarenergie} / kg_{H2}



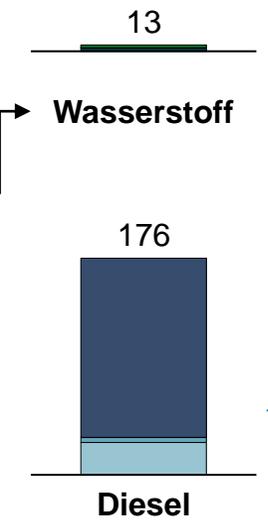
Faktor: 1 kWh solarthermische Energie in Nordafrika verursacht 14 g CO2

Emissionen von Wasserstoff
in g CO2/kg_{H2}

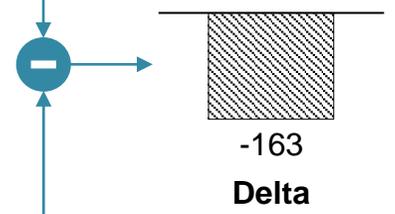


Faktor: Verbrauch 1,07 kg/100km

Emissionen von Wasserstoff und fossilen Kraftstoffen
in g CO2/km



Delta-Emissionen Wasserstoff vs. fossile Kraftstoffe
in g CO2/km



Wasser für Hydrolyse würde aus Meerwasser gewonnen, der Energieaufwand dafür ist mit ca. 0,04 kWh/kg_{H2} vernachlässigbar gering

Wasserstoff auf Basis solarthermischer Energie in Nordafrika verursacht 163g weniger CO2 je Kilometer als fossile Kraftstoffe (~92% Ersparnis ggü. Diesel)

1 Eigene Berechnung basierend auf BMVI, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (s. Anhang) 2 Energiebedarf z.B. für Verluste beim Transport von Wasserstoff werden im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt
3 Dargestellte Werte beziehen sich auf das Jahr 2020 - Bis 2030 werden weitere Optimierungen bei der Wasserstoffproduktion berücksichtigt

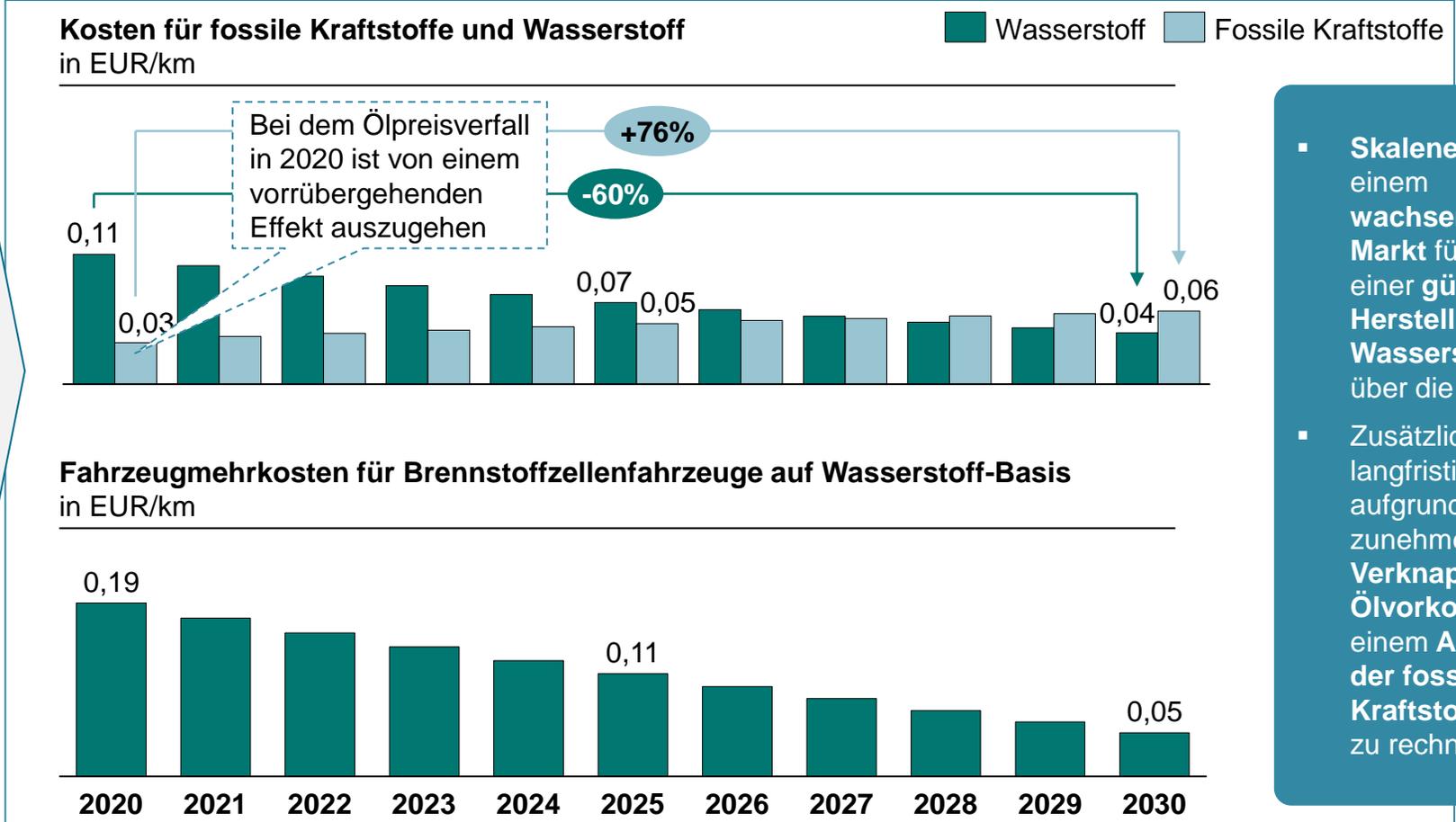
C

Es wird erwartet, dass Kosten von Wasserstoff und fossilen Kraftstoffen sich über die Jahre immer mehr annähern – jedoch kommen bei H2 erhebliche Fahrzeugmehrkosten hinzu

Annahmen

- **Wasserstoffherzeugung in Nordafrika oder im Nahen Osten**
- **Kostenentwicklung für Wasserstoff** basiert auf einer Studie des Hydrogen Council
- **Prognose der Kosten für fossilen Kraftstoff (Diesel)** entsprechend der **Entwicklung des Rohölpreises** (60 US \$/Barrel für 2020 und 90 US \$/Barrel für 2030)²
- **Technische Lösung für den Transport** großer Mengen Wasserstoff von Nordafrika nach Europa ist unklar und somit **nicht Teil dieser Studie**
- **Mineralölsteuer und Mehrwertsteuer** werden **vernachlässigt** – **CO2-Steuer** für die Emissionen des jeweiligen Kraftstoffs wird **berücksichtigt**

Entwicklung Kosten für fossile Kraftstoffe und Wasserstoff und Fahrzeugmehrkosten (2020-2030)¹ in EUR/km



- **Skaleneffekte** in einem **wachsenden Markt** führen zu einer **günstigeren Herstellung des Wasserstoffs** über die Zeit
- Zusätzlich ist langfristig aufgrund einer zunehmenden **Verknappung der Ölvorkommen** mit einem **Anstieg der fossilen Kraftstoffpreise** zu rechnen

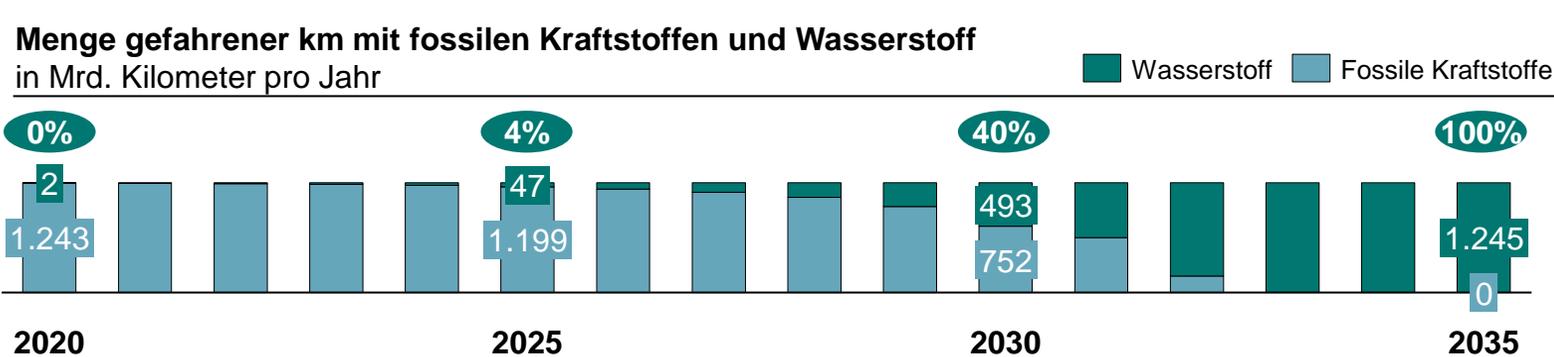
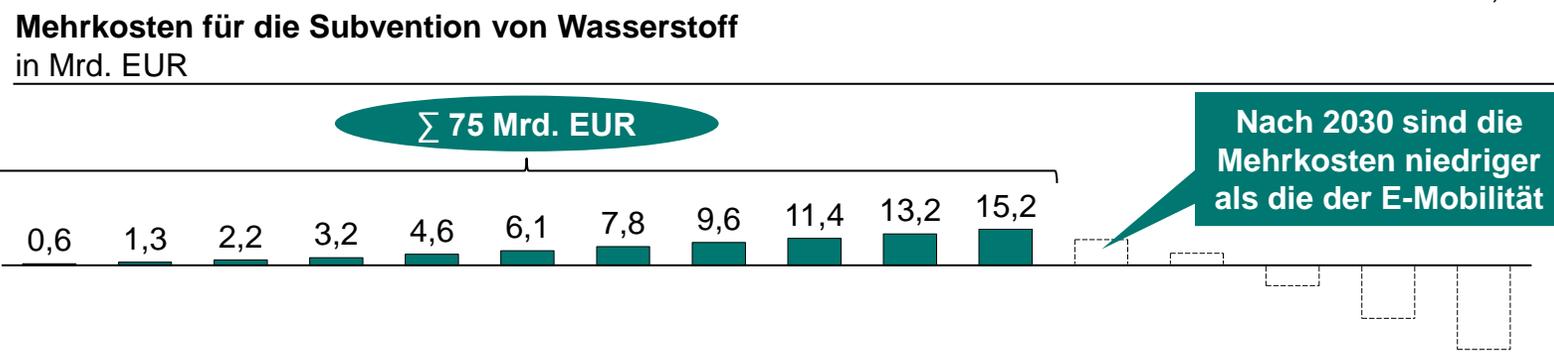
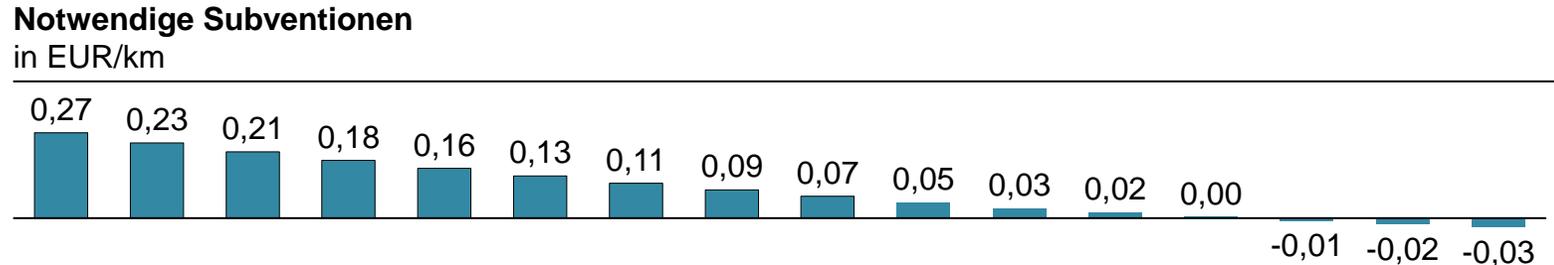
1 Hydrogen Council: ~11,1 USD/kg_{H2} (im Jahre 2020) und 4,4 USD/kg_{H2} (im Jahre 2030)
2 International Energy Agency (IEA)

Werden die Mehrkosten der E-Mobilität (~75 Mrd. EUR) für die Subventionierung von Wasserstoff aufgewendet, kann bis 2030 ca. 40% der Fahrleistung ersetzt werden

Annahmen

- Der jährliche Kraftstoffverbrauch in Deutschland beträgt **27 Mrd. Liter Benzin** und **42 Mrd. Liter Diesel** und wird bis 2030 konstant angenommen¹
- Einfluss** der steigenden Nachfrage für **Wasserstoff** auf den **Rohölpreis** wurde **nicht modelliert**
- Die **Mineralölsteuer** auf Wasserstoff wurde **nicht berücksichtigt**
- Die **CO2-Steuer** fällt in unterschiedlichem Maße an und wird somit berücksichtigt

Entwicklung der Subventionen, Mehrkosten und Menge Wasserstoff

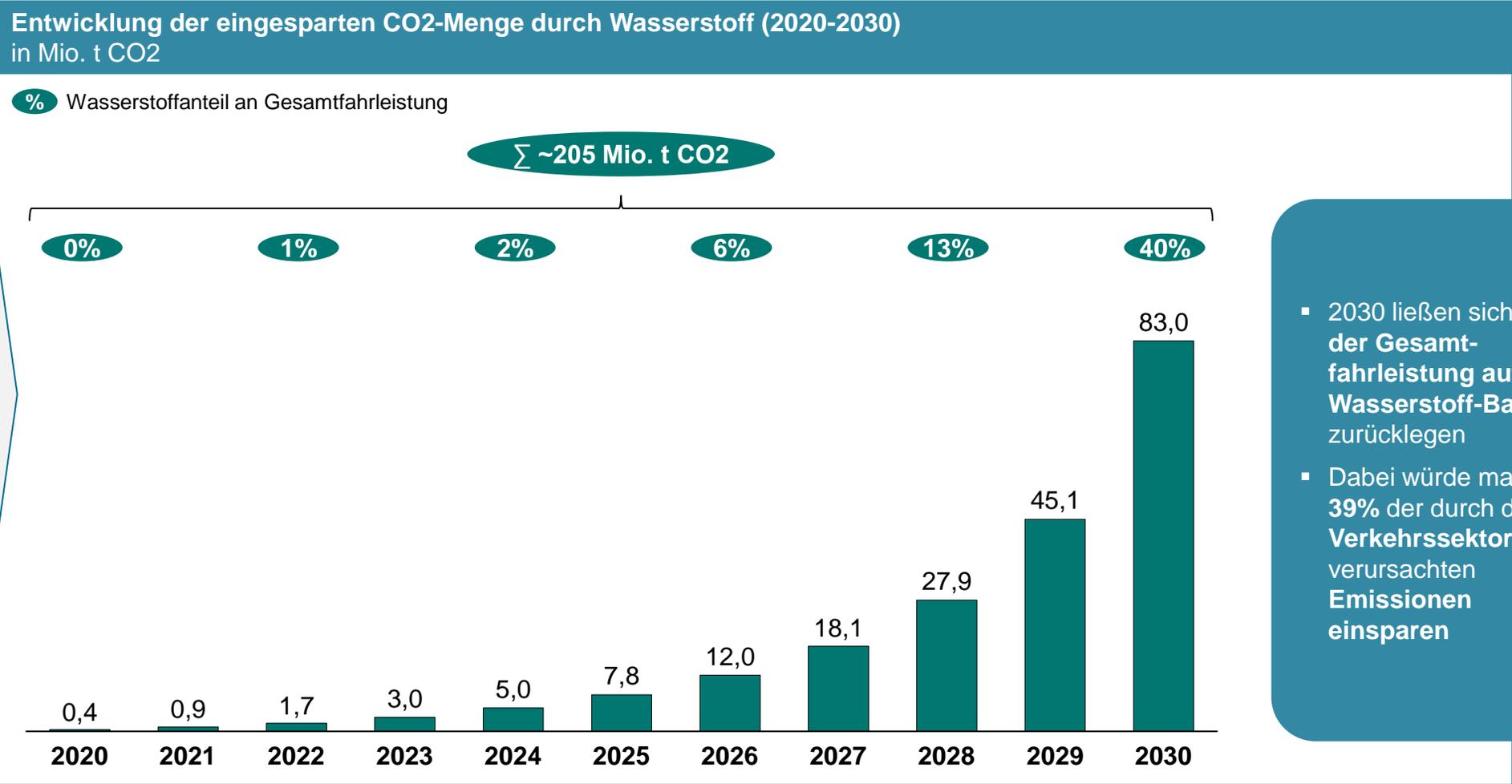


- Ca. 2032 wird eine **Kostenparität** zwischen Wasserstoff und fossilen Kraftstoffen erwartet
- Aufgrund der erhöhten **Zahlungsbereitschaft** für **CO2-ärmere Kraftstoffe** könnten sogar **niedrigere Subventionen pro km** ausreichen

¹ Annahme: Gegenläufige Effekte der wachsenden Flotte und des altersbedingten Wegfalls von Fahrzeugen mit hohem Kraftstoffverbrauch heben sich gegenseitig auf

D Mit Hilfe von Wasserstoff ließen sich ~205 Mio. t CO2 einsparen

- Annahmen**
- Je **gefahrenem km** werden durch **Wasserstoff 163 g CO2** eingespart
 - Ausreichende **Produktionskapazitäten** sowie notwendige **Infrastruktur** können aufgebaut werden



- 2030 ließen sich **40%** der **Gesamtfahrleistung** auf **Wasserstoff-Basis** zurücklegen
- Dabei würde man ca. **39%** der durch den **Verkehrssektor** verursachten **Emissionen** einsparen

1 Offizielle Emissionen des Verkehrssektors: 171 Mio. t CO2 (Tank-to-Wheel) – hinzu kommen Well-to-Tank-Emissionen

E Synthetische Kraftstoffe sind in der Umsetzung wesentlich einfacher



Charakteristika synthetischer Kraftstoffe (SynFuels)



Transport & Lagerung

- Nutzung **bestehender Infrastruktur** für **Transport und Lagerung**
- **Keine Investitionen** notwendig



Vertrieb

- Vertrieb **über existierende Tankstellen** (inkl. **bestehende Zapfsäulen**) **ohne Umrüstung**
- **Keine Investitionen** notwendig



Fahrzeugbetrieb

- Verwendung in **bestehender ICE-Fahrzeugflotte** (z.B. auch **Beimischung zu Fossilen**)
- **Keine Umrüstungen** o.Ä. notwendig
- **Geringerer Wirkungsgrad** im Vergleich zur Brennstoffzelle, daher **primär sinnvoll**, wenn für die Produktion **erneuerbare Energien mit niedrigem CO2-Footprint** zur Verfügung stehen

Synthetische Kraftstoffe verursachen keinen Anpassungsbedarf in Bezug auf Transport, Lagerung, Vertrieb und Betrieb

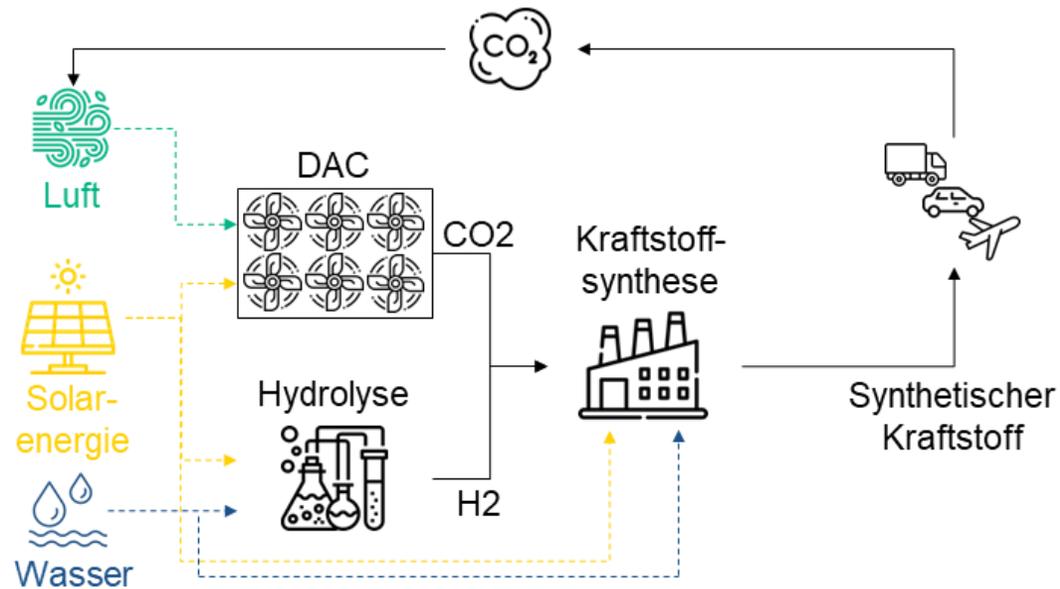
E

Die Herstellung synthetischer Kraftstoffe basiert auf CO₂ und Wasserstoff – beide Stoffe können aus Luft, Wasser und dem Einsatz von Solarenergie gewonnen werden



Herstellung synthetischer Kraftstoffe

- Mit Hilfe **erneuerbarer Energien** wird **Kohlendioxid (CO₂) aus der Luft extrahiert (DAC¹)** und **Wasserstoff (H₂) aus Wasser** gespalten
- **H₂ und CO₂** werden durch weitere Prozesse zu **synthetischen Kraftstoffen** mit **gleicher chemischer Zusammensetzung** (z.B. Diesel, Benzin, Kerosin) verarbeitet
- **Emissionen entstehen nur aus benötigter erneuerbarer Energie** bzw. Anlagenbau. Das CO₂ befindet sich in einem Kreislauf



Großindustrielle Produktionsinfrastruktur existiert noch nicht und muss aufgebaut werden

¹ DAC: Direct Air Capturing

Energiebedarf für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe kann z.B. durch Solarenergie in sonnenreichen Regionen gedeckt werden



Beispiel: Solarkraftwerk Ouarzazate (Marokko)



Bildrechte siehe Fußnote¹

- **Energiebedarf für Herstellung synthetischer Kraftstoffe** könnte durch **solarthermische Kraftwerke** in der **Wüste** gedeckt werden
- In kleinem Maßstab ist dies **bereits Realität** (z.B. **Solarkraftwerk Ouarzazate** in Marokko)
 - Typ: Sonnenwärmekraftwerk
 - Leistung: 580 MW
 - Betriebsaufnahme: Februar 2016



Mögliche Gründe für den Misserfolg vergangener Initiativen (z.B. Desertec)



- Die mit dem damaligen Konzept von Desertec verknüpften **technischen Herausforderungen** stellten eine **zu große Hürde** dar
- Infragestellung der **Verwendung der Energie für entwickelte Länder** statt zur **Unterstützung von Entwicklungsländern**, in denen die Energie produziert würde
- Lokal werden **Megaprojekte mit „wohlmeinenden“ Motiven** als **Ausbeutung armer Länder** für den eigenen Nutzen empfunden

- Enorme Verfügbarkeit an **Solarenergie** in **Nordafrika** würde es erlauben, den **großen Energiebedarf abzudecken**
- Um eine **erfolgreiche Implementierung** sicherzustellen, müssten **Interessen aller Stakeholder frühzeitig** berücksichtigt und durch eine **konzertierte europäische politische Initiative** vorangetrieben werden

¹ Contains modified Copernicus Sentinel data 2019 / CC BY-SA 3.0-IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>)

F

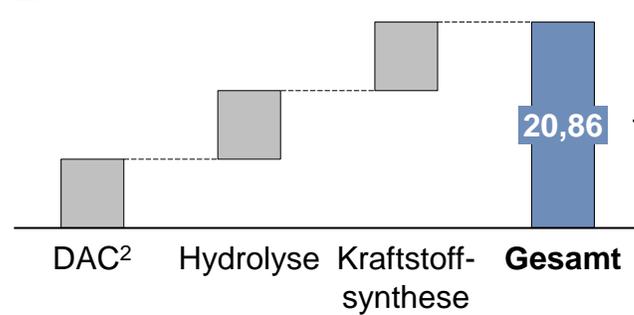
Im Lifecycle verursachen synthetische Kraftstoffe CO₂-Emissionen, die jedoch geringer sind als die von fossilen Kraftstoffen – Pro Kilometer werden ca. 89% der Emissionen vermieden

Berechnung der CO₂-Ersparnis von synthetischen gegenüber fossilen Kraftstoffen

Energieverbrauch bei der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen¹

in kWh_{Solarenergie}/l

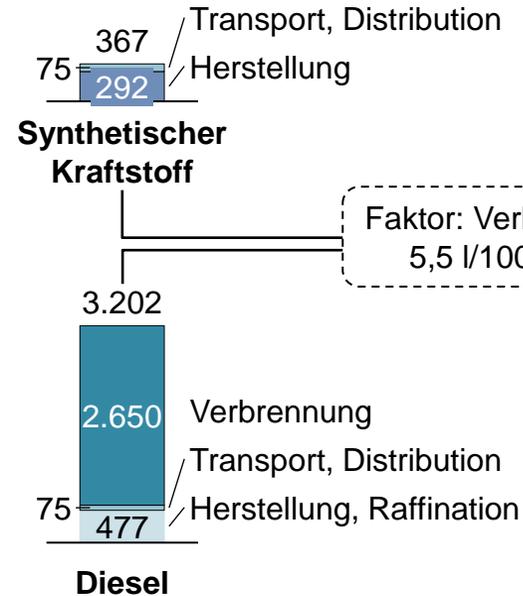
■ Schematisch



Faktor: 1 kWh solarthermische Energie in Nordafrika verursacht 14 g CO₂

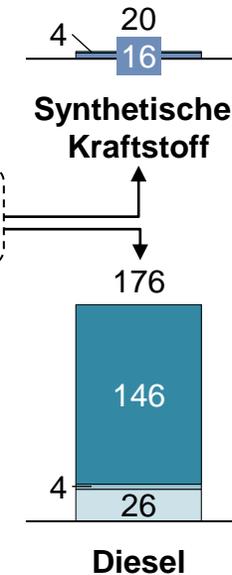
Emissionen von synthetischen und fossilen Kraftstoffen

in g CO₂/l



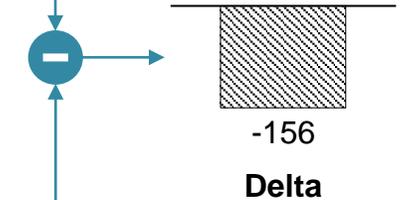
Emissionen von synthetischen und fossilen Kraftstoffen

in g CO₂/km



Delta-Emissionen synthetische vs. fossile Kraftstoffe

in g CO₂/km



Wasser für Hydrolyse kann aus Meerwasser gewonnen werden, der Energieaufwand dafür ist mit ca. 0,04 kWh/kg_{H₂} vernachlässigbar gering

Synthetische Kraftstoffe auf Basis solarthermischer Energie in Nordafrika verursachen 156g weniger CO₂ je Kilometer als fossile Kraftstoffe (~89% Ersparnis ggü. Diesel)

¹ Eigene Berechnung basierend auf Ludwig-Bölkow-Systemtechnik

² Direct Air Capturing

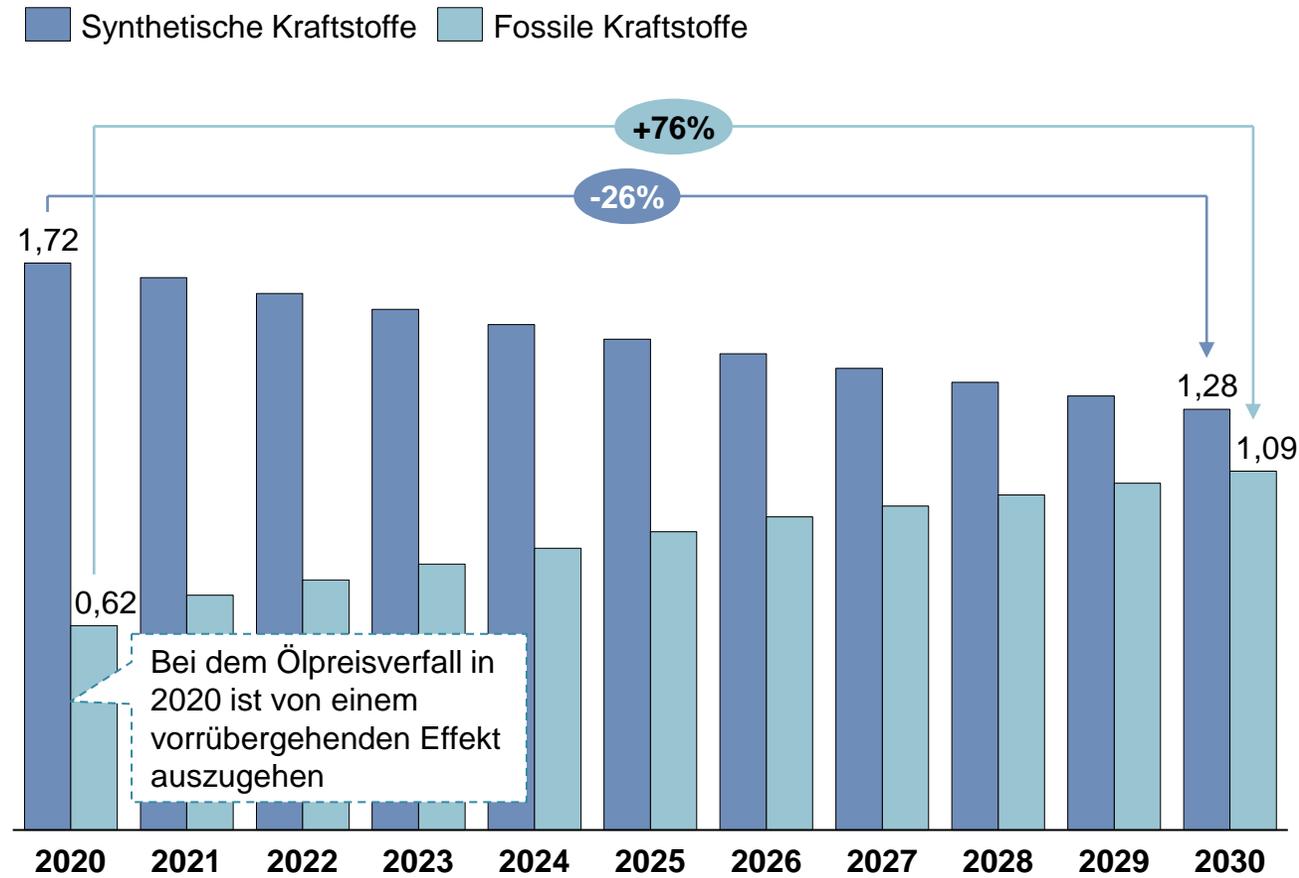
G

Es wird erwartet, dass Kosten von synthetischen und fossilen Kraftstoffen sich über die Jahre immer mehr annähern

Annahmen

- Erzeugung der synthetischen Kraftstoffe in Nordafrika oder im Nahen Osten
- Kostenentwicklung für synthetische Kraftstoffe nach Frontier Economics, die für die Energieerzeugung PV-Technologie annehmen – weitere Potentiale durch Solarthermie
- Prognose der Kosten für fossilen Kraftstoff (Diesel) entsprechend der Entwicklung des Rohölpreises (60 US \$/Barrel für 2020 und 90 US \$/Barrel für 2030)²
- Bei synthetischen Kraftstoffen werden Transport-, Distributions- und Netzkosten vernachlässigt, da sehr gering (<5 ct/l)
- Kraftstoffkosten werden zu Netto-Preisen verglichen – Bevorratungsbetrag und CO₂-Steuer für die Emissionen des jeweiligen Kraftstoffs werden berücksichtigt

Entwicklung der Kosten für fossile und synthetische Kraftstoffe (2020-2030)¹ in EUR/l



Bei dem Ölpreisverfall in 2020 ist von einem vorübergehenden Effekt auszugehen

- Skaleneffekte in einem wachsenden Markt führen zu einer günstigeren Herstellung des synthetischen Kraftstoffs über die Zeit
- Steigende Rohölpreise machen synthetische Kraftstoffe attraktiver

1 Frontier Economics: Kosten synthetischer Kraftstoff: 18ct/kWh_{PtL} (im Jahre 2022) und 14ct/kWh_{PtL} (im Jahre 2030)

2 International Energy Agency (IEA)

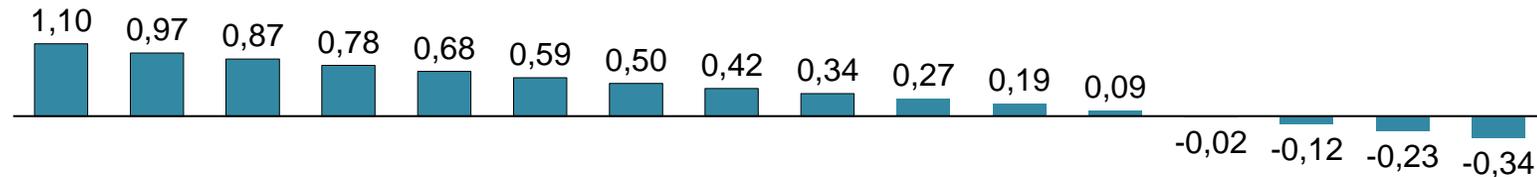
Werden ein Teil der Mehrkosten der E-Mobilität (~73 Mrd. EUR) für die Subventionierung von synthetischen Kraftstoffen aufgewendet, ergeben sich ab ca. 2032 Einsparungen

Annahmen

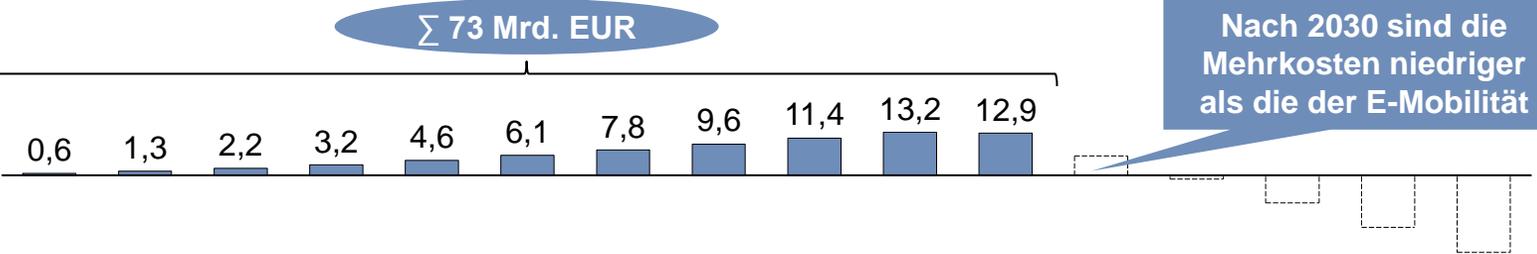
- Der jährliche **Kraftstoffverbrauch** in Deutschland beträgt **27 Mrd. Liter Benzin** und **42 Mrd. Liter Diesel** und wird bis 2030 konstant angenommen¹
- Einfluss** der steigenden Nachfrage für **synthetische Kraftstoffe** auf den **Rohölpreis** wurde **nicht modelliert**
- Da die **Mineralölsteuer im selben Maße** auf beide Kraftstoffe **anfällt** und somit **keinen Einfluss auf das Delta** hat, wurde sie in dieser Darstellung **nicht modelliert**
- Die **CO2-Steuer fällt in unterschiedlichem Maße** an und wird somit **berücksichtigt**

Entwicklung der Subventionen, Mehrkosten und Menge synthetischer Kraftstoffe

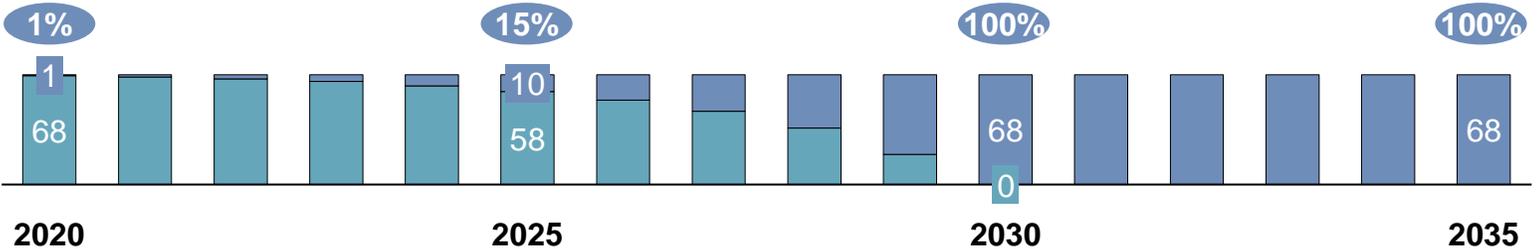
Notwendige Subventionen in EUR/l



Mehrkosten für die Subvention synthetischer Kraftstoffe in Mrd. EUR



Menge fossiler und synthetischer Kraftstoffe in Mrd. Liter pro Jahr



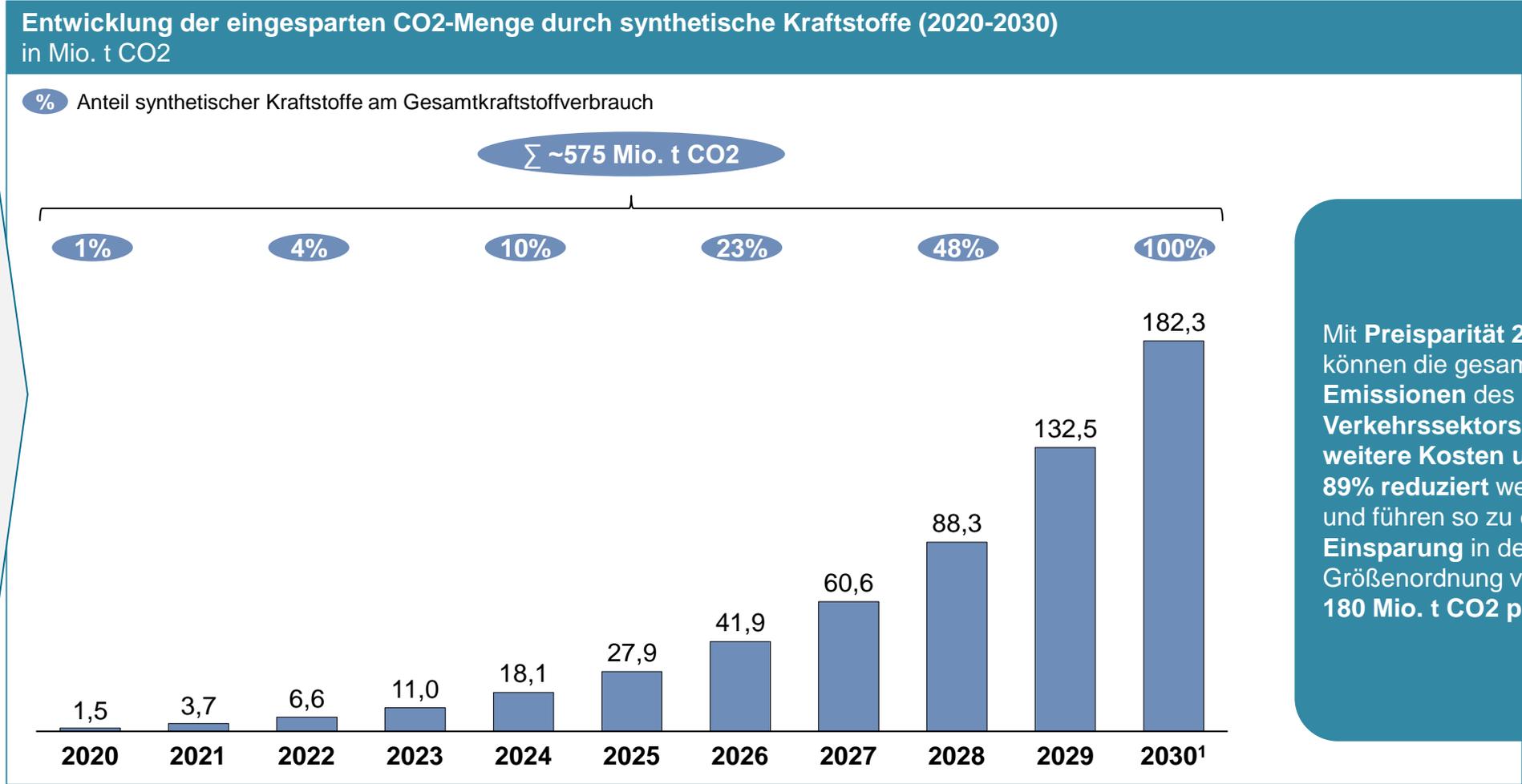
- Anfang der nächsten Dekade wird eine **Kostenparität** zwischen synthetischen und fossilen Kraftstoffen erwartet
- Aufgrund der erhöhten **Zahlungsbereitschaft für CO2-ärmere Kraftstoffe** könnten sogar **niedrigere Subventionen pro Liter** ausreichen

¹ Annahme: Gegenläufige Effekte der wachsenden Flotte und des altersbedingten Wegfalls von Fahrzeugen mit hohem Kraftstoffverbrauch heben sich gegenseitig auf



Mit Hilfe synthetischer Kraftstoffe ließen sich bis 2030 ~575 Mio. t CO2 einsparen

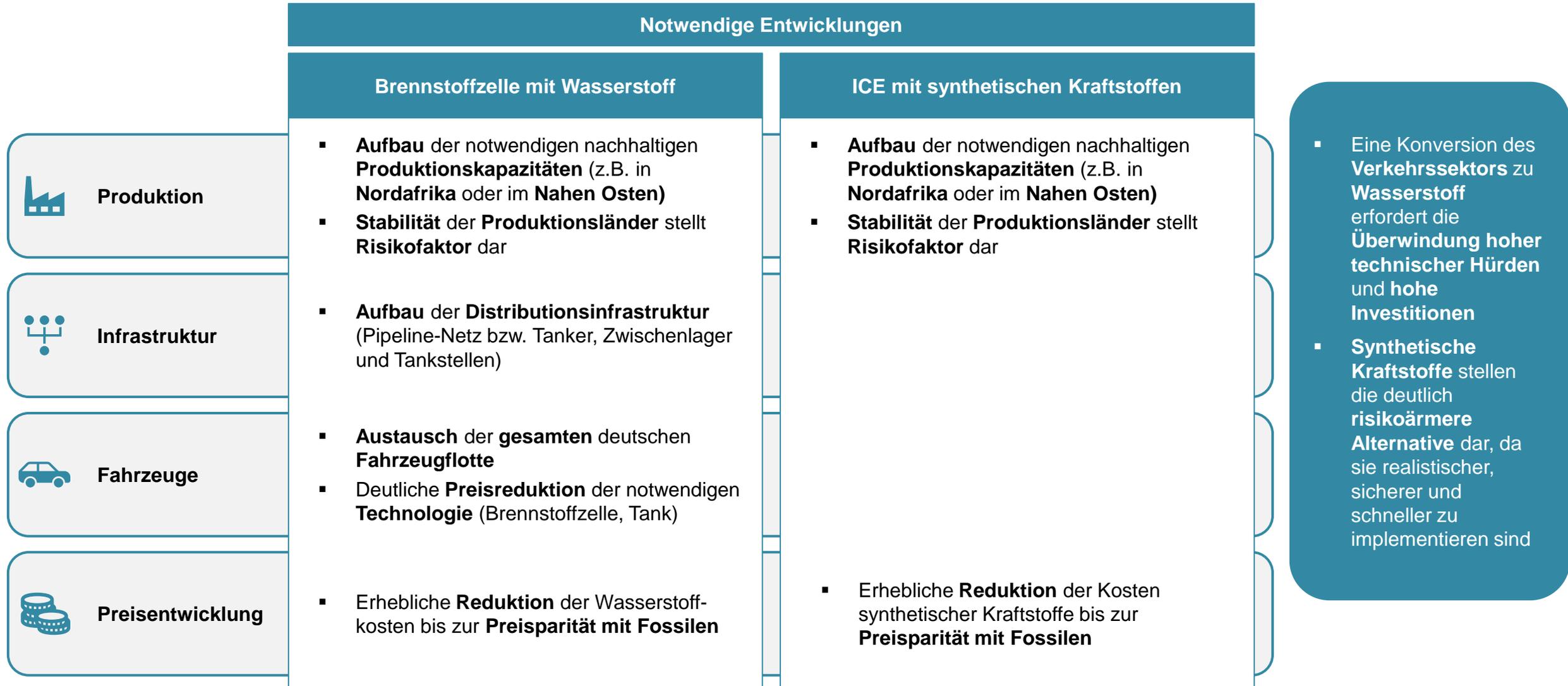
- Annahmen**
- Pro substituiertem Liter fossilem Kraftstoff werden ca. **2.800g CO2 eingespart**
 - Ausreichende **Produktionskapazitäten** können aufgebaut werden



Mit **Preisparität 2032** können die gesamten **Emissionen des Verkehrssektors ohne weitere Kosten um 89% reduziert** werden und führen so zu einer **Einsparung** in der Größenordnung von **180 Mio. t CO2 p.a.¹**

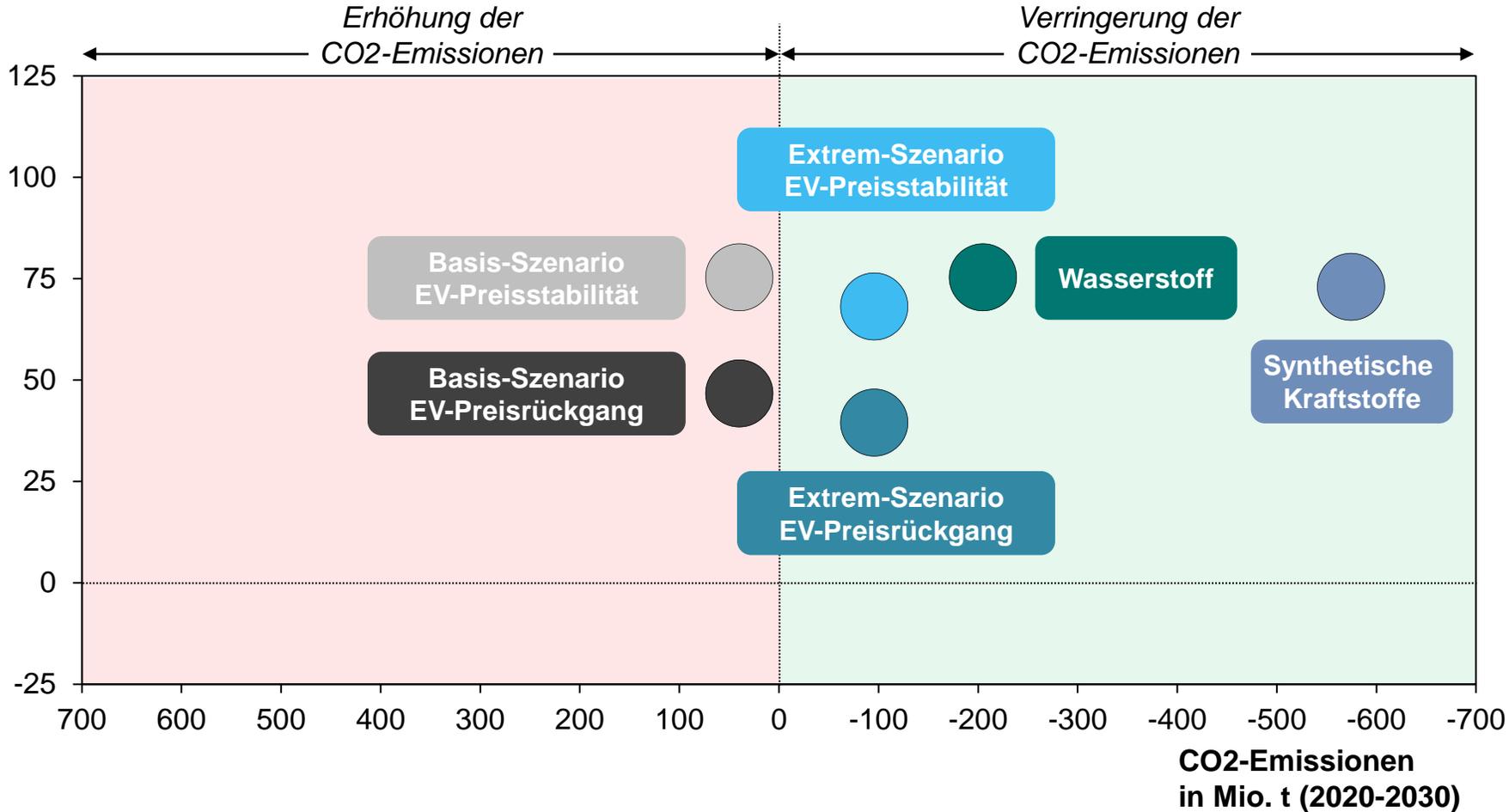
¹ BMU Angaben zu Emissionen des Verkehrssektors (171 Mio. t CO2) betrachten nur Tank-to-Wheel – hier mit Well-to-Tank-Emissionen, daher höher

Für den Erfolg beider Alternativen müssen unterschiedliche Entwicklungen stattfinden, damit sie ihren CO2-Beitrag leisten können – Risiken sind bei Wasserstoff größer



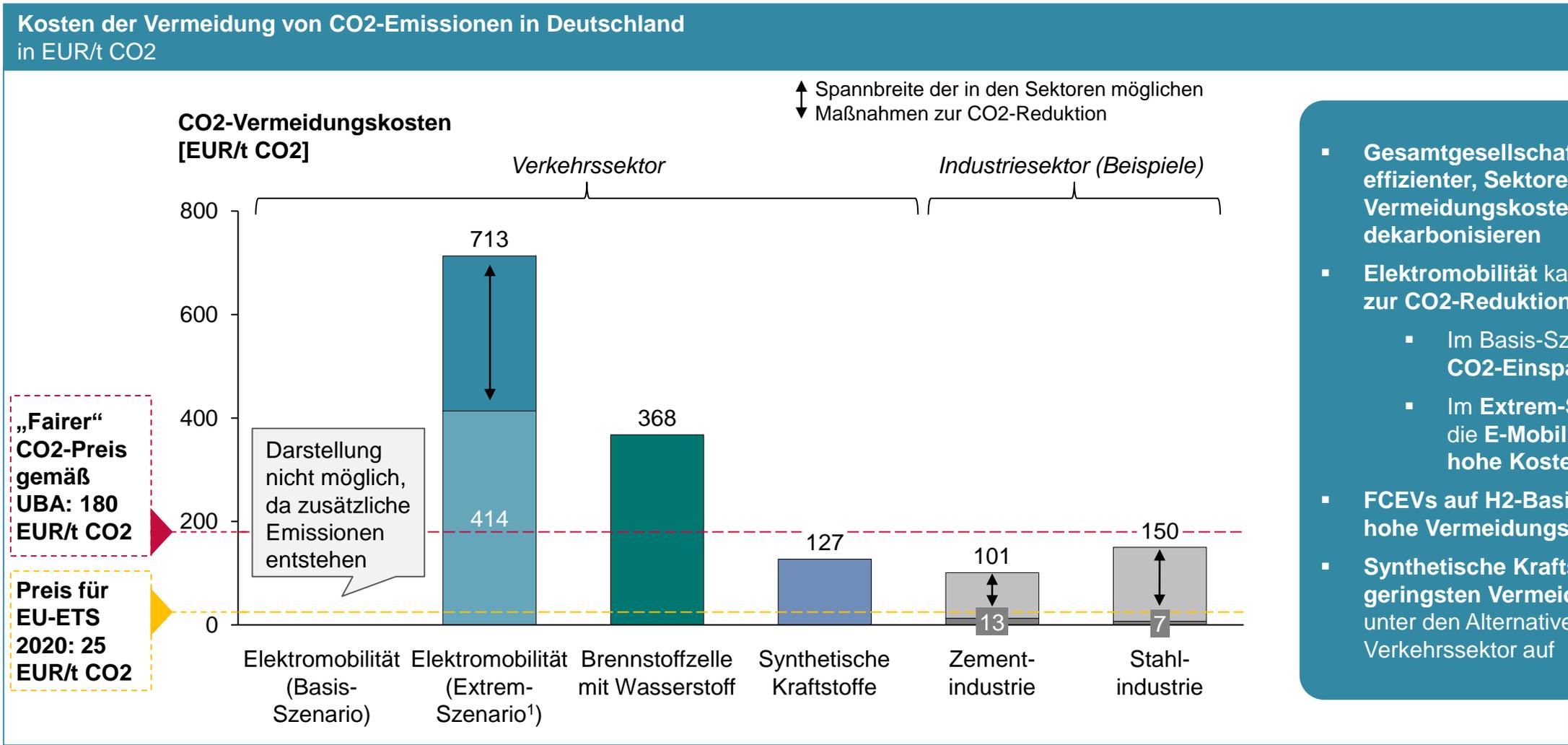
Synthetische Kraftstoffe stellen die sinnvollste Alternative dar, da sie am effizientesten CO2-Emissionen im Verkehrssektor reduzieren können

Gesamtgesellschaftliche Mehrkosten
in Mrd. EUR (2020-2030)



- Synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff können einen wesentlichen CO2-Einspareffekt erreichen
- Jedoch lassen sich mit synthetischen Kraftstoffen aufgrund des schnelleren und einfacherer Ramp-Ups mehr CO2-Emissionen sparen
- Ebenso weisen synthetische Kraftstoffe geringere CO2-Vermeidungskosten auf
- Perspektivisch haben sowohl Wasserstoff als auch synthetische Kraftstoffe das Potential, Preisparität mit Fossilen zu erreichen und damit zu einer umfänglichen Dekarbonisierung des Verkehrssektors beizutragen

Synthetische Kraftstoffe stellen die kosteneffizienteste Möglichkeit dar, CO2-Emissionen im Verkehrssektor zu reduzieren



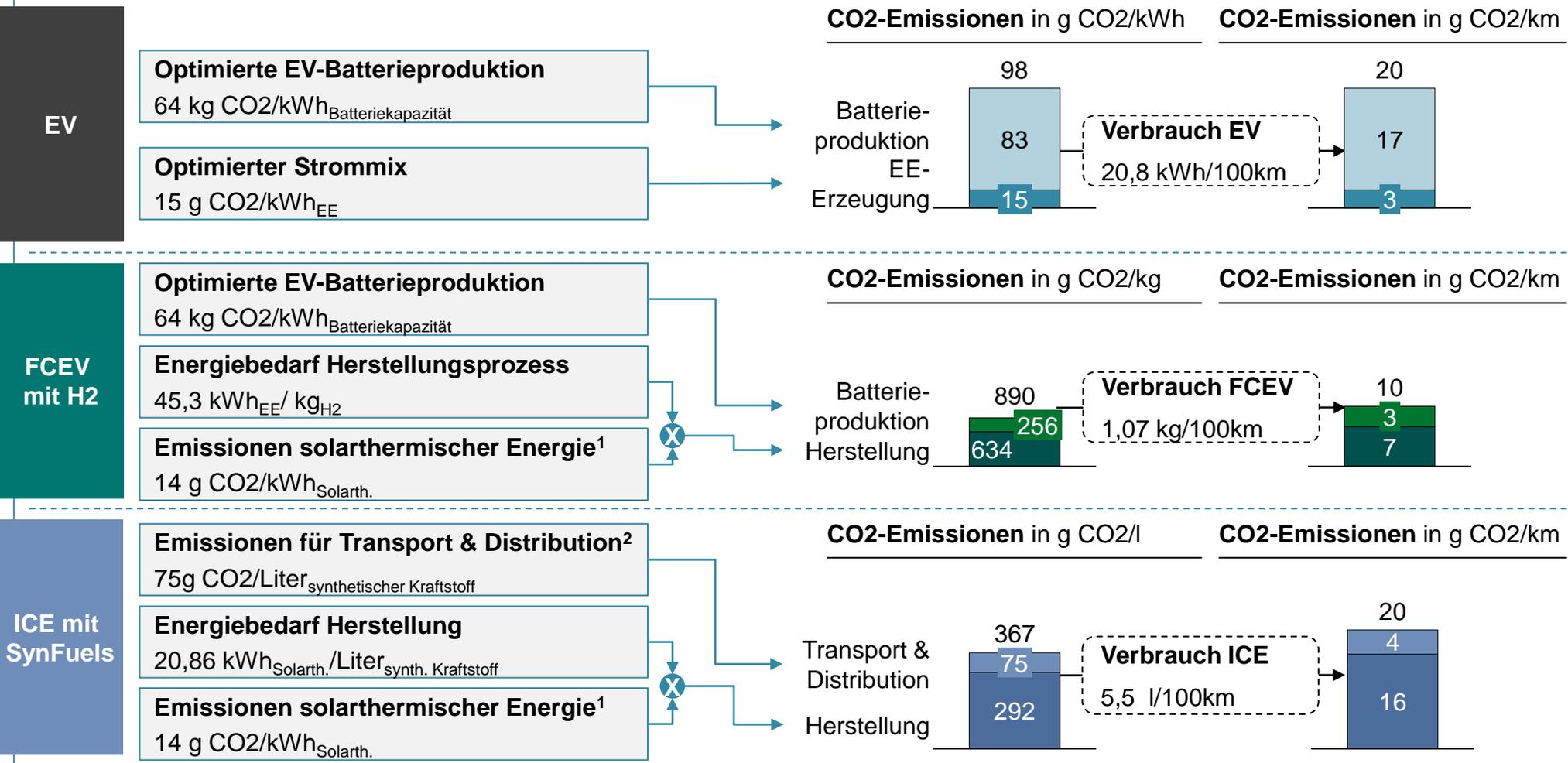
- **Gesamtgesellschaftlich** ist es effizienter, Sektoren mit **niedrigeren Vermeidungskosten** mit **Priorität** zu dekarbonisieren
- **Elektromobilität** kann realistisch **nicht** zur CO2-Reduktion beitragen:
 - Im Basis-Szenario wird **keine CO2-Einsparung** erzielt
 - Im **Extrem-Szenario¹** weist die **E-Mobilität prohibitiv hohe Kosten** auf
- **FCEVs auf H2-Basis** haben ebenso **hohe Vermeidungskosten**
- **Synthetische Kraftstoffe** weisen die **geringsten Vermeidungskosten** unter den Alternativen im Verkehrssektor auf

¹ Im Extrem-Szenario wird angenommen, dass die gesamte Energie zum Laden von EVs aus nicht anderweitig nutzbaren erneuerbaren Energien stammt. 713 EUR/t CO2: EV-Preisstabilität; 414 EUR/t CO2: EV-Preisreduktion. Da die Kosten für die Nutzbarmachung der EE nicht enthalten sind, dürften die Vermeidungskosten höher liegen als hier dargestellt.

Selbst in einer dekarbonisierten Welt mit optimierter EV-Batterieproduktion emittieren synthetische Kraftstoffe und EVs eine ähnliche Menge an CO2 pro km

Perspektive nach 2038

Vergleich der CO2-Emissionen von EVs, Brennstoffzellen mit Wasserstoff und ICEs mit synthetischen Kraftstoffen



- Auch nach dem Kohleausstieg erzeugen EVs nicht weniger Emissionen als die Alternativen – Somit leistet die **Elektromobilität** selbst in einer zu 100% dekarbonisierten Welt **keinen sinnvollen Beitrag**
- FCEVs haben auch in Zukunft das **größte Potential zur Emissionsreduktion** pro km – sind jedoch aufgrund der Mehrkosten **nicht die effizienteste Alternative**
- SynFuels stellen die **ökologisch und ökonomisch sinnvollste Alternative** für den Verkehrssektor dar

¹ Erzeugung EE in Nordafrika mit solarthermischer Energie (14 g CO2/kWh) für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe

² In Anlehnung an fossile Kraftstoffe



- Die **Elektromobilität** leistet in Deutschland keinen sinnvollen Beitrag zur CO₂-Reduktion. Selbst in einem **sehr optimistischen Szenario** sind die **Vermeidungskosten** der **E-Mobilität** **prohibitiv hoch**
- **Wasserstoff** dagegen hat **hohes Potential** zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors, wenn auch mit **Herausforderungen** bei **Kosten** und **Umsetzung**
- Besonders **vielversprechend** zeigen sich **synthetische Kraftstoffe**: Mit relativ **geringen Investitionen** und **beherrschbaren** technischen **Risiken** sind sie nach unserer Analyse und bei intelligenter Umsetzung der **praktikabelste Weg**, um CO₂-Emissionen im Verkehrssektor **schnell** und relativ **kosteneffizient** zu **senken**
- Ein guter Schritt wäre die **Anrechnung** der **synthetischen Kraftstoffe** mit ihren tatsächlichen Emissionen auf den **Flottenverbrauch**
- Ebenso sollten **synthetische Kraftstoffe** systematisch hinsichtlich der **Skalierbarkeit** im großindustriellen Maßstab im Rahmen einer „**Desertec Next Generation Initiative**“ **untersucht** und **gefördert** werden

Let us inspire you!

S T A H L
AUTOMOTIVE CONSULTING

Dr. Martin Stahl
Managing Director

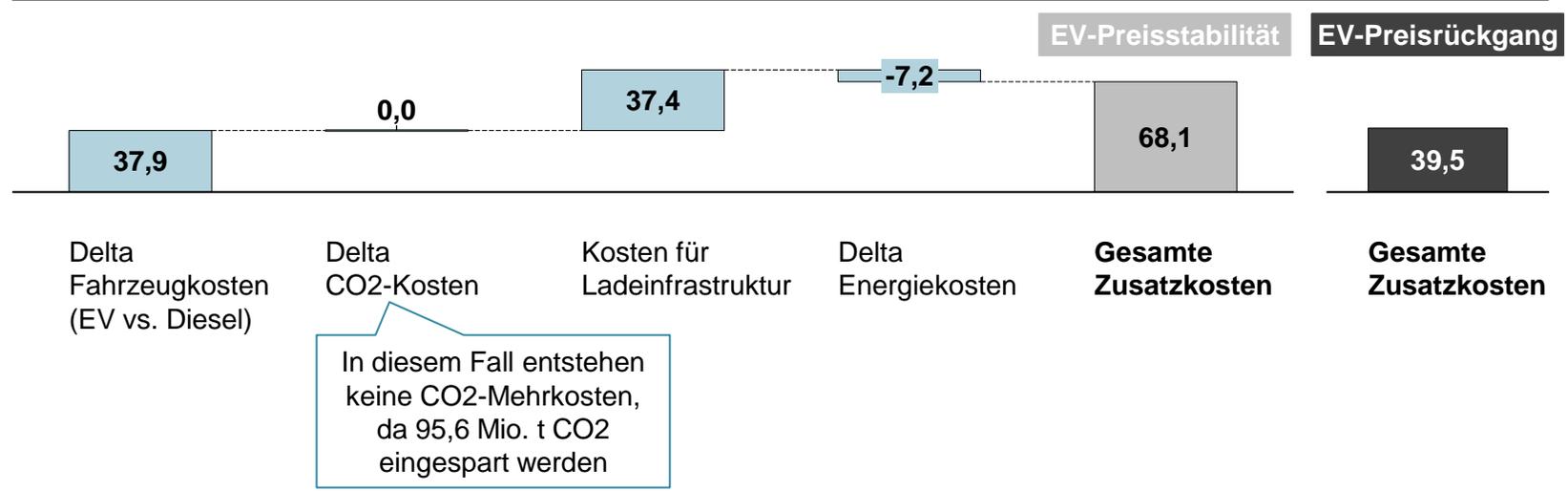
Stahl Automotive Consulting GmbH & Co. KG
Otto-Heilmann-Straße 5
D-82031 Grünwald

E-Mail: info@sac-group.eu
www.sac-group.eu

Berechnung – Vermeidungskosten bei 100%-iger Nutzung von Stromüberschüssen für das Laden von EVs

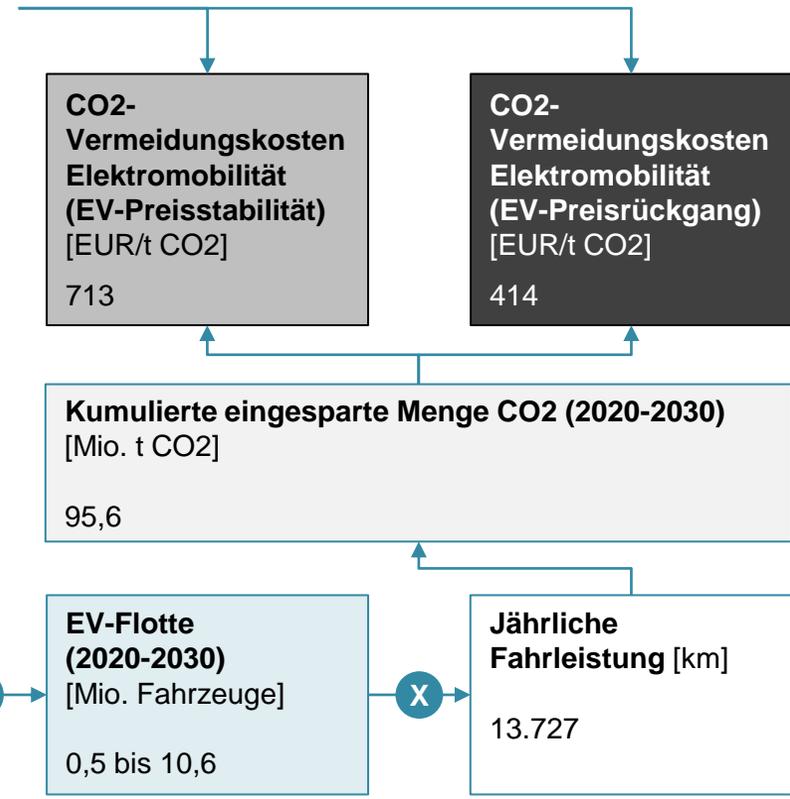
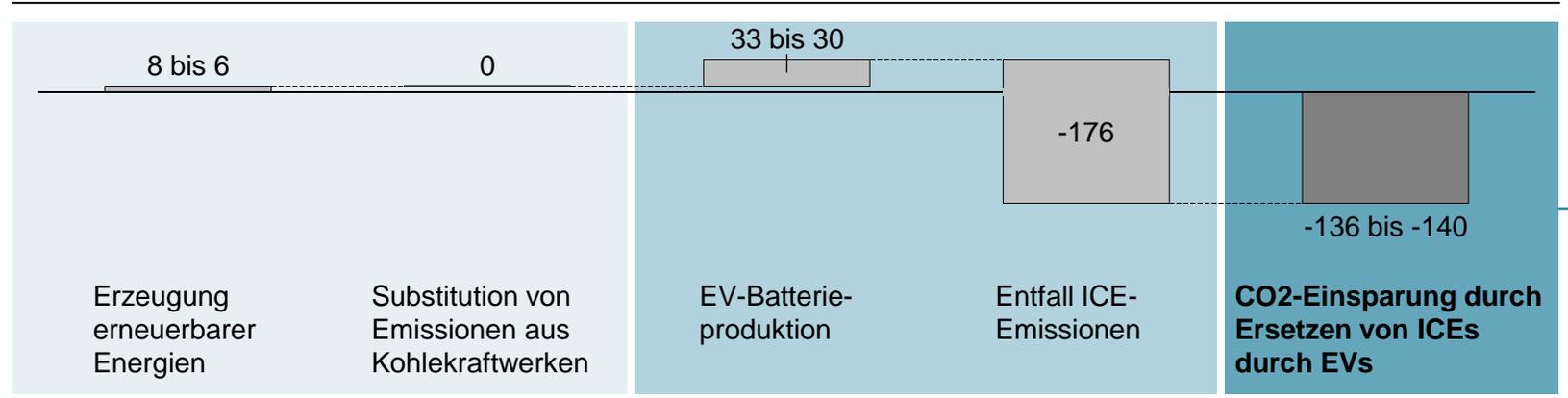
Kostenentwicklung beim Laden der EVs mit 100% EE-Überschuss (2020-2030)

in Mrd. EUR



CO2-Emissionen beim Laden der EVs mit 100% EE-Überschuss (2020-2030)

in g CO2/km



Zuordnung der Quellen und Berechnungen – bei den Kategorien ohne Nummerierung wurden die Berechnungen bereits ausführlich im Hauptteil aufgezeigt

A Annahmen der Studie	B Berechnung Elektromobilität	C Berechnung Wasserstoff	D Berechnung synthetische Kraftstoffe
A1 Verkehr in Deutschland	B1 EV Neuzulassungen und Flotte	C1 Emissionen FCEV mit H2	Emissionen SynFuels
A2 Emissionen und Kosten Energie	B2 EV Verbrauch	C2 Kosten FECV mit H2	Kosten SynFuels
A3 Emissionen und Kosten Verkehr	B3 Emissionen Elektromobilität	Subventionierung H2	Subventionierung SynFuels
A4 Fahrzeugkosten	1 Emissionen erneuerbarer Energien	CO2-Ersparnis FCEV m. H2	CO2-Ersparnis SynFuels
A5 Ladeinfrastruktur	2 Emissionen Kohlekraft		
A6 Energiekosten	3 Emissionen EV-Batterieproduktion		
	4 Emissionen Verbrennungsmotor		
	B4 Kosten Elektromobilität		
	I Fahrzeugkosten		
	CO2-Kosten		
	III Ladeinfrastrukturkosten		
	IV Energiekosten		

A1 Annahmen der Studie (1/7)

<u>Einflussgröße</u>	<u>Annahme</u>	<u>Quelle</u>
<i>Verkehr in Deutschland - Übergreifend</i>		
Fahrleistung / Jahr (2020-2030)	13.727 km	KBA
Emissionsziele 2021, 2025, 2030	95, 81, 59 g CO2/km	Europäisches Parlament , BMU
Flotte Deutschland 2018	47.095.784 Fahrzeuge	KBA
Flotte Deutschland 2030	51.000.000 Fahrzeuge	VDA
<i>Verkehr in Deutschland - Elektrofahrzeuge</i>		
EV-Batteriegröße (2019)	47,4 kWh	Cleantechnica (Sales 2019) , OEM Webseiten
Wachstum EV-Batteriegröße (2019-2030)	1,14%	Statista
EV-Batterielebensdauer	200.000 km	Annahme SAC (basierend auf Interviews)
WLTP-Verbrauch je Elektrofahrzeug	<i>Mehrere Datenpunkte</i>	ADAC
Durchschnittlicher Verbrauch EV, WLTP (2020-2030)	20,8 kWh/100km	Eigene Berechnung SAC (basierend auf ADAC ; siehe B2)

A1 Annahmen der Studie (2/7)

Einflussgröße	Annahme	Quelle
Verkehr in Deutschland – Verbrennungsmotorische Fahrzeuge		
Durchschnittliche Emissionen Dieselseulassungen (2019)	167,6 gCO ₂ /km	Umweltbundesamt
Durchschnittliche Emissionen Benzin-Neuzulassungen (2019)	157,6 gCO ₂ /km	Umweltbundesamt
Mögliche CO ₂ -Einsparung Diesel ggü. Benzin bei gleicher Motorisierung	15%	Umweltbundesamt
Anteil Dieselfahrzeuge in Flotte (2019)	32,0%	KBA
Anteil Benzinfahrzeuge in Flotte (2019)	59,2%	KBA
Tank-to-Wheel Emissionen Dieselseulassung, WLTP (2020-2030)	146g CO ₂ /km	Eigene Berechnung SAC (basierend auf KBA und UBA ; siehe B4IV)
Durchschnittlicher Verbrauch Dieselseulassung, WLTP (2020-2030)	5,5 l/100km	Eigene Berechnung SAC (basierend auf KBA und UBA ; siehe B4IV)
Umrechnungsformel WLTP-NEFZ	$WLTP=0,808*NEFZ+48,275$	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Tank-to-Wheel Emissionen Dieselseulassung, NEFZ (2020-2030)	121g CO ₂ /km	Eigene Berechnung SAC (basierend auf KBA , UBA und BMW i; siehe B4IV)
Verkehr in Deutschland – Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)		
Durchschnittlicher Verbrauch FCEV, WLTP (2020-2030)	1,07 kg _{H₂} /km	Eigene Berechnung SAC für Toyota Mirai und Hyundai Nexu (basierend auf Realverbrauch ADAC)

A2 Annahmen der Studie (3/7)

<u>Einflussgröße</u>	<u>Annahme</u>	<u>Quelle</u>
<i>CO2-Emissionen & Kosten Energiesektor</i>		
CO2-Emissionen von Braunkohle (2020-2030)	1.121 g CO2/kWh	Umweltbundesamt
CO2-Emissionen von Steinkohle (2020-2030)	813 g CO2/kWh	Umweltbundesamt
CO2-Emissionen PV (2020-2030)	66,7 g CO2/kWh	Umweltbundesamt
CO2-Emissionen Windenergie (2020-2030)	9,7 g CO2/kWh	Umweltbundesamt
CO2-Emissionen Wasserkraft (2020-2030)	4,0 g CO2/kWh	Umweltbundesamt
CO2-Emissionen Biomasse (2020-2030)	112,1 g CO2/kWh	Umweltbundesamt
CO2-Emissionen Nuklearenergie (2020-2030)	22,4 g CO2/kWh	Umweltbundesamt
CO2-Emissionen Solarthermie Nordafrika (2020-2030)	14 g CO2/kWh	Ruhr-Universität Bochum
Deutscher Strommix (Nettostromerzeugung 2020-2030)	Siehe Detailseiten	Aurora Energy Research
Abschaltplan Kohlekraftwerke	Siehe Detailseiten	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CO2-Preis der Bundesregierung 2021, 2025 und ab 2026	25, 55, 60 EUR/t CO2	Bundesregierung
Fairer CO2-Preis (2020-2030)	180 EUR/t CO2	Umweltbundesamt

A3 Annahmen der Studie (4/7)

Einflussgröße	Annahme	Quelle
CO2-Emissionen & Kosten Verkehrssektor		
Emissionen Verkehrssektor in Deutschland	171 Mio. t CO2/ a	Umweltbundesamt
CO2-Emissionen von Diesel (Tank-to-Wheel)	2.650 g CO2/l	Umweltbundesamt
CO2-Emissionen von Benzin (Tank-to-Wheel)	2.330 g CO2/l	Umweltbundesamt
Well-to-Tank Emissionen Dieselneufahrzeug (2020-2030)	20,83%	Forschungsstelle der Europäischen Kommission
<i>davon</i> Transport, Distribution	2,84%	Forschungsstelle der Europäischen Kommission
<i>davon</i> Herstellung, Raffination	17,99%	Forschungsstelle der Europäischen Kommission
Well-to-Tank Emissionen Benzinneufahrzeug (2020-2030)	18,59%	Forschungsstelle der Europäischen Kommission
CO2-Emissionen EV-Batterieherstellung (2019-2030)	137-111 kg CO2/kWh _{Kapazität}	Eigene Berechnung (basierend auf Forschungsstelle für Energiewirtschaft ; siehe B33)

A4 Annahmen der Studie (5/7)

Einflussgröße	Annahme	Quelle
Fahrzeugkosten		
Fahrzeugpreis VW Golf 7 2.0 TDI BMT (2020-2030)	27.450 EUR	ADAC
Fahrzeugpreis ID.3 (58kWh) (2020-2030)	37.000 EUR	ADAC
EV Preisreduktion im Jahre 2030 gegenüber 2020 bei Preisstabilität	0%	Annahme SAC (basierend auf Interviews)
EV Preisreduktion im Jahre 2030 gegenüber 2020 bei Preisreduktion	30%	Annahme SAC (basierend auf Interviews)
Restwert nach 10 Jahren	15% Listenpreis	Allianz
Wartung & Reparaturkosten ICE / Jahr (Brutto) (2020-2030)	1.020 EUR	ADAC
Wartung & Reparaturkosten EV / Jahr (Brutto) (2020-2030)	70% von ICE	The Mobility House
Haftpflichtversicherung ICE (2020-2030)	994 EUR	ADAC
Haftpflichtversicherung EV (2020-2030)	994 EUR	Annahme SAC (identisch zu ICE; basierend auf ADAC)
Vollkaskoversicherung ICE bei 500 EUR SB (2020-2030)	1.172 EUR	ADAC
Vollkaskoversicherung EV bei 500 EUR SB (2020-2030)	1.328 - 929 EUR	Annahme SAC (proportional zum Fahrzeugpreis; basierend auf ADAC)

A5 Annahmen der Studie (6/7)

Einflussgröße	Annahme	Quelle
Ladeinfrastruktur allgemein		
Abschreibungszeitraum Hardware	10 Jahre	Annahme SAC (basierend auf Interviews)
Abschreibungszeitraum andere Investitionskosten (Netzanschluss, Bau)	20 Jahre	Annahme SAC (basierend auf Interviews)
Preisreduktion bis 2030 (Hardware, Wartung) aufgrund Skaleneffekte	15%	Annahme SAC (basierend auf Interviews)
Anzahl Ladepunkte		
Private Ladepunkte pro EV (zu Hause und am Arbeitsplatz)	1,1 LP/EV	Annahme SAC (basierend auf VDA)
Öffentliche Normalladepunkte pro EV	0,1 LP/EV	VDA
Öffentliche Schnellladepunkte pro EV	0,01 LP/EV	VDA
Private Stellplätze pro Haushalt	0,6 SP/HH	Annahme SAC (basierend auf Interviews)
Kosten private Ladestation 3,7 kW		
Hardware (2020)	650 EUR	Annahme SAC (basierend auf Ludwig-Bölkow-Stiftung)
Anderer Invest – Planung, Genehmigung, Bau, Netzanschluss (2020-30)	1.000 EUR	Annahme SAC (basierend auf Ludwig-Bölkow-Stiftung)
OPEX (2020)	0 EUR/a	Ludwig-Bölkow-Stiftung
Kosten Ladestation 11 kW		
Hardware (2020)	2.500 EUR	Annahme SAC (basierend auf Ludwig-Bölkow-Stiftung)
Anderer Invest – Planung, Genehmigung, Bau, Netzanschluss (2020-30)	5.000 EUR	Annahme SAC (basierend auf Ludwig-Bölkow-Stiftung)
OPEX (2020)	500 EUR/a	Ludwig-Bölkow-Stiftung
Kosten Schnellladestation 150 kW		
Hardware (2020)	80.000 EUR	Annahme SAC (basierend auf Ludwig-Bölkow-Stiftung)
Anderer Invest – Planung, Genehmigung, Bau, Netzanschluss (2020-30)	80.000 EUR	Annahme SAC (basierend auf Ludwig-Bölkow-Stiftung)
OPEX (2020)	1.000 EUR/a	Ludwig-Bölkow-Stiftung

A6 Annahmen der Studie (7/7)

Einflussgröße	Annahme	Quelle
Energiekosten		
Gestehungskosten erneuerbare Energien (2020-2030)	6,3 ct/kWh	Eigene Berechnung SAC (basierend auf Fraunhofer ISE)
Gestehungskosten Nuklearstrom (2020-2030)	3,2 ct/kWh	Eigene Berechnung SAC (basierend auf Prognos)
Netzentgelt (2020-2030)	7,58 – 9,78 ct/kWh	Eigene Berechnung SAC (basierend auf BDEW)
Konzessionsabgabe (2020-2030)	1,66 ct/kWh	BDEW
Bevorratungsbetrag synthetische Kraftstoffe (analog Diesel, 2020-2030)	0,30 ct/l	Erdölbevorratungsverband
Kosten Dieselmotorkraftstoff, inkl. CO ₂ -Steuer (2020-2030)	0,62 – 1,09 EUR/l	Eigene Berechnung SAC (basierend auf Statista [Abruf 15.01.2020] und IEA ; siehe D4)
Kosten Barrel Rohöl (2020-2030)	60-90 USD/barrel	International Energy Agency (IEA)
Kosten Wasserstoff	11,1 – 4,4 USD/kg	Hydrogen Council (Mittelwerte <i>Exhibit 16</i>)
Kosten synthetischer Kraftstoff, inkl. CO ₂ -Steuer (2022-2030)	1,72-1,28 EUR/l	Eigene Berechnung SAC (basierend auf Agora Energiewende und Frontier Economics)
Energiebedarf HT-Elektrolyse Wasserstoffproduktion (2020-2030)	3,8 – 3,6 kWh/Nm ³	BMVI
Energiebedarf Kompression Wasserstoff	0,12 kWh/kWh	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik
Energiebedarf Pre-Cooling Wasserstoff	0,09 – 0,012 kWh/kWh	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik
Effizienz in der Herstellung synthetischer Kraftstoffe (2020-2030)	46,5%	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik

B1 Berechnung – EV Neuzulassungen und EV Fleet¹

Für jedes Jahr gilt:

$$\text{Emissionsgrenzwert} = \frac{\text{Emissionen}_{ICE} * \text{Anzahl}_{ICE} + \text{Emissionen}_{EV} * \text{Anzahl}_{EV} * \text{Supercredit}}{\text{Anzahl}_{ICE} + \text{Anzahl}_{EV} * \text{Supercredit}}$$

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Neuzulassungen (Tsd. Fzg.)		3.100	3.000	3.100	3.100	3.100	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Emissionsgrenzwert (g CO2/km)			95	-15%			81	-37,5%			59	
Neuzulassungen ICE (Tsd. Fzg.)		2.700	2.600	2.500	2.500	2.200	2.000	1.900	1.800	1.700	1.500	1.400
Neuzulassungen EV (Tsd. Fzg.)		400	400	500	700	900	1.000	1.100	1.200	1.300	1.400	1.500
Flotte EV (Tsd. Fzg.)	100	500	900	1.400	2.100	3.000	4.000	5.100	6.300	7.600	9.100	10.600

X%

XXX

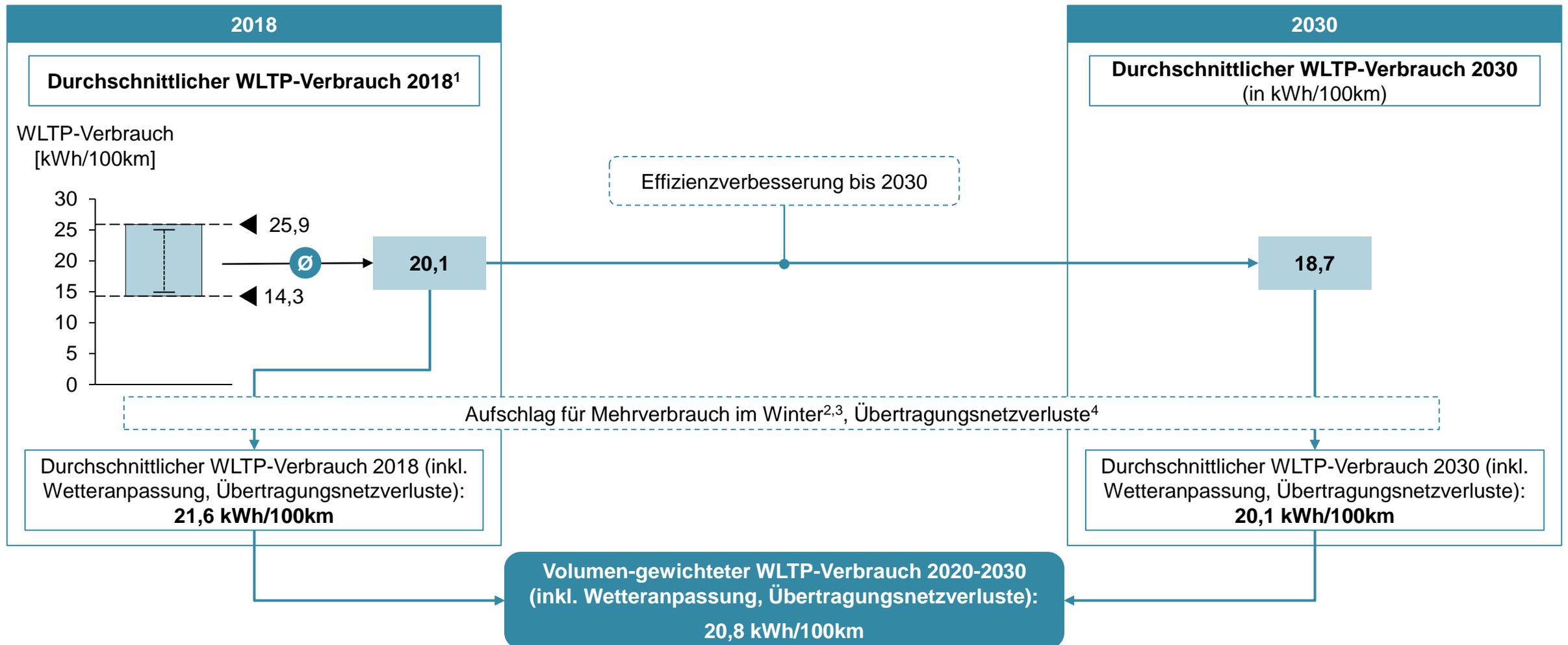
Eingangsdaten

XXX

Berechnete Werte

¹ Abweichungen durch Rundungen

B2 Berechnung – EV Verbrauch



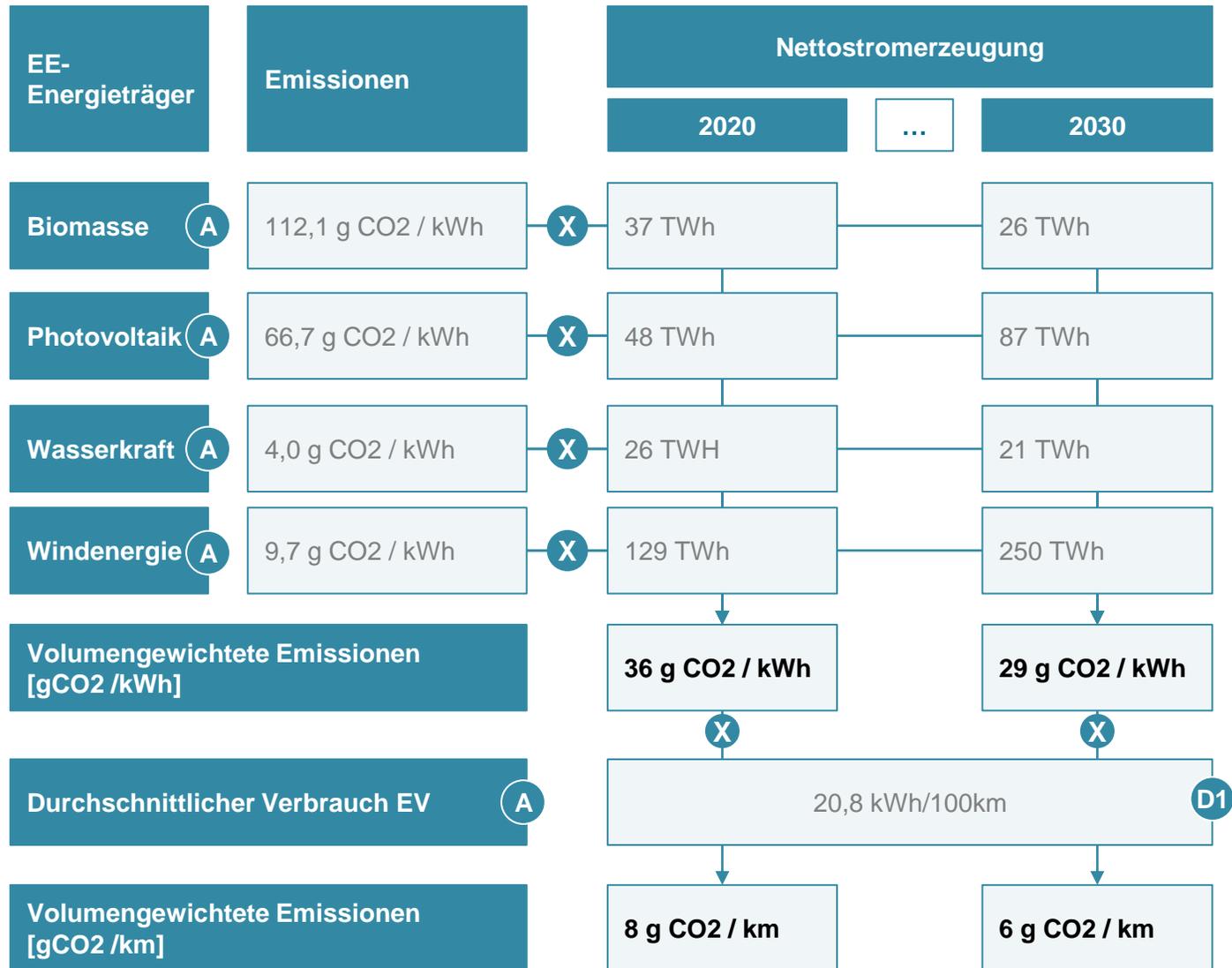
1 [ADAC](#): WLTP-Stromverbrauch nach Herstellerangabe

2 [VDA](#): Beim WLTP-Zyklus bezieht sich der Verbrauch auf eine standardisierte Temperatur (14°C und 23°C), ein Winterbetrieb wird nicht gemessen

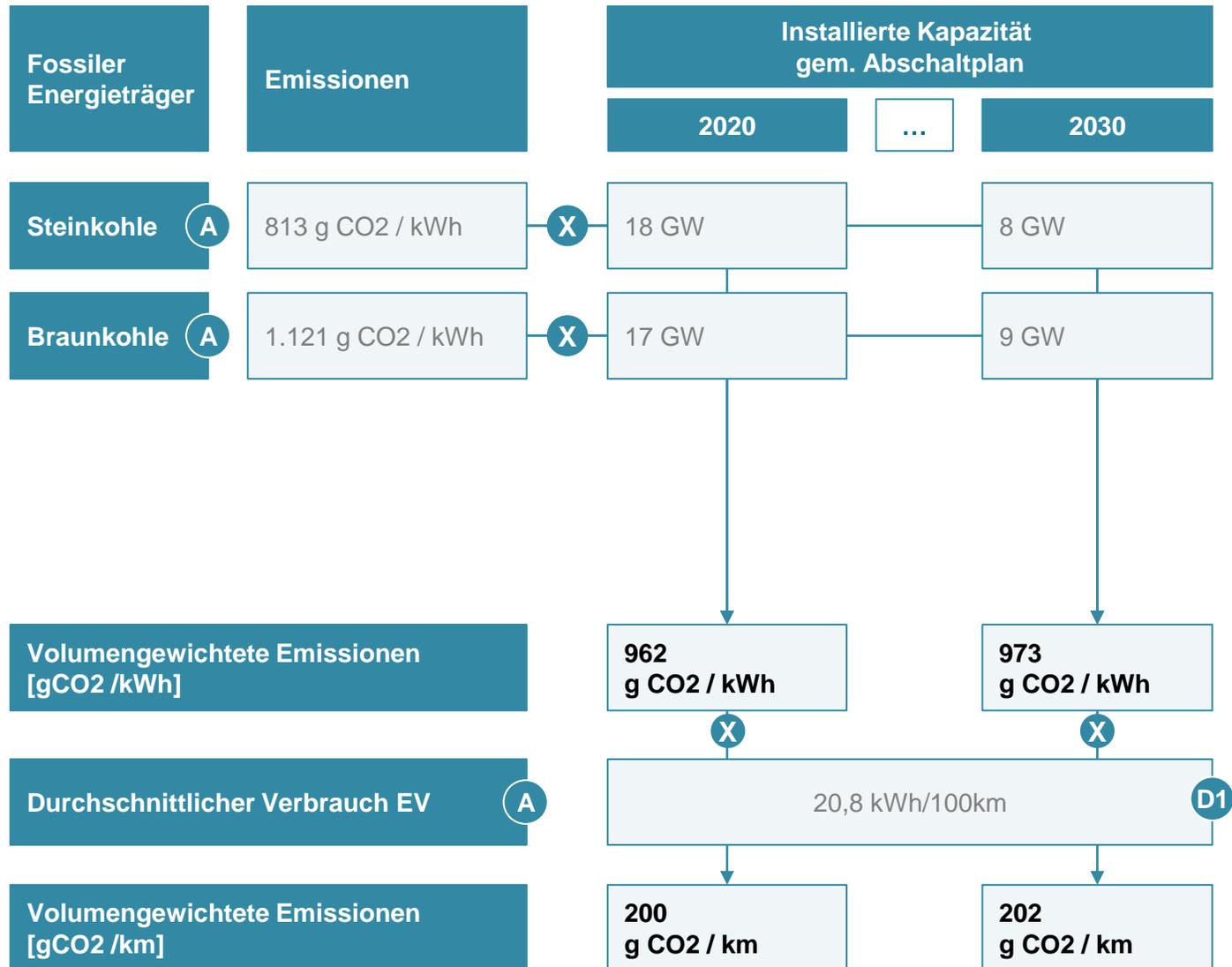
3 [ADAC](#): Elektrofahrzeuge verbrauchen im Winter 10% bis 50% mehr Energie. Dies ist im WLTP-Zyklus nicht abgebildet.

4 [VDA](#): Ladeverluste innerhalb des Fahrzeugs werden im WLTP-Zyklus berücksichtigt, Verluste außerhalb des Fahrzeugs (Übertragungsnetzverluste) nicht.

B31 Berechnung – Emissionen Erzeugung EE



B32 Berechnung – Emissionen Substitution Kohle



B33 Berechnung – Emissionen EV-Batterieproduktion

Annahmen

- Heutige EV-Batterieproduktion benötigt 100kWh Energie je kWh Batteriekapazität
- Verbesserung um 50% bis 2030 bei EV-Batteriefertigung im industriellen Maßstab
- 2030 werden EV-Batterien zu 100% auf Basis erneuerbarer Energien produziert
- Strommix: volumengewichteter Durchschnitt EE + konventionelle Energieträger

- Emissionen für NMC Aktivmaterial, Elektrolyt, Aluminium, Batterie Management System, Graphit und andere¹
- Diese Emissionen sind unabhängig vom Strommix und bleiben somit konstant bis 2030¹

- Heutige EV-Batterieproduktion benötigt 100kWh Energie je kWh Batteriekapazität
- Verbesserung um 50% bis 2030 bei EV-Batteriefertigung im industriellen Maßstab
- Strombedarf für EV-Batteriefertigung besteht 2020 aus 33% EE und steigt auf 100% bis 2030
- Batterieproduktionen benötigen konstante und sichere Stromversorgung, daher Aufschlag für CO2-Emissionen der Kohleverstromung

¹ Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE)

Berechnung (2020-2030)

Strombedarf EV-Batteriefertigung²
 $100-50 \text{ kWh}_{\text{Energie}}/\text{kWh}_{\text{Kapazität}}$

Emissionen deutscher Strommix EV-Batterieprod.
 $436-29 \text{ g CO}_2/\text{kWh}_{\text{Energie}}$

Emissionen Rohstoffgewinnung und Materialproduktion¹
 $62 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}_{\text{Kapazität}}$

Strombedarf EV-Batteriefertigung
 $100-50 \text{ kWh}_{\text{Energie}}/\text{kWh}_{\text{Kapazität}}$

Anteil EE am Strommix für EV-Batterieproduktion
 33-100%

Substitution von Energie aus Kohlekraftwerken
 $926-944 \text{ g CO}_2/\text{kWh}_{\text{Energie}}$

Anteilige Emissionen EV-Batterieproduktion

Emissionen Strombedarf
 $44 - 1 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}_{\text{Kapazität}}$

Emissionen Rohstoffgewinnung & Materialproduktion
 $62 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}_{\text{Kapazität}}$

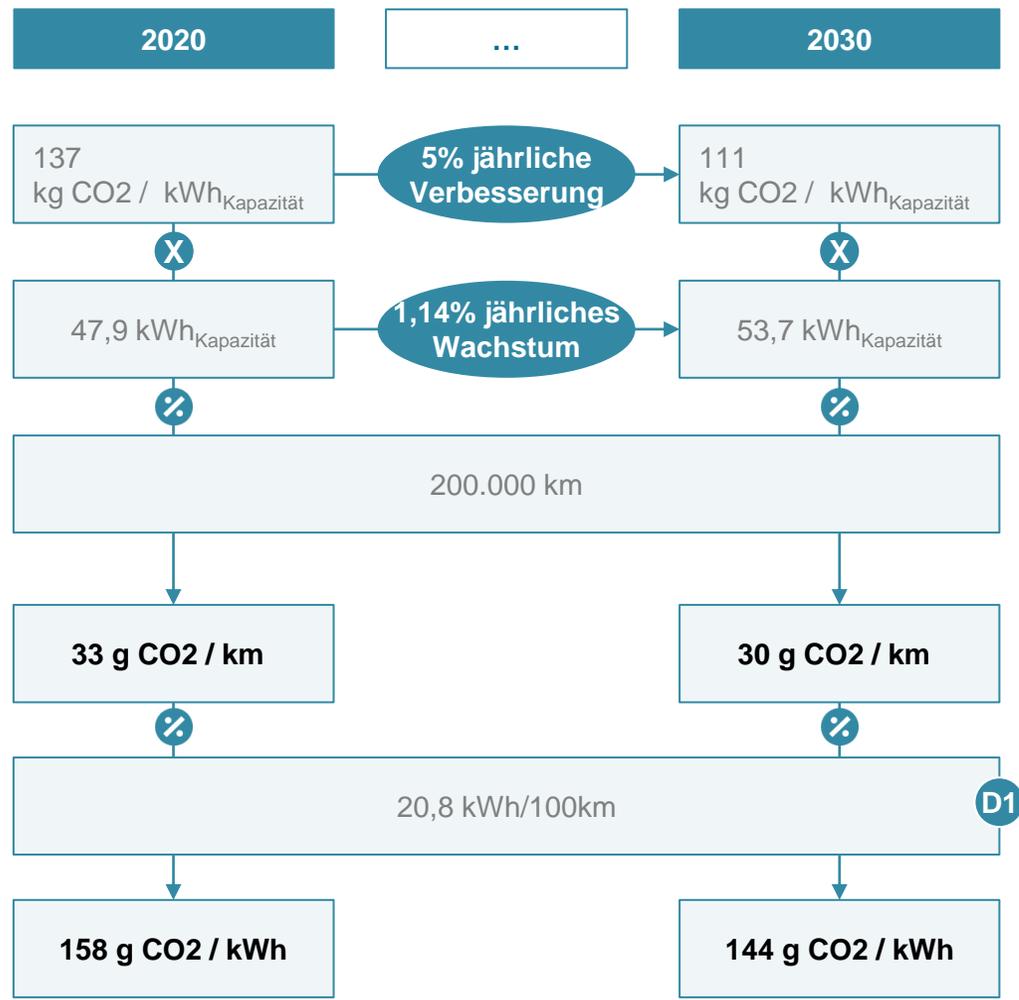
Substitutionseffekt
 $31 - 47 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}_{\text{Kapazität}}$

Gesamtemissionen

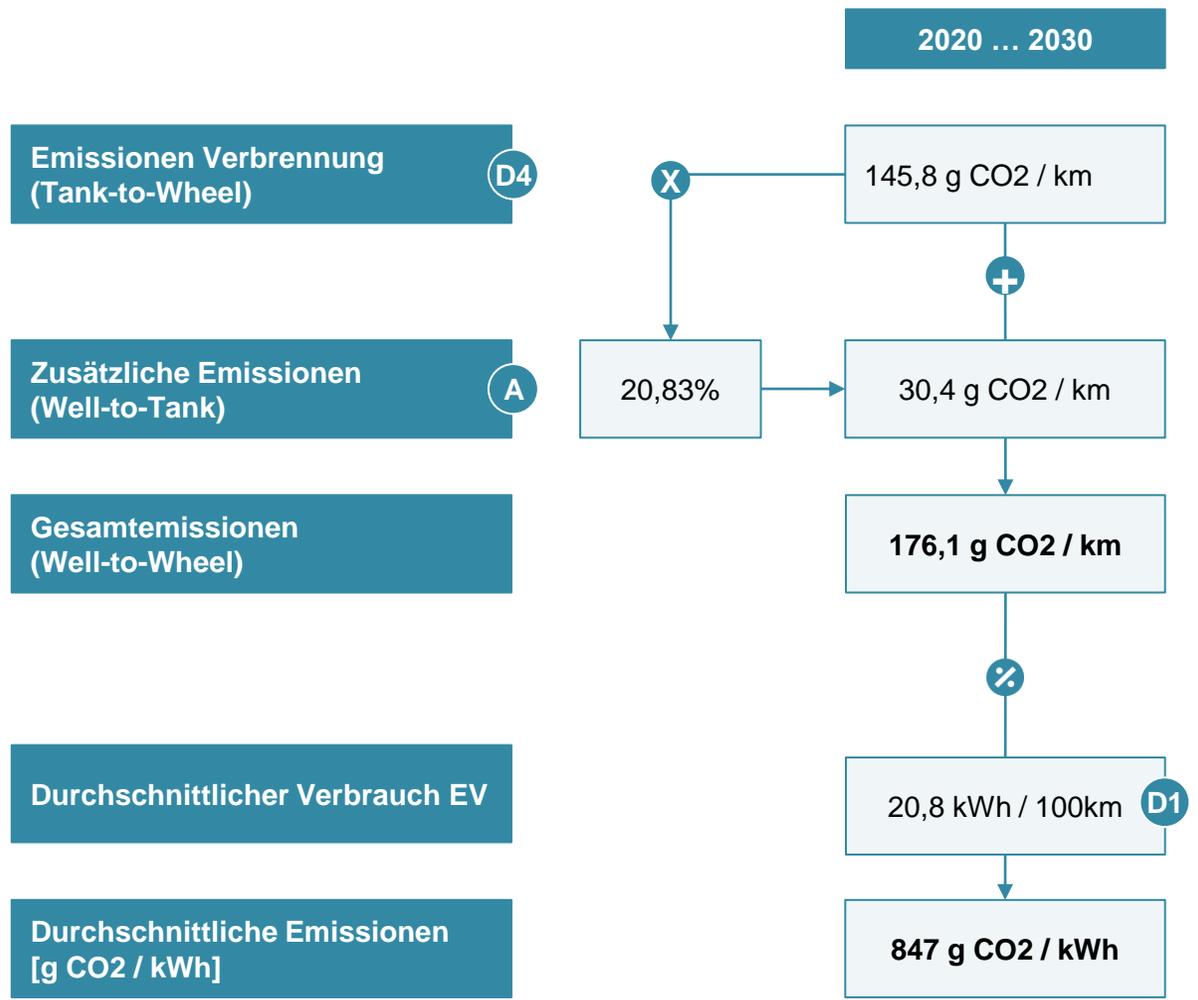
Gesamtemissionen
 $137 - 111 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}_{\text{Kap.}}$

B33 Berechnung – Emissionen EV-Batterieproduktion

- Emissionen EV-Batterieproduktion B1.3
- EV-Batteriegröße A
- Lebensdauer A
- Durchschnittliche Emissionen [gCO₂ /km]
- Durchschnittlicher Verbrauch EV A
- Durchschnittliche Emissionen [gCO₂ /kWh]



B34 Berechnung – Emissionen verbrennungsmotorisches Fahrzeug (Diesel)



Da Emissionen aus dem Energiebereich in g CO2/kWh angegeben werden, müssen diese für eine Vergleichbarkeit mit dem Automobilbereich in g CO2/km umgerechnet werden

1 In der Energieindustrie werden CO2-Emissionen üblicherweise in der Einheit g CO2/kWh angegeben

g CO2/kWh



2 In der Automobilindustrie ist es jedoch üblich CO2-Emissionen in der Einheit g CO2/km anzugeben

g CO2/km



3 Kernfrage für die Umrechnung: Wie weit kann ein EV mit 1kWh Strom fahren?

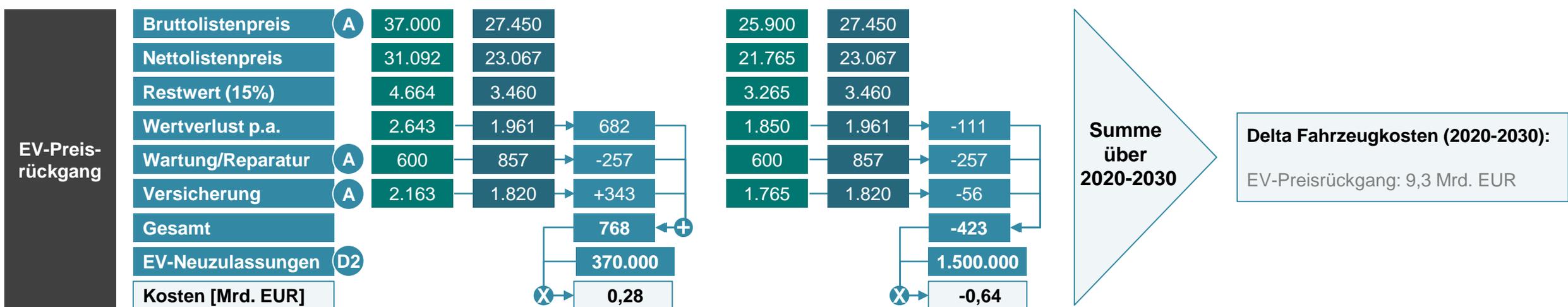
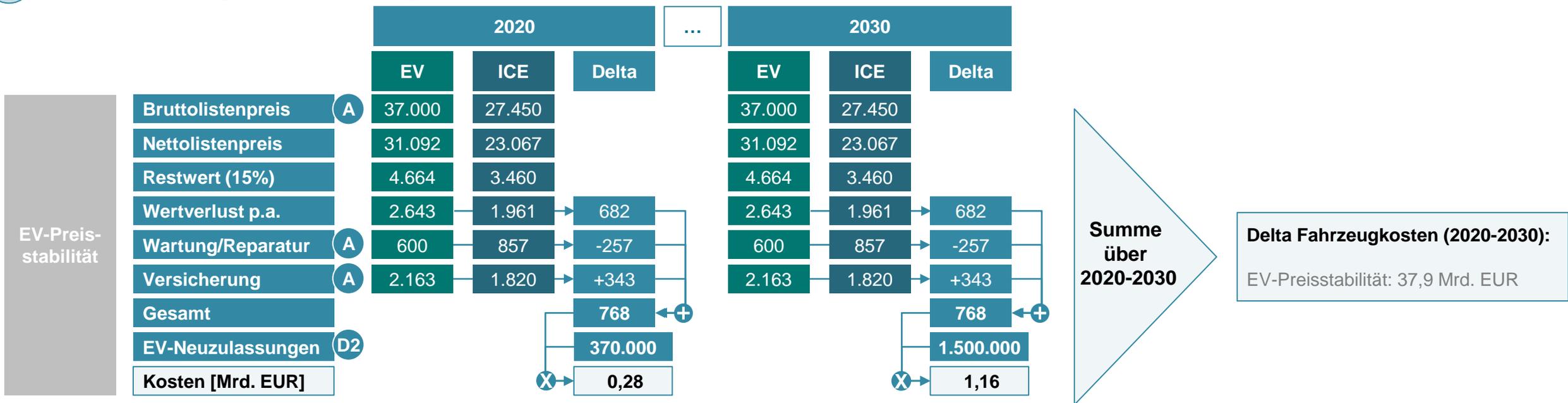
- Bei einem **Durchschnittsverbrauch** von **20,8kWh/100km** kann ein EV mit **1kWh** Strom **~4,81km** weit fahren
- Um eine **Vergleichbarkeit** von **g CO2/kWh** und **g CO2/km** zu erreichen muss folglich **durch den Faktor 4,81 dividiert** werden
- Beispiel: Emissionen für die erneuerbare Energieerzeugung von **36g CO2/kWh** lassen sich für den **Automobilbereich** somit in **8g CO2/km** übersetzen

36g CO2/kWh

4,81km/kWh

8g CO2/km

B4I Berechnung – Fahrzeugkosten



B4III Berechnung – Kosten Ladeinfrastruktur

	2020				...	2030			
	Privat (zu Hause)	Privat (Arbeitsplatz, Geschäfte)	Öffentlich	Schnell		Privat (zu Hause)	Privat (Arbeitsplatz, Geschäfte)	Öffentlich	Schnell
EV-Neuzulassungen (D2)	370.000					1.500.000			
LP pro EV (C2.1)	0,6	0,5	0,1	0,01		0,6	0,5	0,1	0,01
Kosten pro LP [EUR/a] (C2.1)	115	1.000	1.000	13.000		105	888	888	11.650
Kosten [Mio. EUR/a]	25,5	184,3	36,9	48,0		95,4	668,3	133,7	175,7
Kosten [Mio. EUR/a]	294,7					1.073,1			

Kosten Ladeinfrastruktur (2020-2030):

37,4 Mrd. EUR

B4III Berechnung – Kosten pro Ladepunkt

Annahmen LP pro EV

Abschreibung von Investitionsaufwänden¹

- **Hardware: 10 Jahre**
- **Andere : 20 Jahre**
(Planung, Bau, Installation, Netzanschluss)

Anzahl Ladepunkte²: 1,21 LP pro EV

- **1,1 private Ladepunkte pro EV**
 - **0,6 zu Hause (60% der Haushalte haben eigenen Stellplatz³)**
 - **0,5 am Arbeitsplatz** (restliche Haushalte sind auf Arbeitsplatz und öffentliche Ladepunkte angewiesen)
- **0,1 öffentliche Normalladepunkte pro EV**
- **0,01 öffentliche Schnellladepunkte pro EV**

Kosten^{4,5}

- **3,7 kW:** 650 EUR Hardware; 1.000 EUR andere Investitionsaufwände, 0 EUR/a laufende Kosten
- **11 kW:** 2.500 EUR Hardware; 5.000 EUR andere Investitionsaufwände, 500 EUR/a laufende Kosten
- **150 kW:** 80.000 EUR Hardware; 80.000 EUR andere Investitionsaufwände, 1.000 EUR/a laufende Kosten

Berechnung Kosten pro LP

	Privater LP (3,7 kW)		Privater (Arbeitsplatz, Geschäft) und öffentlicher LP (11 kW)		Öffentlicher Schnell-LP (150 kW)	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Hardware [EUR]	650	553	2.500	2.125	80.000	68.000
Abschreibungsperiode [a]	10	10	10	10	10	10
Hardware [EUR/a]	65	55	250	213	8.000	6.800
Bau, Installation, Netzanschluss [EUR]	1.000	1.000	5.000	5.000	80.000	80.000
Abschreibungsperiode [a]	20	20	20	20	20	20
Bau, Installation, Netzanschluss [EUR/a]	50	50	250	250	4.000	4.000
Laufende Kosten [EUR/a]	0	0	500	425	1.000	850
Gesamtkosten pro Jahr [EUR/a]	115	105	1.000	888	13.000	11.650

1 Expertenschätzung

2 VDA

3 Eigene Berechnung

4 Ludwig-Bölkow-Stiftung

5 Skaleneffekte: 15% Kostenreduktion bis 2030 bei Hardware und Wartung

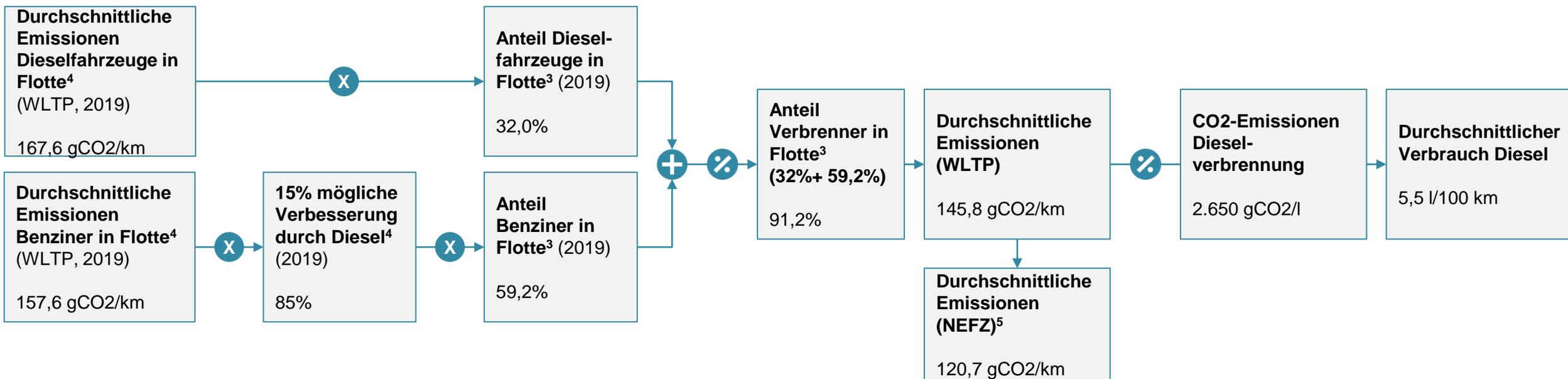
B4IV Berechnung – Kraftstoffkosten und Verbrauch verbrennungsmotorisches Fahrzeug (Diesel)

Bei dem Ölpreisverfall in 2020 ist von einem vorübergehenden Effekt auszugehen

Kraftstoffkosten

Jahr	Einheit	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Kosten pro Barrel Öl ¹	USD/barrel	60	62,48	65,07	67,76	70,56	73,48	76,53	79,69	82,99	86,42	90,00
Kosten für Dieselkraftstoff ² (Produktenpreis + Deckungsbeitrag + CO2- Bepreisung)	EUR/l	0,62	0,71	0,76	0,81	0,86	0,91	0,95	0,99	1,02	1,05	1,09

Verbrauch



1 Kosten für Barrel Öl: International Energy Agency's 2019 World Energy Outlook (interpoliert für 2021-2029)

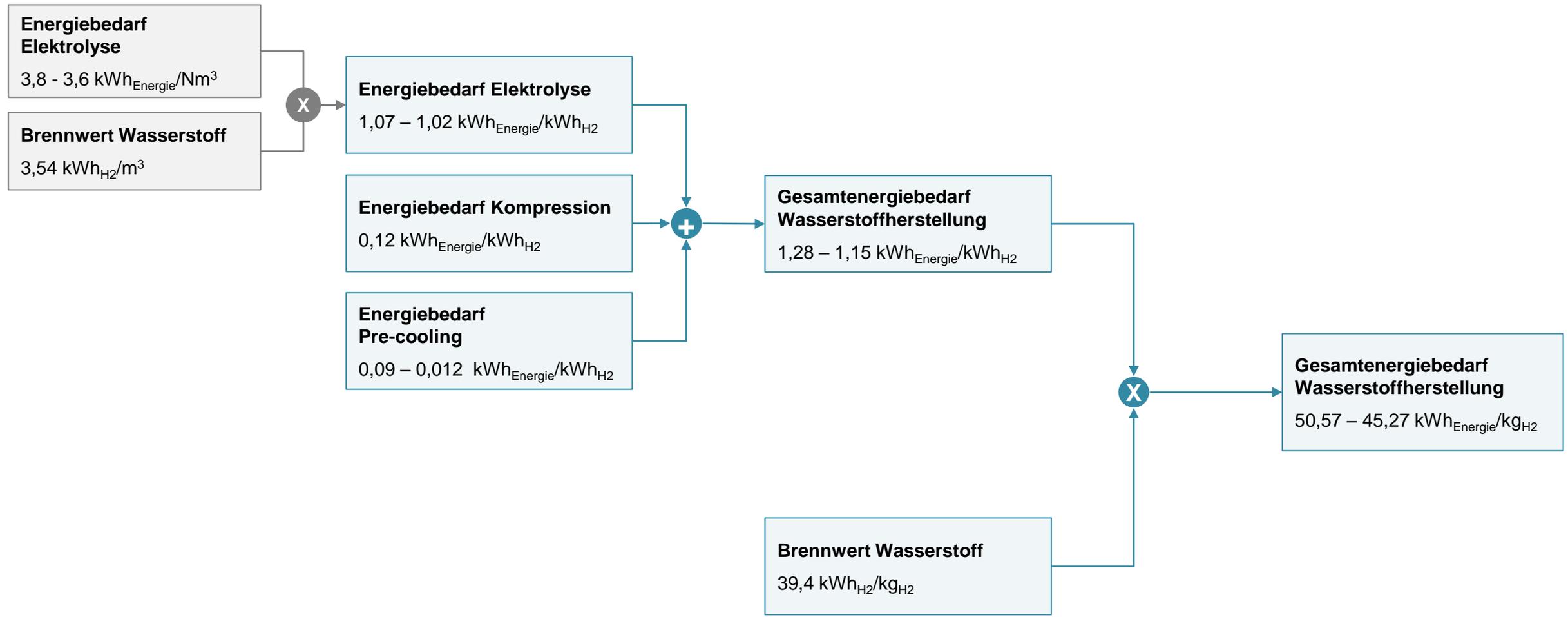
2 Kosten für Dieselkraftstoff 2020 setzen sich zusammen aus Produktenpreis + Deckungsbeitrag (Statista) + CO2-Preis, ohne Mineralölsteuer und MwSt., und entwickeln sich bis 2030 analog dem Barrel-Preis

3 KBA 4 Umweltbundesamt (Diesel-Pkw stoßen bis zu 15 Prozent weniger CO2 aus als Benziner)

5 Umrechnung nach BMWi: $WLTP=0,808*NEFZ+48,275$

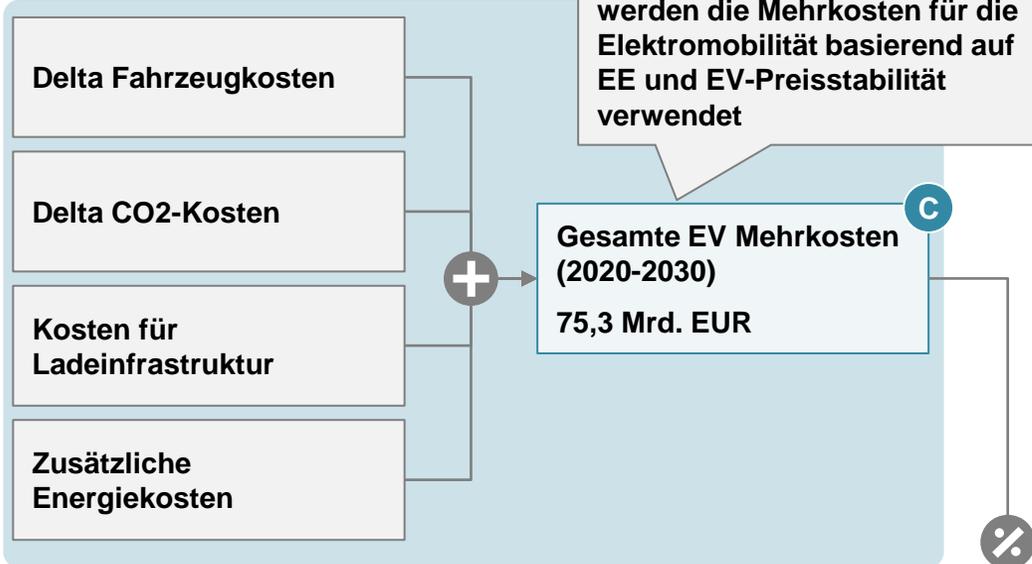
C1 Berechnung – Energiebedarf Wasserstoff

Zahlen für 2020 - 2030

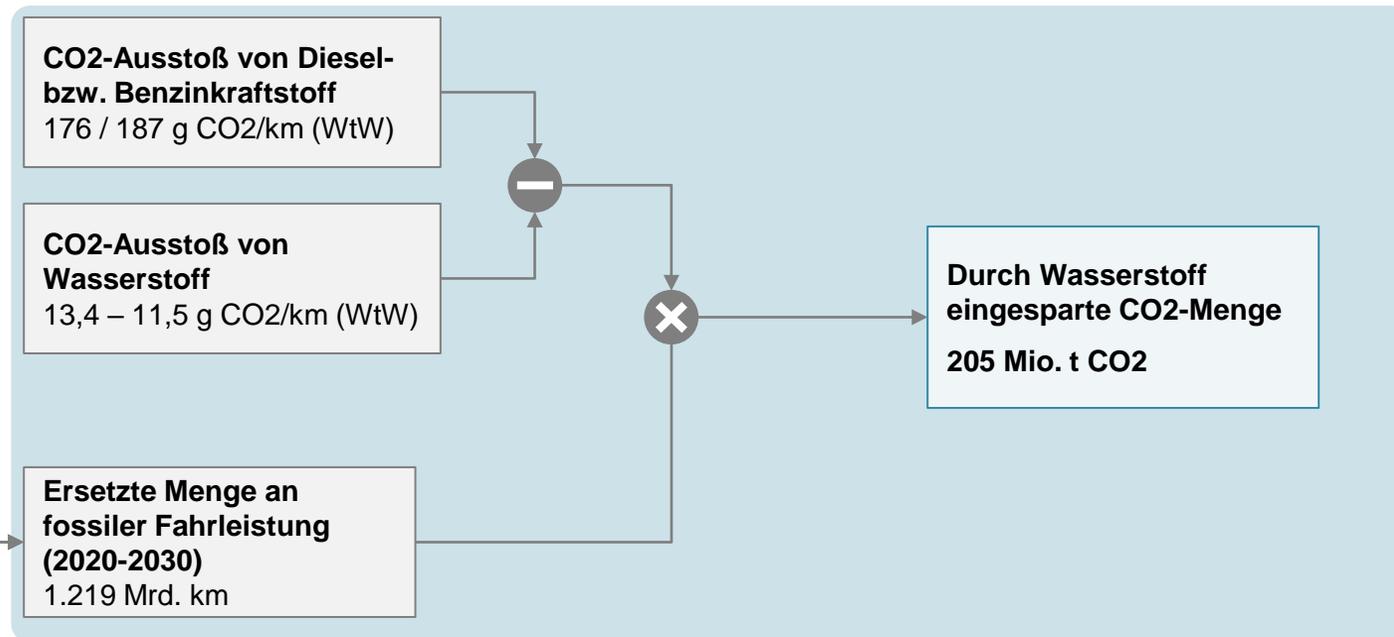


C2 Berechnung – Kosten und Emissionen Wasserstoff

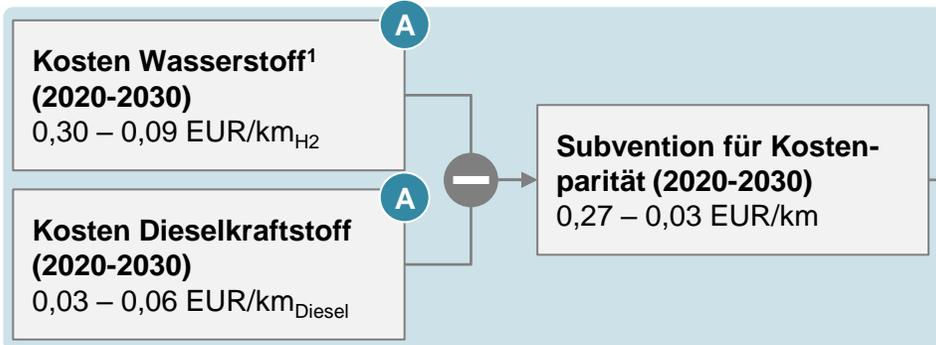
Kalkulation der Mehrkosten durch EVs



CO₂-Einspareffekt durch Wasserstoff



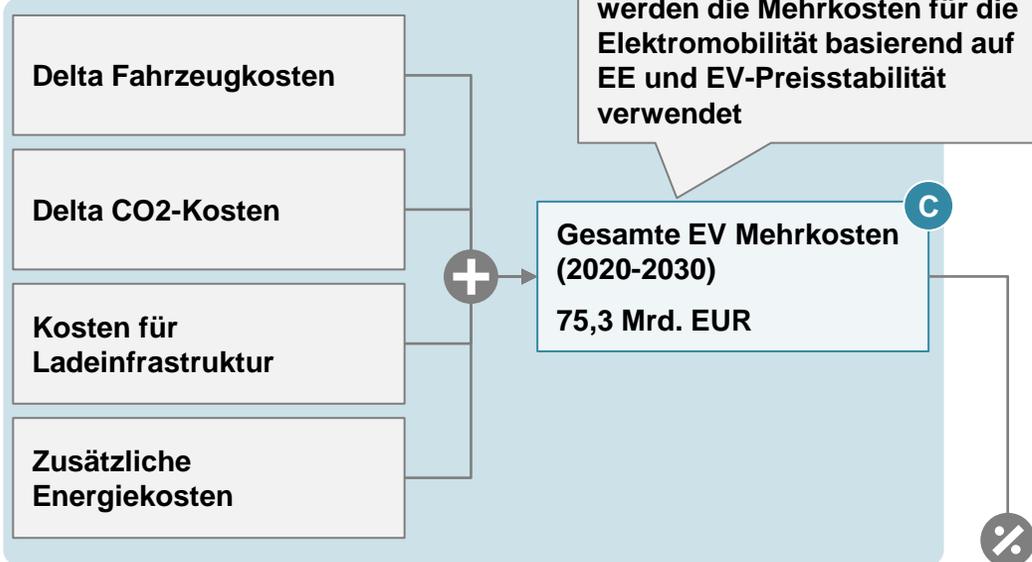
Preisunterschied Wasserstoff & fossiler Kraftstoff



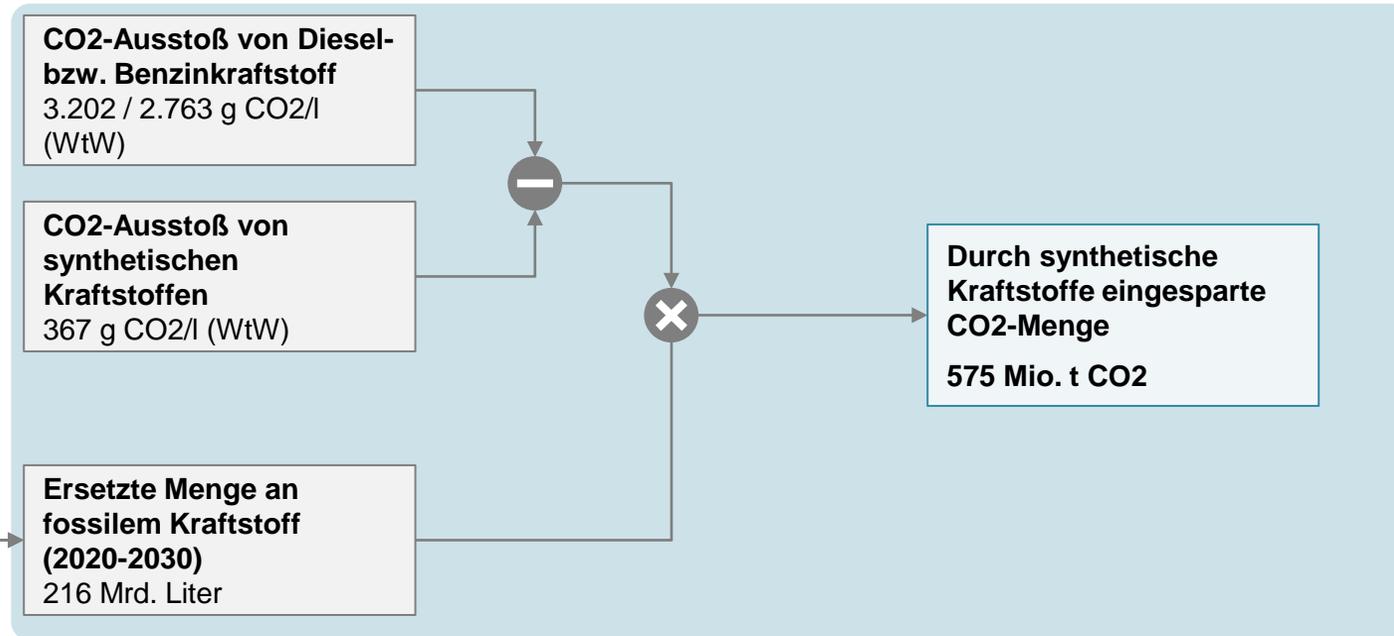
¹ Herstellkosten für Wasserstoff werden in 2020 mit 11,1 USD/kg und 2030 mit 4,4 USD/kg angenommen (Hydrogen Council). Ein Verbrauch von 1,07 kg/100 km wird angenommen. Zusätzlich zu den Wasserstoffherstellkosten werden die Fahrzeugmehrkosten (0,19 – 0,05 EUR/km) berücksichtigt.

D Berechnung – Kosten und Emissionen synthetische Kraftstoffe

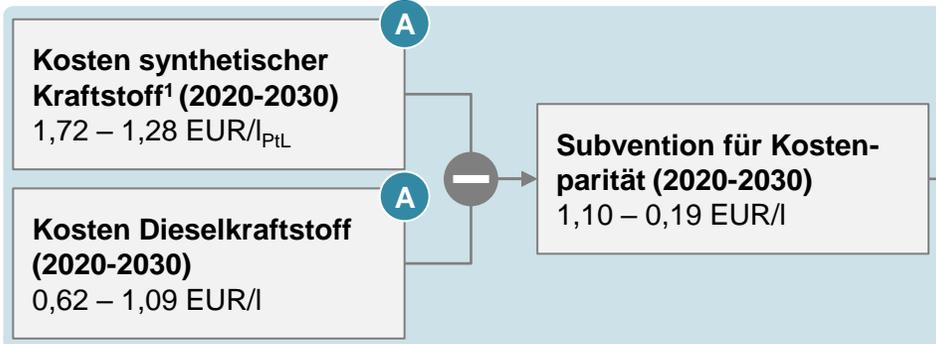
Kalkulation der Mehrkosten durch EVs



CO2-Einspareffekt durch synthetische Kraftstoffe



Preisunterschied synthetischer & fossiler Kraftstoff



¹ Herstellkosten für synthetische Flüssigkraftstoffe werden in 2022 mit 0,18 EUR/kWh und 2030 mit 0,14 EUR/kWh kalkuliert. Diese Kalkulation basiert auf der Annahme, dass der Flüssigkraftstoff in Nordafrika produziert wird. Transportkosten sind nicht enthalten aber nahezu zu vernachlässigen. 10 Cent pro Kilowattstunde entspricht etwa 90 Cent pro Liter Flüssigkraftstoff.

Let us inspire you!

S T A H L
AUTOMOTIVE CONSULTING

Dr. Martin Stahl
Managing Director

Stahl Automotive Consulting GmbH & Co. KG
Otto-Heilmann-Straße 5
D-82031 Grünwald

E-Mail: info@sac-group.eu
www.sac-group.eu