

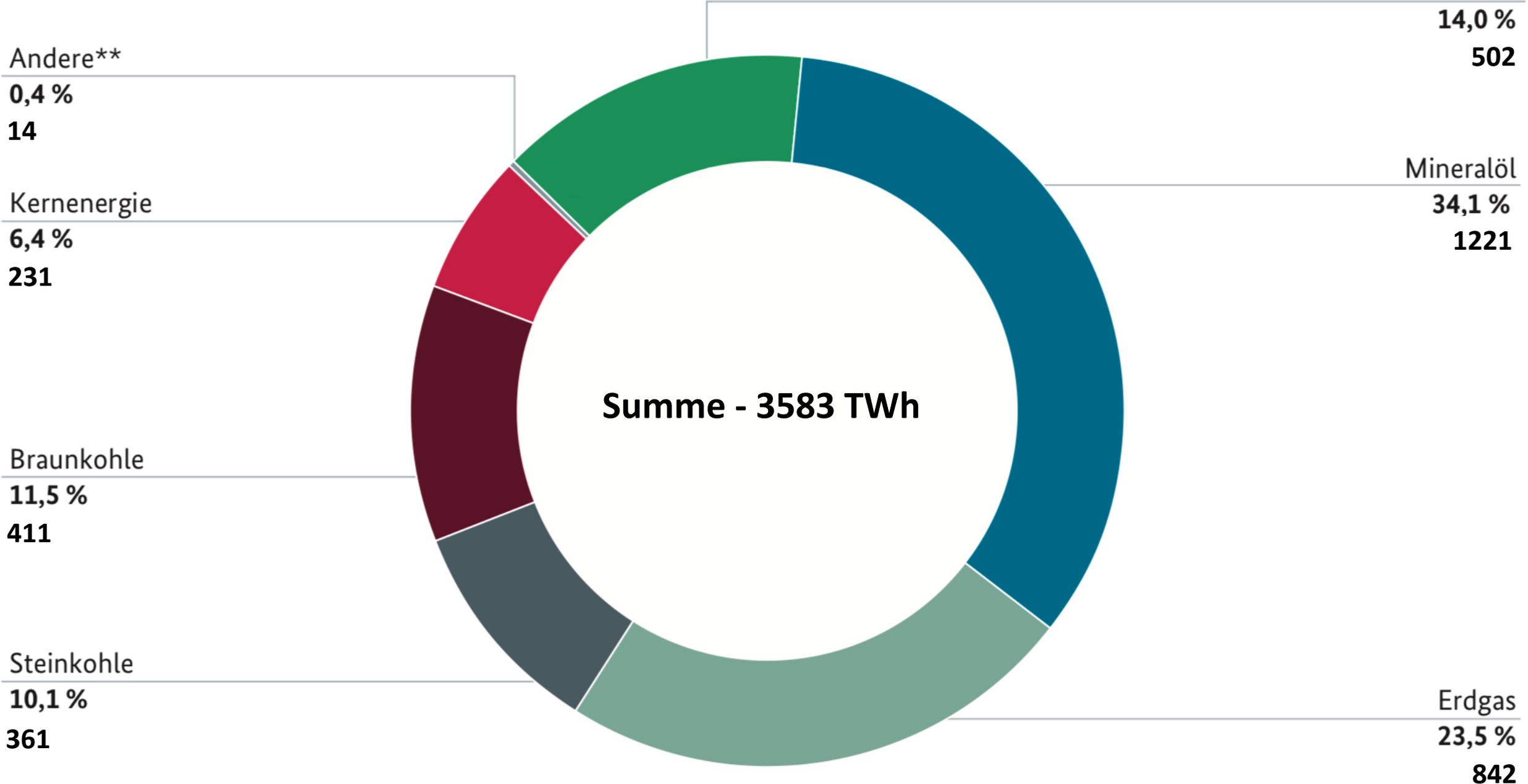
Zukünftige Bootsantriebe

Kommt der fossilfreie Schiffsantrieb?

Dr.-Ing. Hans-Ullrich Döhler

Deutscher Motoryachtverband e.V.
Referat Raumordnung / Umwelt / Infrastruktur

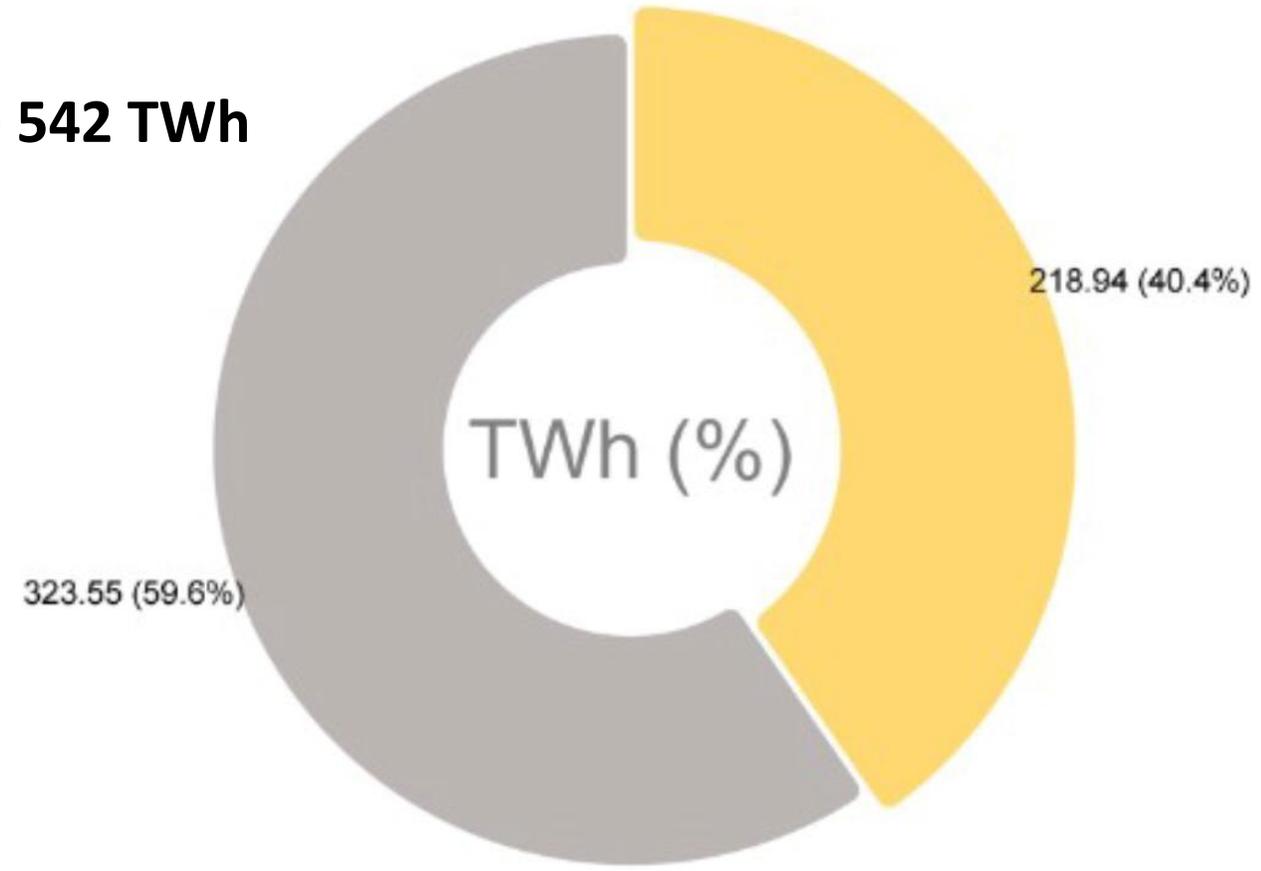
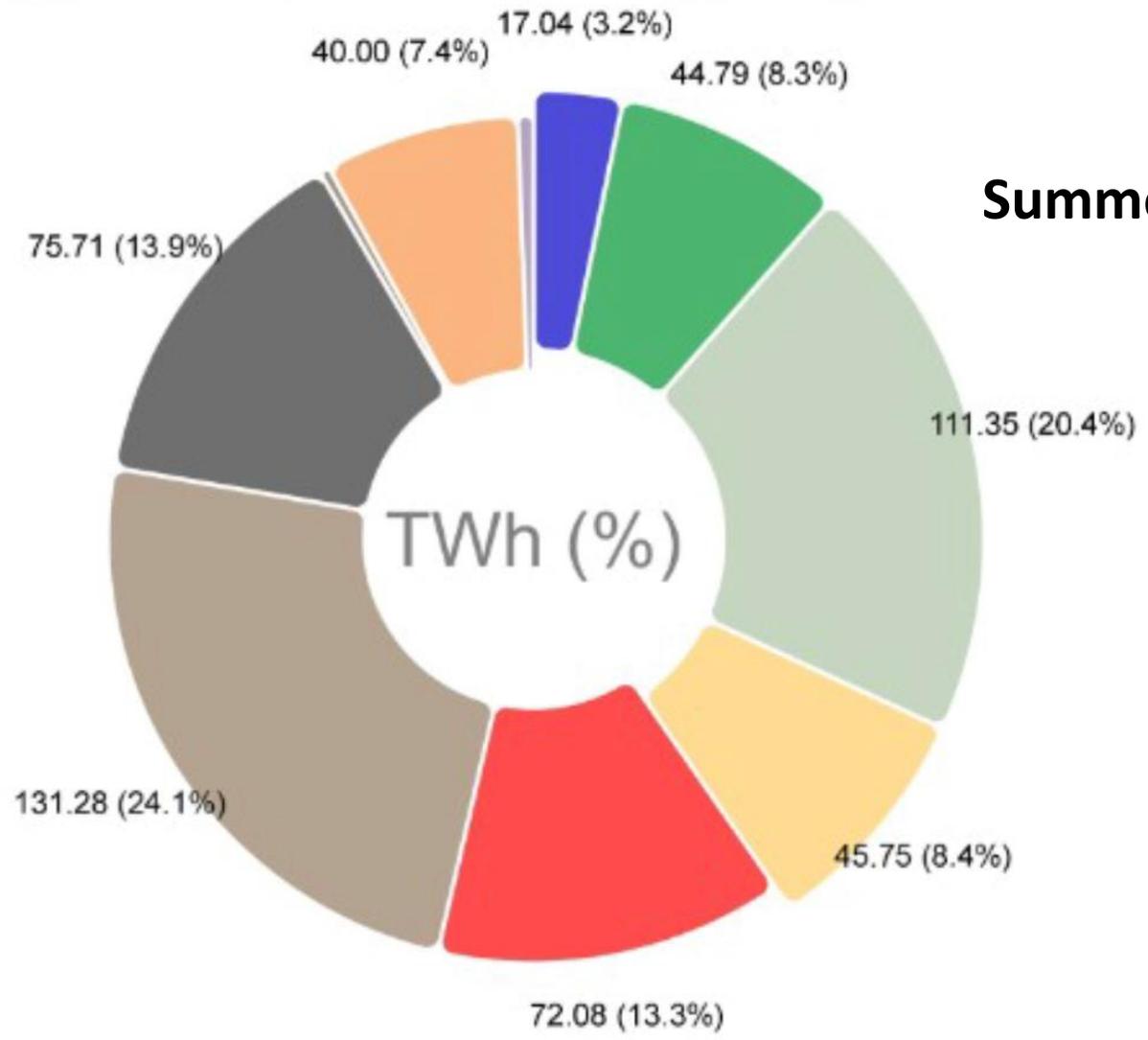
Primärenergieverbrauch Deutschland 2018 in TWh



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen – AGBE

- Wasserkraft
- Biomasse
- Wind
- Solar
- Kernenergie
- Braunkohle
- Steinkohle
- Öl
- Gas
- Andere

- Erneuerbare
- Nicht Erneuerbare



Nettostromerzeugung von Kraftwerken zur öffentlichen Stromversorgung.
 Datenquelle: 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX
 letztes Update: 02 Jan 2019 11:22

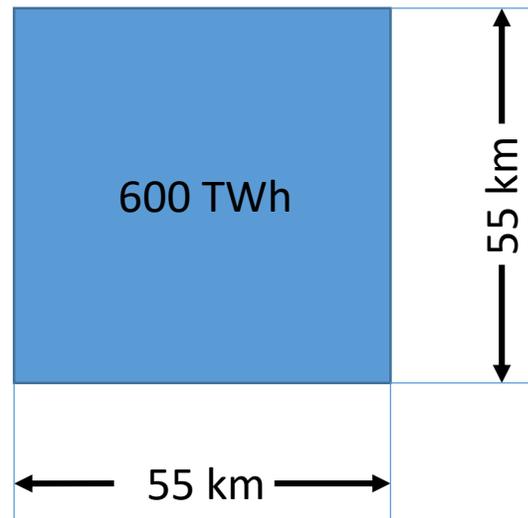
Energiebetrachtungen – Deutschland

- Primärenergieverbrauch Deutschland 2018 ca. 3600 TWh
- 82 Mio Einwohner -> 43,7 MWh / Einwohner
- 120 kWh pro Einwohner und Tag – (5 kW rund um die Uhr)

- Netto Stromerzeugung Deutschland 2018 ca. 600 TWh
- 82 Mio Einwohner -> 7,3 MWh / Einwohner
- 20 kWh pro Einwohner und Tag – (830 W rund um die Uhr)

Photovoltaik Potential in Deutschland

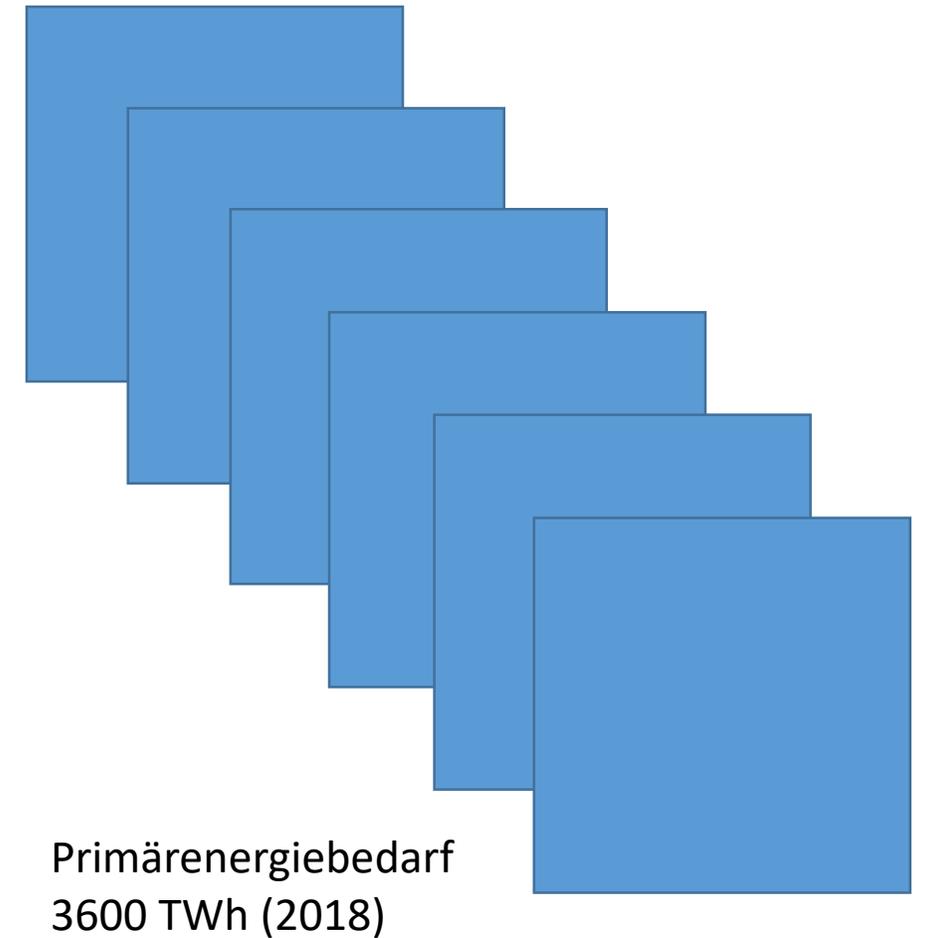
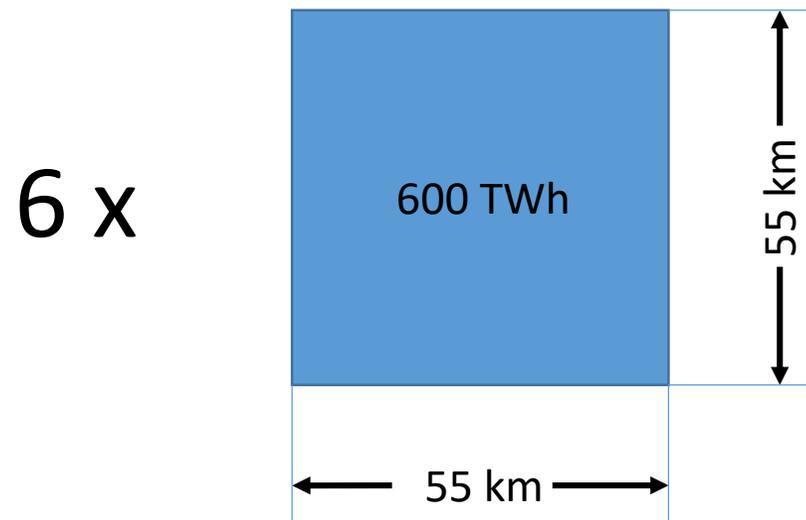
- 200 Wp/m² (200 W/m² peak)
- Jahresertrag 200 kWh/m²/a
- 600 TWh benötigen 3.000.000.000 m²



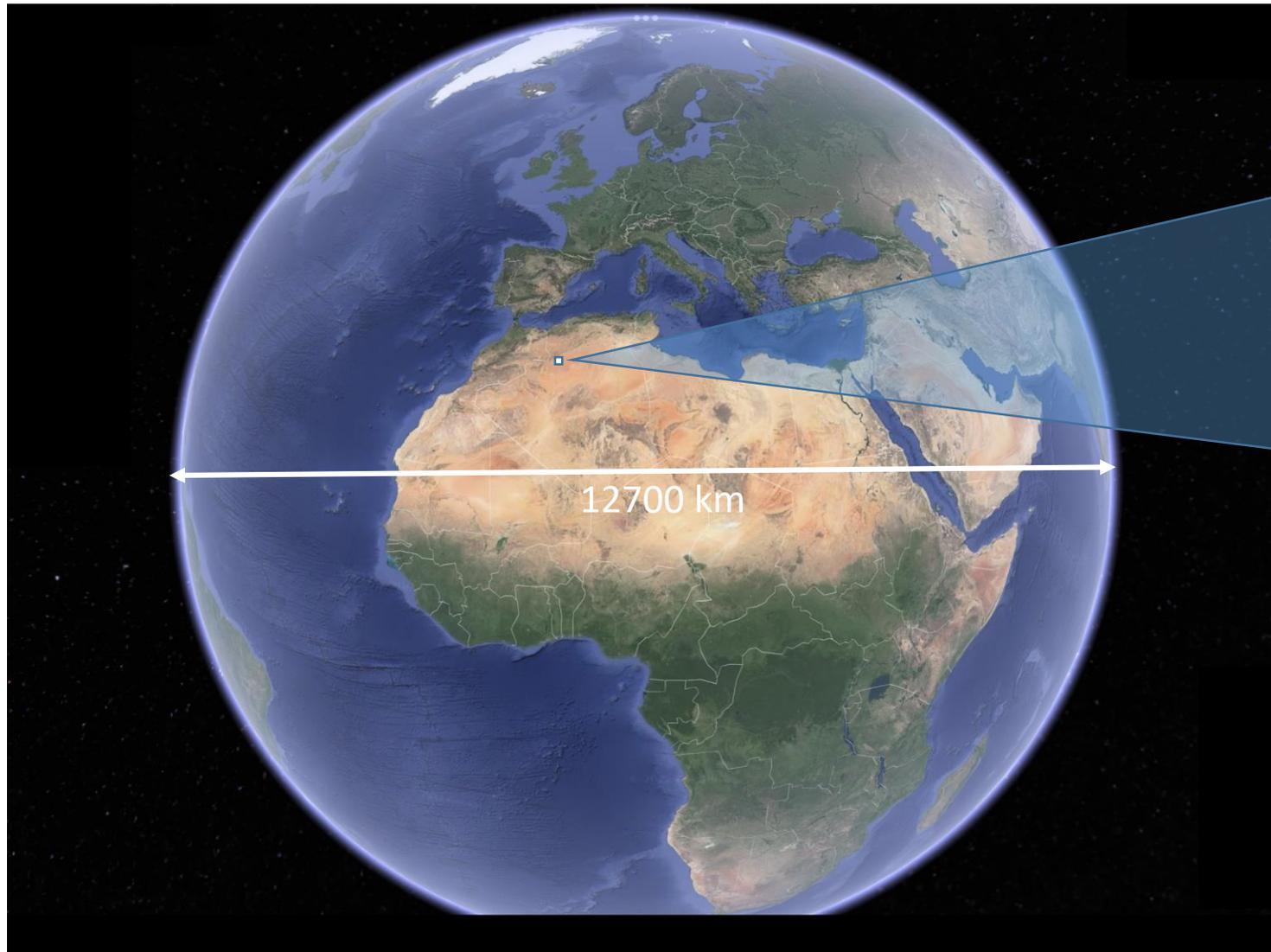
Netto Stromerzeugung
600 TWh (2018)

PV Potential in Deutschland

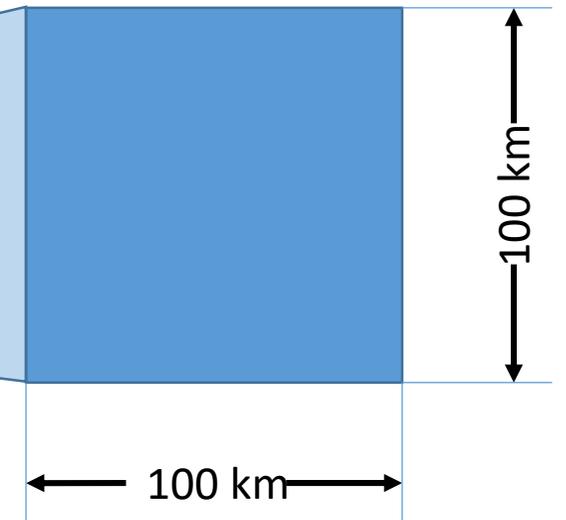
- 200 Wp/m² (200 W/m² peak)
- Jahresertrag 200 kWh/m²/a
- 3600 TWh benötigen 18.000.000.000 m²



PV Potential in Nordafrika



Primärenergiebedarf
3600 TWh (2018)



Elektromobilität

- E-Autos (nur PKW)
- Verbrauch ca. 12 – 22 kWh / 100 km (im Mittel 16 kWh / 100km)
- 45 Mio Autos
- 13.800 km/Auto/a
- Strombedarf maximal $16.000 \cdot 45.000.000 \cdot 138 = 100 \text{ TWh / a}$
- 1/6 der Nettostromerzeugung aus 2018
- ca. 17% mehr Strom als 2018 für 45 Mio E-Autos!

Quelle: Wirtschaftswoche

<https://www.wiwo.de/technologie/mobilitaet/elektromobilitaet-reicht-der-strom/20231296-2.html>

Bewegung und Energie

Kinetische Energie

$$E = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

Luftwiderstand

$$F = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

Leistung

$$P = F \cdot v$$

Reibungsenergie

$$E = F \cdot s$$

Name	Bedeutung
E	Energie in Joule oder Ws
P	Leistung in kW
m	Masse in kg
v	Geschwindigkeit in m/s
F	Kraft in N [kgm/s ²]
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
A	Querschnittfläche
ρ	Luftdichte [1,2 kg/m ³]
s	Weg in m

Beispiel Golf 7 – theoretischer Verbrauch

Name	Bedeutung
m	1500 kg
v	100 km/h = 27,7 m/s
c_w	0,27
A	2,19 m ²
ρ	1.2 kg/m ³

Bewegungsenergie
(0 ... 100 km/h) 0.159 kWh

Luftwiderstand
(bei 100 km/h) 274 N

Energieverbrauch
nur Luftwiderstand
(Stecke 100 km) 274 N · 100 · 1000 m
27.400.000 Nm
27.400.000 Ws
7,6 kWh

Vergleich zwischen Diesel- und E-Motor

Verbrauch Diesel-Motor in der Praxis	Verbrauch E-Motor in der Praxis
4 – 7 Liter / 100 km	
Preis pro Liter 2,00 €: 8,00 – 14,00 € / 100 km	Preis pro kWh 0,40 €: 4,80 – 8,80 € / 100 km
1 Liter enthält ca. 10 kWh (brutto)	
Bei $\eta = 30\%$ (Wirkungsgrad) ca. 3 kWh/l (netto)	
12 – 28 kWh / 100 km	12 – 22 kWh / 100 km
Woher kommt der Unterschied?	Rekuperation (Verzögerung lädt die Batterie)
Alle kinetische Energie wird verschwendet	Der Motor wird zum Generator Besonders wirkungsvoll bei „stop-and-go“

Bootsantrieb - Rumpfgeschwindigkeit

Phasengeschwindigkeit einer Wasserwelle
(Wellenhöhe \ll Wassertiefe)

$$c = \sqrt{\frac{g \lambda}{2\pi}}$$

Rumpfgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{g L}{2\pi}}$$

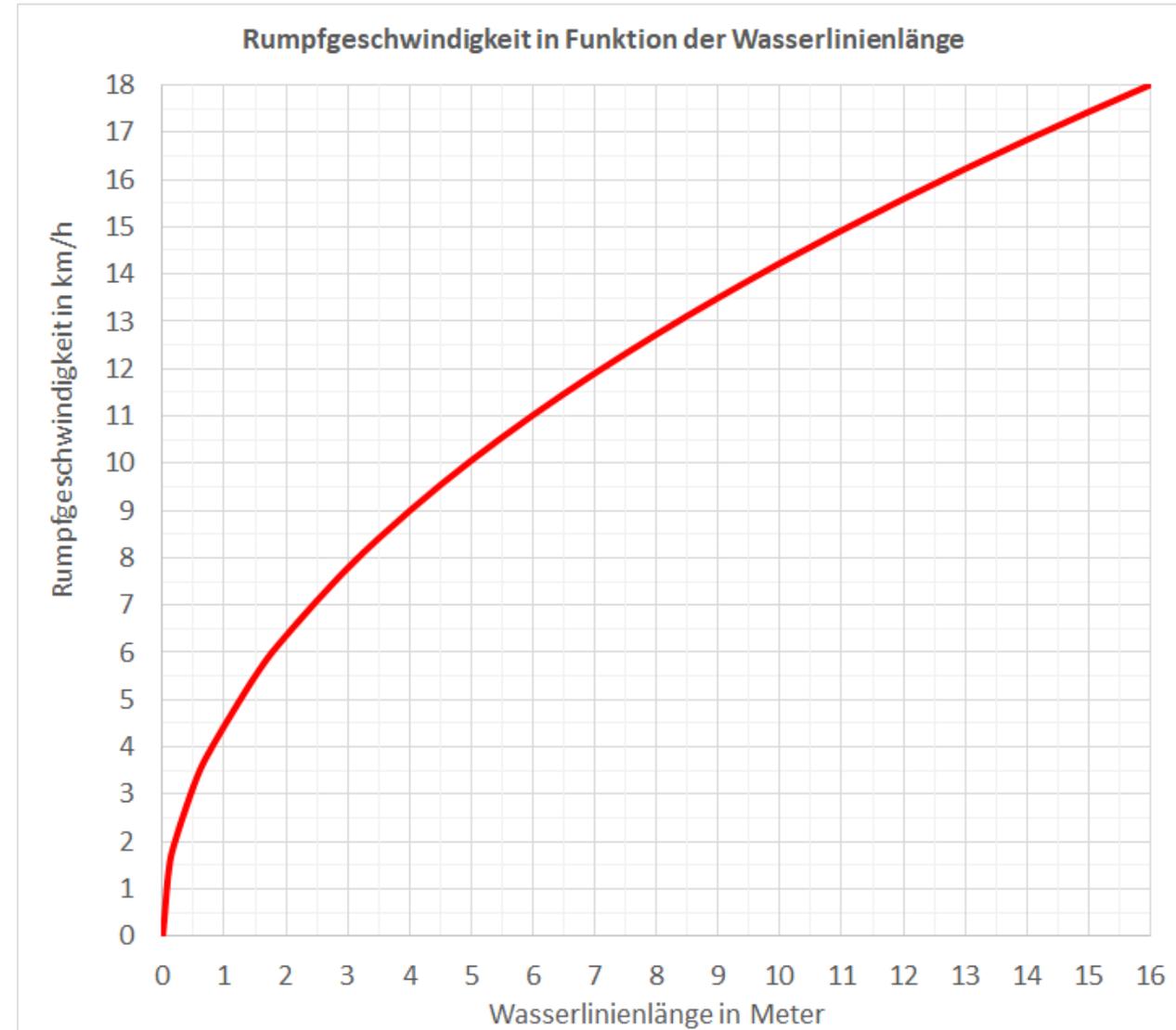
Name	Bedeutung
c	Phasengeschwindigkeit in m/s
g	Gravitationskonstante 9,81 m/s ²
λ	Wellenlänge in m
v	Rumpfgeschwindigkeit in m/s
L	Länge der Wasserlinie in m

Rumpfgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{g L}{2\pi}} \approx 1,25\sqrt{L} \quad [\text{m/s}]$$

$$v \approx 4,5\sqrt{L} \quad [\text{km/h}]$$

Quelle: <https://energie.ch/bootantriebe>



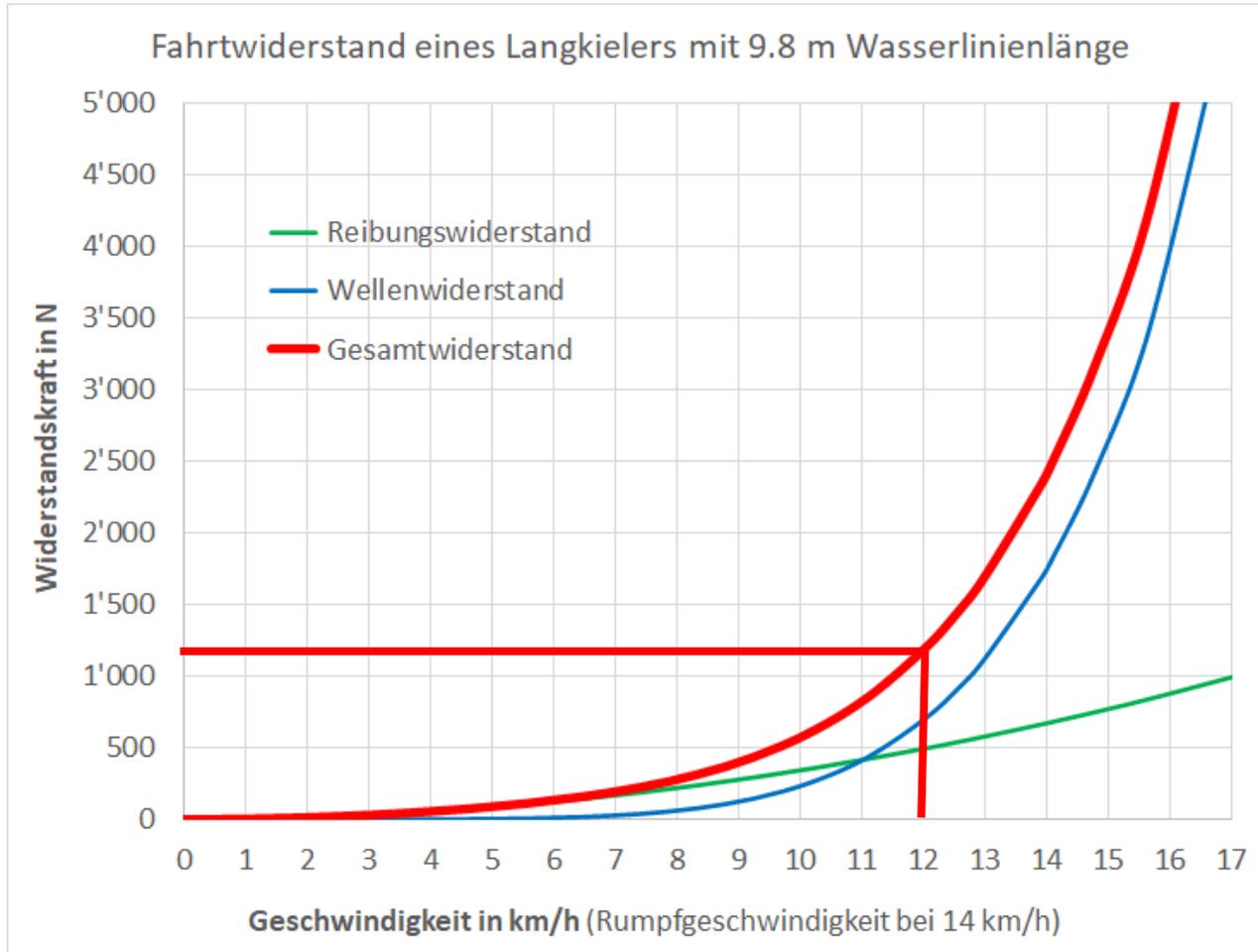
Bootsantrieb - Reibungswiderstand

Reibungswiderstand

$$F = \frac{1}{2} \cdot c_f \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

Name	Bedeutung
F	Kraft in N [kgm/s ²]
c_f	Reibungsbeiwert
A	Benetzte Fläche des Rumpfes
v	Geschwindigkeit in m/s
ρ	Dichte Wasser 1.000 kg/m ³

Gesamtwiderstand - Berechnungsbeispiel



Beispiel:

$$v = 12 \text{ km/h} = 3,33 \text{ m/s}$$

$$F = 1200 \text{ N}$$

$$P = F \cdot v = 1200 \text{ kgm/s}^2 \cdot 3,33 \text{ m/s}$$

$$P = 4,0 \text{ kW (netto am Propeller)}$$

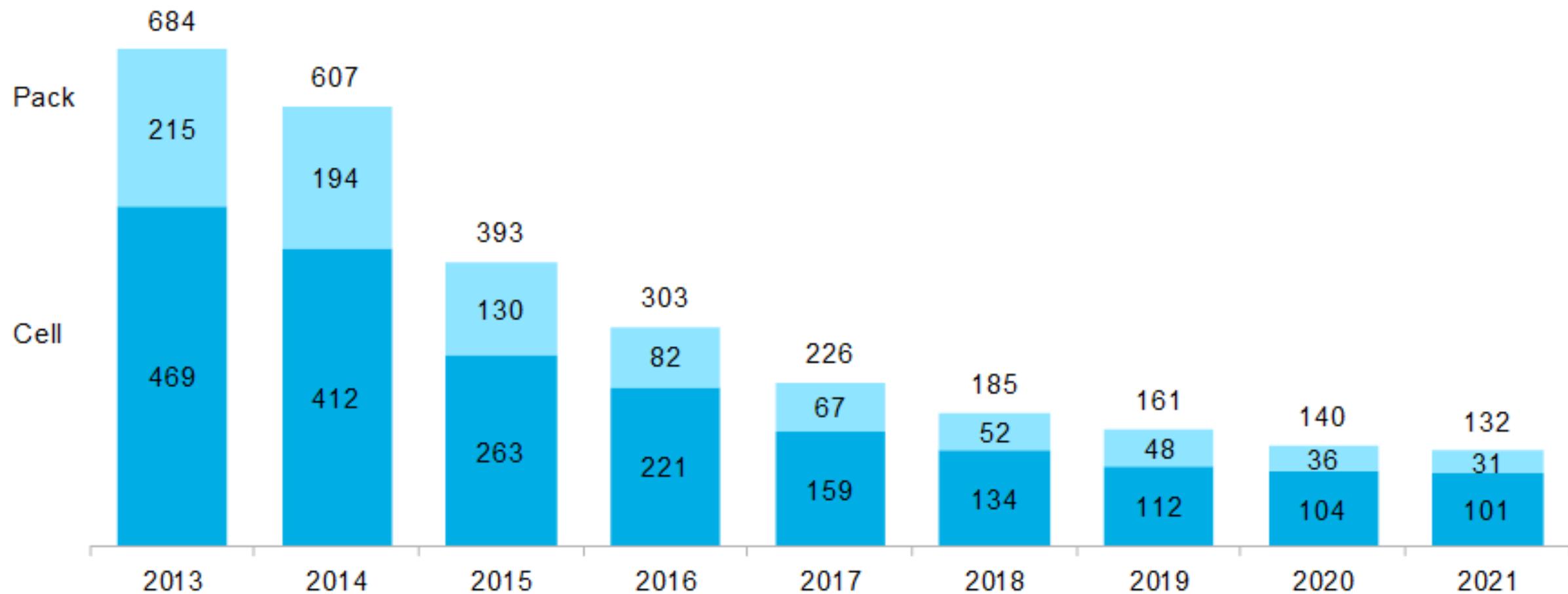
$$P = 8,0 \text{ kW bei } 50 \% \text{ Propellerwirkungsgrad}$$

Quelle: <https://energie.ch/bootantriebe>

Vergleich zwischen Diesel- und E-Motor

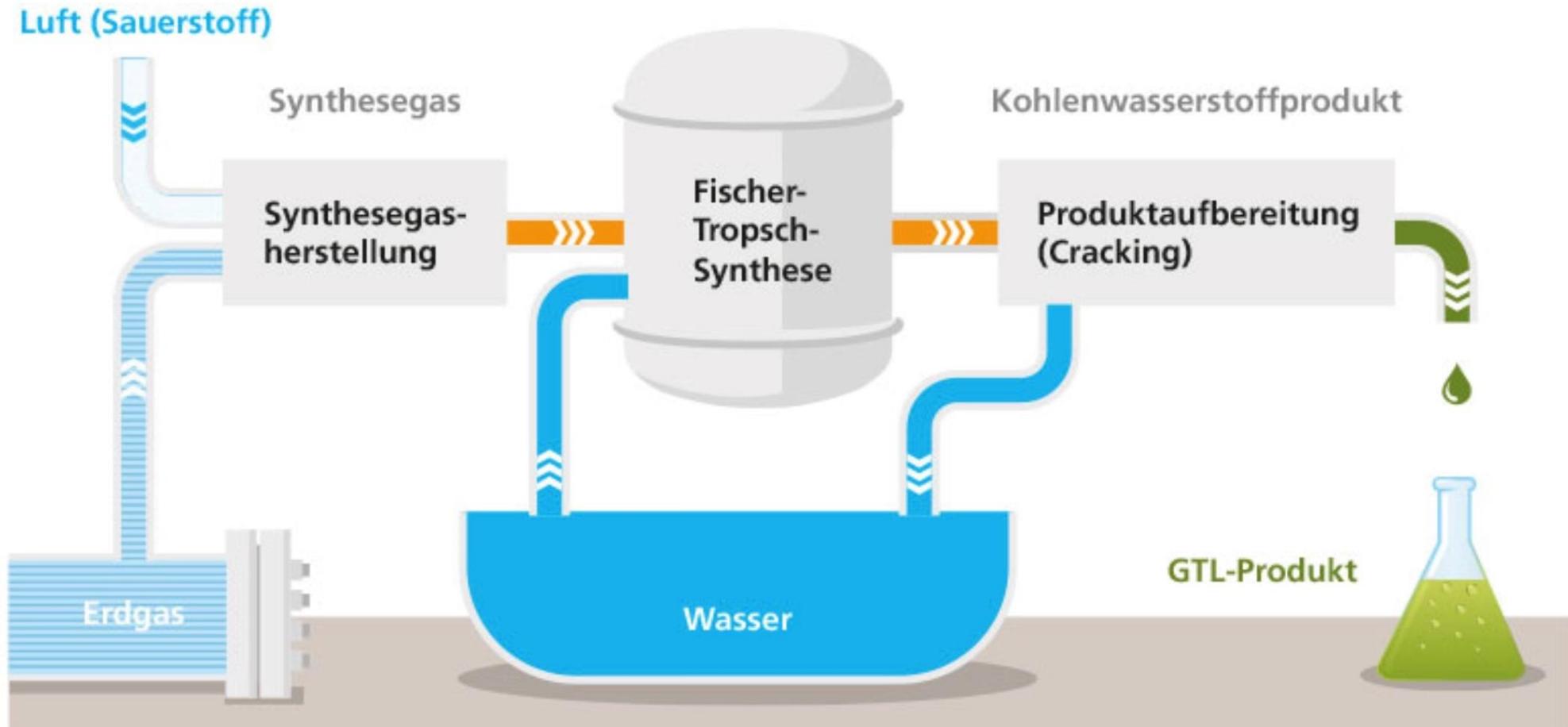
Verbrauch Diesel-Motor in der Praxis	Verbrauch E-Motor in der Praxis
Dieselmotor 50 PS – Gewicht 100 kg	E-Motor 8 kW – Gewicht 50 kg
Tank 100 l – Gewicht 120 kg	Lipo-Batterie 70 kWh – Gewicht 600 kg
Getriebe 40 kg	Getriebe entfällt
Gesamtgewicht Antrieb 260 kg	Gesamtgewicht Antrieb 650 kg
Verbrauch 3 l / h	Verbrauch 8 kWh / h
Geschwindigkeit 12 km / h	Geschwindigkeit 12 km / h
Reichweite $100 \text{ l} / 3 \text{ l} / \text{h} * 12 \text{ km} / \text{h} = 400 \text{ km}$	Reichweite $70 \text{ kWh} / 8 \text{ kWh} / \text{h} * 12 \text{ km} / \text{h} = 105 \text{ km}$

Batteriekosten US-Dollar/kWh



Source: BloombergNEF.

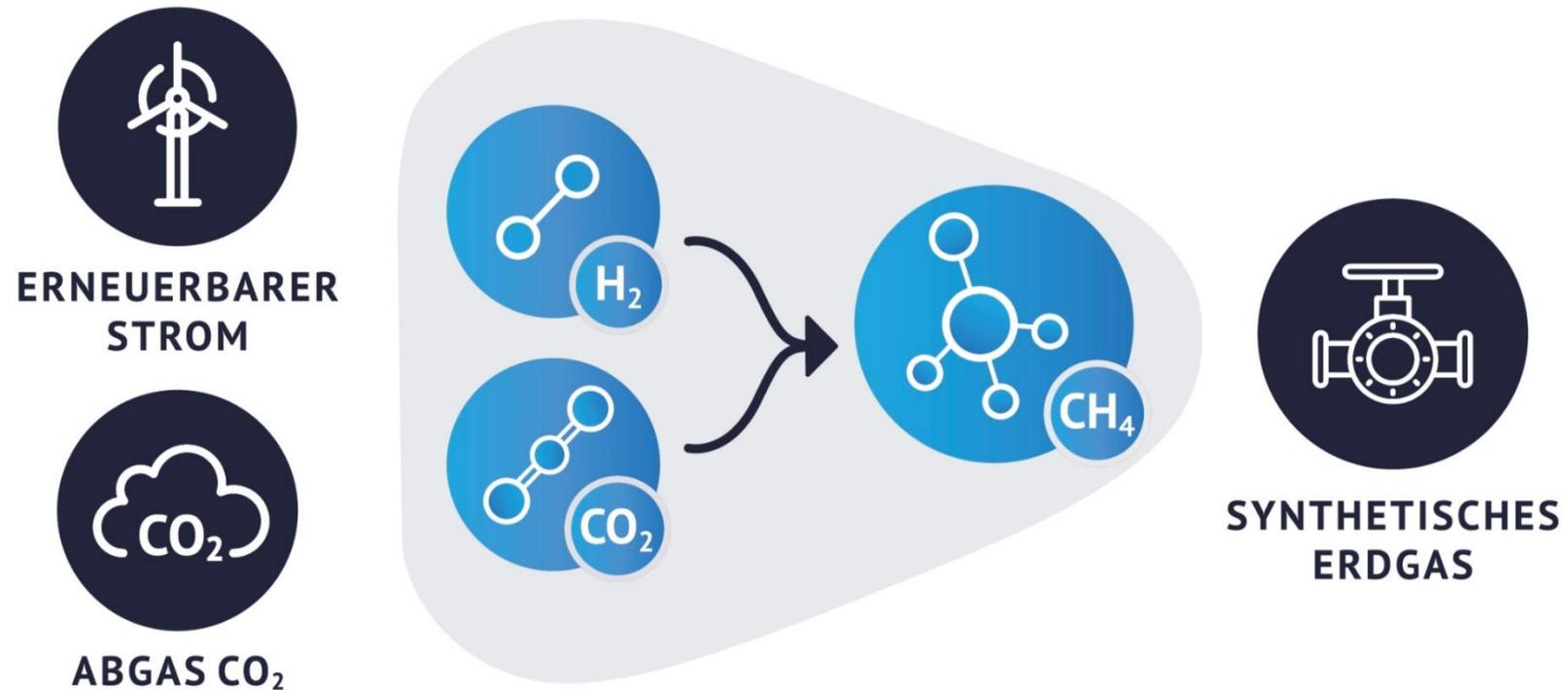
Gas To Liquid - GTL



Quelle: Rhenus Lub GmbH

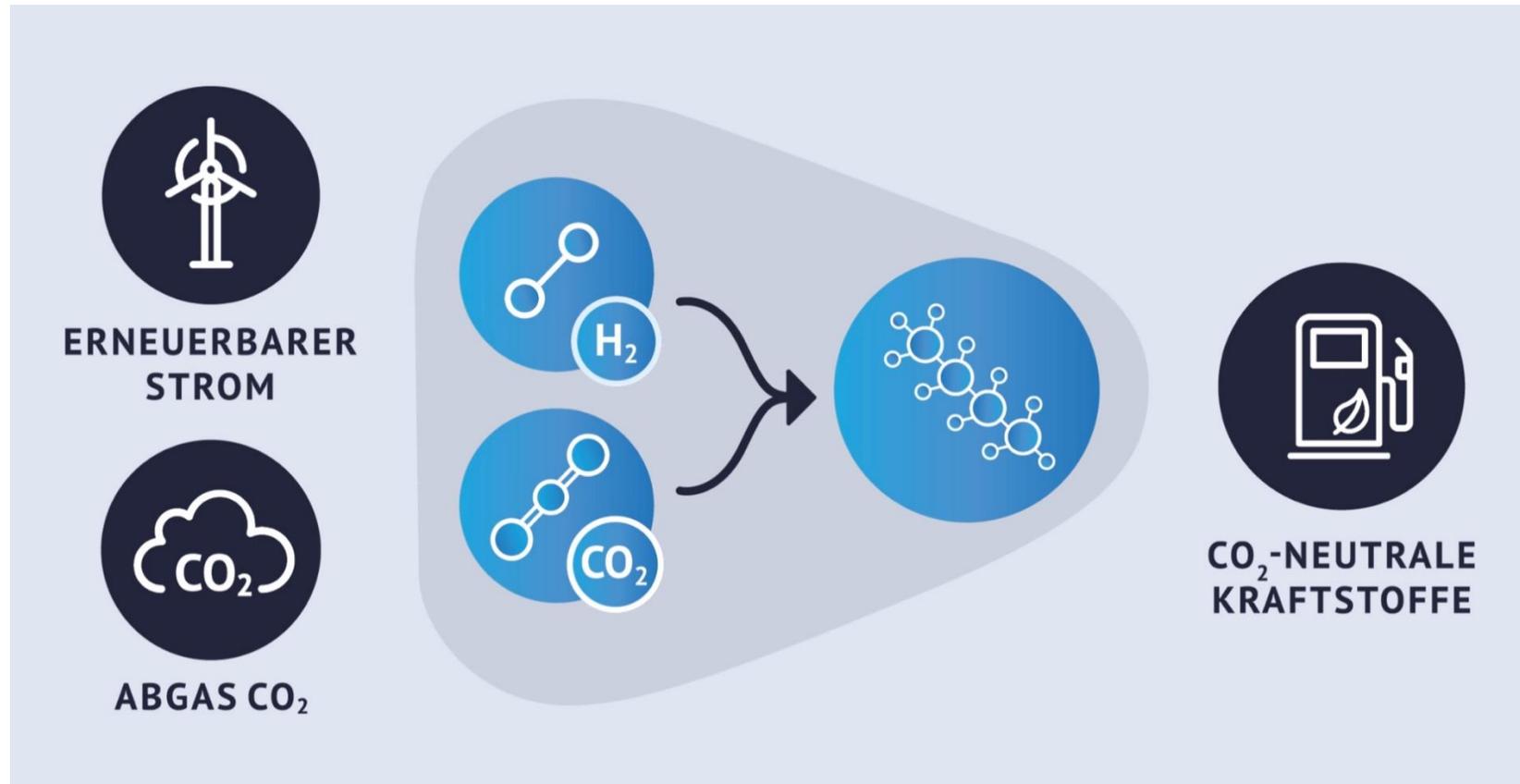
<https://www.rhenuslub.de/de/gtl-technologie-neue-schleifoele-bringen-noch-mehr-vorteile-fuer-den-anwender/>

Power to Gas - PTG



Quelle: INERATEC – Innovative Chemical Reactor Technologies
<https://www.ineratec.de>

Power to Liquid – PTL



Quelle: INERATEC – Innovative Chemical Reactor Technologies
<https://www.ineratec.de>

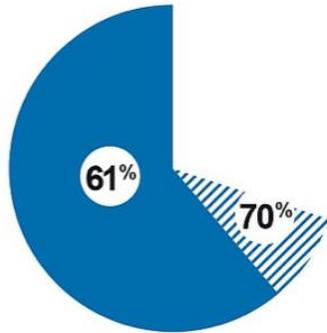
E-Fuels – Lösungsansatz für Mobilität

- Bestehende Flotten können weiter verwendet werden
- Bestehende Infrastruktur kann weiter genutzt werden
- Klimaschutz kann damit im Bestand wirken
- E-Fuels lassen sich flexibel speichern und transportieren
- E-Fuels bieten hohe Versorgungssicherheit
- E-Fuels sind bezahlbar und lassen sich mittelfristig für rund 1,00 Euro pro Liter herstellen

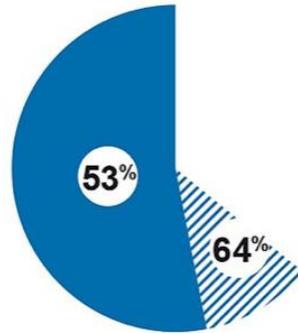
Quelle: Lorenz Kiene, „E-Fuels Tour“, E-Fuels Forum
<https://www.efuels-forum.de/mediathek/>

Power-to-X: Wie viel vom Strom übrig bleibt

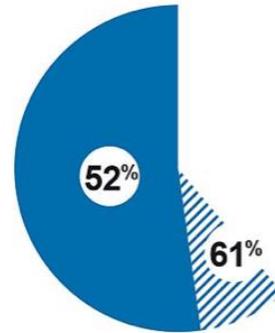
Effizienz bei der Herstellung von Energieträgern aus Strom heute und in Zukunft



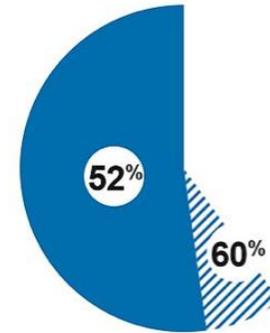
E-Wasserstoff
(gasförmig)



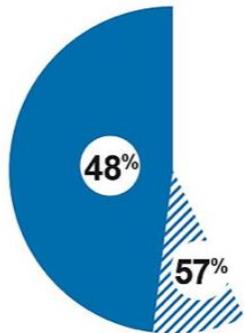
E-Wasserstoff
(verflüssigt)



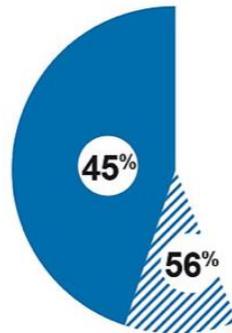
E-Methan
(gasförmig)



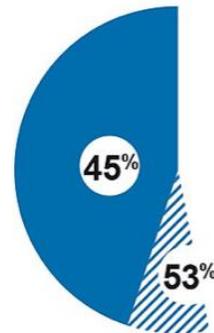
E-Ammoniak



E-Methan
(verflüssigt)



E-Methanol



E-Fuels

Umwandlungseffizienz

Pro eingesetzter Kilowattstunde Strom verbleiben x Prozent im PtX-Produkt

- Heutige PtX-Prozesse
- ▨ Potenzial in der Zukunft

Quellen

[1] - : „Energiebilanzen Deutschland“, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGBE), 2028,
<https://ag-energiebilanzen.de/>

[2] Wirtschaftswoche, „Reicht der Strom?“, <https://www.wiwo.de/technologie/mobilitaet/elektromobilitaet-reicht-der-strom/20231296-2.html>

[3] Rolf Gloor: „Bootsantriebe - Was für eine Leistung und was für einen Propeller benötigt man für ein Segelboot?“, 2021, <https://energie.ch/bootantriebe>

[4] Axel Thielmann et. al.: „Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf“, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, 2020,
<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>

[5] BloombergNEF – „Battery Cost Development“, 2020,
<https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>

[5] Heiner Katz et. al.: „Voruntersuchung Elektrospatz – Arbeitsschiff“, FMSW und BAW Ref. K4,
https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/0/4_Machbarkeitsnachweis%20Elektrospatz.pdf

[6] -: Rhenus,
<https://www.rhenuslub.de/de/gtl-technologie-neue-schleifoele-bringen-noch-mehr-vorteile-fuer-den-anwender/>

[7] -: INERATEC – Innovative Chemical Reactor Technologies,
<https://www.ineratec.de>

[8] Lorenz Kiene: „E-Fuels Tour“, e-Fuels Forum,
<https://www.efuels-forum.de/mediathek/>