

DER EFFIZIENZBEGRIFF IN DER KLIMAPOLITISCHEN DEBATTE ZUM STRASSENVERKEHR

Ein gesamtheitlicher Ansatz für die
Effizienzbewertung von Technologien

Oktober 2020



Studie im Auftrag von:



UNITI Bundesverband
mittelständischer
Mineralölunternehmen e. V.

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

Ansprechpartner

Dirk Arne Kuhrt
✉ kuhrt@uniti.de

Elmar Kühn
✉ kuehn@uniti.de



Mineralölwirtschaftsverband e.V.
Georgenstr. 25
10117 Berlin
www.mwv.de
☎ 030 202 205 30

Ansprechpartner

Alexander Zafiriou
✉ Zafiriou@mwv.de

Prof. Dr. Christian Küchen
✉ Kuechen@mwv.de

Dr. Jens Perner

☎ +49 221 337 13 102
✉ jens.perner@frontier-economics.com

Theresa Steinfort

☎ +49 221 337 13 139
✉ theresa.steinfort@frontier-economics.com

INHALT

Die Studie auf einen Blick	4
Zusammenfassung	6
1. Der Technische Effizienzbegriff auf dem Prüfstand	17
Unser Ziel: Eine gesamtheitliche Untersuchung der Effizienz	17
2. Konventionelle Energieeffizienzanalysen sind unvollständig und können zu fehlerhaften schlussfolgerungen führen	19
In der klimapolitischen Debatte wird auf die technische Effizienz unterschiedlicher Antriebssysteme für Fahrzeuge verwiesen	19
Das Primat der Energieeffizienz leitet sich u.a. aus dem Wunsch nach Energieautarkie ab	20
Batterieelektrische Antriebe weisen bei konventioneller Betrachtung stets erhebliche Effizienzvorteile auf	24
Konventionelle Effizienzbetrachtungen lassen unterschiedliche Jahreserträge von Wind und PV außen vor	26
Zudem werden häufig weitere in der Praxis relevante Faktoren vernachlässigt	26
3. Wir modellieren die gesamtheitliche Effizienz von Antriebssystemen entlang der gesamten Wertschöpfungskette	29
4. Bei gesamtheitlicher Betrachtung rückt die technische Effizienz von BEVs und ICEVs zusammen	40
5. Wirkungsgradverluste verteilen sich auf unterschiedliche Stufen der Wertschöpfungskette	44
Die sich standortabhängig stark unterscheidende Auslastung von EE-Stromerzeugungsanlagen beeinflusst die gesamtheitliche Effizienz maßgeblich	47
Auch der zeitliche Aspekt der Fahrzeugnutzung beeinflusst die Gesamteffizienz	55
Weitere Sensitivitäten in Bezug auf die Elektrolyse und Ladeverluste	58
Sensitivitäten zeigen ein uneinheitliches Bild	61
6. Die technische Effizienz ist Teil eines umfassenderen Effizienzbegriffs	64
7. Politisches Handeln sollte für die Entwicklung aller klimaschonenden Technologien offen sein	67
Abbildungsverzeichnis	69
Referenzen	72
Anhang: Übersicht Referenzszenarien	75

DIE STUDIE AUF EINEN BLICK

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die mit klimaneutralen Kraftstoffen (PtL) angetrieben werden (ICEVs), weisen bei einem gesamtheitlichen Effizienzvergleich für Produktion und Nutzung eine ähnlich gute Energie-Gesamtbilanz auf wie batteriegetriebene Fahrzeuge (BEVs). Das ist das zentrale Ergebnis der vorliegenden Untersuchung.

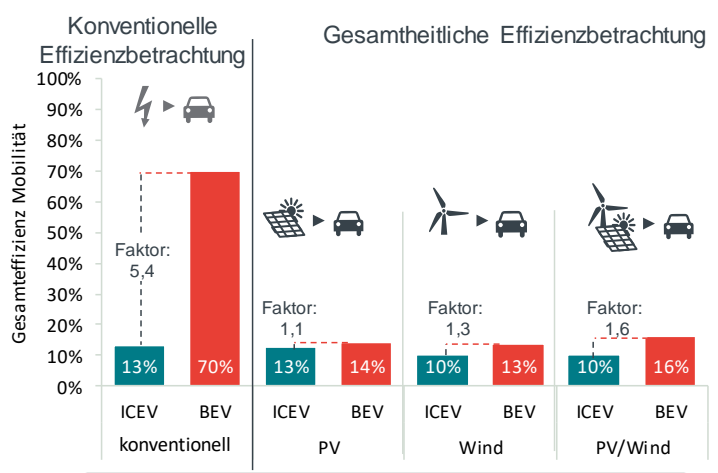
Die in bisherigen, konventionellen Analysen ausgewiesene Effizienz der Nutzung von Ökostrom in BEVs von rund 70% schrumpft in der gesamtheitlichen Analyse auf 13 bis 16% und liegt damit in einer vergleichbaren Größenordnung wie die von Pkw, die mit Verbrennungsmotor und PtL betrieben werden, deren Effizienz je nach Szenario bei 10 bis 13% liegt.

Konventionelle Vergleichsstudien zur Effizienz von Elektromobilität und erneuerbaren Kraftstoffen lassen wichtige Parameter eines sachgerechten Vergleichs außer Acht.

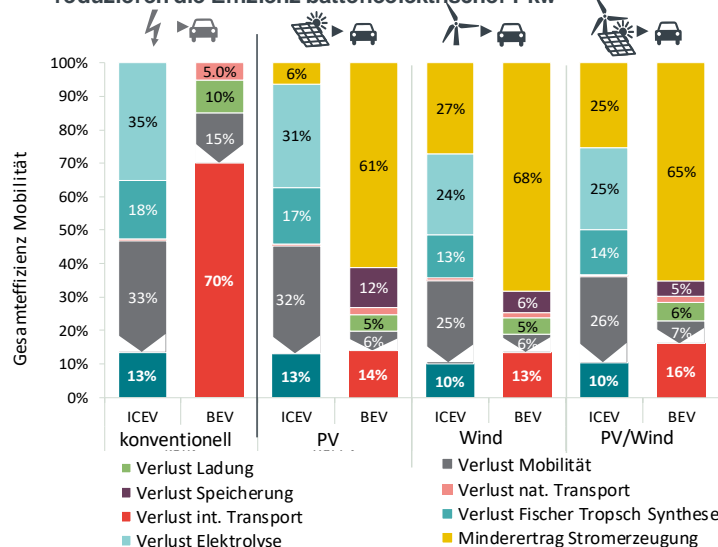
- Vor allem wird** stets von einem rein inländischen Strombezug sowohl für BEVs als auch für die Produktion synthetischer Kraftstoffe ausgegangen und damit ein wesentlicher Vorteil der **importfähigen PtL-Produkte vernachlässigt**: Die **Möglichkeit internationale Standorte mit hohen Stromerträgen aus Erneuerbaren Energien zu nutzen**.
- Zudem fließen Energieverluste in der Elektromobilität beim Stromtransport, bei der Energiespeicherung und beim Laden sowie der teils erhebliche zusätzliche Energiebedarf zur Klimatisierung der Fahrzeuge (Wärme/Kälte) nicht in die konventionellen Studien ein (vgl. **Abbildung 1**).

In weiteren Szenarien werden die einzelnen Parameter variiert, sodass in bestimmten Fällen mit PtL betriebene Autos sogar eine höhere Effizienz aufweisen können.

Abbildung 1. Effizienz von BEV und ICEV bei gesamtheitlicher Betrachtung auf Augenhöhe



Vor allem standortbedingte Mindererträge der Stromerzeugung reduzieren die Effizienz batterieelektrischer Pkw

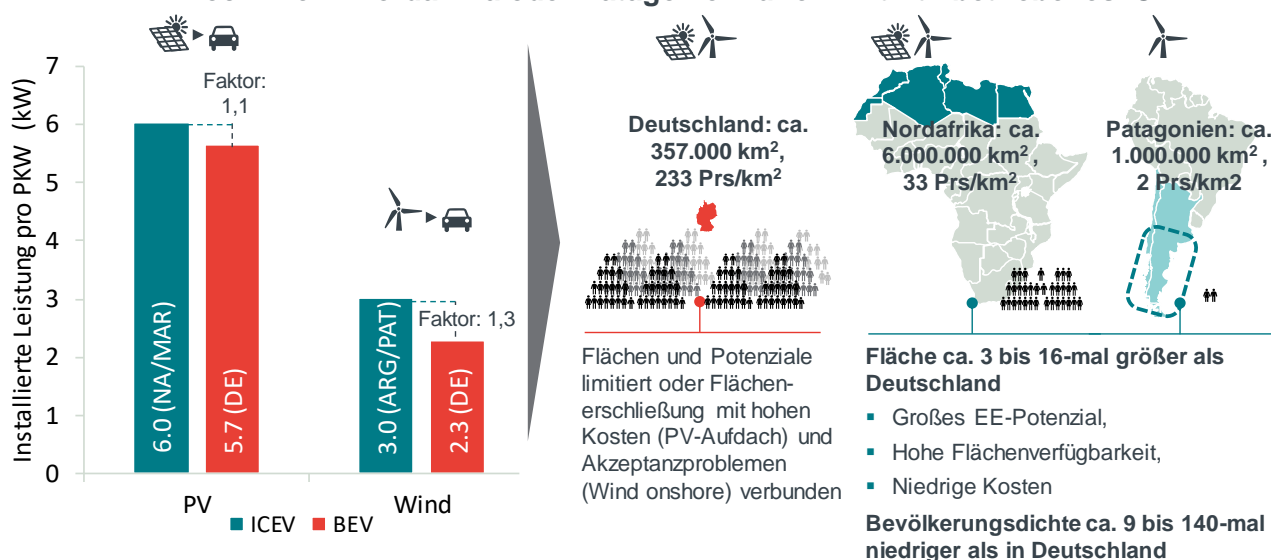


Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Ertragseffizienz (hier „Minderertrag Stromerzeugung“): Globaler Beststandort für Wind o. PV = 100% (Details vgl. Kapitel 3). PV - BEV: Anlagen in Deutschland (DE); ICEV = Anlagen in Nordafrika (NA); Wind - BEV: Anlagen in DE (On- und Offshore); ICEV: Anlagen in Patagonien; PV/Wind, je 50% - BEV: PV- und Windanlagen in DE; ICEV: PV- und Windanlagen in NA

Besonders anschaulich wird das Ergebnis, wenn man vergleicht, **wie viele Windräder und Solaranlagen errichtet werden müssen, um den jährlichen Energiebedarf eines durchschnittlichen Pkw in Deutschland zu bedienen**. Der Betrieb eines Pkw mit grünem PtL benötigt rechnerisch eine PV-Kapazität von 6 kW in Nordafrika, ein BEV mit 5,7 kW fast ebenso viel PV-Kapazität in Deutschland (vgl. **Abbildung 2**). Bei der Stromerzeugung aus Wind müssen für einen Pkw mit grünen PtL 3 kW in Argentinien/Patagonien und immerhin 2,3 kW in Deutschland installiert werden. Allerdings ist die Verfügbarkeit von Flächen mit hohen EE-Potenzialen und geringer Bevölkerungsdichte in Regionen wie Nordafrika oder Patagonien deutlich höher als hier zu Lande, die Kosten und Akzeptanzhürden sind niedriger.

Abbildung 2. PV- bzw. Wind-Kapazitätsbedarf in Deutschland für ein BEV sind annähernd so hoch wie in Nordafrika oder Patagonien für ein mit PtL betriebenes ICEV



Quelle: Frontier Economics
Hinweis: Details vgl. Kapitel 4.

Für politische Entscheidungen sollten auch Kosten und Klimawirkung der jeweiligen Antriebsart herangezogen werden. Hierbei erfahren z.B. energetische Verluste und CO₂-Emissionen eine Bewertung. So nimmt die Bedeutung der bisher immer wieder herangezogenen technischen Energieeffizienz vor dem Hintergrund großer weltweit verfügbarer Mengen an Ökostrom ab, während die Bedeutung der Bereitstellung klimafreundlicher Energie zur richtigen Zeit am richtigen Ort mit der erforderlichen Leistung massiv an Bedeutung gewinnt.

Die politische Vorselektion von Antriebstechnologien allein anhand technischer Effizienzbegriffe vernachlässigt weitere Aspekte wie die Verfügbarkeit bestehender Infrastrukturen einschließlich des Fahrzeugbestandes und die Anwenderbedürfnisse. Ebenso ist eine internationale Perspektive wichtig: Importe von Ökostrom als flüssiger grüner Kraftstoff werden essenziell, um bedarfsgerecht und bezahlbar klimaneutrale Energie in Deutschland zur Verfügung zu stellen, sowohl für die Wirtschaft als auch für Verbraucher.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine zukunftsgerichtete Klimapolitik im Verkehrssektor auf die Nutzung und das Offenhalten aller klimazielkonformen Technologien abzielen sollte. Bei den legislativen Rahmenbedingungen besteht sowohl auf europäischer wie auch auf nationaler Ebene Überarbeitungsbedarf. Dies sollte schnellstmöglich erfolgen, da die Transformation des Energiesystems in Richtung Erneuerbarer Energien angesichts des fortschreitenden Klimawandels zunehmend an Dringlichkeit gewinnt.

ZUSAMMENFASSUNG

Die ambitionierten klimapolitischen Ziele der Bundesregierung¹ erfordern erhebliche Reduktionen der Treibhausgasemissionen in allen energieverbrauchenden Sektoren, einschließlich des Verkehrssektors.

Die Energieeffizienz von Technologien ist in der aktuellen energiepolitischen Debatte eine wichtige Orientierungsgröße für politische Weichenstellungen. Dies gilt in besonderem Maße für die klimapolitische Bewertung verschiedener Antriebstechnologien im Straßenverkehr (wie batterieelektrische Fahrzeuge und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren). Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung möchten wir bisherige methodische Ansätze zur Bestimmung der Effizienz von Antriebstechnologien im Straßenverkehr prüfen und neue Ansätze zur Effizienzbewertung aufzeigen. Gerade in dieser wichtigen Phase der Transformation des Energiesystems ist eine solide Informations- und Faktenbasis von größter Bedeutung für die anstehenden politischen Richtungsentscheidungen.

Unser Ziel: Eine gesamtheitliche Effizienzanalyse von BEVs und mit PtL angetriebenen ICEVs unter Berücksichtigung aller Erzeugungs- und Energieumwandlungsstufen

Ziel der Studie ist es, essenzielle Aspekte einer gesamtheitlichen technischen² Effizienzanalyse von Energiepfaden aufzuzeigen, die bei Erneuerbaren Energien (EE) beginnen und bei der Nutzung in verschiedenen Antriebstechnologien enden. Insbesondere fokussieren wir uns auf EE und den daraus erzeugten Strom, der

- einerseits in batterieelektrischen Fahrzeugen genutzt wird (BEV-Pfad); und
- andererseits zu synthetischen Flüssigkraftstoffen (E-Fuels oder Power-to-Liquids (PtL)) weiterverarbeitet wird, mit denen Verbrennungsmotorfahrzeuge angetrieben werden (ICEV-Pfad).

Dabei zeigen wir auf,

- dass heute oftmals praktizierte Effizienzbetrachtungen (nachfolgend konventionell genannt) limitiert sind und zu Fehlschlüssen führen können, die batterieelektrische



Ziel: Eine gesamtheitliche Effizienzanalyse unter Berücksichtigung aller Erzeugungs- und Energieumwandlungsstufen.

¹ 55% CO₂-Reduktion ggü. 1990 im Jahr 2030, möglichst Klimaneutralität im Jahr 2050.

² Der Einfachheit halber verwenden wir im Folgenden die Begriffe „technische Effizienz“ und „Effizienz“ und „Energieeffizienz“ als synonym.

Fahrzeuge als einzige Lösungsoption für eine Defossilisierung aufweisen;

- dass für eine faire Gegenüberstellung von Technologien eine gesamtheitliche Effizienzbetrachtung angewendet werden muss und welche Wertschöpfungsstufen dafür zu berücksichtigen sind; und
- dass im Ergebnis einer gesamtheitlichen Betrachtung mit PtL angetriebene ICEVs eine ähnliche Effizienz aufweisen wie BEVs, insbesondere da durch die Importfähigkeit der PtL-Produkte EE-Standorte mit hohen Stromertragseffizienzen nutzbar gemacht werden können.

Derzeitige Effizienzanalysen haben eine beschränkte, nationale Perspektive und lassen wichtige Aspekte außen vor



PtL-Produkte lassen sich aufgrund ihrer hohen Energiedichte ohne großen technischen und energetischen Aufwand über weite Distanzen transportieren.

Die derzeitige Debatte zur Energieeffizienz basiert zu einem großen Teil auf der Vorstellung einer weitgehend nationalen Energieautarkie unter ausschließlicher Nutzung von inländisch erzeugter Erneuerbarer Energie für alle Verbrauchssektoren.

Dieser auf Deutschland fokussierte Blick ignoriert, dass sich PtL-Produkte aufgrund ihrer hohen Energiedichte unter atmosphärischen Umgebungsbedingungen, wie Normaldruck und üblichen Umgebungstemperaturen, ohne großen technischen und energetischen Aufwand über weitere Distanzen transportieren lassen. PtL-Produkte ermöglichen somit, weltweit vorhandene und im Vergleich zu Deutschland deutlich höhere EE-Erzeugungspotenziale nahezu unabhängig von ihrem geografischen Standort nutzbar zu machen.

Es ist zweifelhaft, ob eine auf einer konventionellen Effizienzanalyse basierende Vergleichsaussage tragfähig ist: Hierbei bleiben **standortspezifische Faktoren der EE-Erzeugung** und die damit einhergehende **Ertragseffizienz³ der erneuerbaren Stromgewinnung unberücksichtigt**. Für einen fairen Technologienvergleich ist dagegen **eine gesamtheitliche Effizienzanalyse über Ländergrenzen hinweg** erforderlich.

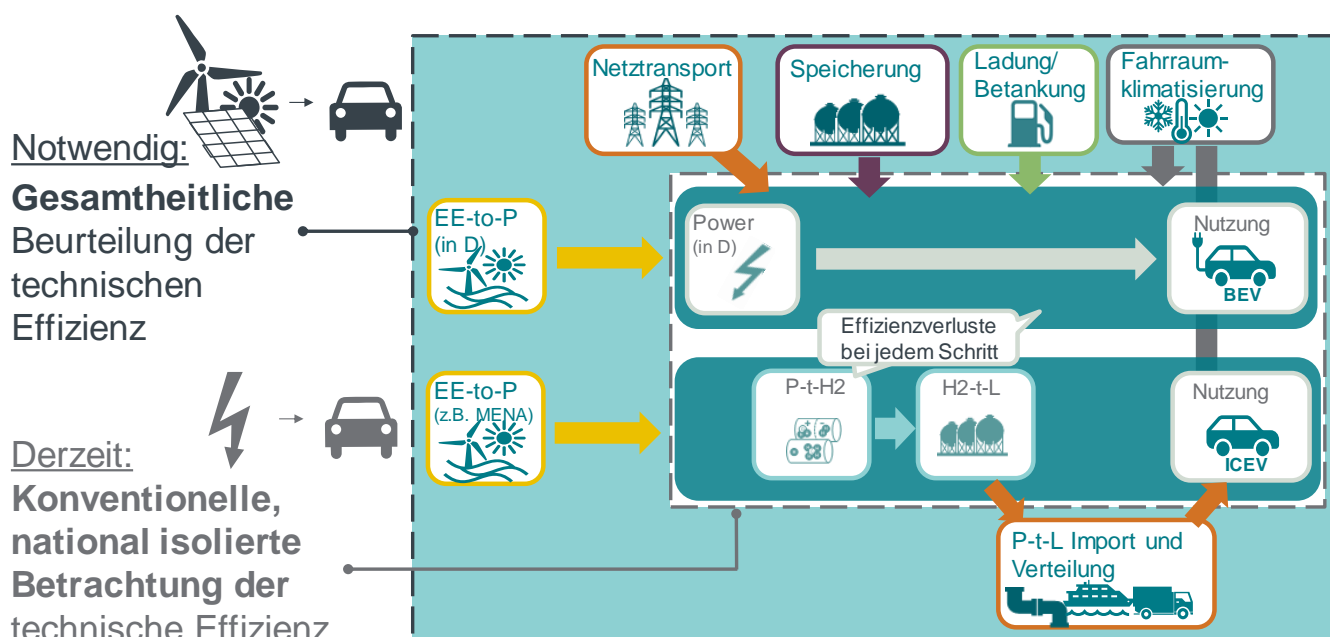
Daneben bleiben in den konventionellen Effizienzanalyse häufig unberücksichtigt:

- **Energieverluste beim Transport;**
- **Verluste bei der Energiespeicherung;**

³ Ertragseffizienz beleuchten wir in dieser Studie standortabhängig, nicht technologieabhängig: Wir unterscheiden bspw. für Windkraftanlagen nicht unterschiedliche Windkrafttechnologien, sondern lediglich standortabhängige Windhöflichkeiten und damit unterschiedliche Stromerträge, i.e. Ertragseffizienzen. Ein Standort mit der global höchsten Windhöflichkeit, die derzeit von Windrädern zu Strom umgewandelt werden kann, hat eine Ertragseffizienz von 100% (vgl. Kapitel 3, S. 42 ff.).

- **Ladeverluste** bei batterieelektrischen Fahrzeugen; sowie
- **Energiebedarf zur Klimatisierung** der Fahrzeuge, insbesondere zur Heizung des Innenraumes bei kühlen Temperaturen.

Abbildung 3. Gesamtheitliche Effizienz berücksichtigt alle Umwandlungsstufen und internationale EE-Potenziale

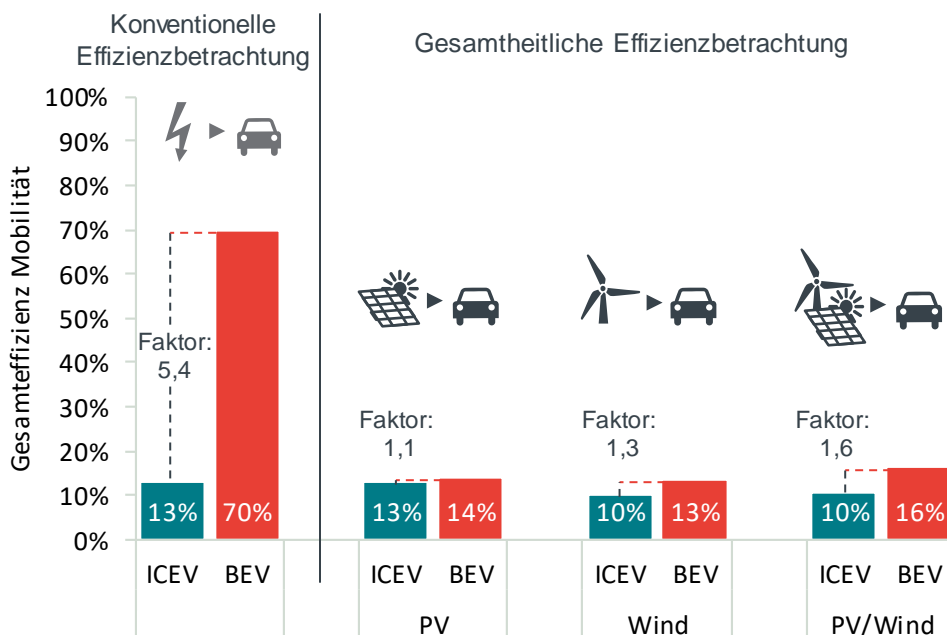


Quelle: Frontier Economics

Bei einer gesamtheitlichen Beurteilung weisen mit PtL angetriebene ICEVs eine ähnliche Effizienz auf wie BEVs, insbesondere da durch die Importfähigkeit der PtL-Produkte EE-Standorte mit hohen Stromertragseffizienzen nutzbar gemacht werden

Wir berücksichtigen in dieser Studie die in **Abbildung 3** illustrierten Aspekte einer gesamtheitlichen Effizienzbetrachtung. Dabei liegt die technische Effizienz von mit erneuerbarem Strom betriebenen Elektrofahrzeugen und mit grünem PtL betriebenen Verbrennern auf einem ähnlichen Niveau: Abweichend von der in bisherigen konventionellen Analysen ausgewiesenen technischen Effizienz von ca. 70% beträgt die gesamtheitliche Effizienz batterieelektrischer Fahrzeuge ca. 13-16%. Dies liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die gesamtheitliche Effizienz von mit PtL angetriebenen ICEVs von 10 – 13% (vgl. **Abbildung 4**).

Abbildung 4. Effizienzunterschiede zwischen BEVs und ICEVs gleichen sich nahezu aus – Referenzszenarien je Stromerzeugungstechnologie



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **Konventionelles Szenario:** 100% Ertragseffizienz, vgl. Kapitel 2.

PV – BEV: PV-Anlagen in Deutschland; ICEV: PV-Anlagen in Nordafrika/Marokko.

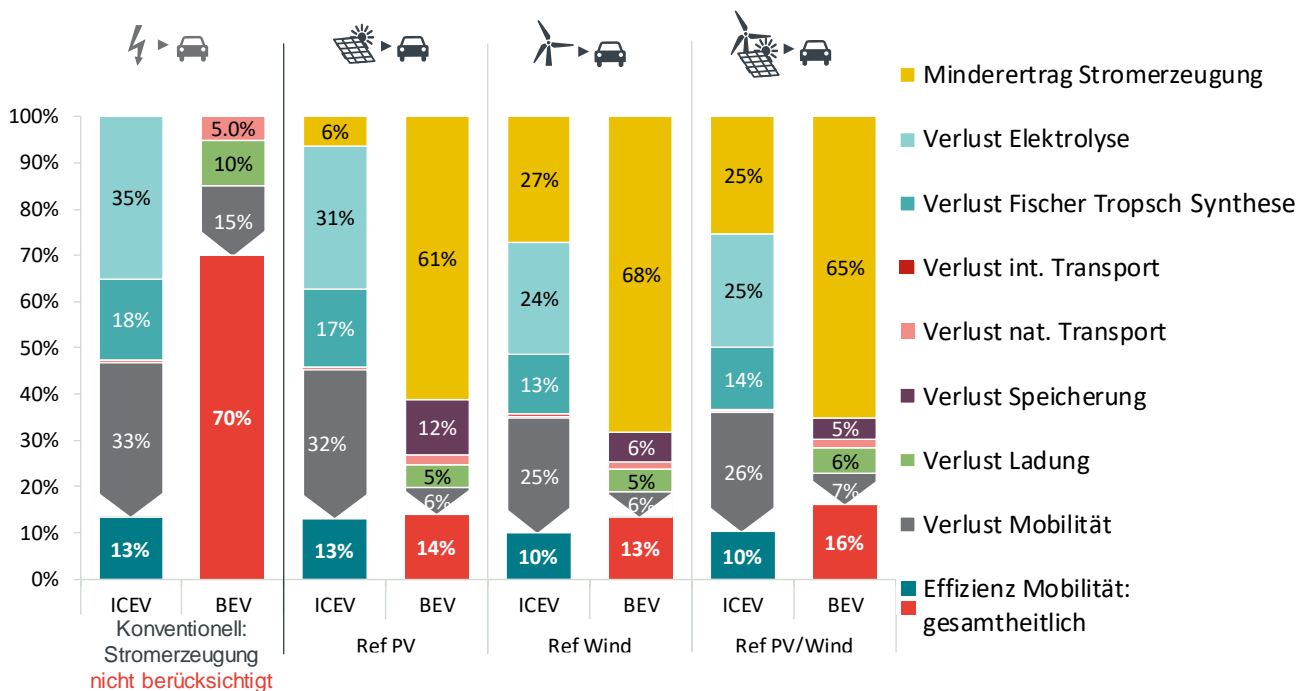
Wind – BEV: Windanlagen in Deutschland, 90% Onshore zu 10% Offshore (gewichtet nach installierter Kapazität 2019). ICEV: Windanlagen in Argentinien/Patagonien

Mix – BEV: PV- und Windanlagen zur Stromerzeugung in Deutschland, jeweils 50%; ICEV: PV- und Windanlagen in Nordafrika/Marokko, jeweils 50%.

Die **Wirkungsgradverluste verteilen sich** dabei auf unterschiedliche Stufen der Wertschöpfungskette (vgl. **Abbildung 5**).

- Bei BEVs ergeben sich im Vergleich zur konventionellen Effizienz zusätzliche Effizienzverluste hauptsächlich durch die geringe Ertragseffizienz der EE-Anlagen in Deutschland (Minderertrag Stromerzeugung), aber auch durch saisonalen Speicherbedarf und Mehrverbrauch durch Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums (enthalten in der Wertschöpfungsstufe „Mobilität“).
- Bei mit PtL betriebenen ICEVs sind die Haupttreiber die Umwandlungsverluste (Elektrolyse und Fischer-Tropsch Synthese) neben der Motoreffizienz, die bei konventionellen Effizienzanalysen bereits abgedeckt werden.

Abbildung 5. Effizienzverluste treten auf allen Wertschöpfungsstufen auf - vor allem standortbedingte Mindererträge der Stromerzeugung reduzieren die BEV-Effizienz



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Ref PV – BEV: PV-Anlagen in Deutschland; ICEV: PV-Anlagen in Nordafrika/Marokko.

Ref Wind – BEV: Windanlagen in Deutschland, 90% Onshore zu 10% Offshore (gewichtet nach installierter Kapazität 2019). ICEV: Windanlagen in Argentinien/Patagonien

Ref PV/Wind – BEV: PV- und Windanlagen zur Stromerzeugung in Deutschland, jeweils 50%; ICEV: PV- und Windanlagen in Nordafrika/Marokko, jeweils 50%.

Weiterer Hinweis: Die jeweilige spezifische Effizienz einer Wertschöpfungsstufe, bspw. die der Umwandlung von Strom in Wasserstoff, ist über die Szenarien hinweg identisch (nämlich 67% für die Elektrolyse), lediglich der Anteil am Gesamtergebnis ist unterschiedlich (vgl. Abbildung „Verlust Elektrolyse“: ICEV PV: 31% vs. ICEV Wind: 24%).



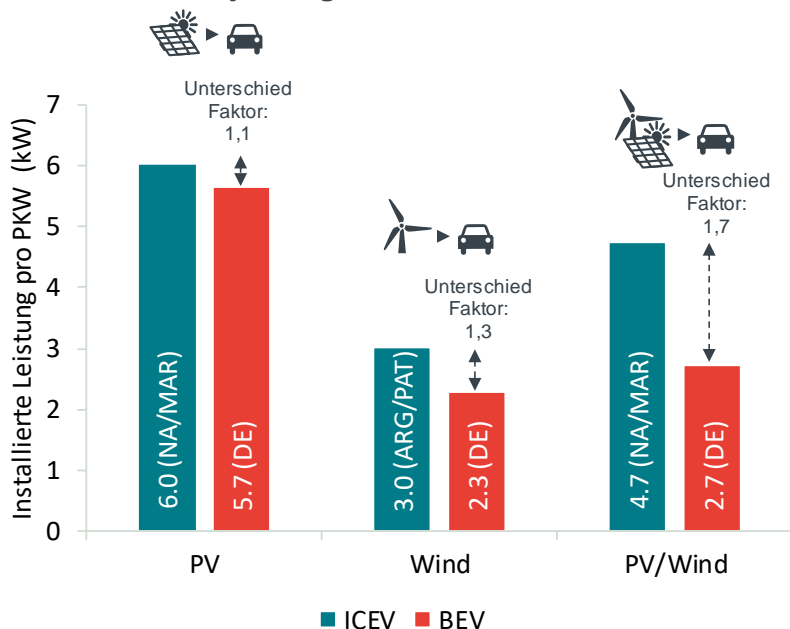
Der Betrieb eines Pkw mit grünem PtL erfordert rechnerisch eine PV-Kapazität von 6 kW in Nordafrika, ein Pkw mit Batterie mit 5,7 kW fast ebenso viel in Deutschland.

Auch die zu installierenden EE-Kapazitäten unterscheiden sich abhängig von den Standortbedingungen – für BEVs in Deutschland und für ICEVs/PtL in bspw. Argentinien/Patagonien oder Nordafrika/Marokko

Die Implikationen eines umfassenden Effizienzbegriffs lassen sich auch daran ablesen, wie viele Windräder und Solaranlagen zu errichten sind, um eine bestimmte Anzahl an Pkw zu betreiben. Um den jährlichen Bedarf eines durchschnittlichen Pkw in Deutschland zu bedienen, bedarf es bspw. bei der Stromerzeugung aus Solarenergie einer Leistung von

- 6 kW je mit PtL betriebenen ICEV (EE-Standort (PV) in Nordafrika/Marokko) und
- 5,7 kW je BEV (EE-Standort (PV) in Deutschland).

Abbildung 6. Impliziter Kapazitätsbedarf pro Pkw für die Jahresfahrleistung eines BEV und eines ICEV in den jeweiligen Referenzszenarien

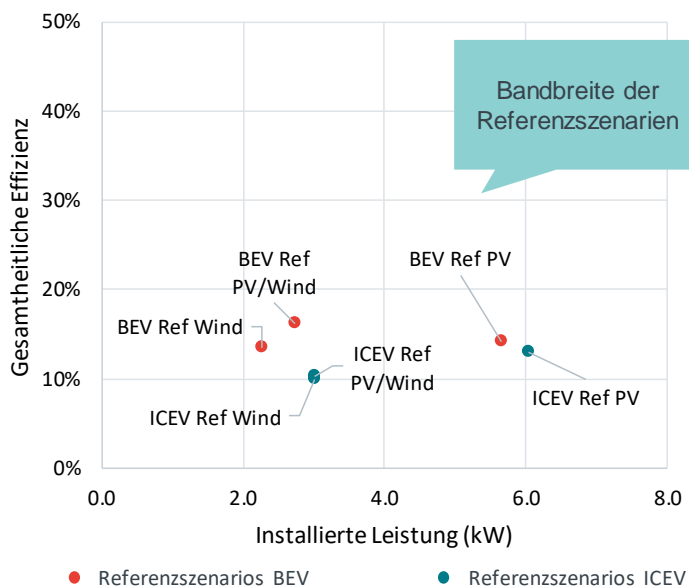


Im Ergebnis zeigt sich, dass im Referenzszenario ein BEV und ein ICEV sowohl bei der gesamtheitlichen Effizienz als auch bei der installierten Leistung sehr nahe beieinander liegen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Flächenverfügbarkeit in dünn besiedelten Regionen wie Nordafrika deutlich besser ist als in dicht besiedelten Ländern wie Deutschland.

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Angenommene Jahresfahrleistung eines Pkw in Deutschland: 13.975 km (Durchschnittswert 2014-2018 basierend auf KBA (2020)).⁴

Abbildung 7. Gesamtheitliche Effizienz und zu installierende Leistung (zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs je Fahrzeug)



Quelle: Frontier Economics

⁴ Der Unterschiedsfaktor bei der Erzeugungstechnologienkombination aus PV und Wind weicht wegen Rundungsunterschieden zwischen der %-Betrachtung (1,6 in Abbildung 4) leicht von der oben dargestellten absoluten kW-Betrachtung ab (1,7).

Sensitivitätsanalysen bestätigen die geringen Effizienzunterschiede der Referenzszenarien zwischen den Antriebstechnologien

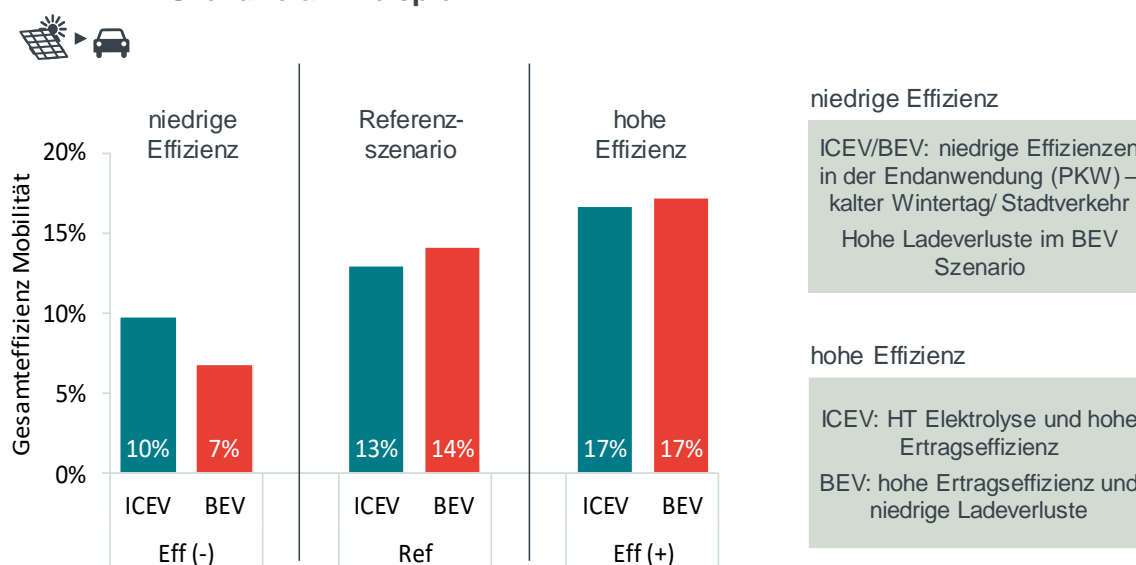


Technische Effizienzen hängen in der Realität von einer Vielzahl von Faktoren ab.

Die Variation einzelner oder mehrerer Einflussfaktoren führt zu einer weiteren Streuung der Ergebnisse für die gesamtheitliche Effizienz der Antriebstechnologien der Pkw. Variiert werden hierbei

- neben den Standorten der EE-Erzeugung die Nutzungssituation der Pkw (Stadt/Land),
- das Nutzungsverhalten der Verbraucher (z.B. Schnellladung vs. Ladung mit Standardgeschwindigkeit bei BEVs),
- klimatische Bedingungen während der Nutzung (Variationen der Außentemperaturen) und
- mögliche zukünftige Technologieoptionen (z.B. Wirkungsgrade verschiedener Elektrolyseverfahren) (vgl. **Abbildung 8**).

Abbildung 8. Schwankungsbreite der Gesamteffizienz je Technologiepfad und Szenario am Beispiel PV



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **Eff (-)** – BEV: PV Anlagen in Deutschland, ICEV: PV Anlagen in Nordafrika/Marokko; jeweils niedrige Effizienzen, vgl. Abbildung 47 und Abbildung 48.

Ref – BEV: PV-Anlagen in Deutschland; ICEV: PV-Anlagen in Nordafrika/Marokko.

Eff (+) – BEV: PV Anlagen in Deutschland, ICEV: PV Anlagen in Nordafrika/Marokko; jeweils hohe Effizienzen, vgl. Abbildung 47 und Abbildung 48.

In bestimmten Sensitivitäts-Konstellationen weisen mit PtL betriebene ICEVs eine höhere Effizienz auf als mit EE-Strom betriebene BEVs. Treiber sind hierbei neben den unterschiedlichen Erträgen der EE-Anlagen (Standort Deutschland bei BEVs, Nordafrika/Südamerika bei ICEVs) der Energiespeicherbedarf, Batterieladeverluste und der energetische Aufwand für die Fahrzeuginnenraum-Klimatisierung.

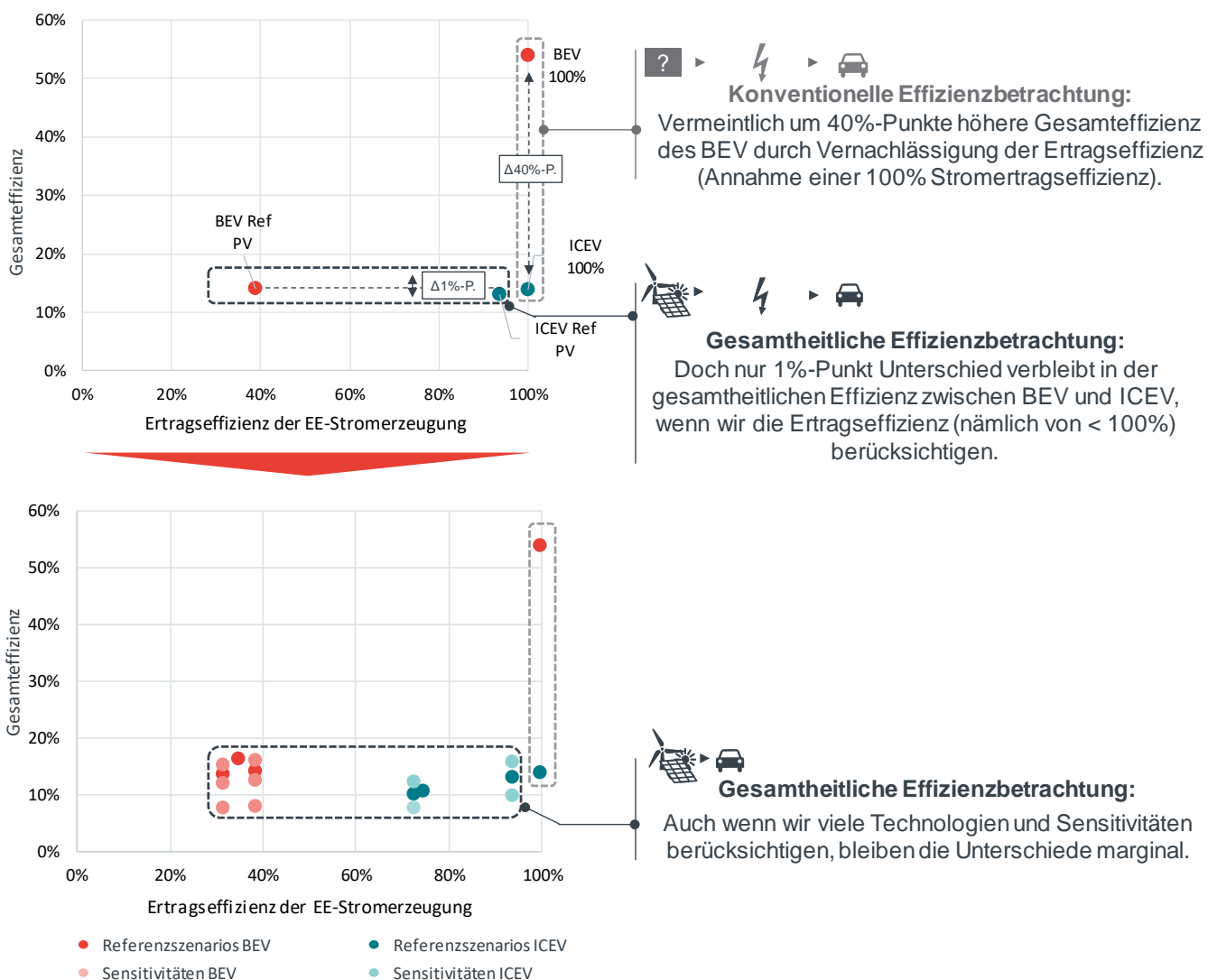
Über alle Szenarien hinweg betrachtet (**Abbildung 9**) zeigt sich, dass



In bestimmten Konstellationen können bei gesamtheitlicher Betrachtung BEVs ineffizienter sein als mit PtL angetriebene ICEVs.

- die **Ertragseffizienz der EE-Stromerzeugung** die Ergebnisse stark beeinflusst – diese fällt bei ICEVs aufgrund der Vorteile von internationalen EE-Standorten durchgängig höher aus (etwa 75% bis 95%) als bei BEVs, die mit EE-Strom aus Deutschland geladen werden (30% bis max. 40%); und
- damit die **gesamtheitliche Effizienz** für BEVs und ICEVs in eine annähernd gleiche Größenordnung rückt (in einen Bereich zwischen ca. 10% und 20%).

Abbildung 9. Bei der gesamtheitlichen Betrachtung schmilzt der Unterschied in der Gesamteffizienz zwischen ICEVs und BEVs

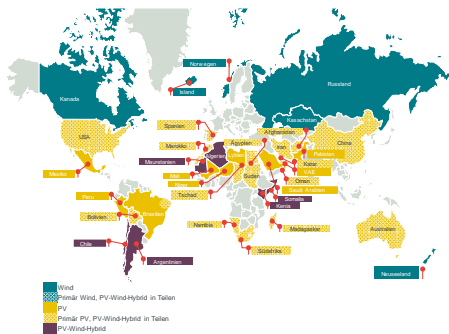


Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Details zu den Szenarien und Sensitivitäten vgl. Kapitel 4, Kapitel 5 und Anhang.



In eine integrierte Effizienzbetrachtung muss die internationale Perspektive einfließen.



Eine durch die Effizienzanalyse motivierte politische Vorselektion ist weder zugunsten des BEV noch des mit PtL betriebenen ICEV zielführend – politische Rahmenbedingungen müssen für die Defossilisierung mit beiden Antriebssystemen offen sein

Der Begriff der technischen Effizienz wird in der bisherigen klimapolitischen Debatte stark eingeschränkt verwendet. Die EE-Stromerzeugung innerhalb Deutschlands als alleinigen Ausgangspunkt der üblichen Effizienzanalysen anzusetzen, führt zu technologisch irreführenden Ergebnissen. Dieser Vergleich führt an der energiewirtschaftlichen Realität vorbei, da nicht nur die mit einer umfassenden direkten Elektrifizierung im Inland einhergehenden Herausforderungen unberücksichtigt bleiben, sondern auch die in großem Maßstab technisch realisierbaren Möglichkeiten von Energieimporten von strombasierten Kraftstoffen aus Weltregionen mit weitaus höheren EE-Ertragspotenzialen und günstigeren Stromgestehungskosten als in Deutschland.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich folgende Schlussfolgerungen als Basis für politische Leitlinien:

- Die **Effizienzvergleiche verschiedener Technologien** sollten vom Windrad bzw. der PV-Anlage ausgehen und damit die standortabhängige Ertragseffizienz der Anlagen mitberücksichtigen. Somit sollte die gesamtheitliche technische Effizienzanalyse an die Stelle bisheriger konventioneller Effizienzbetrachtungen treten.
- Die **gesamtheitliche Effizienzanalyse begründet keine Bevorzugung einer einzelnen Technologie**. Die gesamtheitliche Analyse der Energieketten und deren Wirkungsgradverluste zeigt auf, dass unter realen Bedingungen die technische Effizienzbewertung keine politische Vorselektion einer einzelnen Antriebstechnologie im Straßenverkehr gegenüber einer anderen begründet: weder zugunsten batterieelektrischer Fahrzeuge, noch zugunsten von Verbrennungsmotoren, betrieben mit grünen PtL-Kraftstoffen.



Die gesamtheitliche Effizienzanalyse liefert keine Begründung für die Bevorzugung einer einzelnen Technologie.

Die gesamtheitliche technologische Effizienz liefert *eine* Erkenntnisgrundlage für klimapolitisch motivierte Technologiebewertungen, aber nicht die *alleinige*: Für technologiebezogene politische Entscheidungen sollte **ergänzend zur gesamtheitlichen technischen Effizienz** eine Zuordnung zu einer **umfassenderen, systemischen Effizienzbetrachtung** vorgenommen werden. Diese systemische Effizienz umfasst z.B. auch die

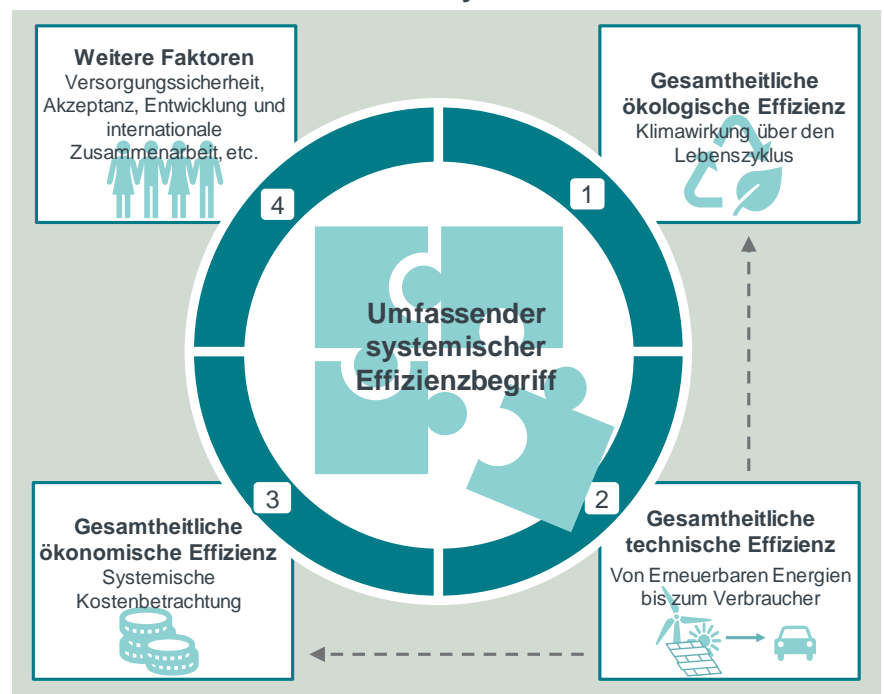
- ökonomischen Effizienzen (Maß für erreichbare Klimaschutzeffekte pro eingesetzter Geldeinheit) und
- ökologischen Effizienzen (Maß für Umfang und Stabilität von technologischen Maßnahmen gegen den Klimawandel).

Hierbei erfahren z.B. energetische Verluste und CO₂-Emissionen eine Bewertung, und es wird nicht nur auf Kilowattstunde (kWh)abgestellt. So nimmt die Relevanz der technischen Energieeffizienz vor dem Hintergrund großer weltweit verfügbarer Mengen an EE ab, während die Bedeutung der Bereitstellung klimafreundlicher Energie am richtigen Ort zur richtigen Zeit mit der erforderlichen Leistung massiv an Bedeutung gewinnt.



Gesamtheitliche technische Effizienz ist ein Baustein einer umfassenderen systemischen Effizienz - einschließlich technischer, ökonomischer und ökologischer Effizienzen.

Abbildung 10. Technische Effizienz ist ein Baustein einer umfassenderen systemischen Effizienz



Quelle: Frontier Economics

Technologiewahl findet zudem nicht auf der grünen Wiese und unter Ausschluss der Anwender statt: In diesem Zusammenhang sollten Aspekte wie die Verfügbarkeit bestehender Infrastrukturen (Speicher, Transport- und Verteilinfrastruktur, Fahrzeugbestand) und Anwenderpräferenzen und -bedürfnisse in den Blick genommen werden. Auch in diesem Zusammenhang erscheint eine politische Fokussierung auf eine oder wenige bestimmte Technologien auf Basis eines eng verstandenen technischen Effizienzbegriffs nicht als zielführend.

Statt also auf eine oder wenige bestimmte Technologien zu setzen, **sollten alle Technologiepfade zur Defossilisierung des Straßenverkehrs zukunfts offen verfolgt werden** – unter Nutzung aller zukünftigen Beschaffungsoptionen für EE: Eine

zukunftsgerichtete Klimapolitik im Verkehrssektor sollte auf die Nutzung und das Offenhalten aller möglichen Defossilisierungstechnologien abzielen. Dabei muss auch die internationale Perspektive eingenommen werden: Importe von EE, z.B. als flüssiger grüner Kraftstoff, werden essenziell, um bedarfsgerecht und bezahlbar klimaneutrale Energie in Deutschland – für alle Wirtschaftszweige und Privathaushalte zur Verfügung zu stellen.

1. DER TECHNISCHE EFFIZIENZBEGRIFF AUF DEM PRÜFSTAND

Die Energieeffizienz von Technologien hat sich in der aktuellen energiepolitischen Debatte – u.a. bezüglich der klimapolitischen Bewertung verschiedener Antriebstechnologien im Straßenverkehr (batterieelektrische Fahrzeuge, Verbrennungsmotoren) – als eine dominierende Orientierungsgröße mit großem Einfluss auf politische Weichenstellungen herausgestellt. Aufgrund dieser Tragweite scheint es erforderlich, bisherige und neue methodische Ansätze zur Ermittlung von technologiespezifischen Effizienzen genauer zu betrachten sowie deren Zuordnung zu einer integrierten systemischen Effizienz vorzunehmen.

UNITI und MWV haben daher Frontier Economics beauftragt, den in der aktuellen politischen Debatte verwendeten Effizienzbegriff quantitativ wie auch qualitativ näher zu beleuchten und einer objektiven Einordnung zu unterziehen.

Unser Ziel: Eine gesamtheitliche Untersuchung der Effizienz

Ziel der Studie ist es, essenzielle Aspekte einer gesamtheitlichen technischen⁵ Effizienzanalyse von Energiepfaden aufzuzeigen, die bei den Anlagen zur Herstellung Erneuerbarer Energien (EE) und deren Energieerträgen beginnen und bei der Nutzung in verschiedenen Fahrzeugen enden. Insbesondere fokussieren wir auf EE und den daraus erzeugten Strom, der

- einerseits vermeintlich „direkt“ in batterieelektrischen Fahrzeugen genutzt wird (BEV-Pfad); und
- andererseits zu synthetischen Flüssigkraftstoffen (E-Fuels oder Power to Liquids, PtL) weiterverarbeitet wird, mit denen Verbrennungsmotorfahrzeuge angetrieben werden (ICEV-Pfad).

Dabei zeigen wir auf,

- welche **Wertschöpfungsstufen** für eine gesamtheitliche Effizienzanalyse berücksichtigt werden müssen; und

⁵ Der Einfachheit halber verwenden wir im Folgenden die Begriffe „technische Effizienz“ und „Effizienz“ und „Energieeffizienz“ als Synonyme.

- zu welchen **Ergebnissen** eine gesamtheitliche Effizienzbetrachtung gegenüber der heute oftmals praktizierten eingeschränkten Methode (nachfolgend konventionelle technische Effizienz genannt) führt.

Die Studie ist wie folgt strukturiert:

- in Kapitel 2 erläutern wir die heute eingeschränkte Interpretation des Begriffs der technischen Effizienz und die Lücken in den Effizienzanalysen;
- in Kapitel 3 fassen wir unseren Ansatz und die Annahmen unserer Effizienzanalyse zusammen;
- in Kapitel 4 stellen wir die Ergebnisse unseres Effizienzvergleichs von BEVs und ICEVs im Überblick dar und vergleichen diese mit den konventionellen Berechnungen;
- in Kapitel 5 erläutern wir die unterschiedlichen Treiber und Sensitivitäten der Ergebnisse im Detail;
- in Kapitel 6 ordnen wir die technische Effizienz in einen umfassenderen Begriff der Systemeffizienz ein, der auch ökonomische und ökologische Effizienzen sowie weitere entscheidungsrelevante Aspekte umfasst; und
- im Kapitel 7 schließlich ziehen wir Schlussfolgerungen aus unserer Effizienzanalyse für die politische Debatte.

2. KONVENTIONELLE ENERGIEEFFIZIENZANALYSEN SIND UNVOLLSTÄNDIG UND KÖNNEN ZU FEHLERHAFTEN SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜHREN

In der klimapolitischen Debatte wird auf die technische Effizienz unterschiedlicher Antriebssysteme für Fahrzeuge verwiesen

Die ambitionierten klimapolitischen Ziele der Bundesregierung (55% CO₂-Reduktion gegenüber 1990 im Jahr 2030, möglichst Klimaneutralität im Jahr 2050) machen erhebliche Reduktionen der Treibhausgasemissionen in allen energieverbrauchenden Sektoren, einschließlich des Verkehrssektors, notwendig. Neben Sektorkopplung und dem weiteren Ausbau von Erneuerbaren Energien ist die Steigerung der Energieeffizienz (Dreiklang der Energiewende) ein wichtiger Baustein in der Strategie der Bundesregierung zum Erreichen der Klimaschutzziele:

„Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, die deutsche Wirtschaft weltweit zur energieeffizientesten Volkswirtschaft zu formen und bis 2050 den Primärenergieverbrauch gegenüber 2008 zu halbieren.“ (Effizienzstrategie 2050)⁶

In der wissenschaftlichen wie auch in der energiepolitischen Debatte besteht Konsens, dass Energieeffizienz ein wichtiges Element für die Energiewende in Deutschland sein wird. So konnten bereits in den letzten Jahrzehnten erhebliche Effizienzsteigerungen bei den in Fahrzeugen eingesetzten Motoren erzielt werden⁷. Ohne diese Effizienzsteigerungen wäre der CO₂-Ausstoß im Straßenverkehr aufgrund der gestiegenen Mobilitätsnachfrage und der größeren und schwereren Fahrzeuge in den vergangenen Jahren deutlich angestiegen und hätte sich nicht auf einem Niveau

⁶ Siehe Energieeffizienzstrategie 2050 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=12.

⁷ Vgl. bspw. Angaben zum Durchschnittsverbrauch, BMVi (2020), S. 309.

von ca. 160 Mio. t (CO₂)⁸ pro Jahr stabilisiert. Trotz dieser Effizienzfortschritte ist allerdings unumstritten, dass der CO₂-Ausstoß des Straßenverkehrs in den kommenden Jahrzehnten massiv gesenkt werden muss, um die Klimaziele Deutschlands zu erreichen.

Insofern ist in der jüngeren Vergangenheit eine intensive Debatte um die Reduktion von Klimagasemissionen im Straßenverkehr entbrannt. Im Zentrum des politischen Handelns stehen hierbei bisher insbesondere die Bestrebungen der Bundesregierung, den Verkauf und die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge in den kommenden Jahren massiv zu fördern und damit auszuweiten, um Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren schrittweise zu ersetzen.

Zu dieser verkehrspolitischen Strategie bestehen allerdings Alternativen: So können Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mit grünen Kraftstoffen wie z.B. Biodiesel oder „grünem“ synthetischen Benzin/Diesel, hergestellt auf Basis Erneuerbarer Energien (Power-to-Liquids, PtL) betankt werden. Auch in diesem Fall entstehen, bei entsprechend grüner Herstellungsweise der Kraftstoffe, (netto) keine CO₂-Emissionen. Eine solche Strategie hat verschiedene Vorteile: So können u.a. existierende Infrastrukturen (wie z.B. Tankstellen oder Tanklager) weiter genutzt werden, ebenso wie die bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Der Aufbau neuer Energieverteilungs- und Speicherinfrastruktur ist somit hierfür nicht erforderlich. Darüber hinaus können Einschränkungen aus Verbrauchersicht, wie z.B. lange Ladezeiten, vermieden und auch der Fahrzeugflottenbestand defossilisiert werden.

Das Primat der Energieeffizienz leitet sich u.a. aus dem Wunsch nach Energieautarkie ab

Die Defossilisierung des Straßenverkehrs wird in Deutschland zu großen Teilen über die Verwendung Erneuerbarer Energien erfolgen. Dies gilt sowohl für die direkte Verwendung von grünem Strom in batterieelektrischen Fahrzeugen als auch über den indirekten Weg des Einsatzes von grünem Strom z.B. über synthetische Kraftstoffe (Benzin/Diesel) oder auch über Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen.⁹

Die Bereitstellung des grünen Stroms trifft allerdings auf unterschiedliche Restriktionen, je nachdem, welche



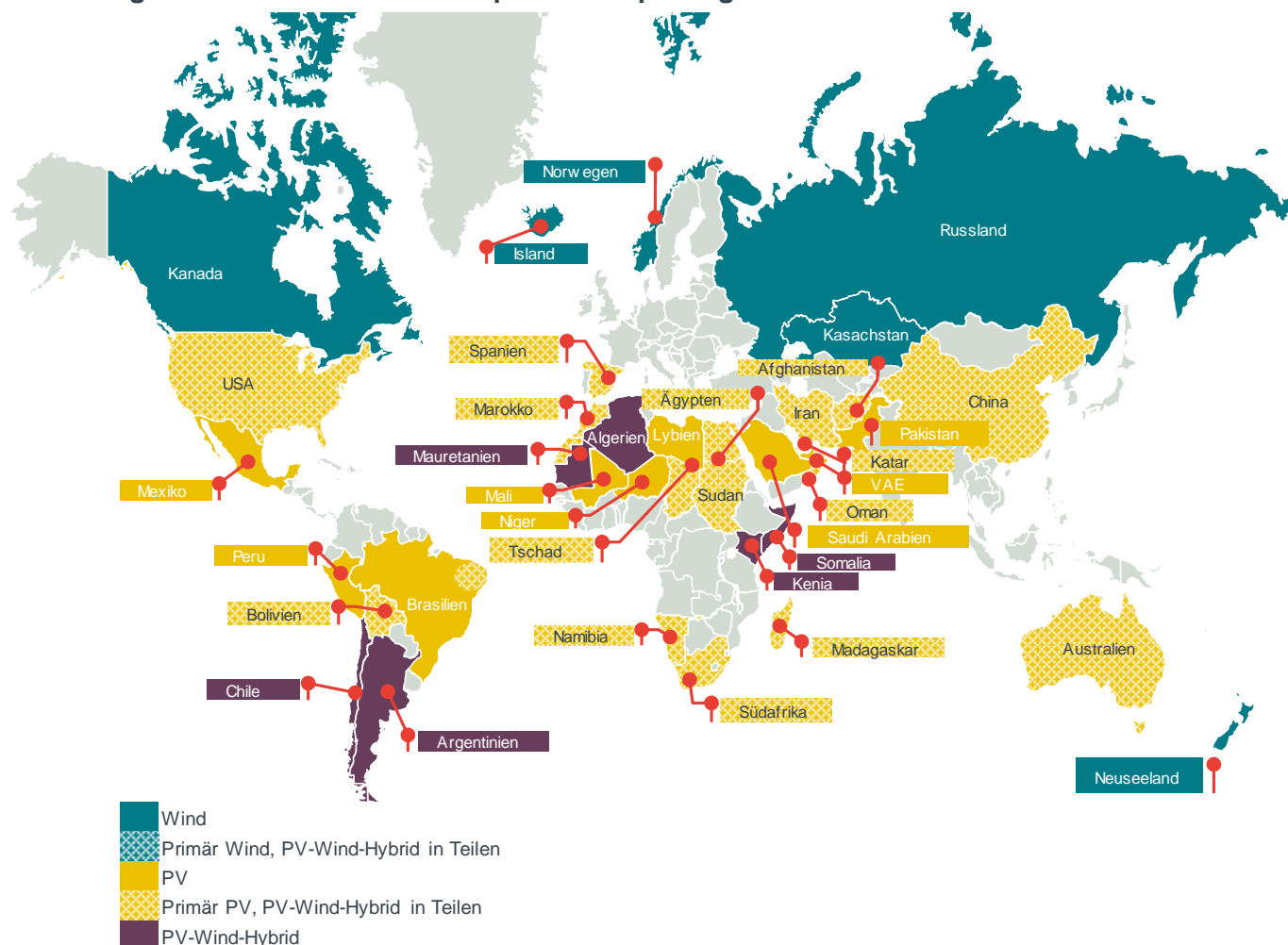
Der Einsatz von auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellten PtL ermöglicht die **Defossilisierung des Fahrzeugflottenbestands und Nutzung bereits verfügbarer Energieverteil- und -speicherinfrastruktur.**

⁸ Vgl. BMVi (2020), S. 311.

⁹ In dieser Studie fokussieren wir auf die Analyse batterieelektrischer Fahrzeuge und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, die mit synthetischen Kraftstoffen (Benzin/Diesel) aus Erneuerbaren Energien betrieben werden. Brennstoffzellenfahrzeuge sind nicht Gegenstand des Gutachtens.

Antriebstechnologie betrachtet wird. So können für die Erzeugung des erneuerbaren Stroms bei synthetischen Kraftstoffen ertragreiche und damit kostengünstige Standorte außerhalb Europas genutzt werden, da sich chemische Energieträger und insbesondere flüssige Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel sehr einfach bei atmosphärischen Umgebungsbedingungen mit hoher Energiedichte speichern und effizient transportieren lassen. Auf diese Weise kann Deutschland diese Energieträger zu einem großen Teil über etablierte Transport- und Handelswege nahezu unabhängig vom geografischen Standort ihrer Herstellung importieren. Dadurch können weltweit eine Vielzahl von Standorten mit hohen EE-Ertragspotenzialen und weiteren begünstigenden Voraussetzungen, wie z.B. großer Flächenverfügbarkeit, genutzt werden. Dazu gehören Regionen in Afrika, im Nahen Osten, in Australien und Südamerika.

Abbildung 11. Potenzielle außereuropäische Exportregionen für PtL Produkte

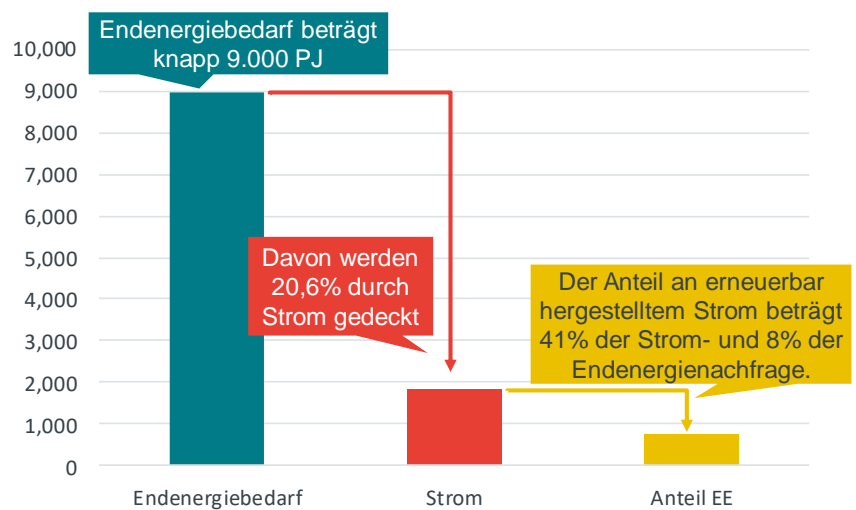


Quelle: Frontier Economics (2018)

Die direkte Verwendung von Strom in batterieelektrischen Fahrzeugen trifft dagegen auf eine Reihe substantieller Herausforderungen:

- Strom aus Erneuerbaren Energien muss – auch ohne zusätzliche Sektorkopplung – konventionelle Stromerzeugung ersetzen:** Derzeit werden bereits große Anstrengungen unternommen, um den Anteil der Erneuerbaren Energien von ca. 41%¹⁰ an der Stromherstellung in Deutschland weiter zu erhöhen. Auf diese Weise soll die Stromerzeugung aus Kohle, Erdgas und Kernenergie komplett ersetzt werden. Mit der zunehmenden Elektrifizierung von zusätzlichen Sektoren wird die Nachfrage nach EE-Strom darüber hinaus ansteigen.

Abbildung 12. Der Anteil erneuerbar hergestelltem Stroms beträgt nur 8% an der Endenergienachfrage



Quelle: AG Energiebilanzen e.V., Werte für 2018



Inländische EE-Mengen begrenzt

Die inländische EE-Stromerzeugung ist wegen limitierter Flächenverfügbarkeit sowie begrenzter EE-Potenziale für die Deckung des deutschen Energiebedarfs in der Realität nicht ausreichend.

- Die Verfügbarkeit inländischer EE-Mengen erscheint zunehmend begrenzt:** Zwar ergeben sich durch die Nutzung Erneuerbarer Energien auch für ein klassisches Importland von fossiler Energie wie Deutschland Möglichkeiten, selbst Energie zu erzeugen und für den Inlandsbedarf bereitzustellen, doch die inländische EE-Stromerzeugung ist wegen limitierter Flächenverfügbarkeit sowie begrenzter EE-Potenziale (relativ wenige Sonnenstunden und geringe Windhöufigkeit) für die Deckung des deutschen Energiebedarfs in der Realität nicht ausreichend (Indikatoren sind z.B. die Diskussionen über Aufstell- und Abstandsregelungen von Windkraftanlagen, den Netzausbau sowie Stromtrassenführungen). Soll Deutschland Industrieland mit fortwährendem Wirtschaftswachstum bleiben, wird der Energiebedarf trotz erheblicher Effizienzanstrengungen gemäß den Erfahrungen aus der Vergangenheit hoch bleiben.

¹⁰ Vgl. https://www.bdew.de/media/documents/2449_Nettostromerzeugung.jpg

- **Zudem gestaltet sich der Import von zusätzlichen Strommengen wegen der limitierten Transportkapazitäten von Strom als schwierig:** Die Energieversorgung für die Sektoren Energie, Industrie, Verkehr u.a. wird derzeit zu einem Großteil durch Importe chemischer Energieträger sichergestellt, bspw. Erdöl(-produkte) für den Straßenverkehr und Öl und Gas für den Wärmesektor und die Industrie. Würde dieser Energiebedarf zukünftig zunehmend über Strom gedeckt, müsste bei limitiertem inländischen Erzeugungspotenzial also in hohem Maße Energie über Stromimporte statt über Importe chemischer Energieträger bereitgestellt werden. Da die Kapazitäten jedoch derzeit nicht einmal ansatzweise in der Höhe vorhanden sind, hätte dies einen enormen Ausbaubedarf der internationalen Stromnetze zur Folge, der prohibitiv teuer wäre. Projekte, bei denen Strom aus entfernten Regionen wie Nordafrika nach Deutschland transportiert werden soll, wie z.B. Desertec, sind aufgrund der Kosten und der fehlenden Wirtschaftlichkeit zunächst gescheitert.



**Stromimporte
wegen limitierter
Transportfähigkeit
problematisch**

Projekte, bei denen Strom aus entfernteren Regionen wie Nordafrika nach Deutschland transportiert werden sollten, sind aufgrund der Stromtransportkosten zunächst gescheitert.

Vor dem Hintergrund der in der Praxis begrenzten EE-Potenziale innerhalb Deutschlands erscheint eine Reduktion der Energienachfrage als einzige Lösung, um eine ausreichende Energieversorgung ansatzweise sicherzustellen.

Dies könnte z.B. durch Verzicht auf Energie, durch Verlagerung von Produktionsprozessen ins Ausland, deren Energieverbräuche dann nicht mehr in die deutschen Energiebilanzen eingehen würden, und/oder durch Fokus ausschließlich auf Technologien, die unter eingeschränktem konventionellen Blickwinkel einen möglichst hohen Wirkungsgrad aufweisen, erfolgen.

Die begrenzte Verfügbarkeit von Erneuerbaren Energien in Deutschland ist somit eine wesentliche **Ursache für die aktuelle Debatte mit einem starken Fokus auf Effizienz und technische Wirkungsgrade.**

Dies führt zu einer Bevorzugung von Technologien mit möglichst wenig Umwandlungsstufen. Die logische Konsequenz: 1. direkte Stromanwendungen werden als das Mittel der Wahl angesehen, und 2. andere klimaneutrale Optionen spielen nur eine nachgelagerte Rolle. Dazu gehören aktuell auch PtL-Produkte als vermeintlich „ineffiziente“ Optionen, zu deren Herstellung weitere verfahrenstechnische Schritte erforderlich sind.

Batterieelektrische Antriebe weisen bei konventioneller Betrachtung stets erhebliche Effizienzvorteile auf

Im Rahmen der Auseinandersetzung um die „richtigen“ Antriebssysteme im Straßenverkehr wird regelmäßig auf diese Effizienz- bzw. Wirkungsgradbetrachtungen für die unterschiedlichen Technologien (batterieelektrische Fahrzeuge, Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellenfahrzeuge etc.) verwiesen.^{11, 12, 13}

Im Extremfall dieser Betrachtungen wird mitunter allein auf die Effizienz der Motoren abgestellt, wonach ein Elektromotor eine Effizienz von ca. 85 bis 90%^{14, 15} aufweist, während Verbrennungsmotoren eine energetische Effizienz von lediglich ca. 25% bis 45% erreichen (Ottomotoren 25% bis 35% und Dieselmotoren 35% bis 45%).¹⁶

Wird die Systemgrenze weiter gezogen und neben der Motoreffizienz auch die Antriebsenergieherstellung (Ladestrom bzw. synthetischer Diesel/synthetisches Benzin) berücksichtigt, sind batterieelektrische Fahrzeuge gegenüber Verbrennungsmotoren auch dann bezüglich der Energieeffizienz im Vorteil: Werden bei Nutzung synthetischer Kraftstoffe die Umwandlungsverluste entlang des Herstellungsverfahrens vom erneuerbarem Strom bis zum PtL-Produkt (synthetischer Diesel, synthetisches Benzin) hinzugerechnet (aus 2 kWh Strom werden ca. 1 kWh synthetischer Kraftstoff), verschlechtert sich die Energiebilanz für Verbrennungsmotoren weiter auf Effizienzwerte in einer Größenordnung von ca. 13% bis 20%.

Werden beim Ladestrom energetische Verluste, z.B. für die Stromspeicherung in der im Fahrzeug eingebauten Batterie, berücksichtigt, kommen einschlägige Quellen immer noch auf eine Effizienz der batterieelektrischen Fahrzeuge von immerhin knapp

¹¹ Vgl. Deutscher Bundestag (2020), Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage[...] der Fraktion DIE LINKE: „Derzeit liegt der Gesamtwirkungsgrad eines Batteriefahrzeugs bei 70 bis 80 Prozent [...] (Annahme 100 % erneuerbare Energiequellen).“

¹² Vgl. Deutscher Bundestag (2019a), Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten [...] der Fraktion Bündnis 90/DIE GRÜNEN: “[...]Vor allem geht bei der Umwandlung von Strom in Kraftstoffe erheblich viel Energie verloren. Dieser Strom könnte in batterieelektrischen Fahrzeugen hingegen direkt und somit wesentlich **effizienter** genutzt werden.[...]“

¹³ Vgl. Deutscher Bundestag (2019b), Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten [...] der Fraktion der FDP: „Aus diesem Grunde [Umwandlungsverluste] sollte mit Blick auf Ökologie und Ökonomie zunächst immer vor einer Verwendung von Wandlungsprodukten eine direkte und **effiziente** Nutzung primärer Energiequellen geprüft werden.“

¹⁴ Vgl. UBA (2015), S.22.

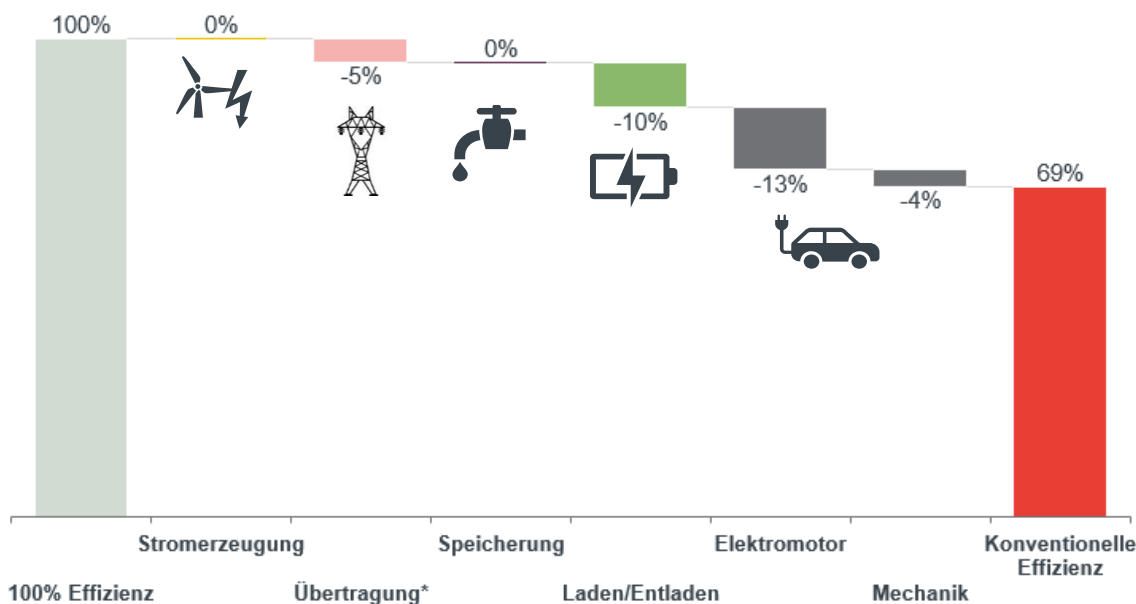
¹⁵ Vgl. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/elektroantrieb/>

¹⁶ Vgl. UBA (2015), S.22.

70% (vgl. **Abbildung 11**).^{17,18} Diese berücksichtigen folgende Faktoren:

- Nutzung des Fahrzeugs: 85% Effizienz¹⁹
- Ladeeffizienz: 90%²⁰
- Mechanik 95%²¹
- Übertragung und Einspeisung Stromnetz: ca. 95%.²²

Abbildung 13. Konventionelle Effizienz eines BEV-Pfads beträgt knapp 70%



Quelle: Frontier Economics basierend auf Acatech et al. (2017)

Hinweis: *Nahtransport von Strom

Dieser Befund verleitet in der politischen Debatte oft zu der Schlussfolgerung, dass PtL-Produkte aus Gründen der Effizienz nur dort einzusetzen seien, wo keinerlei technisch praktikable Alternativen bestehen, wie z.B. im Bereich der Luftfahrt. In Anwendungsfeldern wie dem Straßenverkehr oder der Bereitstellung von Wärme sei aufgrund der im Vergleich zur Direktstromanwendung geringeren energetischen Effizienz von einem Einsatz der entsprechenden PtL-Produkte also abzusehen.

Fraglich ist, ob der dieser politischen Argumentation zugrundeliegende Effizienzbegriff fachlich-objektiv gerechtfertigt ist. Der auf diese Weise definierte Effizienzbegriff greift deutlich zu kurz, da er z.B. die standortabhängig unterschiedlichen Erträge von PV oder Windkraftanlagen komplett außer Betracht lässt. Damit werden

¹⁷ Vgl. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>

¹⁸ Vgl. Acatech et al. (2017).

¹⁹ Vgl. UBA (2015), S 22.

²⁰ Vgl. UBA (2016).

²¹ Vgl. Acatech et al. (2017), Abbildung 5.

²² Frontier Economics basierend auf BDEW 2017.

auch die exemplarisch genannten politischen Schlussfolgerungen auf einer irreführenden Basis getroffen, wie im Folgenden erläutert wird.

Konventionelle Effizienzbetrachtungen lassen unterschiedliche Jahreserträge von Wind und PV außen vor



An außereuropäischen EE-Standorten kann im Vergleich zu Deutschland mit derselben PV- bzw. Windkraftanlage eine vielfache Menge an Erneuerbarem Strom „geerntet“ werden.

Vergleichende Effizienzanalysen für Antriebssysteme im Straßenverkehr verwenden den Effizienzbegriff bisher unter limitierten Prämissen und Blickwinkeln. Das äußert sich in der Grundauffassung, dass für in Deutschland zur Anwendung kommende klimaneutrale Antriebstechnologien der erforderliche EE-Strom ausschließlich in Deutschland produziert und verfügbar gemacht werden muss. Dies ist allerdings, wie bereits oben beschrieben, keine sinnvolle Annahme:

- **Direkte Anwendungen von grünem Strom**, z.B. batterieelektrische Fahrzeuge: Aufgrund der Transport- und Speicherrestriktionen muss der Strom tatsächlich sehr verbrauchsnahe erzeugt werden, also i.d.R. in Deutschland.
- **Indirekte Anwendungen von grünem Strom**, z.B. als synthetische Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren: Der Strom aus Erneuerbaren Energien kann in windreichen und/oder sonnengünstigen Regionen wie z.B. Nordafrika, Südamerika oder Australien gewonnen und zu synthetischen Kraftstoffen verarbeitet werden. Die Produkte können anschließend auf relativ einfache Weise nach Deutschland bzw. Europa transportiert werden.

Dieser Unterschied hat einen massiven Einfluss auf die Ertragseffizienz der Energiebereitstellung. An den günstigen außereuropäischen EE-Standorten kann im Vergleich zu Deutschland mit derselben PV- bzw. Windkraftanlage eine vielfache Menge an Erneuerbarem Strom „geerntet“ werden. Dieser Unterschied im Ertrag bei der Energiegewinnung sollte zwingend in die Analysen zur technischen Effizienz von Antriebssystemen im Straßenverkehr eingehen (siehe Berechnungen in den Abschnitten 4 und 5).

Zudem werden häufig weitere in der Praxis relevante Faktoren vernachlässigt

In konventionellen Effizienzbetrachtungen werden darüber hinaus eine Reihe von in der Praxis relevanten Faktoren nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Hierzu gehören z.B.

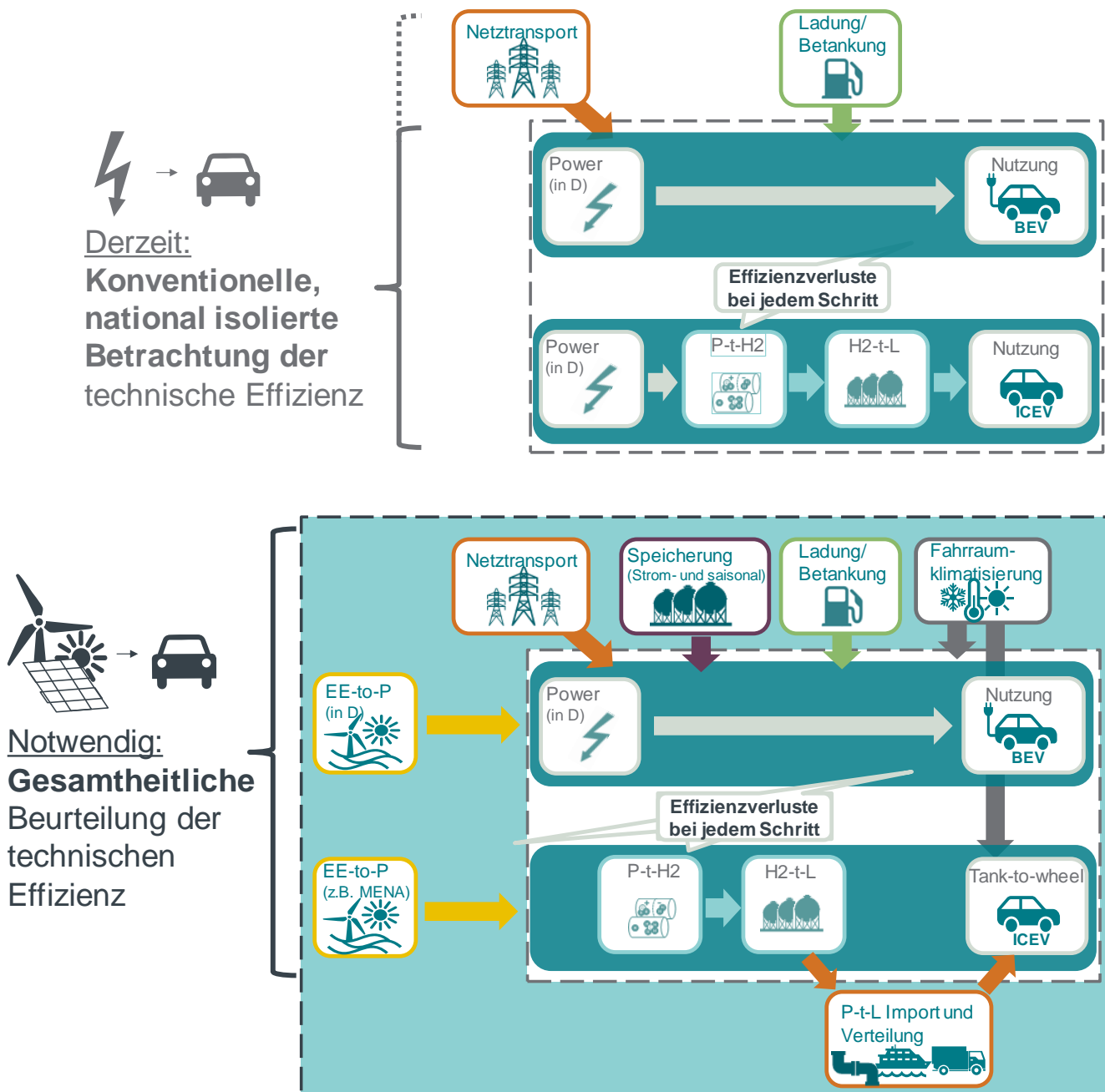


(Saisonal)
Energiespeicherbedarf ist
ein essenzieller, aber
häufig vernachlässigter
Faktor.

- **Energieverluste beim Transport:** Sowohl bei Strom (in größerem Ausmaß) als auch bei synthetischen Kraftstoffen (Benzin/Diesel) fallen bei Transport und Verteilung Energieverluste bzw. Energiebedarfe an.
- **Verluste bei der Energiespeicherung:** Die Verfügbarkeit von erneuerbar erzeugtem Strom ist im Jahresverlauf sehr unterschiedlich. So fällt die Stromproduktion, bspw. von PV-Anlagen, in Deutschland im Winterhalbjahr deutlich niedriger aus als im Sommerhalbjahr. Dementsprechend ist eine saisonale Speicherung des Stroms erforderlich, die wiederum mit Effizienzverlusten einhergeht. Dies gilt nicht für chemische Energieträger wie Diesel oder Benzin, die sich einfach und mit nahezu vernachlässigbaren Verlusten speichern lassen.
- **Ladeverluste bei batterieelektrischen Fahrzeugen:** Beim Laden von Batterien fallen z.T. erhebliche Ladeverluste an. Dies gilt insbesondere beim Schnellladen der Batterien, mit der eine gewisse (aber bei weitem keine vollständige) Angleichung des Nutzungskomforts der Fahrzeuge erreicht werden soll.
- **Energiebedarf zur Innenraum-Klimatisierung der Fahrzeuge:** Häufig unterschätzt wird der Energiebedarf zur Klimatisierung von Fahrzeugen. Während im Sommer sowohl bei batterieelektrischen Fahrzeugen als auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zusätzliche Energie für die Kühlung des Innenraums der Fahrzeuge verwendet werden muss, kann im Winter bei Verbrennungsmotoren die Abwärme des Motors für die Beheizung des Innenraums verwendet werden. Hierbei weist ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor Effizienzvorteile auf, da die Abwärme des Motors teilweise nicht direkt in die Umgebungsluft abgegeben wird, sondern für die Klimatisierung genutzt werden kann.

Erforderlich ist demnach eine **gesamtheitliche Analyse der technischen Effizienz** verschiedener Antriebsysteme, unter Berücksichtigung aller erforderlichen Prozesse und bei Einhaltung eines möglichst gleichmäßigen Nutzungskomforts für die Nutzer (vgl. **Abbildung 14**). Dabei ist die Effizienz der Stromgewinnung genauso zu betrachten wie Umwandlungs-, Transport-, Speicher- und Anwendungsverluste. Diesen Ansatz verfolgen wir in den folgenden Abschnitten 3 und 4.

Abbildung 14. Gesamtheitliche Effizienz berücksichtigt alle Umwandlungsstufen und internationale EE-Potenziale.



Quelle: Frontier Economics

3. WIR MODELLIEREN DIE GESAMTHEITLICHE EFFIZIENZ VON ANTRIEBSSYSTEMEN ENTLANG DER GESAMTEN WERTSCHÖPFUNGSKETTE

In den folgenden Abschnitten (Kapitel 4 und 5) berechnen wir die Effizienzen von BEVs und ICEVs, die mit „grünen“ synthetischen Kraftstoffen betrieben werden. Wir erfassen hierbei alle Energieumwandlungsstufen bezogen auf das jeweilige Antriebssystem: Beim BEV betrachten wir den Energiepfad von der Gewinnung der Erneuerbaren Energien (EE) bis zur Nutzung des Ladestroms im BEV, beim ICEV den Energiepfad von der EE-Gewinnung über die Herstellung von PtL ebenfalls bis zur Nutzung in den Verbrennungsmotoren). Die erfassten Umwandlungsschritte sind somit:

- **Herstellung des Stroms** (erneuerbarer Strom) – hier wird der tatsächliche Stromerntefaktor oder -ertrag, der u. a. vom Standort der Erneuerbaren Energien abhängig ist, zugrunde gelegt;
- **Umwandlung** und entsprechende -verluste bei der Herstellung synthetischer Kraftstoffe;
- **Transport der Antriebsenergie** – Energieverluste sind hier v.a. im Bereich Strom relevant;
- **Saisonale Speicherung** von Strom: Umwandlungsverluste bei der Herstellung von Wasserstoff und Umwandlungsverluste bei der Rückverstromung;
- **Nutzung des Fahrzeugs:** Hierzu gehören
 - Antrieb der Fahrzeuge, also Effizienz der jeweiligen Antriebsart;
 - Speicherung der Energie (z.B. Batteriespeicherverluste);
 - Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums über das gesamte Jahr und damit einhergehende Energiebedarfe (z.B. durch den Gebrauch von Klimaanlage im Sommer) oder -gewinne (etwa durch die (teilweise) Nutzung von Abwärme bei Verbrennungsmotoren);
 - Energieverluste beim Laden der Fahrzeuge (v.a. im Bereich Strom relevant); Berücksichtigung der

zusätzlichen Verluste beim Schnellladen durch erforderliche Zwischenspeicherung.

Damit gehen wir, insbesondere mit dem Schritt der Energiegewinnung über Erneuerbare Energien, über die bisherigen Analysen hinaus.

ABGRENZUNG KONVENTIONELLE VS. GESAMTHEITLICHE EFFIZIENZBERECHNUNG

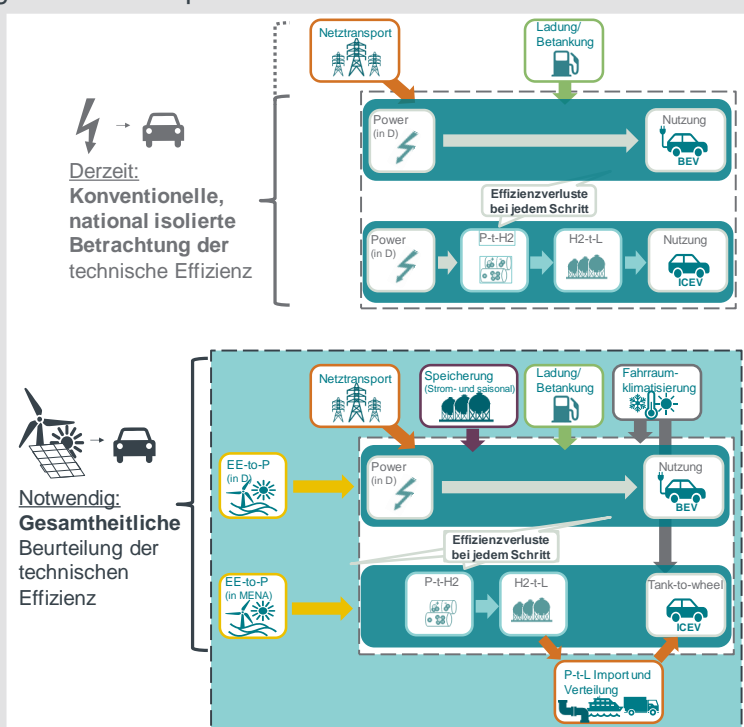
In dieser Studie weisen wir durchgängig die Unterschiede zwischen dem konventionellen und dem gesamtheitlichen Ansatz für die technische Effizienzanalyse aus. Wie in Kapitel 2 beschrieben, gibt es derzeit nicht eine feststehende Definition des konventionellen Ansatzes. Insbesondere in Bezug auf den BEV-Pfad fokussieren manche Analysen gänzlich auf die Effizienz des Motors, während andere einige weitere Faktoren der Fahrzeugnutzung und damit bspw. auch Ladeverluste der Batterie berücksichtigen.

Wir definieren den **konventionellen Ansatz** als Analyse, die folgende Wertschöpfungsstufen beinhaltet:

- In Deutschland hergestellter EE-Strom;
- Stromnetzübertragung;
- PtL-Herstellung und Transport in Deutschland;
- Ladeverluste;
- Fahrzeugverbrauch bei ca. 20° C.








Wir berücksichtigen in unserer **gesamtheitlichen Analyse** zusätzlich:

- Standortabhängige **Stromertrags-effizienz** der Herstellung des Stroms, z.B. aus solarer Strahlungsenergie und/oder Windenergie, internationale PtL-Erzeugung und Transport;
- die saisonunabhängige Nutzung der Fahrzeuge und somit **saisonale Speicherung** des Stroms; und
- die **Klimatisierung** des Fahrzeugs.



Unsere Annahmen und Varianten sind in der Übersichtstabelle (**Abbildung 15**) aufgeführt und orientieren sich an einschlägigen Quellen und eigenen Abschätzungen.

Abbildung 15. Annahmen und Varianten

Varianten, die unterschiedliche Effizienzverluste mit sich bringen		
Wertschöpfungsstufen	Energiepfad bis zum BEV	Energiepfad bis zum ICEV / (Mild) Hybrid
 Standort Energieherstellung	• Deutschland	• Patagonien • Nordafrika/ Marokko
 Erneuerbare Energien		Wind, PV, Wind-PV-Kombination
 Umwandlung	-	• P-t-H2 (Niedrigtemp. Elektrolyse) • <i>Sensitivität: Hochtemp. Elektrolyse</i> • H2-t-L-t-Fuel
 Transport	Stromleitungsnetz	Diesel/Benzin per Tanker und LKWs
 Speicherung	• Speicherung P-t-H2-t-P	• Als Flüssigkraftstoff, damit keine Effizienzverluste
 Ladung	• AC- und DC- Durchschnitt • <i>Sensitivitäten: weniger/mehr Verluste</i>	Exkl. stationäre Batteriespeicher, die für die Leistungsbereitstellung bei Schnellladungen nötig ist*
 PKW Klassen		• Mittelklasse, bspw. Ford Ficus
Außentemperatur & Topografie	• Jahresdurchschnitt: WLTP-Verbrauch (Testbedingungen bei 23°C) ergänzt um Heiz- und Kühlbedarf • <i>Sensitivität: Mehrverbrauch durch Heizbedarf im Winter (ca. 0°C) und in der Stadt</i>	

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: *Bei DC-Ladungen mit hoher Leistung, müssen Strommengen per lokalem stationärem Speicher an einer Tankstelle vorgehalten werden. Dabei können abhängig von vielen Faktoren wie bspw. der Speicherdauer ebenfalls Speicherverluste auftreten. Da diese Ladevorgänge derzeit noch Ausnahmen darstellen, berücksichtigen wir diesen Speicherverlust in dieser Studie nicht.

Standortspezifische Faktoren der EE-Stromerzeugung erfassen wir in der „Ertragseffizienz“

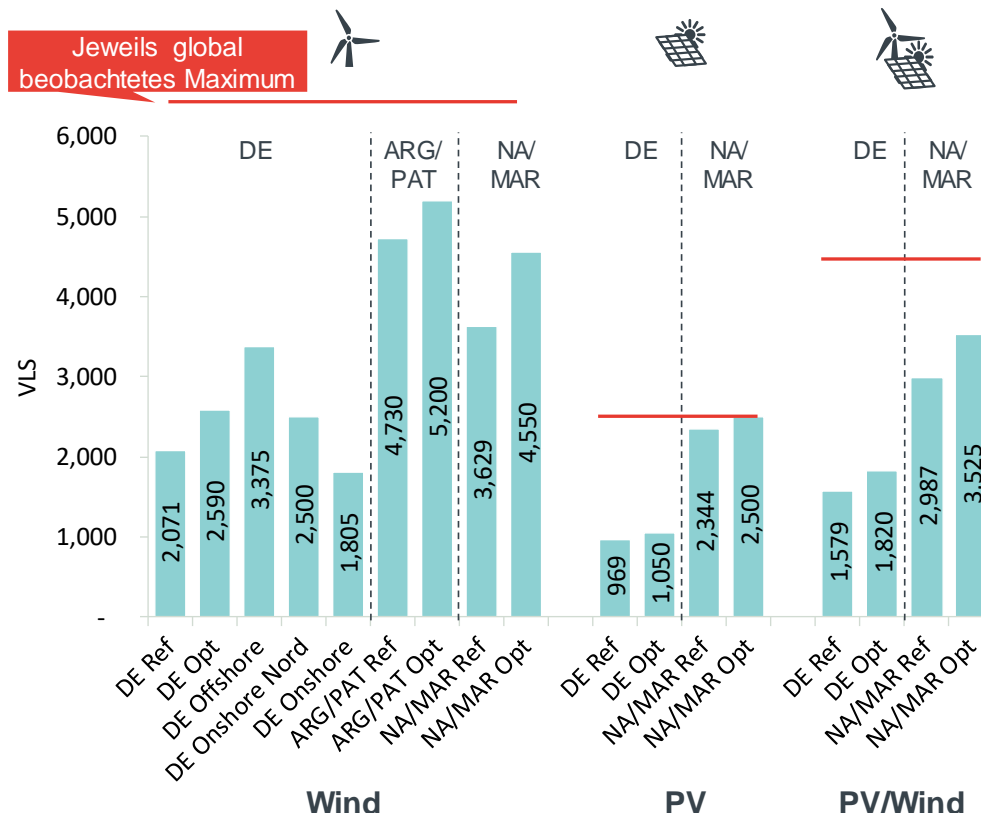
In den gängigen Studien zu Energieeffizienzen wird i.d.R. unterstellt, dass der erneuerbar hergestellte Strom, der in batterieelektrischen Fahrzeugen wie auch zur Herstellung von PtL-Produkten eingesetzt wird, in Deutschland erzeugt wird.

Bei dieser Annahme wird ignoriert, dass sich PtL-Produkte aufgrund ihrer hohen Energiedichten unter atmosphärischen Umgebungsbedingungen im Gegensatz zu Strom auch über sehr weite Distanzen effizient transportieren lassen. PtL-Produkte ermöglichen somit, die weltweit vorhandenen, deutlich höheren EE-Ertragspotenziale nahezu unabhängig von ihrem geografischen Standort für Anwendungen in allen Regionen, auch in Deutschland, nutzbar zu machen.

Stromertragspotenziale und daher auch Volllaststunden von EE-Anlagen variieren erheblich je nach Standort und gehen aus der Anzahl der Sonnenstunden und der Windhöffigkeit hervor. Das

bedeutet, dass mit der gleichen Windkraft- oder PV-Anlage abhängig vom Standort unterschiedlich viel Strom erzeugt werden kann. Umgekehrt ausgedrückt müssen für eine bestimmte, mit einem spezifischen Fahrzeug zurückgelegte Strecke unterschiedlich viele Windkraft- und PV-Anlagen errichtet werden.

Abbildung 16. Volllaststunden nach EE-Technologie mit Sensitivitäten



Quelle: Frontier Economics basierend auf BMWi (2020), BDEW (2020), Fraunhofer ISE (2018), EVWind (2019), FZ Jülich (2017), Roland Berger/Prognos (2019).

Hinweis: Opt = Optimistisches Szenario, Ref = Referenzszenario

Konventionelle Effizienzvergleiche beginnen jedoch die Effizienzberechnung erst bei der hergestellten kWh Strom und berücksichtigen daher nicht die voneinander abweichenden Volllaststunden (VLS) und Stromerträge. Mit dieser begrenzten Analyseperspektive ist daher ein sinnvoller Vergleich der EE-Mobilitätslösungen BEVs und mit PtL betriebenen ICEVs nicht möglich.

Für eine vollständige Effizienzbetrachtung erfassen wir diesen Faktor in der folgenden Analyse. Da die Volllaststunden auf unterschiedlichen EE-Ertragspotenzialen basieren, sollte in einer Effizienzanalyse auch der Stromerzeugungsstufe ein Effizienzscore – eine „(Strom-)Ertragseffizienz“ – zugeordnet werden.

Um die Volllaststunden in einen Effizienzscore (Ertragseffizienz) zu übersetzen, ist ein Benchmark notwendig, der die jeweiligen erzielten Volllaststunden ins Verhältnis setzt. Wir verwenden hier als

Benchmark für 100%ige Effizienz von PV- und Wind-Anlagen jeweils die maximalen Volllaststunden, die aktuell weltweit mit der jeweiligen Technologie erreicht werden können. Für PV-Anlagen sind dies 2.500 h (bspw. in der südamerikanischen Atacama-Wüste) und für Wind-Anlagen 6.500 h (bspw. Patagonien, Tibet).²³



Hohe Volllaststunden bei der Stromerzeugung führen zu hohen EE-Ertragseffizienzen, die bei den gesamtheitlichen Effizienzanalysen eine zentrale Rolle spielen.

- Erreicht eine **PV**-Anlage also beispielsweise 2.344 Volllaststunden (kWh/kW) wie in Nordafrika/Marokko, liegt die kalkulierte Ertragseffizienz nach unserer Definition bei 94% ($= 2.344\text{h}/2.500\text{h} \cdot 100\%$), bzw.
- erreicht eine **Wind**-Anlage beispielsweise 3.629 kWh/kW wie in Nordafrika/Marokko, liegt die kalkulierte Ertragseffizienz bei 56% ($= 3.629/6.500 \cdot 100\%$).
- Bei der Effizienzbetrachtung einer Wind-PV-Kombination ergeben sich die Volllaststunden durch den **gewichteten Durchschnitt an installierten Anlagen** und liegen damit zwischen den Volllaststunden der jeweiligen Einzeltechnologien. Statt wie zuvor zu berechnen, wie viel kWh(el) durch 1 kW installierte Leistung von Wind oder PV erzielt werden, wird bei der Wind-PV-Kombination untersucht, wie viel kWh(el) durch die Installation von 1 kW Leistung insgesamt an Wind und PV erzeugt wird, also etwa eine 0,5 kW Wind-Anlage und 0,5 kW PV-Anlage. Dies bedeutet für eine Wind-PV-Kombination in Nordafrika/Marokko eine Ertragseffizienz von 75% ($= 0,5 \cdot 56\% + 0,5 \cdot 94\%$).

Zum Vergleich: Konventionelle Effizienzanalysen nehmen durch die Vernachlässigung der unterschiedlichen Erträge fälschlicherweise implizit standortübergreifend eine Ertragseffizienz von 100% an.

Eine Reihe von Studien – u.a. von Frontier Economics²⁴ – zeigen, dass es eine Vielzahl von möglichen und attraktiven Erzeugungszentren weltweit für PtL-Produkte gibt. Die EE-Potenziale dieser Länder bzw. Regionen sind enorm und können teilweise durch PtX-Exporte auch für Deutschland und Europa nutzbar gemacht werden.

Um die Analyse übersichtlich zu halten, fokussieren wir uns in der vorliegenden Studie exemplarisch auf folgende Standorte für die Stromerzeugung (vgl. **Abbildung 17**):

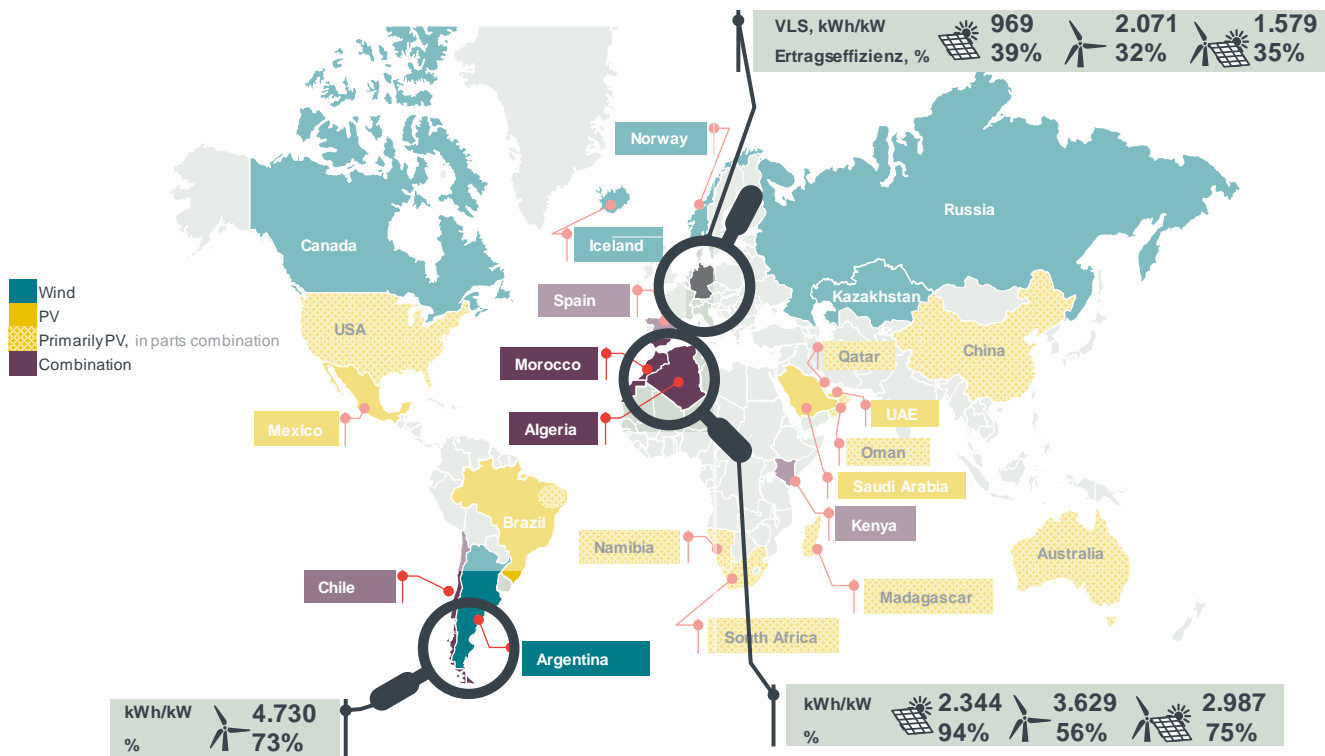
- **EE-Strom für BEVs:** Deutschland (PV, Wind und PV-Wind-Kombination)
- **EE-Strom für PtL:** Zum einen Nordafrika/Marokko als kostengünstiger EE-Standort mit großer Nähe zu Europa und hohen EE-Potenzialen (PV, Wind und PV-Wind-Kombination), zum anderen Argentinien/Patagonien als

²³ Vgl. Fasihi und Breyer (2020), Seite 7.

²⁴ Siehe Frontier Economics (2018).

Beispiel für eine weiter entfernte Produktionsregion mit sehr guten Bedingungen für die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien, ebenfalls ausgestattet mit großen EE-Potenzialen (hier Fokus auf Wind-Onshore).

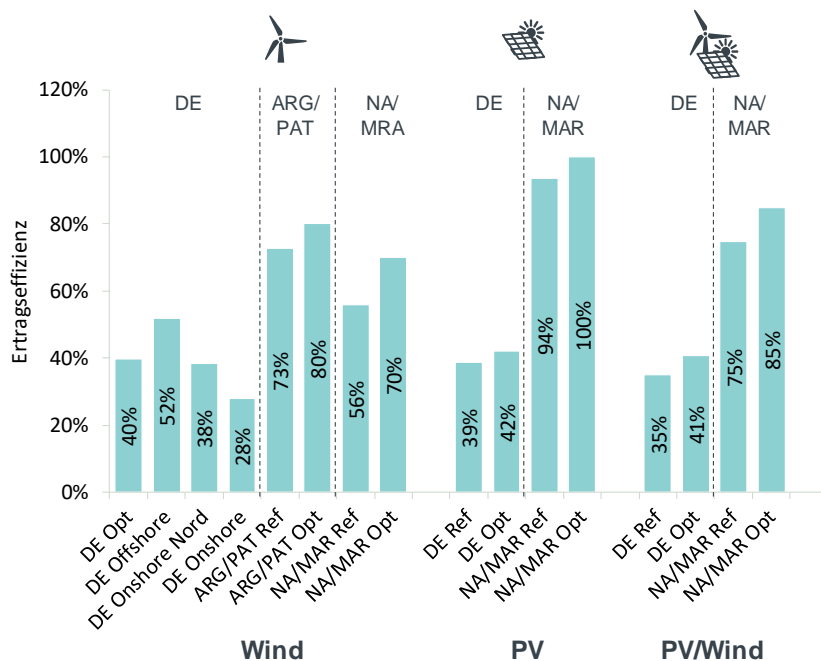
Abbildung 17. Referenzszenarien – Volllaststunden (in kWh/kW) und Effizienzscore (in %) nach Region



Quelle: EE-Potenziale auf Länderebene: Frontier Economics (2018); VLS: D – PV/Wind/Mix: Berechnet von Frontier auf Basis von BMWi (2020) - Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energie in Deutschland; Berechnet auf Basis der tatsächlichen Ertragseffizienz der Technologien; Wind: Onshore Anteil 90% und Offshore Anteil 10%, Mix: 50:50 Verhältnis zwischen Wind und PV. Nordafrika/Marokko-PV/Wind/Mix: Frontier Economics basierend auf Agora und Frontier Economics (2018) und Experteninterviews. Argentinien/Patagonien-Wind: Frontier Economics basierend auf EVwind (2020) – Wind energy in Argentina: YPF wind farm

Ergänzend werden in **Abbildung 18** auch die Ertragseffizienzen weiterer Szenarien dargestellt.

Abbildung 18. Ertragseffizienz nach EE-Technologie mit Sensitivitäten



Quelle: Frontier Economics basierend auf BMWi (2020), BDEW (2020), Fraunhofer ISE (2018), EVWind (2019), FZ Jülich (2017), Roland Berger/Prognos (2019).

Hinweis: Opt = Optimistisches Szenario, Ref = Referenzszenario

Mehrstufige Energieumwandlung der PtL Herstellung:

Verluste bei der Umwandlung von Strom zu Flüssigkraftstoffen sind bereits Gegenstand der aktuellen Debatte zur technischen Effizienz von Antriebstechnologien. Erforderlich ist die Energieumwandlung von Strom zu Wasserstoff (P-t-H₂) und von Wasserstoff zum Flüssigkraftstoff (H₂-t-L):

- **P-t-H₂**: Bei der Umwandlung von EE-Strom zu Wasserstoff gehen wir in unserem ICEV-Referenzszenario von einer Niedrigtemperatur Elektrolyse (NT) mit einem Wirkungsgrad von 67% aus.²⁵ Dies entspricht dem heutigen Stand der Technik. Dabei kann es sich um eine PEM- oder eine alkalische Elektrolyse handeln.
- **H₂-t-L**: Für die Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu Flüssigkraftstoff (z.B. per Fischer-Tropsch-Synthese) und das „Upgrading“ zu Diesel oder Benzin in Raffinerien unterstellen wir einen Wirkungsgrad von 73%.²⁶

²⁵ Frontier Economics basierend auf Agora und Frontier Economics (2018) und Experteninterviews.

²⁶ Frontier Economics basierend auf Agora und Frontier Economics (2018), Experteninterviews, Brynolf et al. (2018) für den Wirkungsgrad der Fischer-Tropsch-Synthese. Das dafür notwendige CO₂ kann entweder aus Industrieabgasen oder aus der Luft (Direct Air Capture) gewonnen werden.

Effizienzverluste des Energietransports und der Verteilung von geringerer Bedeutung

Wir gehen davon aus, dass die E-Fuels in den ICEV-Szenarien sowohl von Nordafrika/Marokko wie auch aus Argentinien/Patagonien mit Tankschiffen nach Deutschland transportiert werden. Der Energiebedarf liegt hier zwischen 0,2% und 1% der transportierten Energiemenge.²⁷ Für die Verteilung innerhalb Deutschlands veranschlagen wir pauschal einen Bedarf von zusätzlich 1%.

Für die direkte Verwendung von Strom in batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV-Szenarien) veranschlagen wir Netzverluste für Transport und Verteilung von 5%.²⁸

Saisonaler Speicherbedarf für die durchgängige Versorgung mit Antriebsenergie darf nicht unterschätzt werden

Speicherbedarf entsteht, wenn Energieproduktion und -nachfrage zeitlich verschoben sind. Die Dargebotsabhängigkeit von Strom aus Wind und Sonne stellt das zukünftige Energiesystem in Kombination mit der Saisonalität der Energienachfrage vor große Herausforderungen. Selbst unter der vereinfachten Annahme einer konstanten Ladestromnachfrage im elektrifizierten Personenstraßenverkehr, entsteht durch Schwankungen der Energiebereitstellung Speicherbedarf.

Zwischenspeicherung von Strom ist immer mit Effizienzverlusten verbunden und sollte somit Bestandteil einer Effizienzbetrachtung sein.

In unserem gesamtheitlichen Ansatz abstrahieren wir für die Ladestrom-Versorgung von **BEVs** weitestgehend von kurz- und mittelfristigem Speicherbedarf von Stunden oder Tagen und fokussieren die Analyse auf saisonalen Speicherbedarf. Wir gehen von P-to-H₂-to-P als saisonalen Speicher aus, da es für die saisonale Speicherung derzeit und absehbar keine Alternative zur Speicherung mittels chemischer gasförmiger oder flüssiger Energieträger gibt. Diese Umwandschritte gehen gemäß unseren Annahmen mit Effizienzverlusten von 64% einher (nur bezogen auf die zu speichernde Energiemenge, nicht den Gesamtverbrauch). Dieser Wert basiert auf den folgenden Annahmen zu Effizienzen der verschiedenen Schritte der Zwischenspeicherung:

- 67% P-t-H₂ Umwandlungseffizienz des Elektrolyseurs;
- 90% Effizienz durch die Wasserstoffspeicherung²⁹; und



Energiespeicherbedarfe werden in der Zukunft mit ansteigenden EE-Anteilen am Stromaufkommen weiter zunehmen.

²⁷ Berechnet auf Basis von <http://hb.hr/wp-content/uploads/2014/12/tankers.pdf> und <https://www.searates.com/services/distances-time/>.

²⁸ BDEW (2017a).

²⁹ Vgl. Fraunhofer UMSICHT (2013), S. 50-51.

- 45% H2-t-P Wirkungsgrad basierend auf Annahmen für H2-Gaskraftwerke.

Die Ladestrommenge, die zwischengespeichert werden muss, ist vom saisonalen Profil von EE-Angebot und Nachfrage abhängig:

- Wir nehmen vereinfachend eine **konstante Energienachfrage** des Pkw-Verkehrs über das Jahr an.
- Dagegen ist die **Energieproduktion** von EE-Anlagen in Deutschland **im Jahresverlauf schwankend** und verursacht daher für eine ausreichende Versorgung der Mobilitätsnachfrage Speicherbedarf:
 - **PV-Anlagen** produzieren im Sommer wesentlich mehr Strom als im Winter. Bei einer überwiegenen Stromversorgung mit PV-Anlagen muss also ein Teil des im Sommer erzeugten Stroms für den Winter gespeichert werden. Wir nehmen an, dass bei einer reinen PV-Lösung 15%³⁰ des Jahresendenergiebedarfs zwischengespeichert werden müssen. Dies führt zu einer Effizienz auf dieser Wertschöpfungsstufe von 68%.
 - Die Stromerzeugung von **Windkraftanlagen** ist etwas gleichmäßiger übers Jahr verteilt, wobei im Winter etwas mehr Strom als im Sommer erzeugt wird. Bei einer Windstromversorgung muss also im Winter erzeugte Energie für die Sommermonate nutzbar gemacht werden. Wir gehen von 10% des Jahresendenergiebedarfs aus. Dies führt zu einer Effizienz auf dieser Wertschöpfungsstufe von 79%.
 - Wird das Gros der Strommenge durch die Kombination aus **PV und Wind** erzeugt, gleicht der Windüberschuss im Winter den PV-Stromüberschuss im Sommer teilweise aus. Dennoch verbleibt ein Stromüberschuss im Sommer. Bei einem Mix von beiden Technologien (50:50) nehmen wir an, dass nur 5% des Jahresendenergiebedarfs zwischengespeichert wird. Dies führt zu einer Effizienz auf dieser Wertschöpfungsstufe von 86%.

Bei den **ICEVs** kann gleichermaßen Speicherbedarf entstehen. Allerdings können flüssige Kraftstoffe ohne nennenswerte Verluste zwischengespeichert werden. Für ICEV-Szenarien sind Effizienzverluste durch saisonale Speicherung daher vernachlässigbar.

³⁰ Die Schätzungen für den Speicherbedarf beruhen auf unseren modellbasierten Analysen des Speicherbedarfs im Szenario „Strom und Gasspeicher“, vgl. Frontier Economics et al. (2017).

10% bis 30% Ladeverluste

sind bei batterieelektrischen Fahrzeugen zu berücksichtigen.

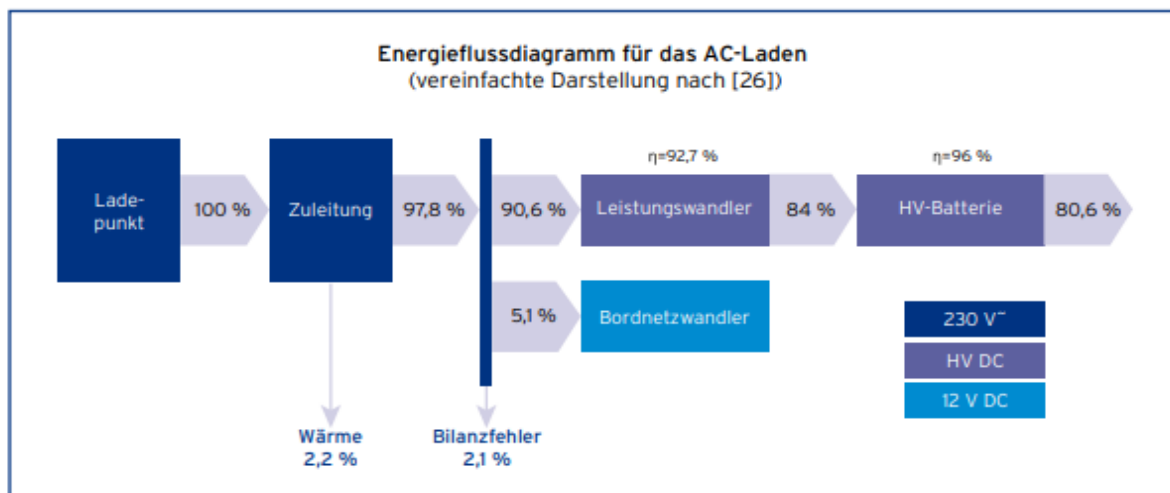
Ladeverluste sind beim BEV-Pfad unabhängig von AC- oder DC-Ladung zu berücksichtigen

Beim Laden der Batterie fallen Ladeverluste im Gegensatz zum Tankvorgang bei einem ICEV an. Diese liegen in der Regel zwischen 10% und 30%³¹ (es werden auch weitere Bandbreiten von 5% bis 40% genannt).³² Generell gilt hierbei, dass die Verluste mit der Geschwindigkeit des Ladevorgangs steigen. Wird ein BEV also über eine leistungsstarke DC-Schnellladesäule geladen, geht mehr Energie verloren als bei einer AC-Ladung, bspw. beim Heimladen mit meist 11 kW Ladeleistung.

Bei einer AC-Ladestation fallen die Verluste durch das im BEV eingebaute Ladegerät (Onboard Charger) räumlich innerhalb des Fahrzeugs an, beim Schnellladen an einer DC-Ladestation außerhalb des Fahrzeugs, also in der Ladesäule. Deswegen werden in manchen Analysen lediglich die Ladeverluste für AC-Ladungen berücksichtigt, also die Ladeverluste hinter der Schnittstelle mit der Ladesäule.

Da wir nicht nur die Effizienz eines batterieelektrischen Fahrzeugs, sondern den gesamten BEV-Pfad von den Erneuerbaren Energien über Ladestrom bis hin zur Fahrzeugnutzung analysieren, berücksichtigen wir sowohl bei AC- als auch bei DC-Ladevorgängen alle Ladeverluste. Wir nehmen für das Referenzszenario durchschnittliche Ladeverluste von **20%** an.

Abbildung 19. Beispieldarstellung für die Ladeverluste beim AC-Laden



Quelle: BMVI und NOW GmbH (2016)

³¹ Vgl. ifeu und Wuppertal Institut (2007), S. 6.

³² Vgl. BMVI und NOW GmbH (2016), S. 68.

Effizienz während der Fahrzeugnutzung umfasst nicht nur den Energieverbrauch zur Streckenbewältigung, sondern auch zur Fahrraumklimatisierung über das ganze Jahr

Im **konventionellen Effizienzansatz** wird häufig lediglich die Motoreffizienz berücksichtigt. Wird diese z.B. mit 85% angegeben (vgl. Seite 24 ff.), sind hier Faktoren wie nicht optimales Fahrverhalten, Wetterbedingungen und Nutzung von elektrischen Verbrauchern wie Media/Radio, Heizung und Klimaanlage üblicherweise nicht berücksichtigt.



Die Heizung bei Elektroautos reduziert durch ihren Strombedarf die Reichweite. Kurzstrecken und jeweils erneutes Aufheizen führen zu erhöhtem Energiebedarf.

<https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/elektroantrieb/>

In unserem **gesamtheitlichen Ansatz** nehmen wir den Aspekt der Außentemperatur und entsprechenden Klimatisierungsbedarf zusätzlich mit auf. Während das Fahrverhalten sehr individuell ist, kann ein durchschnittlicher Heiz- und Kühlungsbedarf anhand von Temperaturprofilen abgeleitet werden. Dieser führt zu einem Reichweitenverlust von 15% bei einem batterieelektrischen Referenzfahrzeug³³. Auch auf ICEVs wirkt sich dieser aus, wenn auch in geringerem Maße von 4%³⁴, da die Abwärme für die Beheizung des Innenraums der Fahrzeuge genutzt werden kann. Insgesamt ergibt sich somit eine Effizienz der Fahrzeugnutzung von

- **71% für BEVs³⁵** und
- **29% für ICEVs³⁶**.

³³ Den Berechnungen zugrunde liegen: Temperaturprofile für Deutschland aus den Jahren 2015 bis 2019, ein angenommener Heizbedarf bei Außentemperaturen von unter 15°C und Kühlungsbedarf bei über 19°C (vgl.

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1031883/umfrage/entwicklung-der-temperatur-im-auto-nach-standzeit-und-aussentemperatur/>, basierend auf Dr. Andrew Grundstein, American Meteorological Society 2010) sowie ein Reichweitenverlust von **BEVs** durch Heizung von durchschnittlich 18% und durch Kühlung von durchschnittlich 14% (vgl. Doyle und Muneer (2019)). Unser Ergebnis fällt auch in die Bandbreite an Reichweitenverlusten für BEVs, die sich laut Expertenangaben zwischen jährlich durchschnittlich 11,2% bei Wärmepumpen und 25,6% bei PTC Heatern bewegt.

³⁴ Den Berechnungen zugrunde liegen: Temperaturprofile für Deutschland aus den Jahren 2015 bis 2019, ein angenommener Heizbedarf bei Außentemperaturen von unter 15°C und Kühlungsbedarf bei über 19°C (vgl.

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1031883/umfrage/entwicklung-der-temperatur-im-auto-nach-standzeit-und-aussentemperatur/>, basierend auf Dr. Andrew Grundstein, American Meteorological Society 2010) sowie ein Mehrverbrauch von **ICEVs** von 2% für Heizungsbedarf und 15% für Klimatisierungsbedarf (vgl. [https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/](https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/auto-klimaanlagen/)).

³⁵ 71% ergeben sich aus einer Antriebseffizienz von 83% für ein BEV (Fortbewegungseffizienz inkl. Verluste durch Batterithermomanagement und Gebrauch von Nebenaggregaten wie Licht, Radio, vgl. bspw. Acatech et al. (2017)) gemindert durch einen Reichweitenverlust von 15%, d.h. $71\% = 83\% \cdot (1-15\%)$. Für die Ermittlung der zu installierenden EE-Erzeugungsleistung (vgl. Kapitel 4) verwenden wir einen Gesamtstromverbrauch inkl. Reichweitenverlust durch Klimatisierung von 20,1 kWh_{el}/100km.

³⁶ Wie bei den BEVs ergibt sich dieser Wert aus der Antriebseffizienz gemindert durch die 4% Mehrverbrauch. Als entsprechenden Gesamtverbrauch setzen wir für die Ermittlung der zu installierenden EE-Erzeugungskapazität (vgl. Kapitel 4) 4,8 l_{diesel}/100 km an.

4. BEI GESAMTHEITLICHER BETRACHTUNG RÜCKT DIE TECHNISCHE EFFIZIENZ VON BEVS UND ICEVS ZUSAMMEN

Bei der gesamtheitlichen Effizienzanalyse zeigen sich wesentliche Unterschiede zu einem Ansatz mit einer engeren (konventionellen) Betrachtung. Im Folgenden zeigen wir die Ergebnisse unserer Effizienzberechnungen

- sowohl bzgl. der Effizienz (Angaben in %);
- als auch bzgl. des damit einhergehenden Bedarfs an zu installierenden PV- und Wind-Anlagen (Angaben in kW).

Bei einer gesamtheitlichen Perspektive ergibt sich eine deutlich geringere Effizienz des BEV-Pfads, und der Unterschied zum ICEV-Pfad reduziert sich erheblich

Die gesamtheitliche Effizienz von BEVs, die mit grünem in Deutschland hergestelltem Ladestrom angetrieben werden, und ICEVs, die mit importierten grünen synthetischen Kraftstoffen angetrieben werden, liegen abweichend von der konventionellen Betrachtung sehr nahe beieinander (vgl. **Abbildung 20**):

- Bei der **konventionellen Betrachtung** ergibt sich zunächst eine um den Faktor **5,4 höhere Effizienz für BEVs** im Vergleich zu ICEVs.
- Auf Basis des **gesamtheitlichen Effizienzansatzes** zeigt sich, dass BEVs relativ zu ICEVs weniger Effizienzvorteile haben als häufig angenommen. Statt einer 5,4-mal höheren Effizienz von BEVs gegenüber ICEVs liegt der Faktor mit der Stromerzeugungstechnologie
 - **Wind** (Stromerzeugung im BEV-Szenario in Deutschland und im ICEV-Szenario in Argentinien/Patagonien) bei **1,4**;
 - **PV** (BEV-Szenario in Deutschland und im ICEV-Szenario in Nordafrika/Marokko) bei **1,1**; und
 - **PV-Wind-Kombination** (BEV-Szenario in Deutschland und ICEV-Szenario in Nordafrika/Marokko) bei **1,6** (siehe **Abbildung 20**).

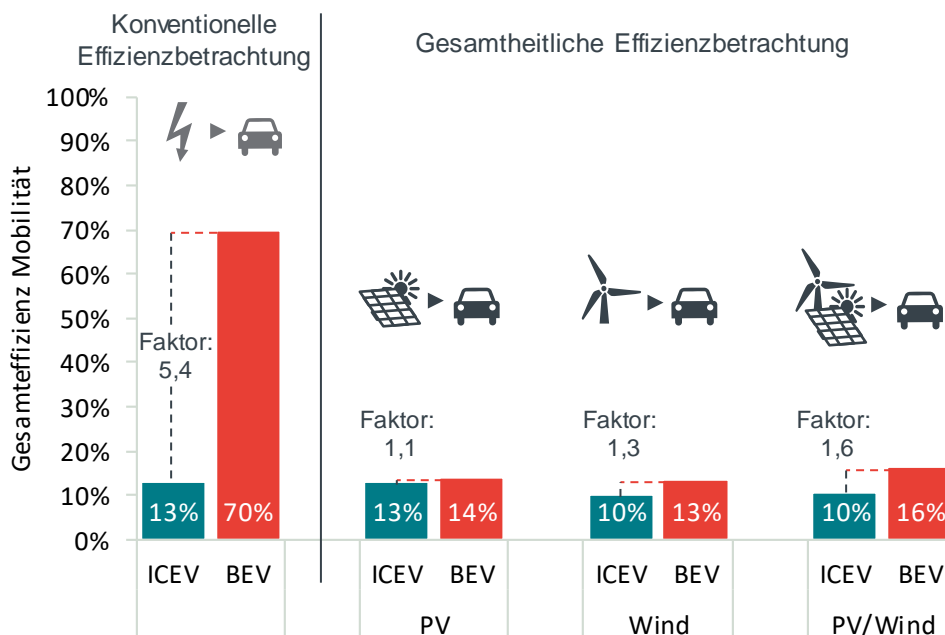
Damit liegen die gesamtheitlichen Effizienzen der Antriebstechnologien (BEV und ICEV) in einer vergleichbaren Größenordnung.



Effizienzunterschiede...

zwischen BEVs und mit PtL betriebenen ICEVs schmelzen bei gesamtheitlicher Betrachtung zusammen.

Abbildung 20. Effizienzunterschiede zwischen BEV und ICEV nach Betrachtungsansatz und EE-Technologie – Referenzszenarien je Stromerzeugungstechnologie



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **Konventionelles Szenario:** 100% Ertragseffizienz, vgl. Kapitel 2.

PV – BEV: PV-Anlagen in Deutschland; ICEV: PV-Anlagen in Nordafrika/Marokko.

Wind – BEV: Windkraftanlagen in Deutschland, 90% Onshore zu 10% Offshore (gewichtet nach installierter Kapazität 2019). ICEV: Windkraftanlagen in Argentinien/Patagonien

Mix – BEV: PV- und Windkraftanlagen zur Stromerzeugung in Deutschland, jeweils 50%; ICEV: PV- und Windkraftanlagen in Nordafrika/Marokko, jeweils 50%.

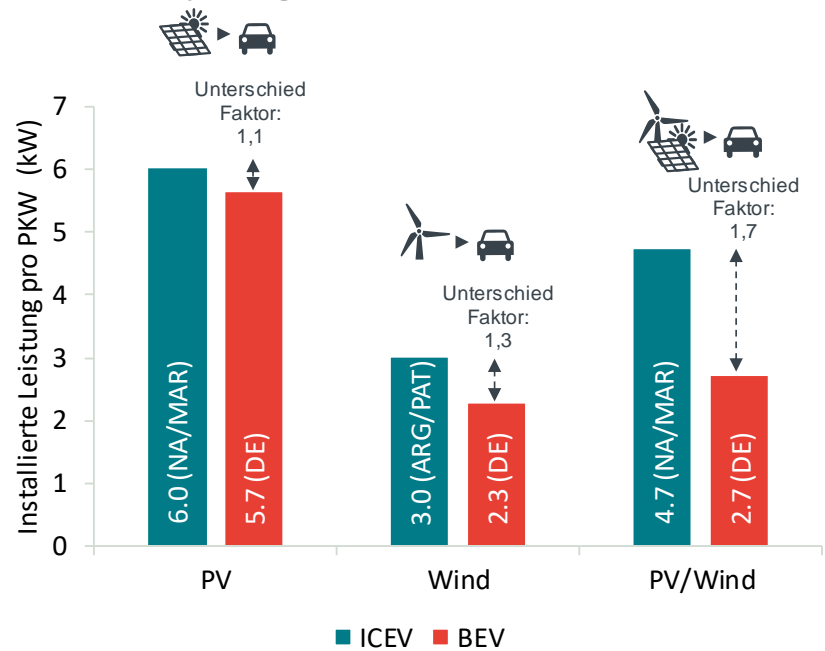
Die unterschiedliche Ertragseffizienz der EE-Anlagen zeigt sich auch im benötigten Kapazitätsbedarf an EE-Anlagen zum Betrieb der Fahrzeuge

Das Einbeziehen der Ertragseffizienz bei der EE-Stromerzeugung ergibt nicht nur ein realistisches Bild auf die gesamtheitliche Effizienz der Antriebstechnologien BEV und ICEV, sondern erlaubt auch die Berechnung der jeweils notwendigen zu installierenden EE-Kapazitäten.

In Abbildung 21 sind die jeweils pro BEV und ICEV zu installierenden Kapazitäten nach EE-Technologie abgebildet. Ausgangspunkt für die Kapazitätsbestimmung ist hierbei die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Pkw in Deutschland.³⁷ Auch hier lässt sich deutlich erkennen, dass der tatsächlich benötigte Kapazitätsausbaubedarf pro ICEV vom Ausbaubedarf eines BEV kaum abweicht.

³⁷ Ausgangspunkt für den Leistungsbedarf ist die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Pkw in Deutschland (13.975 km/Jahr – Durchschnittswert von 2014-2018, basierend auf KBA (2020)) und die damit einhergehende benötigte Gesamtenergiemenge pro BEV bzw. ICEV.

Abbildung 21. Impliziter PV-Kapazitätsbedarf pro Pkw für die Jahresfahrleistung mit BEV und ICEV in den jeweiligen Referenzszenarien



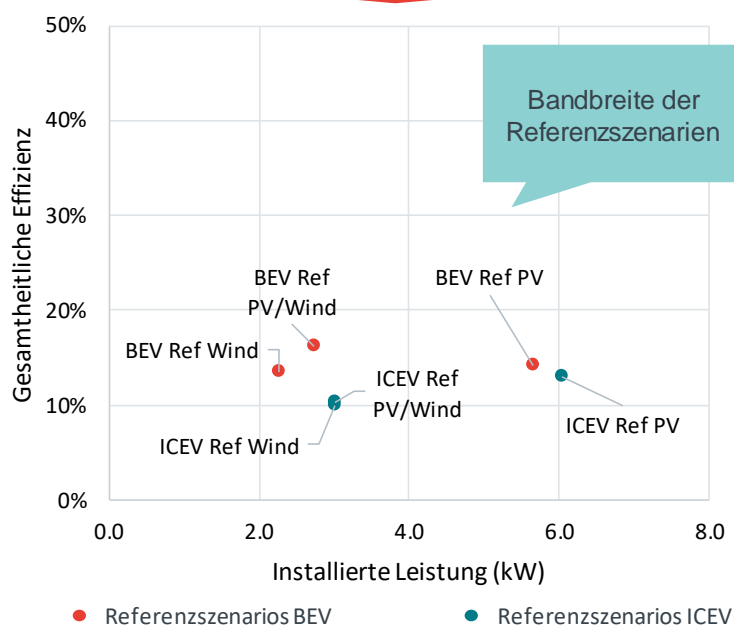
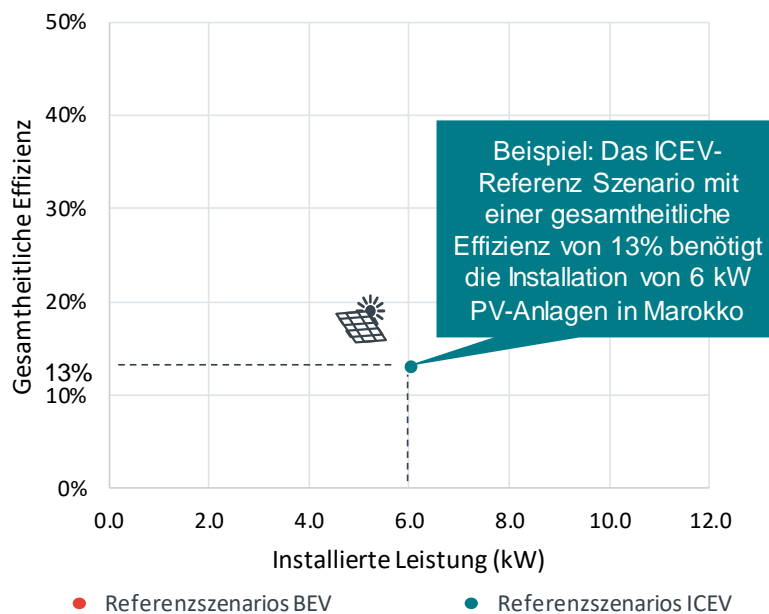
Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Angenommene Jahresfahrleistung eines Pkw in Deutschland: 13.975 km (Durchschnittswert 2014-2018 basierend auf KBA (2020)).³⁸

In **Abbildung 22** ist die zu installierende Leistung pro Pkw in den Referenzszenarien der gesamtheitlichen Effizienz der jeweiligen Referenzszenarien gegenübergestellt. Im Ergebnis zeigt sich, dass im Referenzszenario BEVs und ICEVs sowohl bei der gesamtheitlichen Effizienz als auch bei der installierten Leistung sehr nahe beieinander liegen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Flächenverfügbarkeit in dünn besiedelten Regionen wie Nordafrika deutlich besser ist als in dicht besiedelten Ländern wie Deutschland.

³⁸ Der Unterschiedsfaktor bei der Erzeugungstechnologienkombination aus PV und Wind weicht wegen Rundungsunterschieden zwischen der %-Betrachtung (1,6 in Abbildung 20) leicht von der oben dargestellten absoluten kW-Betrachtung ab (1,7).

Abbildung 22. Gesamtheitliche Effizienz und zu installierende Leistung (zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs je Fahrzeug)



Quelle: Frontier Economics

Im folgenden Kapitel gehen wir näher auf die einzelnen Wertschöpfungsstufen ein und erläutern die Treiber für die Unterschiede zwischen der konventionellen und der gesamtheitlichen Effizienz.

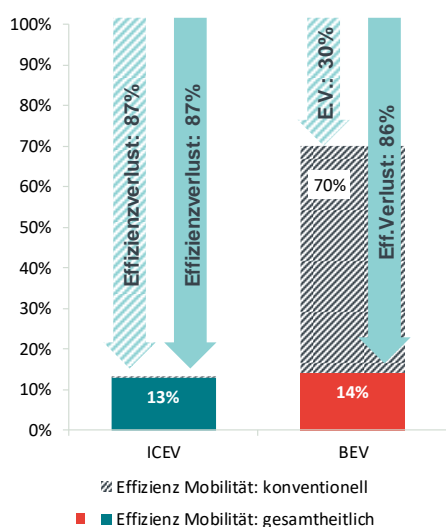
5. WIRKUNGSGRADVERLUSTE VERTEILEN SICH AUF UNTERSCHIEDLICHE STUFEN DER WERTSCHÖPFUNGSKETTE

Im vorherigen Kapitel haben wir die Unterschiede zwischen konventioneller und gesamtheitlicher Effizienz für die Stromerzeugungstechnologien PV, Wind und PV-Wind-Kombination aufgezeigt (vgl. **Abbildung 20**). In diesem Kapitel gehen wir detailliert auf die Haupttreiber für diese Ergebnisse ein.

Anhand der Übersichtsgrafik links wird deutlich, dass beim BEV der Unterschied zwischen konventioneller und gesamtheitlicher Effizienz deutlich größer ist (56%-Punkte) als beim ICEV (1%-Punkt).

Dies liegt v.a. daran, dass in der konventionellen Betrachtung die Haupttreiber für die Effizienzverluste bei BEVs nicht berücksichtigt werden, bei ICEVs dagegen schon. Zudem verteilen sich die Effizienzverluste bei BEVs und ICEVs über unterschiedliche Abschnitte des Energiepfades (vgl. **Abbildung 23** und **Abbildung 24**):

Effizienzverlust nach Betrachtungsansatz für Szenario PV

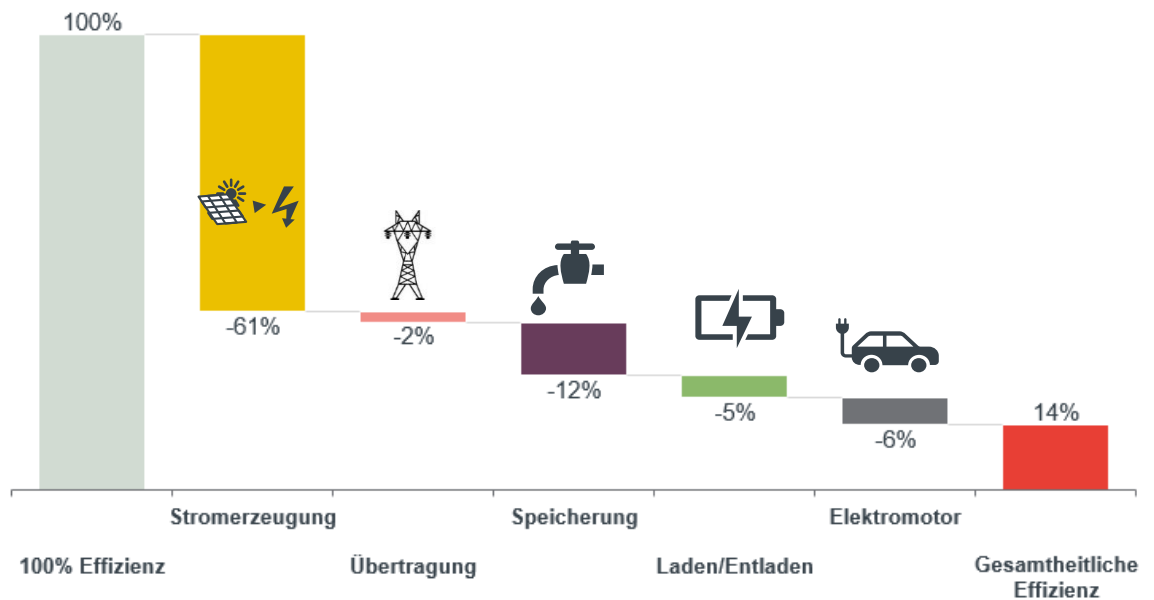


- **Mindererträge durch die unterschiedlichen Ertragseffizienzen der Stromerzeugung** bleiben bei der konventionellen Betrachtung unberücksichtigt. Diese betreffen beide Technologien, jedoch BEVs erheblich stärker, da die Ertragseffizienz von PV bzw. Wind in Deutschland geringer ist als in Nordafrika/Marokko (94%) oder Argentinien/Patagonien (73%).
- **Verluste durch saisonale Speicherung** werden konventionell nicht erfasst, spielen jedoch bei BEVs mit einer vermeintlich „direkten“ Stromversorgung bei einer vollständig auf erneuerbare intermittierende Energien umgestellten Energieversorgung eine wichtige Rolle.
- **Verluste beim Laden der Batterie** werden ebenfalls in Effizienzvergleichen häufig nicht einbezogen.
- **Effizienzverluste bei der Fahrzeugnutzung („Mobilität“)** werden regelmäßig berücksichtigt und treiben v.a. das Ergebnis für das ICEV.
- Bei **ICEVs** entstehen zusätzlich Effizienzverluste durch die **Umwandlung** des Stroms zu Wasserstoff und synthetischem Kraftstoff („Verluste Elektrolyse“ und „Verlust

Fischer-Tropsch“-Synthese). Diese sind ebenfalls in den bisherigen Effizienzvergleichen häufig berücksichtigt.

Diese Effizienzverluste lassen sich bspw. für das Referenzszenario mit PV-Erzeugung in Deutschland und Stromverwendung in einem BEV grafisch gemäß **Abbildung 23** darstellen.

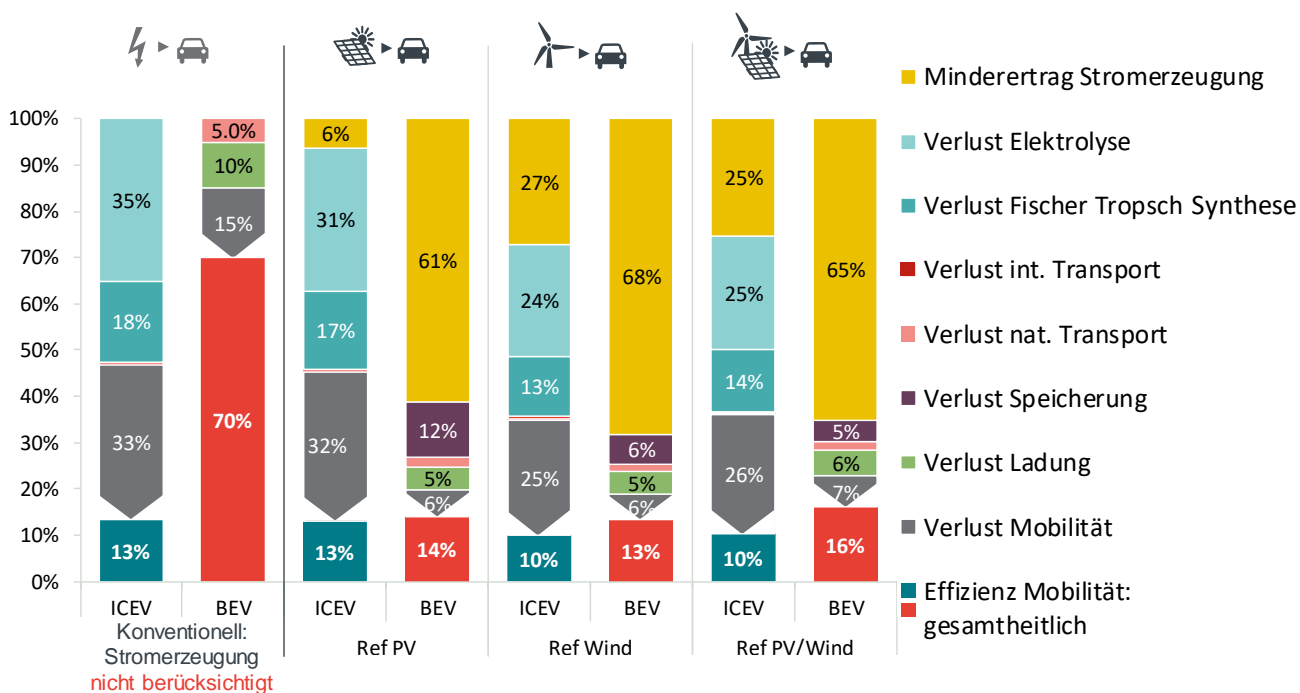
Abbildung 23. Effizienzverluste illustriert durch das BEV-Referenzszenario



Quelle: Frontier Economics

Auf diese Weise lassen sich sämtliche Szenarien mit Verlusten und Gesamteffizienz darstellen. In **Abbildung 24** erfolgt die zusammenfassende Illustration der Referenzszenarien für BEVs und ICEVs im Vergleich für verschiedene EE-Stromerzeugungsvarianten. Dabei entspricht das in **Abbildung 23** dargestellte Szenario der zweiten Säule von links in **Abbildung 24**.

Abbildung 24. Effizienzverluste in den Referenzszenarien nach Wertschöpfungsstufe im Vergleich zur konventionellen Betrachtung



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **Ref PV – BEV:** PV Erzeugung in DE (969 VLS/ 39% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherverluste (saisonal): 15%, Effizienz BEV: 71%; **ICEV:** PV Erzeugung in Nordafrika/Marokko (2344 VLS/ 94% Ertragseffizienz), Wirkungsgrad (Wg.) Elektrolyse (NT): 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste. (nat.): 1%, Effizienz ICEV: 29%.
Ref Wind – BEV: Windkraftanlagen in Deutschland (2071 VLS/ 32% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherverlust (saisonal): 10%, Effizienz BEV: 71%; **ICEV:** Wind-Erzeugung Argentinien/Patagonien (4730 VLS/ 73% Ertragseffizienz), Wirkungsgrad (Wg.) Elektrolyse: 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste. (nat.): 1%, Effizienz ICEV: 29%.
Ref PV/Wind – BEV: PV- und Windkraftanlagen zur Stromerzeugung in Deutschland, jeweils 50% (1.579 VLS/ 35% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherverluste (saisonal): 5%, Effizienz BEV: 71%; **ICEV:** PV- und Windkraftanlagen in Nordafrika/Marokko, jeweils 50% (2.987 VLS/ 75% Ertragseffizienz), Wirkungsgrad (Wg.) Elektrolyse (NT): 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste. (nat.): 1%, Effizienz ICEV: 29%.

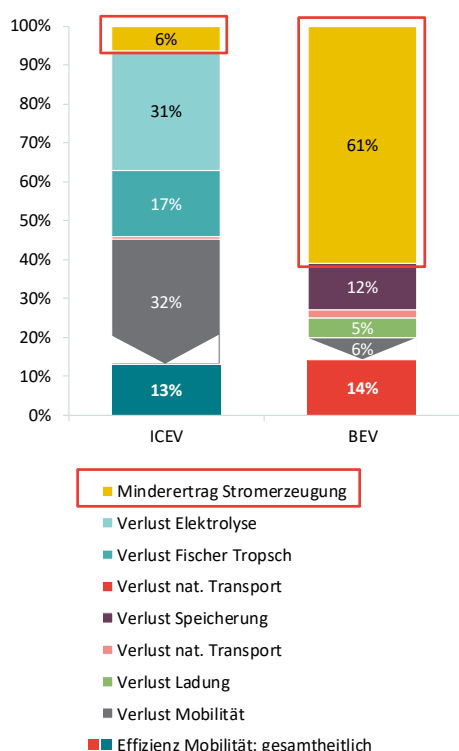
Im Folgenden gehen wir näher auf die wesentlichen Einflussparameter und Sensitivitäten ein, insbesondere

- auf die Ertragseffizienz der Stromerzeugungstechnologien;
- auf die saisonübergreifende Fahrzeugnutzung und daraus resultierenden saisonalen Speicherbedarf und Mehrverbrauch bei Klimatisierung des Fahrzeugaums; sowie
- Sensitivitäten in Bezug auf die Elektrolysetechnologien und Ladeverluste.

Abschließend geben wir einen zusammenfassenden Überblick über die verschiedenen Sensitivitäten.

Die sich standortabhängig stark unterscheidende Auslastung von EE-Stromerzeugungsanlagen beeinflusst die gesamtheitliche Effizienz maßgeblich

Haupttreiber Ertragseffizienz



In Kapitel 3 erläutern wir, warum die Berücksichtigung unterschiedlicher Standorte zur Stromerzeugung ein essenzieller Bestandteil einer gesamtheitlichen Effizienzanalyse ist und wie wir die Effizienz dieser Wertschöpfungsstufe, also die Ertragseffizienz, herleiten. Hier zeigen wir,

- wie sich die Ertragseffizienz auf die gesamtheitliche Effizienz auswirkt; und
- wie viele Kapazitäten an EE-Anlagen für die Versorgung der ICEV- und BEV-Pfade jeweils installiert werden müssen.

Die Ertragseffizienz hat einen entscheidenden Einfluss auf die gesamtheitliche Effizienz

Der Stromertrag aus den EE-Anlagen ist ein wesentlicher Treiber der Effizienzverluste des BEV-Pfads, wie er in dieser Studie verwendet wird. Wir nehmen hierbei an, dass der Ladestrom in Deutschland hergestellt wird. Allerdings weist Deutschland im Vergleich zum weltweit maximalen Benchmark relativ geringe Windhöufigkeit und Sonnenstunden auf. So beträgt die Effizienz von PV-Anlagen in Deutschland nach unserer Definition z.B. lediglich 39% (969 h (Volllaststunden in DE) / 2.500h (Volllaststunden weltweit maximal) * 100)³⁹.

In **Abbildung 25** stellen wir die Auswirkung des EE-Ertrags (x-Achse) auf die Effizienz (y-Achse) grafisch dar.

- Der **konventionelle Effizienzansatz** lässt die Ertragseffizienz bei der EE-Stromerzeugung außer Acht. Deswegen wird implizit eine PV- und Wind-Ertragseffizienz von 100% angenommen (vgl. Kapitel 3, S. 31 ff.). In diesem Fall ergibt sich bei ansonsten gleichen Annahmen eine technische Gesamteffizienz von über 50% für BEVs und 14% für ICEVs. Der Stromertrag einer PV-Anlage in Deutschland wird damit so hoch angesetzt wie der Ertrag einer PV-Anlage an Standort mit deutlich besseren Erzeugungsbedingungen.
- Bei der **gesamtheitlichen Effizienzanalyse** wird dagegen die Ertragseffizienz in der Realität berücksichtigt, die sich aus dem Verhältnis der Volllaststunden einer EE-Anlage an



Konventionelle Effizienz unterstellt für PV-Anlagen in Deutschland implizit 100% Ertragseffizienz, also das weltweit höchste Sonnenenergiepotenzial.

³⁹ Berechnet auf Basis der durchschnittlichen Ertragseffizienz von Solaranlagen in Deutschland in 2019, vgl. BMWi (2020). Für Volllaststunden weltweit maximal siehe Fasihi und Breyer (2020).

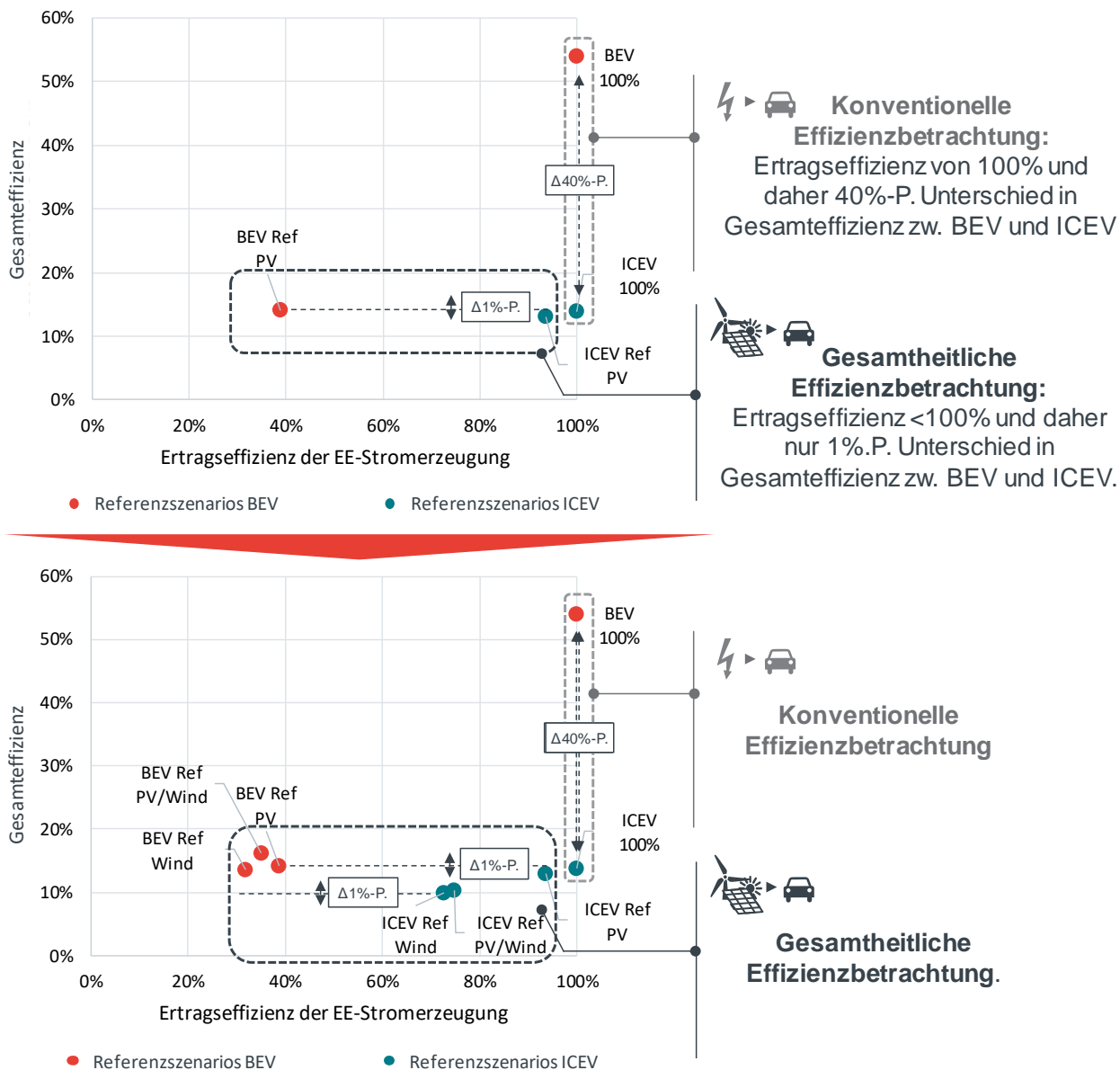
einem bestimmten Standort gegenüber dem maximal weltweit beobachtbaren Volllaststunden ergibt:

- Die Ertragseffizienzen der EE-Anlagen für die **ICEV-Szenarien** liegen zwischen 65% und 94%, da der EE-Strom hier in Regionen mit hohen VLS produziert wird (Wind in Argentinien/Patagonien, Solar in Nordafrika/Marokko).
- Für **BEV-Szenarien** nehmen wir an, dass der EE-Strom in Deutschland erzeugt wird. Unter dieser Maßgabe erreichen die Ertragseffizienzen der EE-Anlagen aufgrund der ungünstigeren Standortbedingungen Werte von lediglich 32% bis 39%.

Damit liegen alle Ergebnisse der gesamtheitlichen technischen Effizienz generell unterhalb der Ergebnisse konventioneller Berechnungen, bspw. für den PV-Pfad bei 14% für BEVs und 13% für ICEVs.

Vor allem die höheren Ertragseffizienzen von EE-Anlagen im Ausland führen dazu, dass die ICEVs bei der gesamtheitlichen Effizienzbetrachtung, trotz Berücksichtigung der Umwandlungsschritte von Strom zu flüssigem Kraftstoff, im Endergebnis auf einem ähnlichen Effizienzniveau liegen wie die BEVs.

Abbildung 25. Gesamtheitliche Effizienz und Ertrags­effizienz für die Referenzszenarien: Differenzierung zur bisherigen konventionellen Sichtweise



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **Konventionelles Szenario:** 100% Ertrags­effizienz, vgl. Kapitel 2.

PV Ref – BEV: PV-Anlagen in Deutschland; ICEV: PV-Anlagen in Nordafrika/Marokko.

Wind Ref – BEV: Windkraftanlagen in Deutschland, 90% Onshore zu 10% Offshore (gewichtet nach installierter Kapazität 2019). ICEV: Windkraftanlagen in Argentinien/Patagonien

Mix Ref – BEV: PV- und Windkraftanlagen zur Stromerzeugung in Deutschland, jeweils 50%; ICEV: PV- und Windkraftanlagen in Nordafrika/Marokko, jeweils 50%.

Auch die zu installierenden EE-Kapazitäten unterscheiden sich in Abhängigkeit von den Standortbedingungen

Dass die Berücksichtigung der Ertrags­effizienzen von EE-Anlagen relevant ist, zeigt sich auch bei der Betrachtung der notwendigen zu installierenden Anlagen-Leistungen für die betrachteten Mobilitätslösungen (siehe **Abbildung 26**). Im Endeffekt ist es eine wesentliche Frage, wie viele Windkraft- und Solaranlagen gebaut

werden müssen, um eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen zu betreiben. Wir betrachten hierfür die Anlagen-Leistung, die installiert werden muss, um den jährlichen Energiebedarf eines durchschnittlichen Pkw in Deutschland zu bedienen.⁴⁰ Diese leiten wir anhand von vier Schritten her (**Abbildung 26**):

- **Schritt 1:** Aufgrund der geringeren Effizienz auf der **Endanwendungsstufe (Mobilität)** benötigt ein ICEV für eine Fahrleistung von 13.975 km ca. 6.840 kWh p.a., während ein BEV lediglich 2.810 kWh p.a. verbraucht.
- **Schritt 2:** Zusätzlich steigt die insgesamt benötigte Energiemenge aufgrund der erforderlichen Umwandlungsschritte.
- **Schritt 3:** Dies führt zu einer insgesamt erforderlichen Energiemenge
 - im ICEV-Szenario von insgesamt ca. 14.156 kWh pro Pkw p.a.,
 - während der Jahresenergiebedarf eines Pkw in einem BEV-Szenario durch andere Effizienzverluste (Schritt 2) lediglich auf ca. 5.479 kWh pro Pkw p.a. steigt.
- **Schritt 4:** Die aus dem Energiebedarf resultierende zu installierende Leistung an EE-Anlagen hängt von den Volllaststunden ab, die in den Szenarien realisiert werden können. Dies lässt sich am Beispiel der erforderlichen Leistung von PV-Anlagen illustrieren:
 - Die PV-Leistung, die notwendig ist, um den Jahresverbrauch eines **BEV** bereitzustellen, beträgt in **Deutschland** bei weniger als 1000 Volllaststunden **5,7 kW pro Pkw**.
 - Für die einjährige Nutzung eines **ICEV** beträgt die zu installierende Leistung **6 kW** in **Nordafrika/Marokko**.

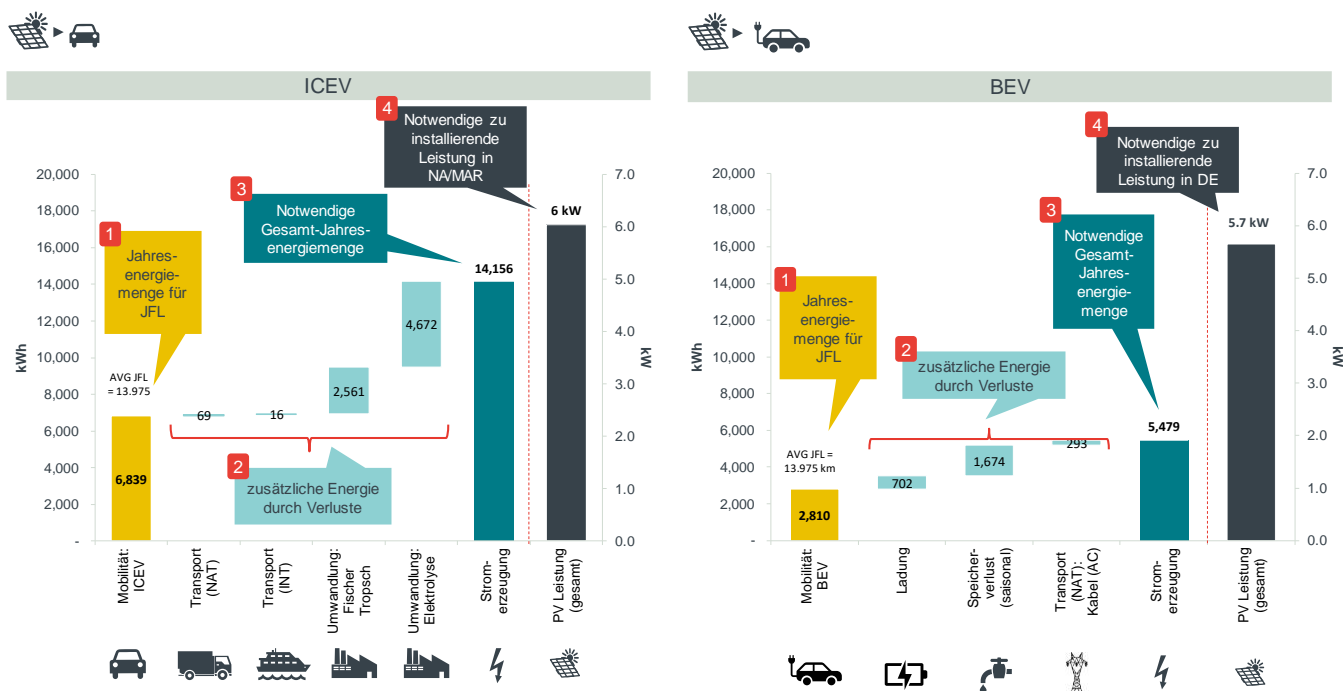


Für die einjährige Nutzung eines **BEV** werden in **Deutschland 5,7 kW PV-Leistung** benötigt, für die eines **ICEV 6 kW** in **Nordafrika/Marokko**.

Die Differenz zwischen ICEV und BEV ist hierbei also erheblich geringer, als es der konventionelle Ansatz suggerieren würde.

⁴⁰ Durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Pkw in Deutschland: 13.975 km (2014-2018), basierend auf: KBA (2020) – Verkehr in Kilometern – Inländerfahrleistung.

Abbildung 26. PV - Tatsächlicher Leistungsbedarf pro ICEV und BEV



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **BEV:** Referenzszenario BEV/ PV: - PV Erzeugung in DE (969 VLS/ 39% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherverluste (saisonal): 15%, Effizienz BEV: 71%.

ICEV: PV Erzeugung in Nordafrika/Marokko (2344 VLS/ 94% Ertragseffizienz), Referenzszenario ICEV/PV: Wirkungsgrad (Wg.) Elektrolyse: 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste (nat.): 1%, Effizienz ICEV: 29%.

Eine batterieelektrische Versorgung von etwa 1/4 der Pkw-Flotte mit Solarstrom würde die Verdopplung der derzeit installierten PV-Kapazitäten in DE erfordern

Die Versorgung Deutschlands mit grünem Strom gestaltet sich bereits heute als herausfordernd. Dies liegt an der benötigten Installation von EE-Anlagen, die aufgrund der limitierten Transportfähigkeit von Strom ganz überwiegend in Deutschland oder Zentraleuropa errichtet werden müssen. Die Verfügbarkeit von Standorten für EE-Anlagen in Deutschland bzw. Zentral/Westeuropa ist jedoch begrenzt. Dies liegt nicht nur an der begrenzten Verfügbarkeit geeigneter Standorte selbst, sondern auch an regulatorischen Hindernissen (Umweltschutz, Bevölkerungsschutz, etc.) und Akzeptanzproblemen.

Derzeit ist durchschnittlich nur ein Anteil von 40%⁴¹ des Stroms erneuerbar hergestellt. In Deutschland sind aktuell 49 GW an PV-Kapazitäten und 61 GW Wind-Kapazitäten installiert⁴².

Die Herausforderung des Ausbaus von EE-Anlagen wird mit der Elektrifizierung weiterer Sektoren wie dem Wärme-, Verkehrs- und Industriesektor zunehmen.

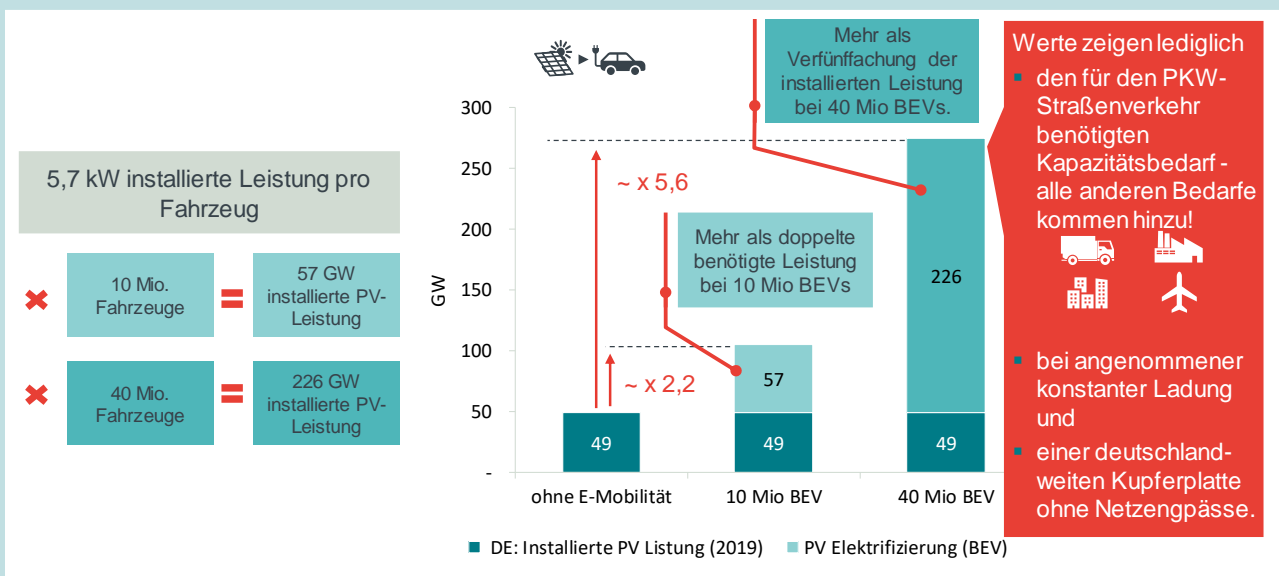
Es ist daher von großer Bedeutung, wie viel Kapazität an EE-Erzeugungsanlagen in den verschiedenen Sektoren benötigt wird und wie die lokal erzeugten EE letztendlich auf die verschiedenen Sektoren aufgeteilt werden können, bzw. wie eine gesamtwirtschaftliche Dekarbonisierung erfolgen kann.

⁴¹ Vgl. AG Energiebilanzen (2020).

⁴² Vgl. BMWi (2020).

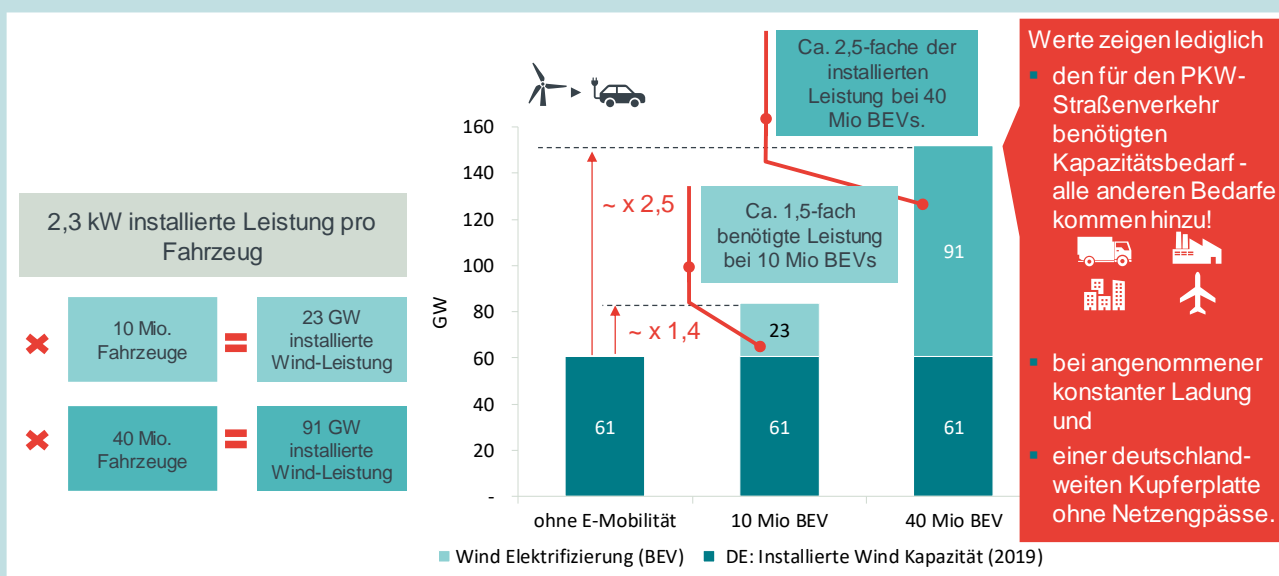
Im Folgenden illustrieren wir den EE-Kapazitätsbedarf für die Versorgung von BEVs mit grünem Ladestrom. Eine rein PV-basierte batterieelektrische Versorgung der Pkw-Flotte (BEV-Lösung) würde bspw. die Installation von 226 GW_{PV} erfordern, eine rein Wind-basierte BEV-Lösung die von 91 GW_{Wind}. Diese Werte sind deutlich höher als die bisher in Deutschland installierten PV- bzw. Wind-Kapazitäten (siehe oben). Bei einer batterieelektrischen Versorgung eines Viertels der Pkw-Flotte betragen die korrespondierenden Ausbaubedarfe immerhin noch 57 GW bei PV bzw. 23 GW bei Wind, d.h. im Falle von PV bedeutet dies immer noch eine Verdopplung der heute installierten Kapazitäten. Und diese **Ergebnisse ergeben sich bei Annahme einer deutschlandweiten Kupferplatte, konstantem Ladeverhalten und ohne jegliche Zusatzbedarfe für neue oder alte Stromanwendung!**

BEV-Pfad basierend auf PV



Quelle: Installierte PV Leistung Deutschland: Vgl. BMWi (2020) – Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland.

BEV-Pfad basierend auf Wind



Quelle: Vergleiche für installierte Wind Leistung Deutschland: BMWi (2020) – Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland.

Sensitivitätsanalyse zeigt den Einfluss der Ertragseffizienz auf die Gesamteffizienz und Leistungsbedarfe

Die Resultate des gesamtheitlichen Ansatzes hängen stark von der Annahme bezüglich der realisierbaren Volllaststunden ab. Wir betrachten daher neben unseren Referenzfällen (siehe oben) auch Sensitivitäten bezüglich der Volllaststunden, die sich in der Realität einstellen können.

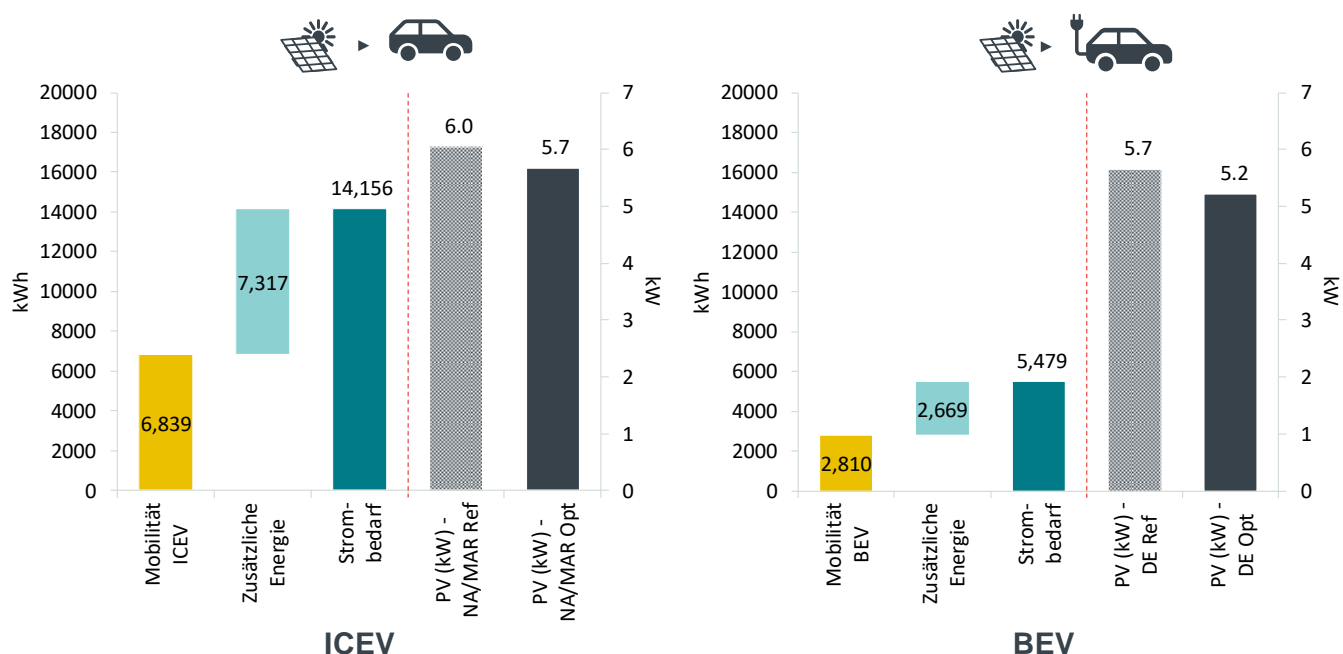
Bei **PV-Stromerzeugung** zeigen sich bzgl. der realisierbaren VLS

- zwar **zwischen den Regionen große Unterschiede** – bspw. sind die VLS in Nordafrika/Marokko 2 bis 2,5-mal so hoch wie in Deutschland –
- jedoch **je Region nur relativ geringe Unterschiede**: Sowohl in Nordafrika/Marokko als auch in Deutschland sind die VLS unter optimistischeren Annahmen nur unwesentlich höher als im Referenzszenario; in Nordafrika/Marokko nehmen wir im Szenario mit höheren Effizienzen 2.500⁴³ statt 2.344 VLS im Referenzszenario an, in Deutschland 1.050⁴⁴ statt 969 VLS. Entsprechend ergeben sich zwischen den Szenarien auch nur geringfügige Unterschiede im Leistungsbedarf (siehe **Abbildung 27**).

⁴³ Vgl. Frontier Economics basierend auf Agora und Frontier Economics (2018), Experteninterviews und Gesprächen im Rahmen eines parallel laufenden Projektes für GIZ Marokko (Frontier Economics (2020)). Die Volllaststunden für Onshore Wind basieren auf Tizgui et al. (2018) und Agora Energiewende (2017). Die Volllaststunden (VLS) der PV-Wind-Kombination entsprechen der Summe der VLS der PV- und der Wind-Anlage, multipliziert mit einem Faktor von 90%, um Überschneidungen bei den VLS von PV- und Wind-Anlagen Rechnung zu tragen. Gemäß Breyer (2012) liegen die Überschneidungen bei den VLS von PV und Wind weltweit bei 1-8%, in vielen Weltregionen bei 2%. Gemäß Fasihi und Breyer (2020) liegen die Überschneidungen in den meisten Regionen der Welt bei unter 500 Stunden. Mit einem Abschlag von 10% bzw. ca. 600-650 Stunden ist der von uns angenommene Abschlag also eher als konservativ einzustufen.

⁴⁴ Vgl. Roland Berger und Prognos (2019), durchschnittliche VLS für Neuanlagen.

Abbildung 27. Einfluss der Volllaststunden an PV-Standorten auf zu installierende Leistung zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs des Referenz-Pkw



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **BEV - PV DE Ref:** PV Erzeugung in DE (969 VLS/ 39% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherverlust (saisonal): 15%, Effizienz BEV: 71%.

BEV - DE Opt: PV Erzeugung in DE (1050 VLS/ 42% Ertragseffizienz), c.p.

ICEV – PV NA/MAR Ref: PV Erzeugung in Nordafrika/Marokko (2344 VLS/ 94% Ertragseffizienz), Wirkungsgrad (Wg.) Elektrolyse: 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste. (nat.): 1%, Effizienz ICEV: 29%.

ICEV – PV NA/MAR Opt: PV Erzeugung in Nordafrika/Marokko (2500 VLS/ 100% Ertragseffizienz), c.p.

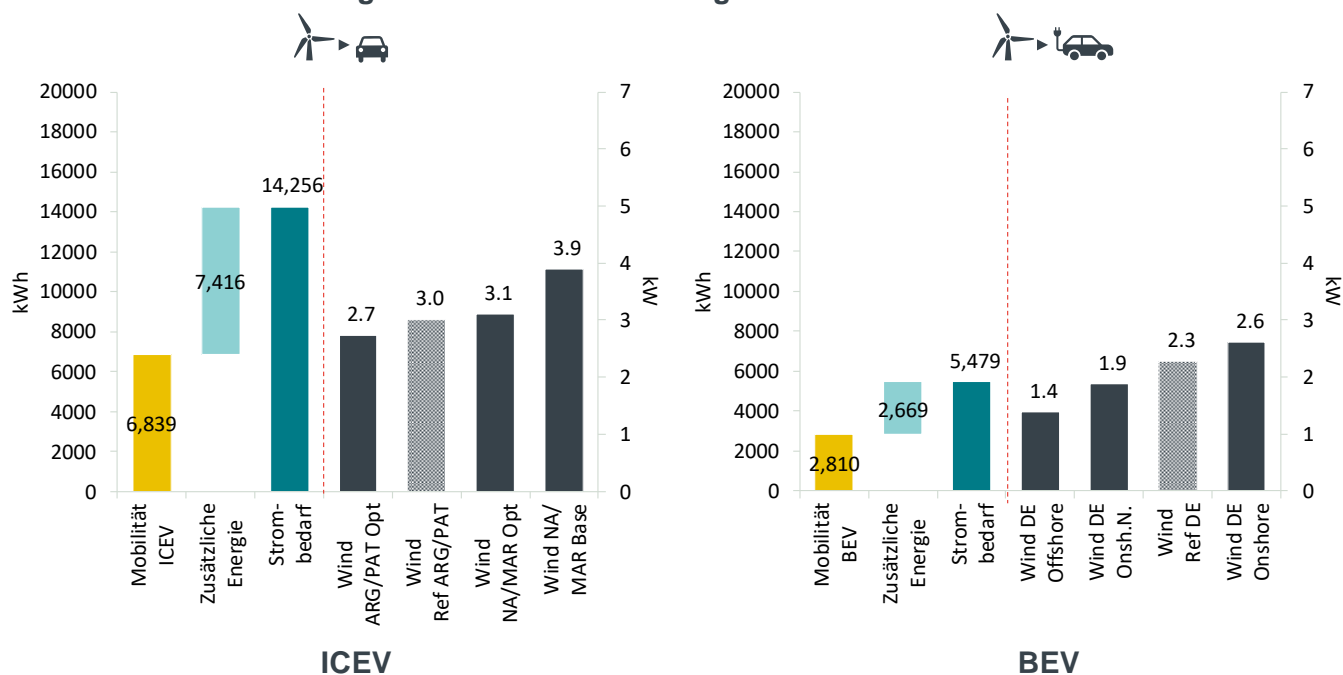
Bei **Wind-Stromerzeugung** gibt es prinzipiell eine größere Varianz an möglichen realisierbaren Volllaststunden (**Abbildung 28**).

- Die weltweit besten Standorte liegen u.a. in Argentinien/Patagonien. Auch in Nordafrika/Marokko werden in verschiedenen Landesteilen hohe Volllaststunden erreicht.
- In Deutschland werden wesentlich niedrigere Auslastungen erreicht, jedoch gibt es hier eine große Bandbreite, insbesondere zwischen Onshore- und Offshore-Anlagen und auch zwischen Nord- und Süddeutschland.

Es ist bei Wind-Anlagen aber nicht immer eindeutig, welche Standorte tatsächlich genutzt werden können. Bspw. kann die regionale Topografie (bspw. bergiges bzw. unwegsames Terrain) eine Installation erschweren oder gänzlich unmöglich machen. Wir verwenden daher für unser Referenzszenario Wind ICEV die Windhöffigkeit und die Volllaststunden eines realistischen Standorts (4.730 kWh/kW) und nicht die des besten (6.500 kWh/kW) in Patagonien.

Aber auch in Deutschland gibt es ein starkes Gefälle zwischen realisierbaren VLS im Offshore- und Onshore-Bereich, insbesondere im Landesinneren. Der Ausbau an guten bis sehr guten Standorten innerhalb Deutschlands ist durch geografische Einschränkungen (Offshore und Onshore) sowie bereits vorhandene Windkraftanlagen an guten Standorten, regulatorische Hindernisse (Umweltschutz, etc.) und Akzeptanzprobleme (Onshore) begrenzt. In unseren Annahmen für das Referenzszenario haben wir daher die realisierbaren Volllaststunden in Deutschland zwischen Onshore und Offshore nach aktuell installierter Kapazität gewichtet.

Abbildung 28. Einfluss der Volllaststunden an Windkraft-Standorten auf zu installierende Leistung zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs des Referenz-Pkw



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **ICEV – Wind Ref ARG/PAT:** Wind-Erzeugung Argentinien/Patagonien (4730 VLS/ 73% Ertragseffizienz), Wirkungsgrad (Wg.) Elektrolyse: 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste. (nat): 1%, Effizienz ICEV: 29%.
ICEV – Wind ARG/PAT Opt: Wind-Erzeugung Argentinien/Patagonien (5200 VLS/ 80% Ertragseffizienz), c.p.
ICEV – Wind NA/MAR Opt: Wind-Erzeugung Nordafrika/Marokko (4550 VLS/ 70% Ertragseffizienz), c.p.
ICEV – Wind NA/MAR Base: Wind-Erzeugung Nordafrika/Marokko (3629 VLS/ 56% Ertragseffizienz), c.p.
BEV – Wind Ref DE: Wind-Erzeugung DE (2071 VLS/ 32% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherungsverlust (saisonal): 10%, Effizienz BEV: 71%.
BEV – Wind DE Offshore: Wind-Erzeugung DE Offshore (3375 VLS/ 52% Ertragseffizienz), c.p.
BEV – Wind DE Onsh.N.: Wind-Erzeugung Onshore Norddeutschland (2500 VLS/ 39% Ertragseffizienz), c.p.
BEV – Wind DE Onshore: Wind-Erzeugung DE Onshore (1805 VLS/ 28% Ertragseffizienz), c.p.

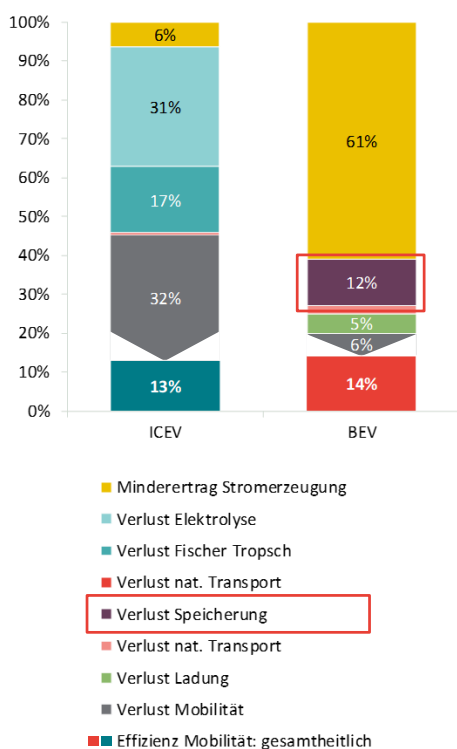
Auch der zeitliche Aspekt der Fahrzeugnutzung beeinflusst die Gesamteffizienz

Die Effizienzanalyse sollte weiterhin berücksichtigen, dass Fahrzeuge über das gesamte Jahr gefahren werden, also nicht nur

dann, wenn z.B. die Sonne scheint und PV-Anlagen Strom erzeugen. Zudem sind aufgrund der schwankenden Außentemperaturen die Fahrzeuge zu heizen bzw. kühlen. Dies führt zu

- Verlusten bei der Antriebsenergiebereitstellung durch saisonale Speicherung von Energie; und
- Verluste aufgrund von Mehrverbrauch durch Klimatisierung (Heizen oder Kühlen) des Fahrraums.

Saisonale Speicherverluste



Saisonaler Speicherbedarf senkt die gesamtheitliche Effizienz von BEVs vor allem bei PV-Strom

Wie im Kapitel 3 ab Seite 36 ff. beschrieben, fokussieren wir in unserem gesamtheitlichen Ansatz für die Versorgung von **BEVs** auf saisonalen Speicherbedarf in Form von P-to-H₂-to-P. Ausgehend von der vereinfacht angenommenen konstanten Mobilitätsnachfrage über das Jahr und den saisonalen Ausprägungen der Erzeugungsprofile der jeweiligen EE-Technologien ergibt sich folgender Einfluss auf die Effizienz:

- Da **PV-Anlagen** im Sommer wesentlich mehr Strom als im Winter produzieren, wird die Effizienz um 12% gesenkt.
- Da Stromerzeugung von **Windkraftanlagen** etwas gleichmäßiger übers Jahr verteilt ist, ist der saisonale Speicherbedarf entsprechend niedriger, und die Effizienz wird um 6% gesenkt.
- Wird das Gros der Strommenge durch die Kombination aus **PV und Wind** erzeugt, wird die Effizienz um 5% gesenkt.

Unter realen Bedingungen verbraucht die Innenraum-Klimatisierung substanziiell Energie

Wie im Kapitel 3 begründet, ändert sich die Effizienz der direkten Endanwendung sowohl für ICEVs als auch BEVs mit der Außentemperatur, d.h. wenn nicht wie in derzeitig üblichen Testzyklen bei moderaten Temperaturen (WLTP bspw. bei 23°C) ohne besonderen Heiz- oder Kühlungsbedarf gefahren wird.

In unseren Referenzfällen berücksichtigen wir die Temperatur über das ganze Jahr und ermitteln so den jährlichen Durchschnittsverbrauch eines Kompaktklassefahrzeugs. Die so hergeleitete Effizienz der direkten Endanwendung, also des Fahrzeugs, beträgt 71% für BEVs und 29% für ICEVs. Der Anteil der entsprechenden Energieverluste der Fahrzeuge gemessen am Gesamtenergieverbrauch liegt in den ICEV-Szenarien bei 32% (PV) und 25% (Wind), und in den BEV-Szenarien bei 6% (PV) und 6% (Wind).

Wir ergänzen unser Referenzszenario durch die Sensitivität des **Fahrzeugbetriebs in der Stadt an einem Wintertag mit**

Temperaturen von höchstens 0°C. Beide Faktoren dieses Szenarios (Wintertemperaturen und Stadtverkehr) führen zu Mehrverbrauch sowohl bei ICEVs als auch bei BEVs:

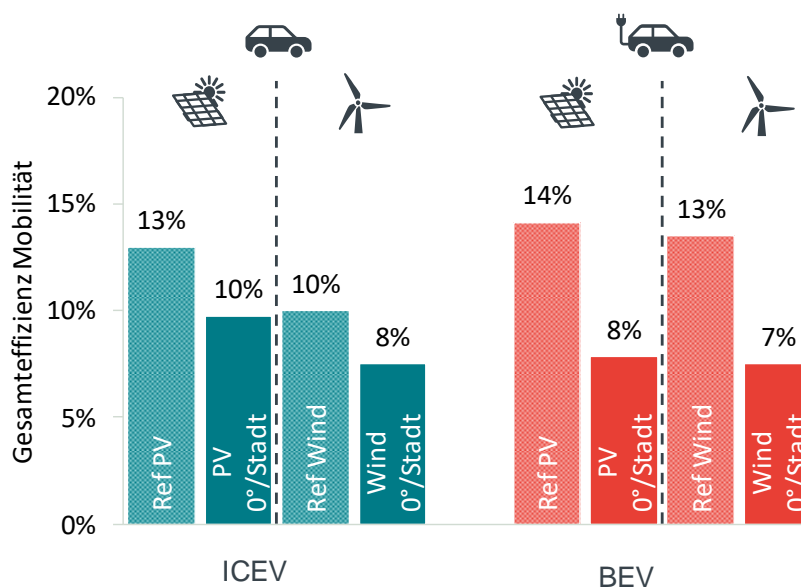


Im Winter...

können mit grünem PtL betriebene ICEVs aufgrund des Heizbedarfs der Fahrzeuge effizienter sein als BEVs.

- Bei **BEVs** wirkt sich der Heizbedarf auf die Effizienz der Fahrzeugnutzung aus, da kaum Abwärme genutzt werden kann und zusätzlich zum Fahrerraum auch die Batterie geheizt werden muss. Der Mehrverbrauch der Heizung bei BEVs ist zudem auf den Kilometer ungerechnet höher, wenn es mit geringerer Geschwindigkeit bewegt wird.⁴⁵ Wir nehmen einen Verlust der Reichweite von 50% an, wodurch sich die gesamtheitliche Effizienz
 - auf 8% (PV) und
 - auf 7% (Wind) verringert.
- Auch **ICEVs** verbrauchen in diesem Szenario mehr. Der angenommene Mehrverbrauch von 28% kommt durch eine weniger effiziente Fahrweise, durch häufiges Anfahren und Bremsen sowie durch Heizbedarf zustande, der nicht durch die Abwärme des Motors gedeckt werden kann.⁴⁶ Dadurch verringert sich die gesamtheitliche Effizienz
 - auf 10% (PV) und
 - auf 8% (Wind).

Abbildung 29. Effizienzauswirkungen durch Fahrzeugnutzung im Winter bei ca. 0 °C in der Stadt.



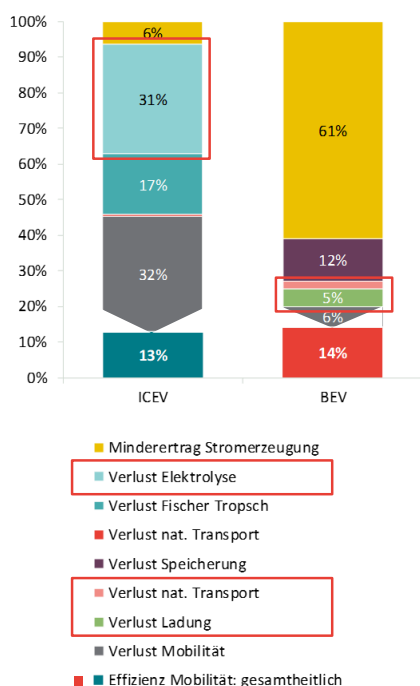
Quelle: Frontier Economics

⁴⁵ Vgl. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-reichweite-winter/>.

⁴⁶ Vgl. ADAC autotest (2019), S. 9.

Hinweis: **ICEV - Ref PV**: PV Erzeugung in Nordafrika/Marokko (2344 VLS/ 94% Ertragseffizienz), Wirkungsgrad (Wg.) Elektrolyse: 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste. (nat.) = 1%, Effizienz ICEV: 29%.
ICEV - PV 0°/Stadt (kalter Wintertag, Stadtverkehr): Effizienz ICEV: 22%, c.p..
ICEV - Ref Wind: Wind-Erzeugung Argentinien/Patagonien (4730 VLS/ 73% Ertragseffizienz), Wirkungsgrad (Wg.) Elektrolyse: 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste, Effizienz ICEV: 29%.
ICEV - Wind 0°/Stadt (kalter Wintertag, Stadtverkehr): Effizienz ICEV: 22%, c.p..
BEV - Ref PV: PV Erzeugung in DE (969 VLS/ 39% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherverlust (saisonal): 15%, Effizienz BEV: 71%.
BEV - PV 0°/Stadt (kalter Wintertag, Stadtverkehr): Effizienz BEV: 36%, c.p..
BEV - Ref Wind: Wind-Erzeugung DE (2071 VLS/ 32% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherverlust (saisonal): 10%, Effizienz BEV: 71%.
BEV - Wind 0°/Stadt (kalter Wintertag, Stadtverkehr): Effizienz BEV: 36%, c.p..

Weitere Sensitivitäten in Bezug auf die Elektrolyse und Ladeverluste



Mögliche weitere wesentliche Treiber für die Effizienzen der Antriebstechnologien könnten z.B. Variationen in der Effizienz von Elektrolyseuren oder z.B. bei Ladeverlusten von BEVs sein. Bei beiden Treibern bestehen erhebliche Spannweiten bezüglich der Effizienzverluste in der Praxis bzw. bezüglich möglicher zukünftiger technologischer Entwicklungen.

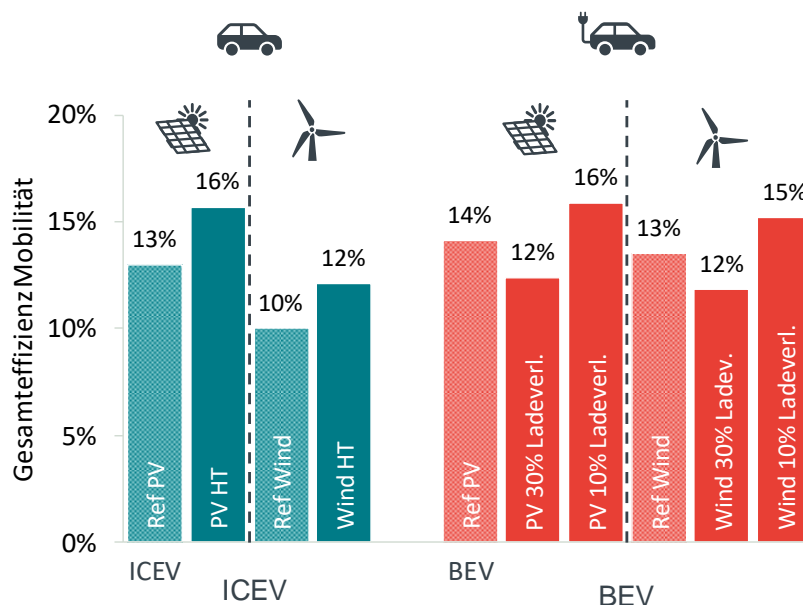
Entsprechend zeigen wir im Folgenden Sensitivitäten für diese beiden Einflussfaktoren (**Abbildung 30**):

- Bei ICEVs nehmen wir für die Effizienzverluste bei der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff die effizientere Hochtemperaturelektrolyse (HT Elektrolyse) statt der Niedrigtemperaturelektrolyse (NT Elektrolyse) an, die im Referenzszenario unterstellt wird.
- Bei BEVs variieren wir die Ladeverluste in Abhängigkeit von der Ladeleistung.

Es zeigt sich, dass auch in diesen Sensitivitäten in bestimmten Fällen die Effizienz des ICEV höher sein kann als die des BEV, z.B. wenn die Elektrolyse zukünftig auf Basis des effizienteren HT-Verfahrens erfolgt und gleichzeitig das BEV überwiegend per Schnellladung aufgeladen wird.

Im Folgenden erläutern wir die Herleitung des Ergebnisses detaillierter.

Abbildung 30. Gesamteffizienz Mobilität nach relevanten Sensitivitäten



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **ICEV - Ref PV:** PV Erzeugung in Nordafrika/Marokko (2344 VLS/ 94% Ertragseffizienz), Wirkungsgrad (Wg.) Wg. Elektrolyse (NT): 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste (nat.): 1%.
ICEV - PV HT: Wg. Elektrolyse (HT): 81%, c.p.
ICEV - Ref Wind: Wind-Erzeugung Argentinien/Patagonien (4730 VLS/ 73% Ertragseffizienz), Wirkungsgrad (Wg.) Elektrolyse: 67%, Wg. Fischer Tropsch: 73%, Transportverluste (int.): < 1%, Transportverluste (nat.): 1%.
ICEV - Wind HT: Wg. Elektrolyse (HT): 81%, c.p.
BEV - Ref PV: PV Erzeugung in DE (969 VLS/ 39% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherverluste (saisonal): 15%, Effizienz BEV: 71%.
BEV - PV 30% Ladeverlust: Ladeverlust: 30%, c.p.
BEV - PV 10% Ladeverlust: Ladeverlust: 10%, c.p.
BEV - Ref Wind: Wind-Erzeugung DE (2071 VLS/ 32% Ertragseffizienz), Netz/Transportverluste: 5%, Ladeverluste: 20%, Speicherverluste (saisonal): 10%, Effizienz BEV: 71%.
BEV - Wind 30% Ladeverl.: Ladeverlust: 30%, c.p.
BEV - Wind 10% Ladeverl.: Ladeverlust: 10%, c.p.



Zukünftiger technologischer Fortschritt...

entlang der Wertschöpfungskette kann die Relationen der Effizienzen zwischen den Technologien weiter verschieben.

Hochtemperaturelektrolyse (HT) erhöht die Gesamteffizienz von ICEVs um bis zu 3%-Punkte

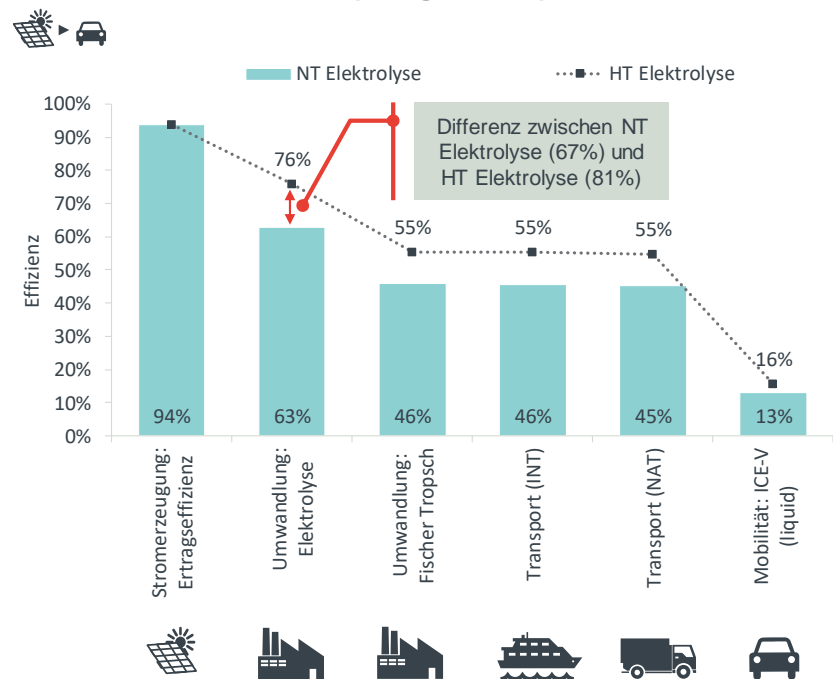
Im ICEV-Referenzszenario unterstellen wir eine Niedrigtemperaturelektrolyse (NT) mit einem Wirkungsgrad von 67%⁴⁷ für die Herstellung von Wasserstoff aus grünem Strom (vgl. Kapitel 3 Seite 34). In der Sensitivität rechnen wir mit einem

⁴⁷ Frontier Economics basierend auf Agora und Frontier Economics (2018) und Experteninterviews.

Hochtemperaturelektrolyseur (HT) mit einem Wirkungsgrad von 81%.⁴⁸

Im Vergleich zum PV-Referenzszenario steigt hierdurch die gesamtheitliche Effizienz der ICEVs von 13% auf 16% und im Vergleich zum Wind-Referenzszenario von 10% auf 12%.

Abbildung 31. Gesamtheitliche Effizienz im „Referenzszenario PV“ mit HT und NT Elektrolyse (nach Wertschöpfungsstufen)



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **NT Elektrolyse** (Niedrigtemperatur Elektrolyse): Referenzszenario PV (NT Elektrolyse: 67% Wirkungsgrad).

HT Elektrolyse (Hochtemperatur Elektrolyse): Referenzszenario PV mit HT Elektrolyse (81% Wirkungsgrad).

Unterschiedliche Stromladeverluste senken bzw. steigern die Gesamteffizienz von BEVs um ca. 2%

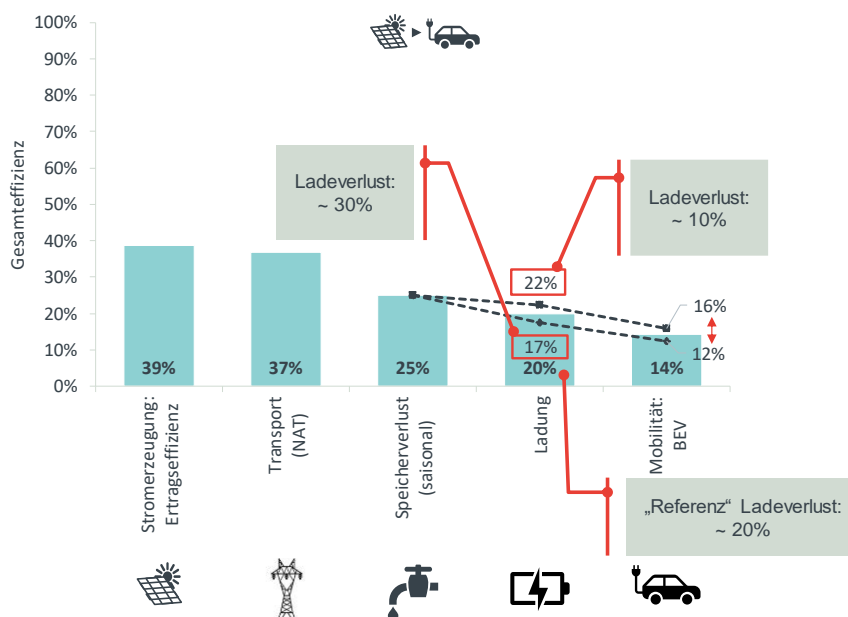
Wie im Kapitel 3 begründet, nehmen wir im BEV-Referenzszenario Ladeverluste von 20% an. Diese senken die Gesamteffizienz im gesamtheitlichen Ansatz um 6% (PV) und 6% (Wind) und 7% (Wind- & PV-Kombination).

Zusätzlich berechnen wir zwei Sensitivitäten mit Ladeverlusten von 10% und 30%. Die daraus resultierende Bandbreite der Werte für die gesamtheitliche Effizienz (vgl. **Abbildung 30**) liegt

- zwischen 12% und 16% (PV);
- zwischen 12% und 15% (Wind).

⁴⁸ Frontier Economics basierend auf Agora und Frontier Economics (2018) und Experteninterviews.

Abbildung 32. Gesamtheitliche Effizienz im „Referenzszenario PV“ mit niedrigen und hohen Ladeverlusten (nach Wertschöpfungsstufen)



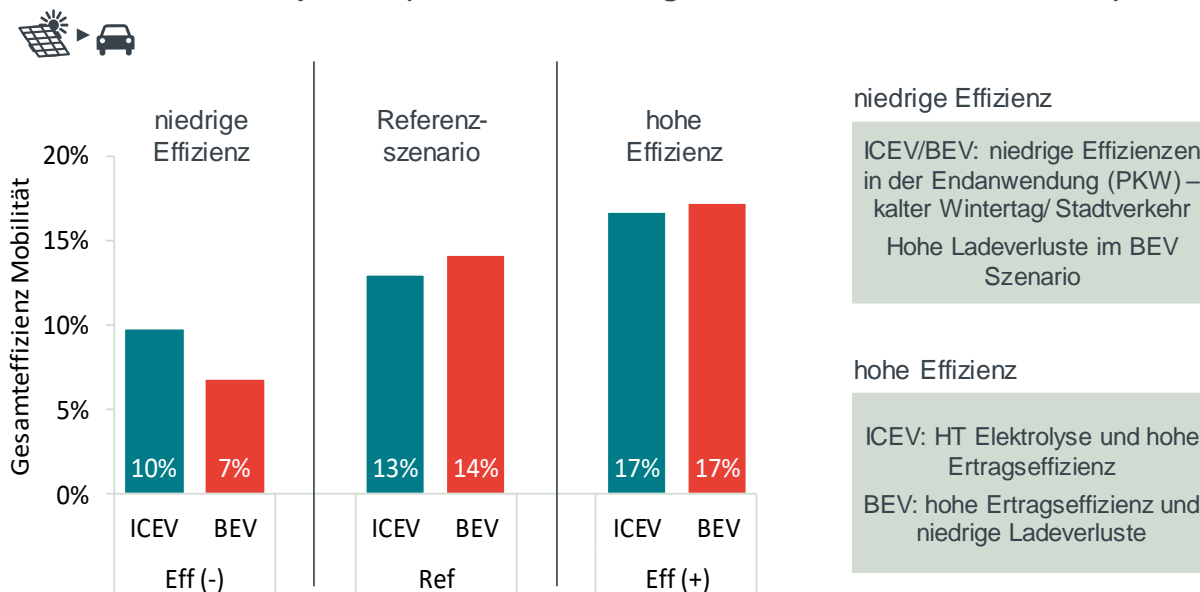
Quelle: Frontier Economics

Hinweis: PV Referenzszenario (DE) mit Sensitivitäten.

Sensitivitäten zeigen ein uneinheitliches Bild

Werden z.B. die zuvor genannten Faktoren nicht nur isoliert, sondern in Kombination variiert, resultieren hieraus größere Spannbreiten für die Effizienzwerte. So schwanken bei einer Variation aller in dieser Studie erfassten Treiber für ein Szenario mit Herstellung des EE-Stroms in PV-Anlagen die Effizienz der Antriebssysteme zwischen 10% und 17% für das ICEV und zwischen 7% und 17% für das BEV (**Abbildung 33**). Es sei darauf hingewiesen, dass in der Realität eine Vielzahl weiterer Fallvariationen denkbar ist, die zu noch größeren Schwankungsbreiten bei der gesamtheitlichen Effizienz führen können.

Abbildung 33. Schwankungsbreite der Gesamteffizienz je Technologiepfad und Szenario am Beispiel PV (basierend auf ausgewählten Parametervariationen)



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **Eff (-)** – BEV: Ertragseffizienz: 35% (Deutschland), Netzverluste: 5%, Speicherverluste (saisonal): 15%, Ladeverluste: 30%, Effizienz BEV: 39%. ICEV: Ertragseffizienz: 94% (Nordafrika/Marokko), Wirkungsgrad Elektrolyse (NT): 67%, Wirkungsgrad Fischer Tropsch: 73%, Verlust Int. Transport: <1%, Verlust nat. Transport: 1%, Effizienz ICEV: 22%. **Eff (+)** – BEV: Ertragseffizienz: 42% (Deutschland), Netzverluste: 5%, Speicherverluste (saisonal): 15%, Ladeverluste: 10%, Effizienz BEV: 71%. ICEV: Ertragseffizienz: 100% (Nordafrika/Marokko), Wirkungsgrad Elektrolyse (HT): 81%, Wirkungsgrad Fischer Tropsch: 73%, Verlust Int. Transport: <1%, Verlust nat. Transport: 1%, Effizienz ICEV: 29%.

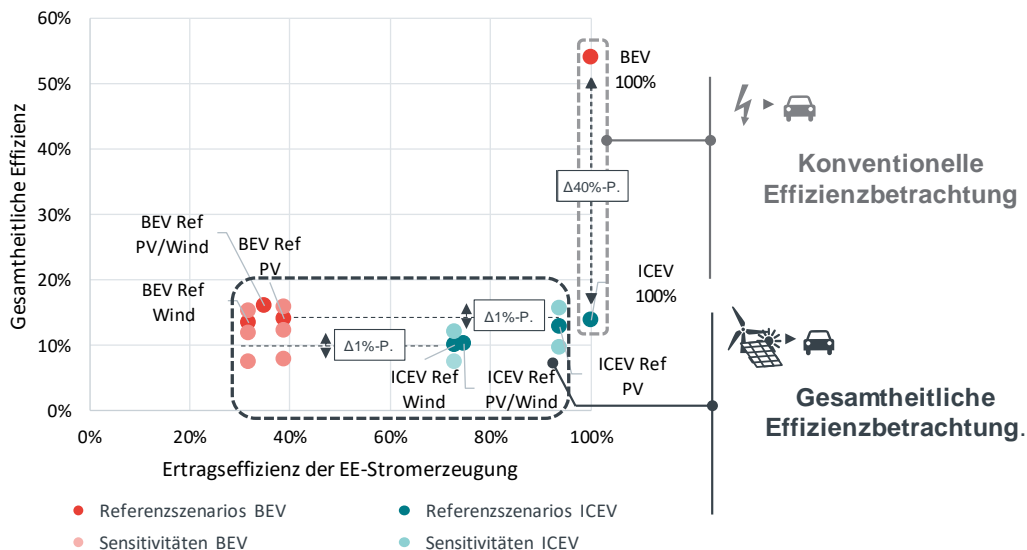
Dies hat zur Folge, dass es bei der gesamtheitlichen Effizienzanalyse Konstellationen gibt, bei denen die ICEV-Technologie mit Nutzung von an günstigen Standorten hergestellten PtL-Kraftstoffen Effizienzvorteile gegenüber dem mit in Deutschland erzeugten EE-Strom betriebenen BEV aufweist. Eine Rolle spielen dabei z.B. die Erträge von Anlagen aus Erneuerbaren Energien, der Energiespeicherbedarf, Schnellladeverluste oder auch der energetische Aufwand für die Fahrzeuginnenraum-Klimatisierung. Ebenso üben Optimierungspotenziale beim Herstellungsprozess von PtL-Produkten sowie die Reduzierung von Umwandlungsverlusten, z.B. durch die fortschreitende Integration von Prozessschritten, einen Einfluss aus.

Anhand **Abbildung 34** wird dies für einige denkbare Szenarien und Sensitivitäten jeweils für den konventionellen und gesamtheitlichen Effizienzansatz illustriert. Es zeigt sich, dass

- die **Ertragseffizienz der EE-Stromerzeugung** bei ICEVs aufgrund der Vorteile von internationalen EE-Potenzialstandorten durchgängig höher ausfällt (etwa in einem Bereich zwischen 75% bis 95%) als für BEVs basierend auf EE-Strom aus Deutschland (30% bis max. 40%) und

- damit die **gesamtheitliche Effizienz** für BEVs und ICEVs in annähernd gleicher Größenordnung liegt (etwa in einem Bereich zwischen 7% und 20%).

Abbildung 34. Gesamteffizienz von ICEV und BEV nach konventioneller und gesamtheitlicher Betrachtung

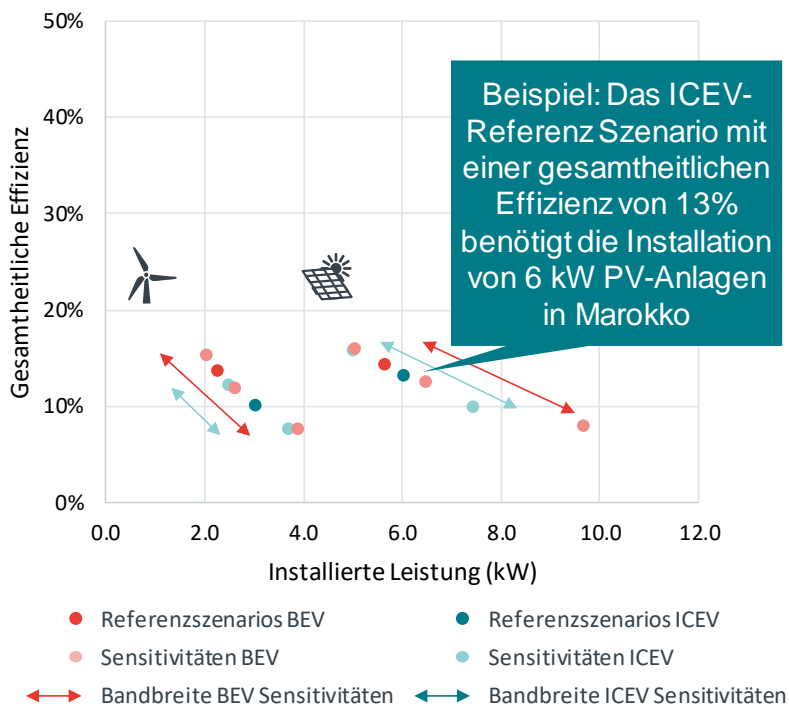


Quelle: Frontier Economics, Details siehe Anhang.

In **Abbildung 35** stellen wir die zu installierende Leistung in den Referenzszenarien den Sensitivitäten der jeweiligen gesamtheitlichen Effizienz gegenüber.

Abbildung 35. Gesamtheitliche Effizienz und zu installierende Leistung (zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs je Fahrzeug)

Es zeigt sich bei beiden Betrachtungsweisen, dass die Ergebnisse für BEVs und mit grünem PtL betriebenen ICEVs deutliche Überlappungen aufweisen, je nach Fallkonstellation und Annahme. Die Effizienzen bewegen sich hierbei durchgehend in ähnlichen Bandbreiten.



Quelle: Frontier Economics, Details siehe Anhang.

6. DIE TECHNISCHE EFFIZIENZ IST TEIL EINES UMFASSENDEREN EFFIZIENZBEGRIFFS

Auch wenn die gesamtheitliche technische Effizienz von Antriebssystemen eine wichtige Orientierungsgröße für energiepolitische Entscheidungen sein kann, greift die bisherige energiepolitische Debatte um Effizienzen zu kurz. Das Konzept der technischen Effizienz lässt für sich allein genommene wesentliche Faktoren für die Bewertung von Technologien außen vor:



Technische Effizienz ist im energiewirtschaftlichen Gesamtkontext zu interpretieren.

- Energieverluste sind vor dem Hintergrund der **Energieverfügbarkeit** zu beurteilen: In einem zukünftigen globalen Energiesystem, in dem Erneuerbare Energien perspektivisch relativ günstig und in sehr großen Mengen verfügbar sein werden, sind Effizienzverluste weniger entscheidend als bei Energieknappheit. Dies gilt heute bereits z.B. dann, wenn im Extremfall für die Nutzung erneuerbaren Stroms vor Ort keine andere Nutzung möglich ist (Stichwort: Überschussstrom): In diesem Fall muss die Erneuerbare Energie gespeichert werden, soll sie zumindest teilweise nutzbar gemacht werden, Effizienzverluste treten in den Hintergrund.
- Die zukünftige Herausforderung des globalen Energiesystems stellt vor diesem Hintergrund weniger die absolute Verfügbarkeit von Energie dar, sondern die Verfügbarkeit der richtigen Menge an Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort, also die Bereitstellung von **Leistung**. Diese Herausforderung können Speichertechnologien bzw. speicherfähige Energieträger, wie z.B. synthetische Kraftstoffe, abdecken. Die zunehmende Relevanz der Leistungsbereitstellung und damit der Versorgungssicherheit bildet die bisherige Debatte um die technische Effizienz meist unzureichend ab.
- Die bisherigen Diskussionen zur technischen Effizienz haben oftmals auch weitere wesentliche Aspekte für Technologiebewertungen nicht ausreichend im Blick: dazu gehört die **Nutzbarkeit vorhandener bzw. den Bedarf an neuen Infrastrukturen**.
- Zudem finden Technologieentwicklungen in der Regel nicht „auf der grünen Wiese“ und unter Ausschluss der Anwender statt. Auch hier stößt die alleinige Fokussierung auf die technische Effizienz schnell an ihre Grenzen, da z.B.

Aspekte **der Sicherstellung einer Vielfalt an Nutzungsanforderungen und -erwartungen** nicht umfasst sind.



Energiepolitische Entscheidungen sollten nicht allein auf Basis der technischen Effizienz von Technologien erfolgen, sondern auf Basis eines **umfassenden Effizienzbegriffs**.

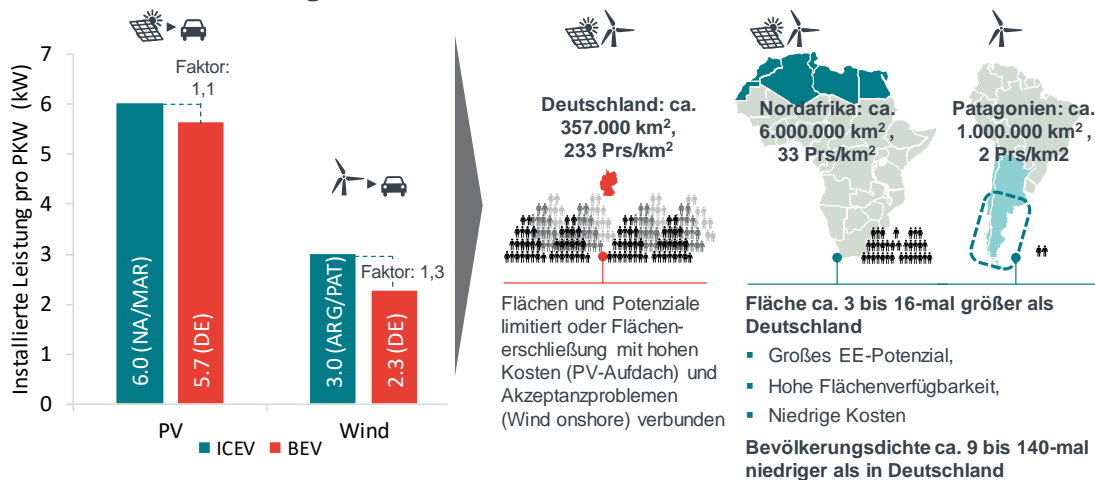
Für wegweisende klimapolitische Debatten und Richtungsentscheidungen sollte deshalb die technische Gesamteffizienz im Kontext eines **umfassenderen, systemischen Wirkmechanismus mit Berücksichtigung weiterer Effizienz kategorien** gesehen und interpretiert werden. Dieser systemische Effizienzbegriff umfasst neben der gesamtheitlichen technischen Effizienz insbesondere

- die **gesamtheitliche ökonomische Effizienz** (= Maß für erreichbare Klimaschutzeffekte pro eingesetzter Geldeinheit) mit Berücksichtigung z.B.
 - der Kosten für die Erschließung und Nutzbarmachung von Erneuerbaren Energien;
 - der Nutzbarkeit vorhandener Infrastrukturen,
 - der Generierung von Skalierungspotenzialen;
- die **gesamtheitliche ökologische Effizienz** (= Maß für Wirksamkeit von technologischen Maßnahmen gegen den Klimawandel) mit Berücksichtigung z.B.
 - des Ausmaßes der erzielbaren Treibhausgasminderungen über den Lebenszyklus einer Technologie;
 - der Geschwindigkeit der Umsetzung einer klimaneutralen Technologie;
- **Weitere Faktoren**, die in Zusammenhang mit dem Einsatz von Technologien stehen, wie z.B.
 - Akzeptanz von Technologien bezüglich Beeinträchtigungen für Umwelt und Allgemeinheit, damit auch z.B. die Verfügbarkeit von Flächen zum Ausbau der Erneuerbaren Energien (vgl. **Abbildung 36**);
 - der Verlässlichkeit und Nutzbarkeit einer Technologie in der Breite der Nutzungsanforderungen in globalem Maßstab;
 - Potenziale der internationalen Zusammenarbeit und Weiterentwicklung nachhaltiger Handelsbeziehungen.



Die Konzepte technische, ökologische und ökonomische Effizienz und weitere Faktoren gehen **Hand in Hand**.

Abbildung 36. PV- bzw. Wind-Kapazitätsbedarf in Deutschland für ein BEV und in Nordafrika oder Patagonien für ein mit PtL betriebenes ICEV

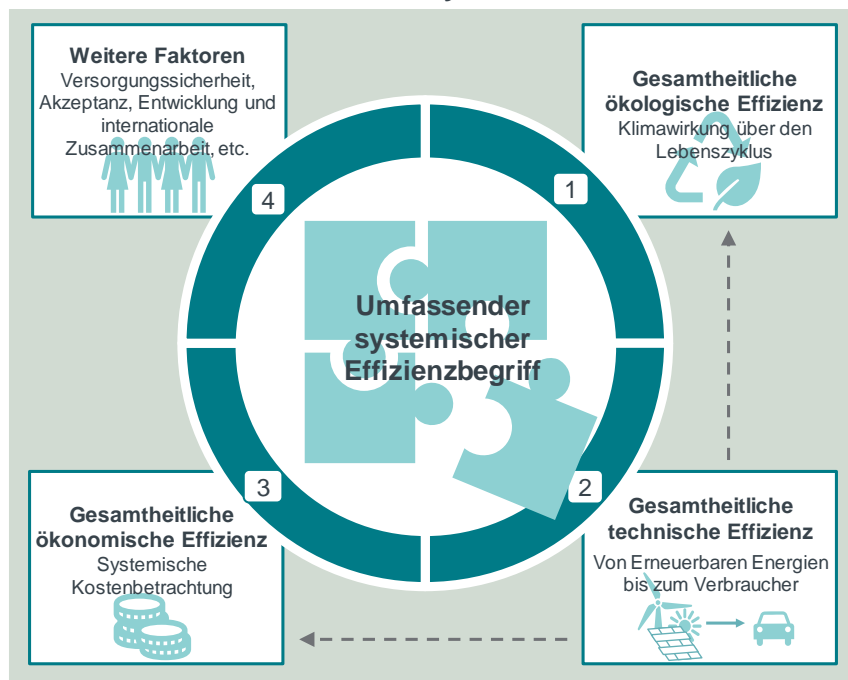


Quelle: Frontier Economics
Hinweis: Details vgl. Kapitel 4.

Die verschiedenen Effizienzkonzepte gehen dabei Hand in Hand: So beeinflusst die technische Effizienz die ökonomische wie auch die ökologische Effizienz, d.h. die Kosten und den ökologischen Fußabdruck des Einsatzes von Technologien. Höhere Effizienzen wirken sich tendenziell kostensenkend und umweltschonend aus, allerdings erfahren energetische Verluste und CO₂-Emissionen hierbei eine

ökonomische und ökologische Bewertung, es wird nicht nur auf kWh abgestellt.

Abbildung 37. Gesamtheitliche technische Effizienz als Baustein einer systemischen Effizienz



Quelle: Frontier Economics

Die integrierte Betrachtungsweise der zentralen Effizienzkategorien ist damit eine wesentliche Grundlage für einen zielführenden und verlässlichen Kurs in Richtung Klimaneutralität.

7. POLITISCHES HANDELN SOLLTE FÜR DIE ENTWICKLUNG ALLER KLIMASCHONENDEN TECHNOLOGIEN OFFEN SEIN

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Studie lassen sich **folgende Grundsätze** für die Definition, Auswahl und Interpretation von Effizienzanalysen im Kontext der klimapolitischen Debatte ableiten:

- Die **politische Fokussierung auf eine einzelne Technologie** auf Basis einer konventionellen Effizienzansicht, hier im Pkw-Mobilitätsbereich, ist **irreführend**, da sie wesentliche Einflussparameter außer Acht lässt. Dies konnte in der vorliegenden Untersuchung für die Pkw-Antriebstechnologien BEV (mit der Nutzung von in Deutschland hergestelltem EE-Strom) und ICEV (mit Nutzung von in internationalen EE-Potenzialregionen hergestellten PtL) quantitativ nachgewiesen werden.
- Die **Methode der gesamtheitlichen technischen Effizienzanalyse** berücksichtigt alle wesentlichen Wertschöpfungsstufen und Einflussparameter und liefert damit eine geeignetere Basis für die Effizienzbewertung von Technologien. Im Rahmen dieser Untersuchungen führt die gesamtheitliche Effizienzanalyse zu dem Ergebnis, dass eine alleinige Präferenz weder zugunsten des BEV noch zugunsten des ICEV sinnvoll ist.
- Eine **nationale Definition von Systemgrenzen als Ausgangspunkt für Technologiefokussierungen ist nicht zielführend**. Importe und Exporte von Erneuerbaren Energien gehören zukünftig zur internationalen Energielandschaft. Die Potenziale der internationalen Zusammenarbeit sollten demnach erschlossen und in die Realität umgesetzt werden.
- Die technische Effizienzanalyse sollte im Kontext eines **systemischen Effizienzbegriffes**, der auch die ökonomische Effizienz und die ökologische Effizienz umfasst, interpretiert werden. Technische Effizienzen erhalten hierdurch einen ökonomischen und ökologischen Wert, es wird nicht nur auf eingesparte kWh abgestellt.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine zukunftsgerichtete Klimapolitik im Verkehrssektor auf die Nutzung und das Offenhalten

aller klimazielkonformen Technologien abzielen sollte. Diesbezüglich besteht bei den legislativen Rahmenbedingungen – auf europäischer wie auch auf nationaler Ebene – Überarbeitungsbedarf. Dies sollte schnellstmöglich erfolgen, da die Transformation des Energiesystems in Richtung Erneuerbarer Energien angesichts des fortschreitenden Klimawandels zunehmend an Dringlichkeit gewinnt.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.	Effizienz von BEV und ICEV bei gesamt-heitlicher Betrachtung auf Augenhöhe	4
Abbildung 2.	PV- bzw. Wind-Kapazitätsbedarf in Deutschland für ein BEV sind annähernd so hoch wie in Nordafrika oder Patagonien für ein mit PtL betriebenes ICEV	5
Abbildung 3.	Gesamtheitliche Effizienz berücksichtigt alle Umwandlungsstufen und internationale EE-Potenziale	8
Abbildung 4.	Effizienzunterschiede zwischen BEVs und ICEVs gleichen sich nahezu aus – Referenzszenarien je Stromerzeugungstechnologie	9
Abbildung 5.	Effizienzverluste treten auf allen Wertschöpfungsstufen auf - vor allem standortbedingte Mindererträge der Stromerzeugung reduzieren die BEV-Effizienz	10
Abbildung 6.	Impliziter Kapazitätsbedarf pro Pkw für die Jahresfahrleistung eines BEV und eines ICEV in den jeweiligen Referenzszenarien	11
Abbildung 7.	Gesamtheitliche Effizienz und zu installierende Leistung (zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs je Fahrzeug)	11
Abbildung 8.	Schwankungsbreite der Gesamteffizienz je Technologiepfad und Szenario am Beispiel PV	12
Abbildung 9.	Bei der gesamtheitlichen Betrachtung schmilzt der Unterschied in der Gesamteffizienz zwischen ICEVs und BEVs	13
Abbildung 10.	Technische Effizienz ist ein Baustein einer umfassenderen systemischen Effizienz	15
Abbildung 11.	Potenzielle außereuropäische Exportregionen für PtL Produkte	21
Abbildung 12.	Der Anteil erneuerbar hergestellten Stroms beträgt nur 8% an der Endenergienachfrage	22
Abbildung 13.	Konventionelle Effizienz eines BEV-Pfads beträgt knapp 70%	25
Abbildung 14.	Gesamtheitliche Effizienz berücksichtigt alle Umwandlungsstufen und internationale EE-Potenziale.	28
Abbildung 15.	Annahmen und Varianten	31
Abbildung 16.	Volllaststunden nach EE-Technologie mit Sensitivitäten	32
Abbildung 17.	Referenzszenarien – Volllaststunden (in kWh/kW) und Effizienzscore (in %) nach Region	34
Abbildung 18.	Ertragseffizienz nach EE-Technologie mit Sensitivitäten	35
Abbildung 19.	Beispieldarstellung für die Ladeverluste beim AC-Laden	38
Abbildung 20.	Effizienzunterschiede zwischen BEV und ICEV nach Betrachtungsansatz und EE-Technologie – Referenzszenarien je Stromerzeugungstechnologie	41
Abbildung 21.	Impliziter PV-Kapazitätsbedarf pro Pkw für die Jahresfahrleistung mit BEV und ICEV in den jeweiligen Referenzszenarien	42
Abbildung 22.	Gesamtheitliche Effizienz und zu installierende Leistung (zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs je Fahrzeug)	43
Abbildung 23.	Effizienzverluste illustriert durch das BEV-Referenzszenario	45
Abbildung 24.	Effizienzverluste in den Referenzszenarien nach Wertschöpfungsstufe im Vergleich zur konventionellen Betrachtung	46
Abbildung 25.	Gesamtheitliche Effizienz und Ertragseffizienz für die Referenzszenarien: Differenzierung zur bisherigen konventionellen Sichtweise	49
Abbildung 26.	PV - Tatsächlicher Leistungsbedarf pro ICEV und BEV	51

Abbildung 27.	Einfluss der Volllaststunden an PV-Standorten auf zu installierende Leistung zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs des Referenz-Pkw	54
Abbildung 28.	Einfluss der Volllaststunden an Windkraft-Standorten auf zu installierende Leistung zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs des Referenz-Pkw	55
Abbildung 29.	Effizienzauswirkungen durch Fahrzeugnutzung im Winter bei ca. 0 °C in der Stadt.	57
Abbildung 30.	Gesamteffizienz Mobilität nach relevanten Sensitivitäten	59
Abbildung 31.	Gesamtheitliche Effizienz im „Referenzszenario PV“ mit HT und NT Elektrolyse (nach Wertschöpfungsstufen)	60
Abbildung 32.	Gesamtheitliche Effizienz im „Referenzszenario PV“ mit niedrigen und hohen Ladeverlusten (nach Wertschöpfungsstufen)	61
Abbildung 33.	Schwankungsbreite der Gesamteffizienz je Technologiepfad und Szenario am Beispiel PV (basierend auf ausgewählten Parametervariationen)	62
Abbildung 34.	Gesamteffizienz von ICEV und BEV nach konventioneller und gesamtheitlicher Betrachtung	63
Abbildung 35.	Gesamtheitliche Effizienz und zu installierende Leistung (zur Deckung des erforderlichen Energiebedarfs je Fahrzeug)	63
Abbildung 36.	PV- bzw. Wind-Kapazitätsbedarf in Deutschland für ein BEV und in Nordafrika oder Patagonien für ein mit PtL betriebenes ICEV	66
Abbildung 37.	Gesamtheitliche technische Effizienz als Baustein einer systemischen Effizienz	66
Abbildung 38.	Kalkulationsmethoden der Effizienzwerte der einzelnen Wertschöpfungsstufen	75
Abbildung 39.	Referenzszenarien BEV - Effizienzfaktoren und Wirkungsgradverluste nach Wertschöpfungsstufen	76
Abbildung 40.	Referenzszenarien ICEV - Effizienzfaktoren und Wirkungsgradeverluste nach Wertschöpfungsstufen	76
Abbildung 41.	VLS Sensitivitäten BEV	77
Abbildung 42.	VLS Sensitivitäten ICEV	77
Abbildung 43.	Winter/Stadt Sensitivität BEV	77
Abbildung 44.	Winter/Stadt Sensitivität ICEV	78
Abbildung 45.	Technische Sensitivitäten BEV, Variation der Ladeverluste	78
Abbildung 46.	Technische Sensitivitäten ICEV, Variation der Elektrolysetechnologie (HT statt NT)	78
Abbildung 47.	Effizienz-Sensitivitäten BEV	79
Abbildung 48.	Effizienz-Sensitivitäten ICEV	79

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AC	Wechselstrom
BEV	Battery Electric Vehicle; Batterieelektrisches Fahrzeug
c.p.	ceteris paribus, unter sonst gleichen Bedingungen
DC	Gleichstrom
EE	Erneuerbare Energien
E-Fuels	synthetische Flüssigkraftstoffe
h	Stunde
H ₂	Wasserstoff
HT	Hochtemperatur (Elektrolyse)
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle; Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
int.	international
konv	konventionell
kWh	Kilowattstunde
NT	Niedrigtemperatur (Elektrolyse)
nat.	national
MENA	Middle East & North Africa
Opt	Optimistisch
PEM	Proton Exchange Membrane (Elektrolyse)
PtL	Power-to-Liquid; synthetische, aus erneuerbarem Strom hergestellte Flüssigkraftstoffe
PtX	Power-to-X; gasförmige, flüssige oder feste, chemische, aus erneuerbarem Strom hergestellte Energieträger
PV	Photovoltaik
Ref	Referenzszenario
t	Tonne
VLS	Volllaststunden
WKA	Windkraftanlage
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

REFERENZEN

- **Acatech et al. (2017)**, »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. und Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V., Stellungnahme, November 2017, https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/06/ESYS_Stellungnahme_Sektorkopplung.pdf
- **ADAC autotest (2019)**, Ford Focus 1.5 EcoBlue ST-Line - Fünftürige Schräghecklimousine der Kompaktklasse (88 kW / 120 PS), April 2019, https://www.adac.de/ext/itr/tests/Autotest/AT5825_Ford_Focus_1_5_EcoBlue_ST_Line/Ford_Focus_1_5_EcoBlue_ST_Line.pdf.
- **AG Energiebilanzen (2020)**, Stromerzeugung nach Energieträgern 1990 - 2019 (Stand Februar 2020), https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausdruck_strerz_abgabe_20200217.pdf.
- **Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2016)**, Metaanalyse – Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr, Forschungsradar Energiewende, Agentur für Erneuerbare Energien und Prognos AG, April 2016.
- **Agora Energiewende (2017)**, Future Cost of Onshore Wind - Recent auction results, long-term outlook and implications for upcoming German auctions, April 2017, https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Future_Cost_of_Wind/Agora_Future-Cost-of-Wind_WEB.pdf.
- **Agora und Frontier Economics (2018)**, Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, Frontier Economics, Studie im Auftrag von Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, März 2018, https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost-Studie_WEB.pdf
- **BDEW (2017)**, Stromzahlen 2017 – Vorläufige Zahlen für 2016, <https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-Stromzahlen-2017.pdf>.
- **BDEW (2020)**, Jahresvolllaststunden 2018/2019, <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/jahresvolllaststunden/>.
- **BMVI (2020)**, Verkehr in Zahlen 2019/20, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehr-in-zahlen.html>
- **BMVI und NOW GmbH (2016)**, Abschlussbericht Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkung von Elektrofahrzeugen, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, 2016.
- **BMWi (2020)**, Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland, unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: Februar 2020), https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=26.

- **Breyer (2012)**, Economics of Hybrid Photovoltaic Power Plants, Dissertation, Universität Kassel, August 2012, <https://kobra.uni-kassel.de/bitstream/123456789/2012102242017/3/DissertationChristianBreyer.pdf>.
- **Brynnolf et al. (2018)**, Electrofuels for the transport sector: A review of production costs, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 81, Nr. 2, Januar 2018, S. 1887-1905.
- **Deutscher Bundestag (2019a)**, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Stephan Kühn, Oliver Krischer, Dr. Julia Verlinden, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Drucksache 19/8204, Mengen, Kosten und Einsatzbereiche strombasierter Kraftstoffe im Verkehr, 25.03.2019.
- **Deutscher Bundestag (2019b)**, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Bernd Reuther, Frank Sitta, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP, Drucksache 19/15198, Synthetische Kraftstoffe im Luftverkehr, 06.12.2019.
- **Deutscher Bundestag (2020)**, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Lorenz Gösta Beutin, Sabine Leidig, Hubertus Zdebel, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE, Drucksache 19/18122, Ökologische Folgen und Kosten der Wasserstoffwirtschaft, 24.04.2020.
- **Doyle und Muneer (2019)**, Energy consumption and modelling of the climate control system in the electric vehicle, Energy Exploration & Exploitation 2019, Volume 37, Nr. 1.
- **Fasihi und Breyer (2020)**, Baseload electricity and hydrogen supply based on hybrid PV-Wind power plants, Journal of Cleaner Production, Nr. 243, 2020.
- **FZ Jülich (2017)**, Techno-Economic Analysis of a Potential Energy Trading Link between Patagonia and Japan Based on CO2 free Hydrogen, <http://user.fz-juelich.de/record/837682>.
- **EVWind (2019)**, Wind energy in Argentina: YPF wind farm, 20.08.2019.
- **Fraunhofer UMSICHT (2013)**, Speicher für die Energiewende, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, September 2013, <https://speicherinitiative.at/assets/Uploads/18-Speicher-fuer-die-Energiewende-Fraunhofer-UMSICHT.pdf>.
- **Fraunhofer ISE (2018)**, Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.
- **Frontier Economics et al. (2017)**, Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland - Eine modellbasierte Analyse, Studie im Auftrag von FNB Gas, https://www.fnb-gas.de/files/fnb_gas_wert_von_gasinfrastrukturendbericht.pdf
- **Frontier Economics (2018)**, International Aspects of a Power-to-X Roadmap, Studie im Auftrag des Weltenergieerats Deutschland (WER Deutschland), <https://www.frontier-economics.com/media/2642/frontier-int-ptx-roadmap-stc-12-10-18-final-report.pdf>.
- **hzwei (2016)** - TU Berlin erforscht nasse Verbrennung, <https://www.hzwei.info/blog/2016/06/14/tu-berlin-erforscht-nasse-verbrennung/>.
- **ifeu und Wuppertal Institut (2007)**, Elektromobilität und Erneuerbare Energien, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/Energiebalance_AP5.pdf.

- **KBA (2020)**, Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung (VK), Entwicklung der Fahrleistungen nach Fahrzeugarten seit 2014, https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_archiv/2014/verkehr_in_kilometern_kurzbericht_pdf.pdf;jsessionid=BD0C2427E9AEDA8D1DEB3B81FB383B8C.live11291?_blob=publicationFile&v=1.
- **Roland Berger und Prognos (2019)**, Wegweiser Solarwirtschaft: PV Roadmap 2020.
- **SMARD Strommarktdaten (2020)**, <https://www.smard.de/home>.
- **UBA (2015)**, Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung, INFRAS AG, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, April 2015, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_30_2015_postfossile_energieversorgungsoptionen.pdf.
- **UBA (2016)**, Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, April 2016, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf.
- **Tizgui et al. (2018)**, Estimation and Analysis of Wind Electricity Production Cost in Morocco, International Journal of Energy Economics and Policy 2018, Volume 8, Nr. 3, S. 58-66.

ANHANG: ÜBERSICHT REFERENZSZENARIEN

Abbildung 38. Kalkulationsmethoden der Effizienzwerte der einzelnen Wertschöpfungsstufen

Wertschöpfungsstufe	Beschreibung
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	Berechnung auf Basis zu erwartender VLS nach Technologie und Standort im Verhältnis zur maximalen VLS-Zahl, die aktuell weltweit mit der jeweiligen Technologie erreicht werden kann. Für PV-Anlagen ist der bestmögliche Wert aktuell 2.500 h (bspw. in der südamerikanischen Atacama-Wüste) und für Wind-Anlagen 6.500 h (bspw. Patagonien, Tibet). Der bestmögliche Wert für PV/Wind (Kombinations-)Anlagen entspricht der jeweiligen Gewichtung des PV- und Wind-Wertes.
Netzverluste, <i>nur BEVs</i>	Berechnung auf Basis der gesamtdeutschen Netzverluste im Verhältnis zum gesamtdeutschen Stromverbrauch.
Speicherverluste (saisonal), <i>nur BEVs</i>	Effizienzverluste durch die Zwischenspeicherung von Strom aufgrund der ungleichen (saisonalen) Verteilung der EE-Produktion in Deutschland in den BEV-Szenarien. Berücksichtigung saisonaler (Sommer zu Winter) und Tag-Nacht Speicherung von PV-Strom sowie saisonaler (Winter zu Sommer) Speicherung von Wind-Strom. Vereinfachte Grundannahme ist, dass die Mobilitätsnachfrage über das Jahr gleichmäßig verteilt ist. Basis der Schätzung der zu zwischenspeichernden Energiemengen sind historische Erzeugungsvolumina von PV und Wind in Deutschland. Als Speichertechnologie gehen wir von einer PtH2P Lösung aus. Die hier zugrunde gelegten Annahmen zur Elektrolyse entsprechen denen der ICEV-Referenzszenarien. Zudem gehen wir von einem Gasspeicherverlust von 10% und einem Wirkungsgrad bei der Rückverstromung mittels H2-Gaskraftwerk von 45% aus. Aufgrund der verlustfreien Speicher bzw. Lagermöglichkeit von synthetischen Kraftstoffen, berücksichtigen wir in den ICEV Szenarien keine (saisonalen) Speicherverluste.
Ladeverluste, <i>nur BEVs</i>	Ladeverluste bei der Be- und Entladung der Batterie.
Effizienz Elektrolyse, <i>nur ICEVs</i>	Wirkungsgrad der Umwandlung von erneuerbarem Strom zu Wasserstoff.
Effizienz Fischer-Tropsch, <i>nur ICEVs</i>	Wirkungsgrad der Umwandlung von Wasserstoff zu synthetischen Flüssigkraftstoffen per Fischer-Tropsch-Verfahren inklusive der Raffination/Verfeinerung zum Endprodukt synthetischer Kraftstoff.
Verluste int. Transport, <i>nur ICEVs</i>	Effizienzverluste durch den internationalen Transport des synthetischen Kraftstoffs mittels Schifffahrt. Geschätzt auf Basis des Tageskraftstoffbedarfs eines typischen Tankschiffs und der zu transportierenden Distanz nach Deutschland.
Verluste nat. Transport	Effizienzverluste durch den nationalen Transport des synthetischen Kraftstoffs. Pauschal auf 1% festgelegt.
Effizienz Mobilität	Berücksichtigt wird die Effizienz der Fahrzeugnutzung also die Effizienz des Motors (Verbrennungsmotor bzw. Elektromotor), die Wirkungsgradverluste durch die Mechanik bzw. des restlichen Antriebsstrangs und die Wirkungsgradverluste durch weitere Anwendung im Fahrzeug wie bspw. die Innenraum-Klimatisierung. Andere Wirkungsgradverluste, etwa des Ladevorgangs oder beim Transport, werden in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen berücksichtigt.
Gesamtheitliche Effizienz	Berücksichtigt werden jeweils für BEVs und ICEVs alle relevanten Wertschöpfungsstufen, von der Ertragseffizienz der EE-Anlagen bis hin zur Effizienz der Fahrzeugnutzung.
Leistung pro Pkw	Berechnung der zu installierenden Leistung, die benötigt wird, um den durchschnittlichen Jahresenergiebedarf eines Fahrzeuges zu erzeugen. Basis der Berechnung ist die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Pkw in Deutschland (in km/Jahr) und die Fahrzeugverbräuche von BEVs und ICEVs (in kWh/km) zur Berechnung des Jahresenergiebedarfs sowie die realisierbaren VLS der jeweiligen EE-Technologien in Abhängigkeit des Standorts zur Übersetzung der Jahresenergiemenge in zu installierende Leistung (kW).

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: **Stromerzeugung/ Ertragseffizienz:** basierend auf BMWi (2020), BDEW (2020), Fraunhofer ISE (2018), EVWind (2019), FZ Jülich (2017), Roland Berger/Prognos (2019).
Netzverluste: basierend auf BDEW (2017)

Speicherverluste (saisonal): Fraunhofer UMSICHT (2013), Frontier Economics et al. (2017), hzwei (2016), SMARD Strommarktdaten (2020).

Ladeverluste: basierend auf ifeu und Wuppertal Institut (2007), BMVI und NOW GmbH (2016).

Effizienz Elektrolyse: basierend auf Agora und Frontier Economics (2018) und Experteninterviews.

Effizienz Fischer Tropsch: Agora und Frontier Economics (2018), Experteninterviews, Brynolf et al. (2018).

Verluste int. Transport: basierend auf Basis von <http://hb.hr/wp-content/uploads/2014/12/tankers.pdf> und <https://www.sear.ates.com/services/distances-time/>.

Effizienz Mobilität: basierend auf Doyle und Muneer (2019),

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1031883/umfrage/entwicklung-der-temperatur-im-auto-nach-standzeit-und-aussentemperatur/>, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/auto-klimaanlagen/>,

<http://www.mx-electronic.com/pdf-texte/link-e-mobility/Der-Elektrofachmann-Wirkungsgrad-Vergleich-zwischen-Fahrz.pdf>

Leistung pro Pkw: Jahresfahrleistung basierend auf KBA (2020).

Abbildung 39. Referenzszenarien BEV - Effizienzfaktoren und Wirkungsgradverluste nach Wertschöpfungsstufen

Wertschöpfungsstufe	PV Referenzszenario	Wind Referenzszenario	PV/Wind Referenzszenario
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	Deutschland: 969 VLS/ 39%	Deutschland: 2.071 VLS/ 32%	Deutschland: 1.579 VLS/ 35%
Netzverluste	5%	5%	5%
Speicherverluste (saisonal)	15%	10%	5%
Ladeverluste	20%	20%	20%
Effizienz Mobilität	71%	71%	71%
Gesamtheitliche Effizienz	14%	13%	16%
Leistung pro Pkw	5,7 kW	2,3 kW	2,7 kW

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 40. Referenzszenarien ICEV - Effizienzfaktoren und Wirkungsgradeverluste nach Wertschöpfungsstufen

Wertschöpfungsstufe	PV Referenzszenario	Wind Referenzszenario	PV/Wind Referenzszenario
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	Nordafrika/Marokko: 2.344 VLS/ 94%	Argentinien/Patagonien: 4.730 VLS/ 73%	Nordafrika/Marokko: 2.987 VLS/ 75%
Effizienz Elektrolyse	67%	67%	67%
Effizienz Fischer-Tropsch	73%	73%	73%
Verluste int. Transport	0,2%	0,9%	0,2%
Verluste nat. Transport	1%	1%	1%
Effizienz Mobilität	29%	29%	29%
Gesamtheitliche Effizienz	13%	10%	10%
Leistung pro Pkw	6,0 kW	3,0 kW	4,7 kW

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 41. VLS Sensitivitäten BEV

Wertschöpfungsstufe	PV DE Opt	Wind DE Offshore	Wind Nord-DE Onshore	Wind DE Onshore
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	Deutschland: 1.050 VLS/ 42%	Deutschland: 3.375 VLS/ 52%	Deutschland: 2.500 VLS/ 38%	Deutschland: 1.805 VLS/ 28%
Netzverluste	5%	5%	5%	5%
Speicherverluste (saisonal)	15%	10%	10%	10%
Ladeverluste	20%	20%	20%	20%
Effizienz Mobilität	71%	71%	71%	71%
Gesamtheitliche Effizienz	15%	22%	16%	12%
Leistung pro Pkw	5,2 kW	1,4 kW	1,9 kW	2,6 kW

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 42. VLS Sensitivitäten ICEV

Wertschöpfungsstufe	PV NA/MAR Opt	Wind ARG/PAT Opt	Wind NA/MAR Opt	Wind NA/MAR Base
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	Nordafrika/Marokko: 2.500 VLS/ 100%	Argentinien/ Patagonien: 5.200 VLS/ 80%	Nordafrika/ Marokko: 4.550 VLS/ 70%	Nordafrika/ Marokko: 3.629 VLS/ 56%
Effizienz Elektrolyse	67%	67%	67%	67%
Effizienz Fischer- Tropsch	73%	73%	73%	73%
Verluste int. Transport	0,2%	0,9%	0,2%	0,2%
Verluste nat. Transport	1%	1%	1%	1%
Effizienz Mobilität	29%	29%	29%	29%
Gesamtheitliche Effizienz	14%	11%	10%	8%
Leistung pro Pkw	5,7 kW	2,7 kW	3,1 kW	3,9 kW

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 43. Winter/Stadt Sensitivität BEV

Wertschöpfungsstufe	PV 0°/Stadt	Wind 0°/Stadt	PV/Wind* 0°/Stadt
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	Deutschland: 969 VLS/ 39%	Deutschland: 2.071 VLS/ 32%	Deutschland: 1.579 VLS/ 35%
Netzverluste	5%	5%	5%
Speicherverluste (saisonal)	15%	10%	5%
Ladeverluste	20%	20%	20%
Effizienz Mobilität	39%	39%	39%
Gesamtheitliche Effizienz	8%	7%	9%
Leistung pro Pkw	9,7 kW	3,9 kW	4,7 kW

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: * Zusätzliche Information, d.h. nicht im Hauptteil des Berichts aufgeführt.

Abbildung 44. Winter/Stadt Sensitivität ICEV

Wertschöpfungsstufe	PV 0°/Stadt	Wind 0°/Stadt	PV/Wind* 0°/Stadt
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	Nordafrika/Marokko: 2.344 VLS/ 94%	Argentinien/Patagonien: 4.730 VLS/ 73%	Nordafrika/Marokko: 2.987 VLS/ 75%
Effizienz Elektrolyse	67%	67%	67%
Effizienz Fischer-Tropsch	73%	73%	73%
Verluste int. Transport	0,2%	0,9%	0,2%
Verluste nat. Transport	1%	1%	1%
Effizienz Mobilität	22%	22%	22%
Gesamtheitliche Effizienz	10%	8%	8%
Leistung pro Pkw	7,4 kW	3,7 kW	5,8 kW

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: * Zusätzliche Information, d.h. nicht im Hauptteil des Berichts aufgeführt.

Abbildung 45. Technische Sensitivitäten BEV, Variation der Ladeverluste

Wertschöpfungs- stufe	PV 30% Ladeverl.	PV 10% Ladeverl.	Wind 30% Ladeverl.	Wind 10% Ladeverl.	PV/Wind 30% Ladeverl.*	PV/Wind 10% Ladeverl.*
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	Deutschland: 969 VLS/ 39%	Deutschland: 969 VLS/ 39%	Deutschland: 2.071 VLS/ 32%	Deutschland: 2.071 VLS/ 32%	Deutschland: 1.579 VLS/ 35%	Deutschland: 1.579 VLS/ 35%
Netzverluste	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Speicherverluste (saisonal)	15%	15%	10%	10%	5%	5%
Ladeverluste	30%	10%	30%	10%	30%	10%
Effizienz Mobilität	71%	71%	71%	71%	71%	71%
Gesamtheitliche Effizienz	12%	16%	12%	15%	14%	18%
Leistung pro Pkw	6,5 kW	5,0 kW	2,6 kW	2,0 kW	3,1 kW	2,4 kW

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: * Zusätzliche Information, d.h. nicht im Hauptteil des Berichts aufgeführt.

Abbildung 46. Technische Sensitivitäten ICEV, Variation der Elektrolysetechnologie (HT statt NT)

Wertschöpfungsstufe	PV HT	Wind HT	PV/Wind HT*
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	Nordafrika/Marokko: 2.344 VLS/ 94%	Argentinien/Patagonien: 4.730 VLS/ 73%	Nordafrika/Marokko: 2.987 VLS/ 75%
Effizienz Elektrolyse	81%	81%	81%
Effizienz Fischer-Tropsch	73%	73%	73%
Verluste int. Transport	0,2%	0,9%	0,2%
Verluste nat. Transport	1%	1%	1%
Effizienz Mobilität	29%	29%	29%
Gesamtheitliche Effizienz	16%	12%	13%
Leistung pro Pkw	5,0 kW	2,5 kW	3,9 kW

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: * Zusätzliche Information, d.h. nicht im Hauptteil des Berichts aufgeführt.

Abbildung 47. Effizienz-Sensitivitäten BEV

Wertschöpfungsstufe	niedrige Effizienz	hohe Effizienz
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	PV Deutschland: 969 VLS/ 39%	PV Deutschland: 1.050 VLS/ 42%
Netzverluste	5%	5%
Speicherverluste (saisonal)	15%	15%
Ladeverluste	30%	10%
Effizienz Mobilität	39%	71%
Gesamtheitliche Effizienz	7%	17%
Leistung pro Pkw	11,0 kW	4,6 kW

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 48. Effizienz-Sensitivitäten ICEV

Wertschöpfungsstufe	niedrige Effizienz	hohe Effizienz
Stromerzeugung/ Ertragseffizienz	PV Nordafrika/Marokko: 2.344 VLS/ 94%	PV Nordafrika/Marokko: 2.500 VLS/ 100%
Effizienz Elektrolyse	67%	81%
Effizienz Fischer-Tropsch	73%	73%
Verluste int. Transport	0,2%	0,2%
Verluste nat. Transport	1%	1%
Effizienz Mobilität	22%	29%
Gesamtheitliche Effizienz	10%	17%
Leistung pro Pkw	7,4 kW	4,7 kW

Quelle: Frontier Economics

