

Dr. Andreas Menne

Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Umsicht  
Abteilungsleiter Low Carbon Technologies

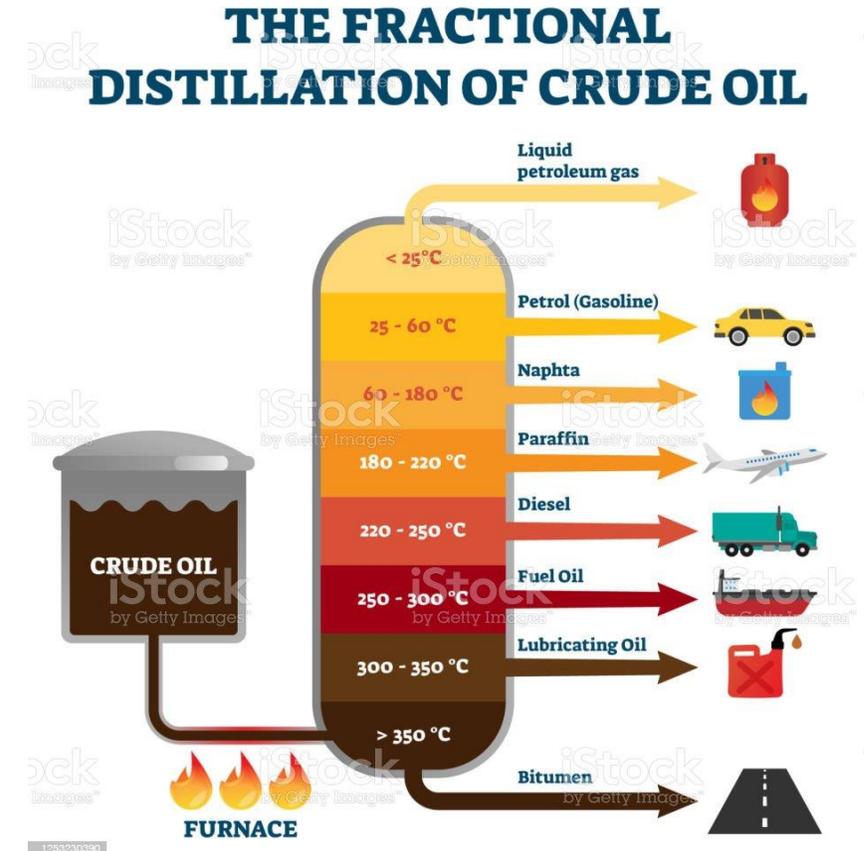
# Kraftstoffe der zukünftigen Mobilität

# Kraftstoffe heute

- Produkte aus Rohöl im wesentlichen verschiedene Siedeschnitte

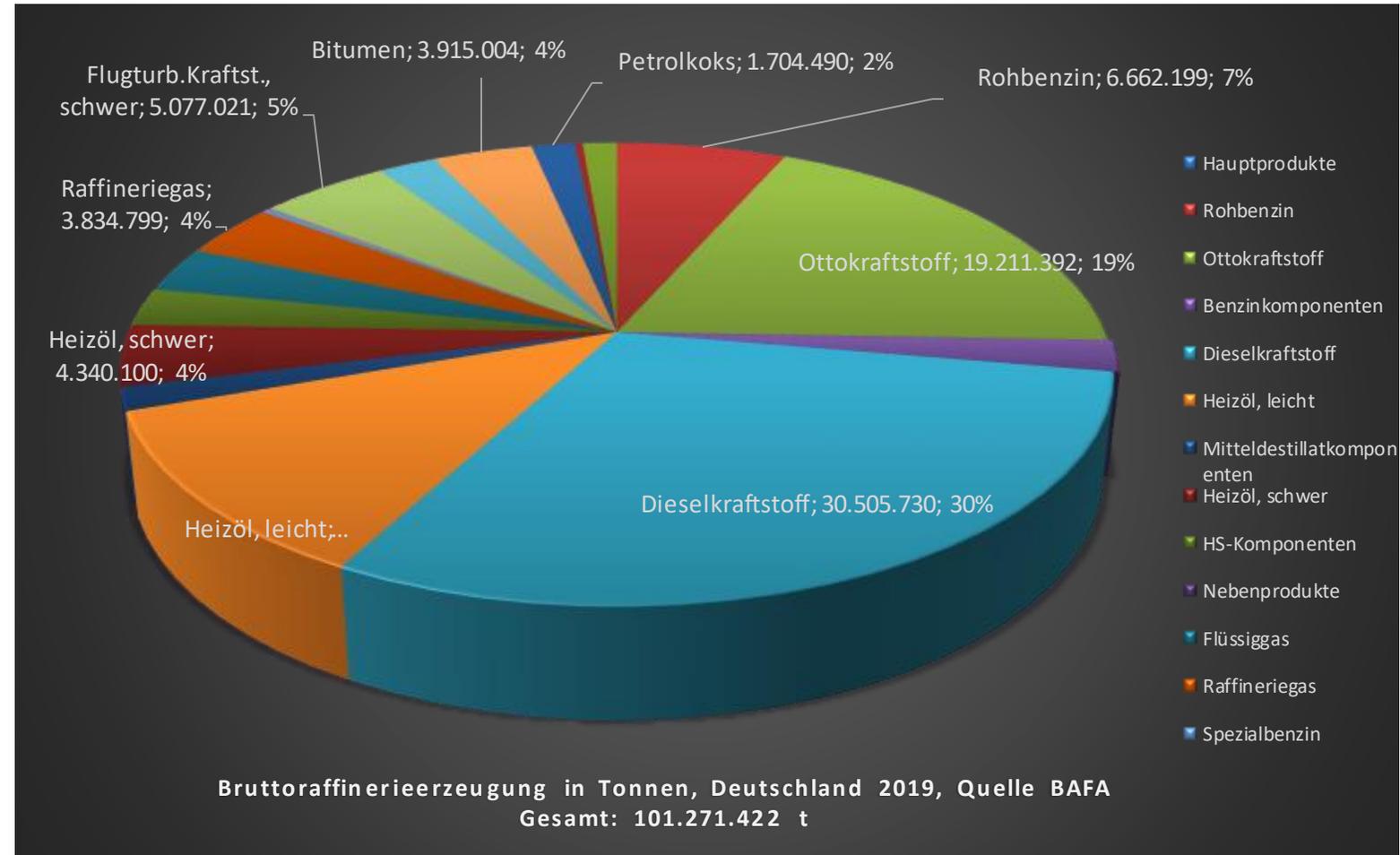
Vereinfachte formale Zusammensetzung  $C_xH_y$

- Flüssiggas
  - Benzin
  - Kerosin
  - Diesel/Heizöl
  - Schiffsdiesel
- Chemische Produkte sind weiteres wichtiges Produkt
- Hochoptimierte und integrierte Prozesse
- Verbrennungstechnik/Motoren für Kraftstoffe ausgelegt und optimiert



# Herausforderung: Markt für Mineralölerzeugnisse

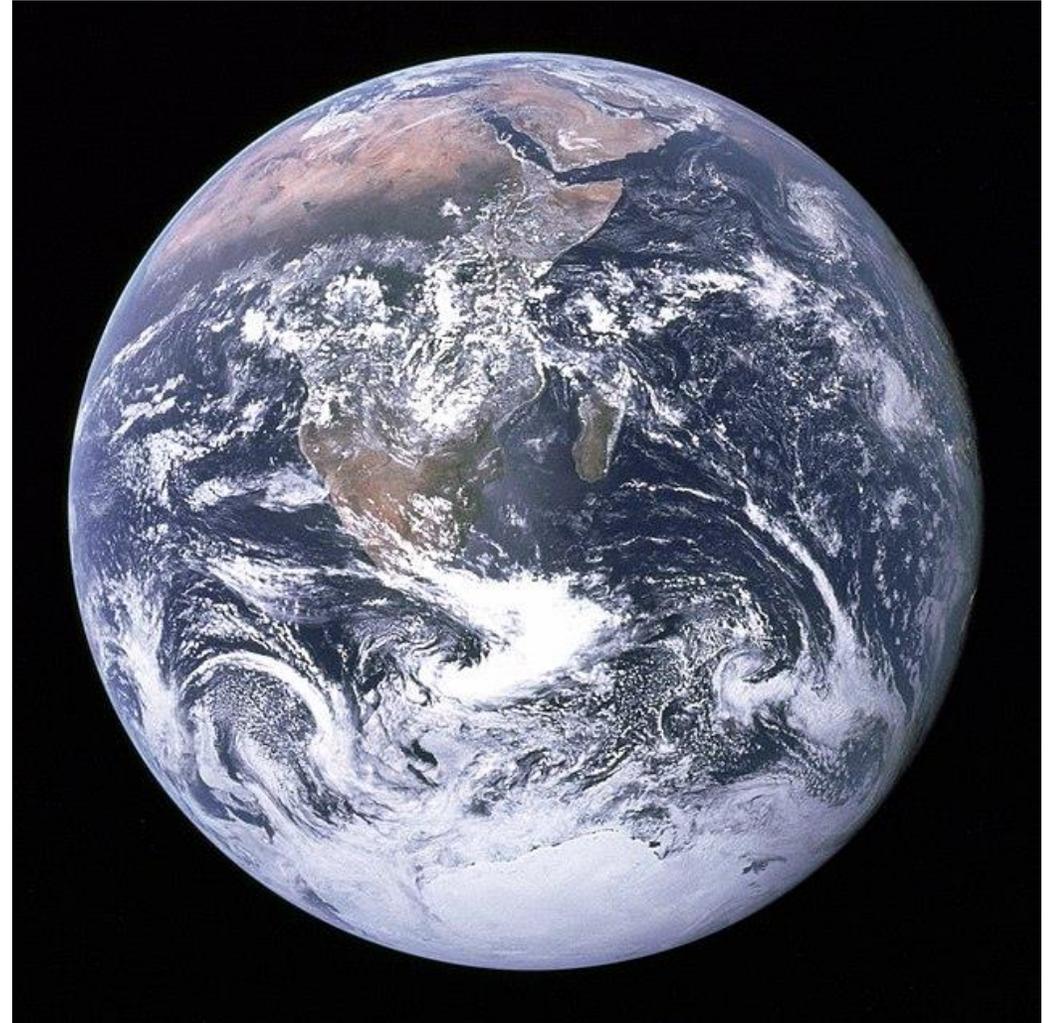
- In deutschen Raffinerien wurden im Jahr 2019 etwas mehr als 100.000.000 t Mineralölerzeugnisse verarbeitet (Anteil global 2,3 %)
  - Dies entspricht rund 335.000.000 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten
  - 10 Mio. t H<sub>2</sub>
  - Energiegehalt Rohöl 11,6 MWh/t
  - Um vom CO<sub>2</sub> mit H<sub>2</sub> wieder auf den gleichen Wert zu kommen
- $x\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow x\text{CH}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  werden 50 Mio. t H<sub>2</sub> benötigt



# Alternativen?

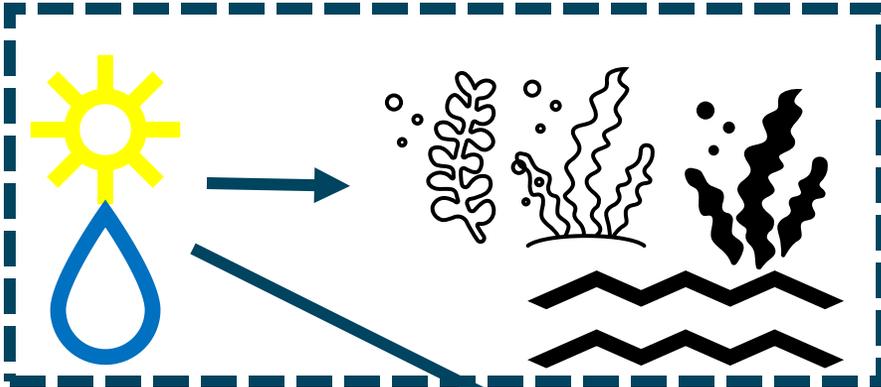
- Klimawandel
- Endliche Ressourcen
- Resilienz

Gesetzliche Vorgaben und Selbstverpflichtungen



# Kraftstoffherstellung heute: Ein Vergleich

- Erhöhung der Energiedichte in Mio. Jahren durch



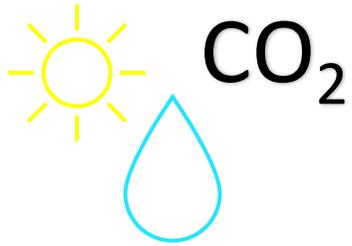
	<p><math>\text{CO}_2</math></p>  <p><math>\text{H}_2</math></p>	 <ul style="list-style-type: none"><li>Synthetische Kraftstoffe</li><li>Biokraftstoffe</li></ul>
--	--	---



- Erhöhung der Energiedichte durch chemische Prozesse in wenigen Minuten

# Kraftstoffherstellung heute: Ein Vergleich

Erhöhung der Energiedichte



Erhöhung der Energiedichte



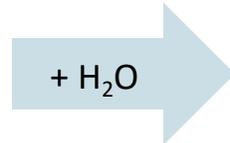
Erhöhung der Energiedichte

# Alternativen

Regenerativ hergestellter Strom



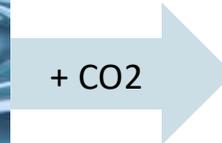
eless.de



Wasserstoff



Bund-nrw.de

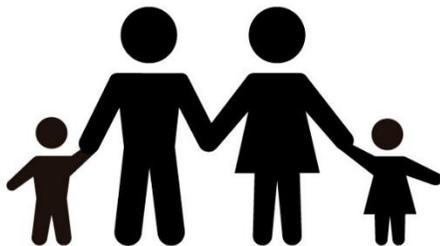


Flüssige/gasförmige Energieträger



Oiltanking-deutschland.de

- $C_xH_y$
- $H_2O$



- Verhaltensänderung
- Effizienzmaßnahmen



- Gesetze
- Regularien
- Anreize oder Strafen

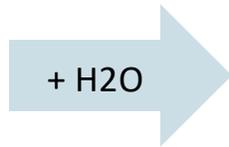
# Effizienz vs. Pragmatismus

Regenerativ hergestellter Strom



eless.de

▪ Energieeffizienz  
ca. 0,8

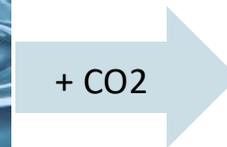


Wasserstoff



Bund-nrw.de

ca. 0,5



Flüssige/gasförmige Energieträger



Oiltanking-deutschland.de

ca. 0,2

Energiedichte Speicherung

Li-Ion ca. 0,1 kWh/kg

Flüssig: 33 kWh/kg

Gas 0,003 kWh/l

Diesel 12 kWh/kg

Methan 13 kWh/kg

▪ Abwägung: Speicherung und Transport vs. Wirkungsgrad

# Die Lösungen im einzelnen

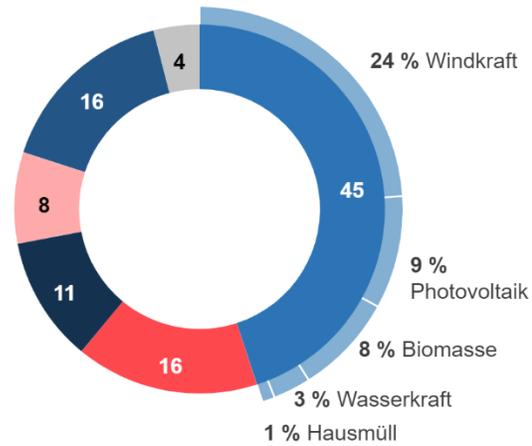
---

- Strom
- Wasserstoff
- Synthetische Energieträger inkl. Biobasierter Energieträger
- Aktuelle Fallbeispiele

# Strom

## Bruttostromerzeugung 2020

in %, insgesamt 567 Mrd. kWh

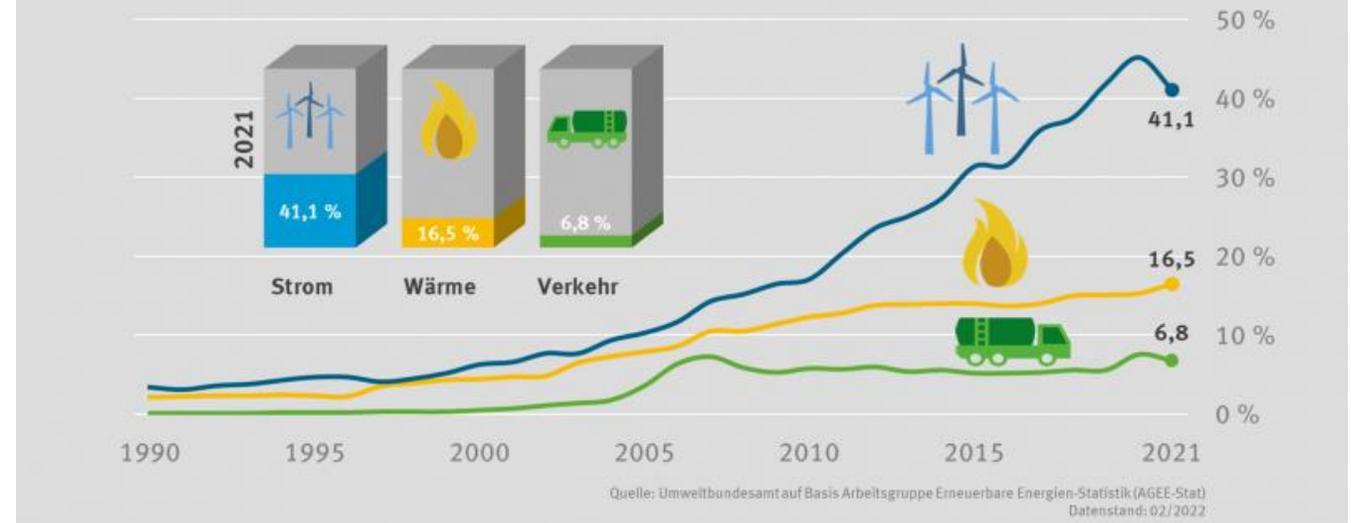


■ Erneuerbare Energien ■ Braunkohle ■ Kernenergie ■ Steinkohle ■ Erdgas ■ Sonstige

Vorläufige Angaben  
Quelle: AGEE-Stat und AGEB

© Statistisches Bundesamt (Destatis), 2022

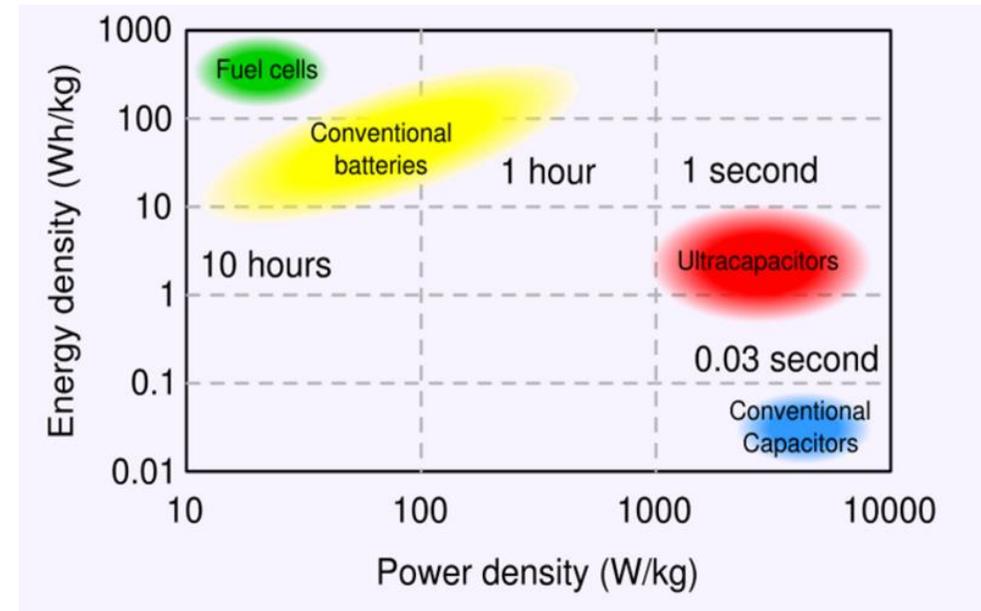
## Erneuerbare Energien: Anteile in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr



- Bei der Stromerzeugung spielen reg. Energien bereits eine bedeutende Rolle in den anderen Bereichen noch nicht. Windkraft ist die mit Abstand wichtigste reg. Energiequelle in Deutschland

# Strom

- Zur Erreichung der Klimaziele müssen die erneuerbaren Energien massiv ausgebaut werden.
- Da auch Industrie, Gewerbe, Wärme zukünftig auf erneuerbaren Strom bzw. daraus hergestellten Wasserstoff setzen muss neben dem heimischen Ausbau insbesondere auch der Import gefördert werden.
- Neben Strom und Wasserstoff liefert heute Biomasse bereits einen bedeutenden Beitrag in den Bereichen Mobilität, Wärme und Strom
- Nachteil des Stroms ist seine schlechte Speicherbarkeit, lange Ladezeiten und die Lücke zwischen Energiedichte und Leistungsdichte



# Fazit

---

Wir brauchen enorme Mengen erneuerbarer Energie in sehr kurzer Zeit für in allen Sektoren, wenn wir Klimaziele erreichen wollen

Die Speicherung von Strom ist schwierig

- Batterien haben eine geringe Energiedichte

- Für die Bereitstellung gerade großer Leistung werden die Batterien sehr groß/schwer

Wasserstoff ist eine interessante Form der Energiespeicherung weil es die größte Energiedichte erzielt

# Erneuerbarer Wasserstoff

---

## „Grauer“ Wasserstoff

Erzeugung auf Basis fossiler Energieträger unter Freisetzung von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre

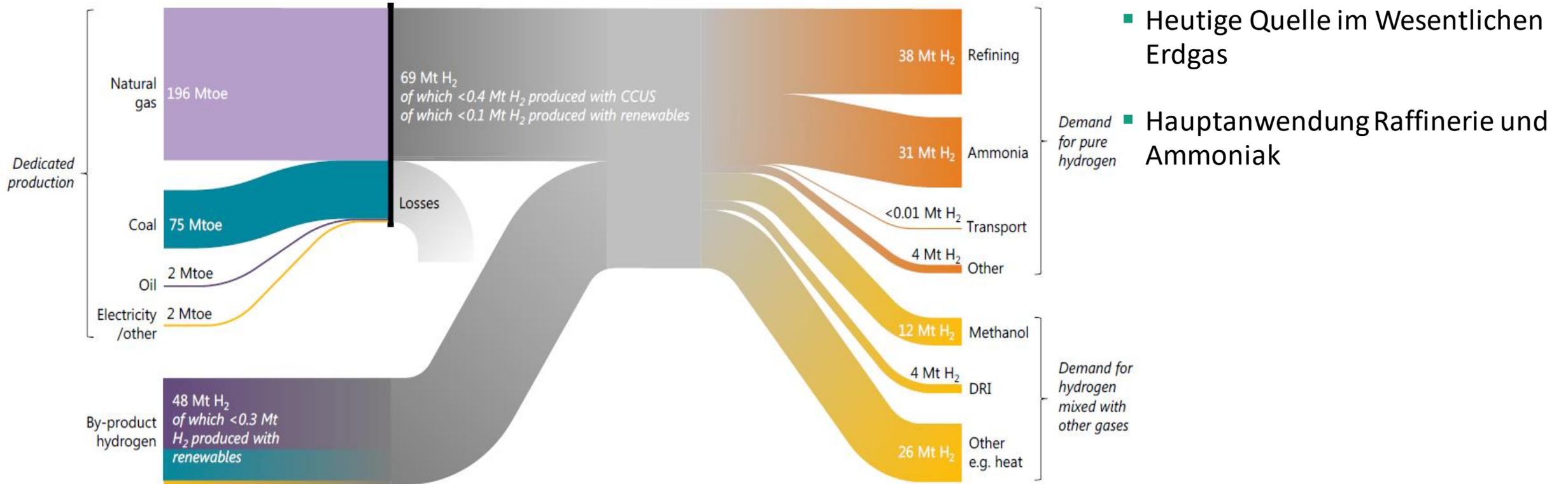
## „Blauer“ bzw. „Türkiser“ Wasserstoff

Erzeugung auf Basis fossiler Energieträger (durch Reforming oder Pyrolyse) mit anschließender Abscheidung und Lagerung des entstehenden CO<sub>2</sub> oder Kohlenstoffs

## „Grüner“ Wasserstoff

Erzeugung auf Basis Erneuerbarer Energien

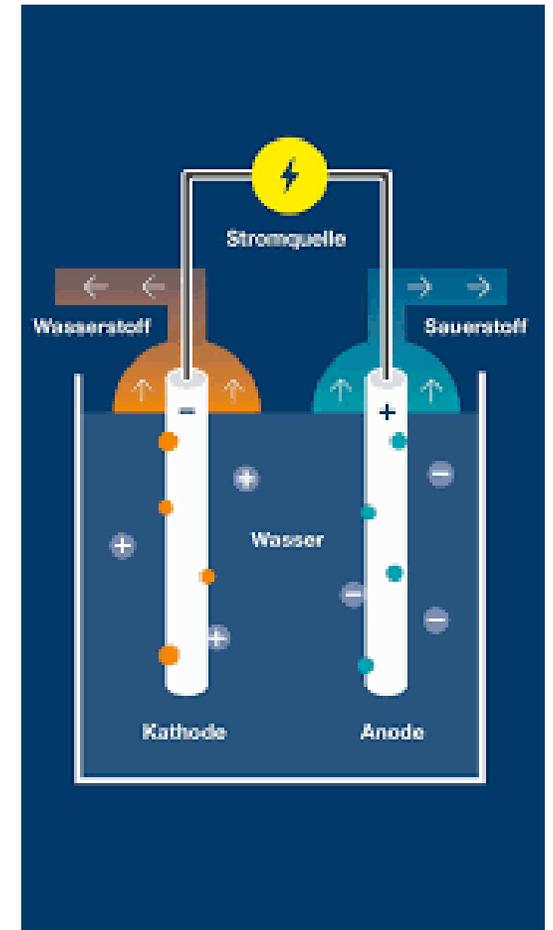
# Heutige Wasserstoffnutzung und Quellen



- Heutige Quelle im Wesentlichen Erdgas
- Hauptanwendung Raffinerie und Ammoniak

# Grüner Wasserstoff Wasserelektrolyse

- Wasserelektrolyse benötigt etwa 55 kWh Strom pro kg Wasserstoff
- Energiedichte 33,3 kWh/kg
- Ca. 9 kg Wasser werden benötigt pro kg Wasserstoff benötigt
- Notwendigkeit von hochreinem Wasser
- Man unterscheidet zwischen alkalischer Elektrolyse, PEM Elektrolyse und Hochtemperaturelektrolyse
- Je nach (Strom)quelle gibt es verschiedene Farben für den Wasserstoff
- Reinheit wichtig für die spätere Anwendung Norm (>99,97 %)



Steag.com

# Transportoptionen

---

- **Transportoptionen Schiff, LkW**

- Derzeit keine Schiffe für den reinen H<sub>2</sub> Transport
- Transport nur in anderer Form (NH<sub>3</sub>, LOHC)
- Nachteil: Schiffe müssten vermutlich eine Leerfahrt machen
- Ammoniak könnte analog zu LPG transportiert werden ca. 0,2 % Verbrauch pro Tag
- LOHC analog zu Rohöl/ Hin- und Rücktransport
- LkW Kapazität            1,1 t-1,5 t H<sub>2</sub> (700 bar),
  - 1,7 tH<sub>2</sub> LOHC
  - 5 tH<sub>2</sub> Ammoniak

# »Wasserstoff«

## Speichertechnologien

### • Druckwasserstoffspeicherung

- 350 – 700 bar (zurzeit), 25 °C; 1200 bar technisch machbar
- Tanks aus hochfesten Faserverbund-Werkstoffen, auch mit metallischen Linern (Permeation)
- Kompressionsaufwand: für 700 bar ca. 12 % der Energieleistung des Wasserstoffs

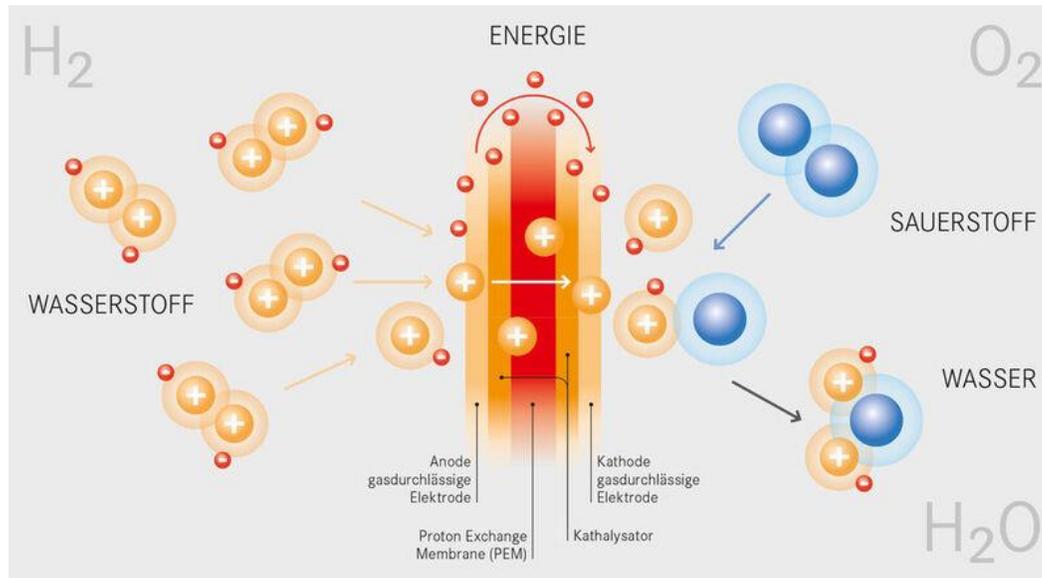
### • Flüssiggasspeicherung

- -253 °C, 1 bar
- Tanks aus austenitischem Edelstahl; aufwändige Isolierung (Boil-Off-Verluste)
- Verflüssigungsaufwand: ca. 40 % der Energieleistung des Wasserstoffs
- Produktion in D zurzeit nur bei Linde, Leuna: 5 t/d;  
ab 2021 10 t/d geplant



[Wasserstoff – Schlüssel zu weltweit nachhaltiger Energiewirtschaft  
EnergieRegion. NRW 2009]

# Wasserstoffnutzung in der Mobilität/Brennstoffzelle



- Wasserstoff und Sauerstoff (Luft) reagieren an einem Katalysator zu Wasser
  - Dabei entstehen elektrischer Strom und Wärme
  - Mit dem Strom kann ein Elektromotor angetrieben werden.
  - Der Strom wird auch über eine Batterie gespeichert.
- Die Effizienz liegt bei etwa 35 % wenn der Strom aus der Wasserelektrolyse kommt
- Nachteile der Brennstoffzelle ist ihre
  - Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen
  - Hohe Kosten
  - Technisch komplex im Vergleich zum Verbrennungsmotor

- Auch die Wasserstoffverbrennung kann in bestimmten Bereichen eine spannende Alternative sein

# Kosten

---

Strom in DE: 8 ct/kWh      Strom in anderen Regionen 2 ct/kWh

Umwandlung in H<sub>2</sub>: 55 kWh/kg \* 8 ct/kWh = 4,4 €/kg

Zuzüglich Verdichtung ca. 15 % des Energiegehaltes von H<sub>2</sub>, 5 kWh\*8 ct = 0,4 €

Für vorort hergestellten Wasserstoff ca. 5 €/kg Herstellkosten (zzgl. Abschreibungen, Steuern, eventuell Transport und Speicherung etc.) 10-12 €

Da außerhalb Deutschlands Strom günstiger produziert werden kann, sind bei Import niedrigere Kosten zu erwarten  
8-9 €/kg

# Fazit

---

- Wichtiger Energiespeicher keine Energiequelle
- Aufwändiger Transport und Speicherung sowie komplexe Infrastruktur machen die Technologie teuer
- Wirkungsgrade von etwa 0,6 bei Elektrolyse (Erzeugung) und Brennstoffzelle (Nutzung) ergeben niedrigere Wirkungsgrade als bei der direkten Stromnutzung
- Dennoch bietet Wasserstoff die Option Energie zu transportieren
- Ebenfalls ist Wasserstoff der wichtigste Ausgangsstoff für efuels

# Synthetische Kraftstoffe

- Biokraftstoffe
- efuels
- Gesetzliche Rahmenbedingungen

# Advanced Fuels – Übersicht

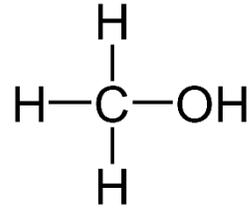
- Während in Deutschland rund die Hälfte des Dieselkraftstoffes im Verkehr auf leichte und schwere Nutzfahrzeuge entfällt, entfallen rund 95 % des Bezinverbrauchs auf den PkW Bereich
- Flüssige Energieträger sind aufgrund ihrer hohen Energiedichte, insbesondere im Flug- und Schiffsverkehr sowie im Langstreckentransport auf der Straße sowie in der Landwirtschaft, Baumaschinen oder beim Militär auch zukünftig nicht zu ersetzen
- Selbst bei einer Reduktion des Verbrauchs im Verkehrssektor auf ein Drittel der aktuellen Mengen bedeutet dies, dass allein für Deutschland immer noch etwa 15 Mio. Tonnen flüssige Kraftstoffe, hauptsächlich Diesel und Kerosin, bereitgestellt werden müssen.
- Neben Biokraftstoffen sind CO<sub>2</sub>-/H<sub>2</sub>O-basierte Kraftstoffe, die unter Einsatz von Strom über chemischen Synthesen hergestellt werden, zukünftig interessant. Hierzu zählen zum Beispiel:
  - **Fischer-Tropsch Kraftstoffe, Höhere Alkohole, Methanol, Methan, Wasserstoff und Strom**



# Alternativen: eFuels

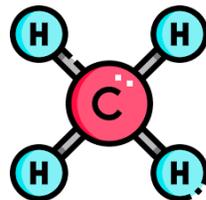
## Methanol

- Direkt aus  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  herstellbar
- Einfache Synthese
- Nutzung als Basischemikalie oder Ausgangsstoff für weitere Synthesen



## Methan

- Direkt aus  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  herstellbar
- Einfache Synthese
- Nutzung als Brennstoff

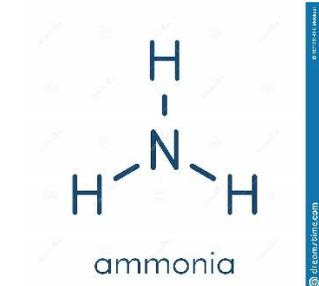


## Fischer-Tropsch Kraftstoffe $\text{C}_x\text{H}_y$

- Herstellung aus  $\text{CO}/\text{H}_2$
- Aufwändige Trennverfahren
- Hohe Kraftstoffqualitäten

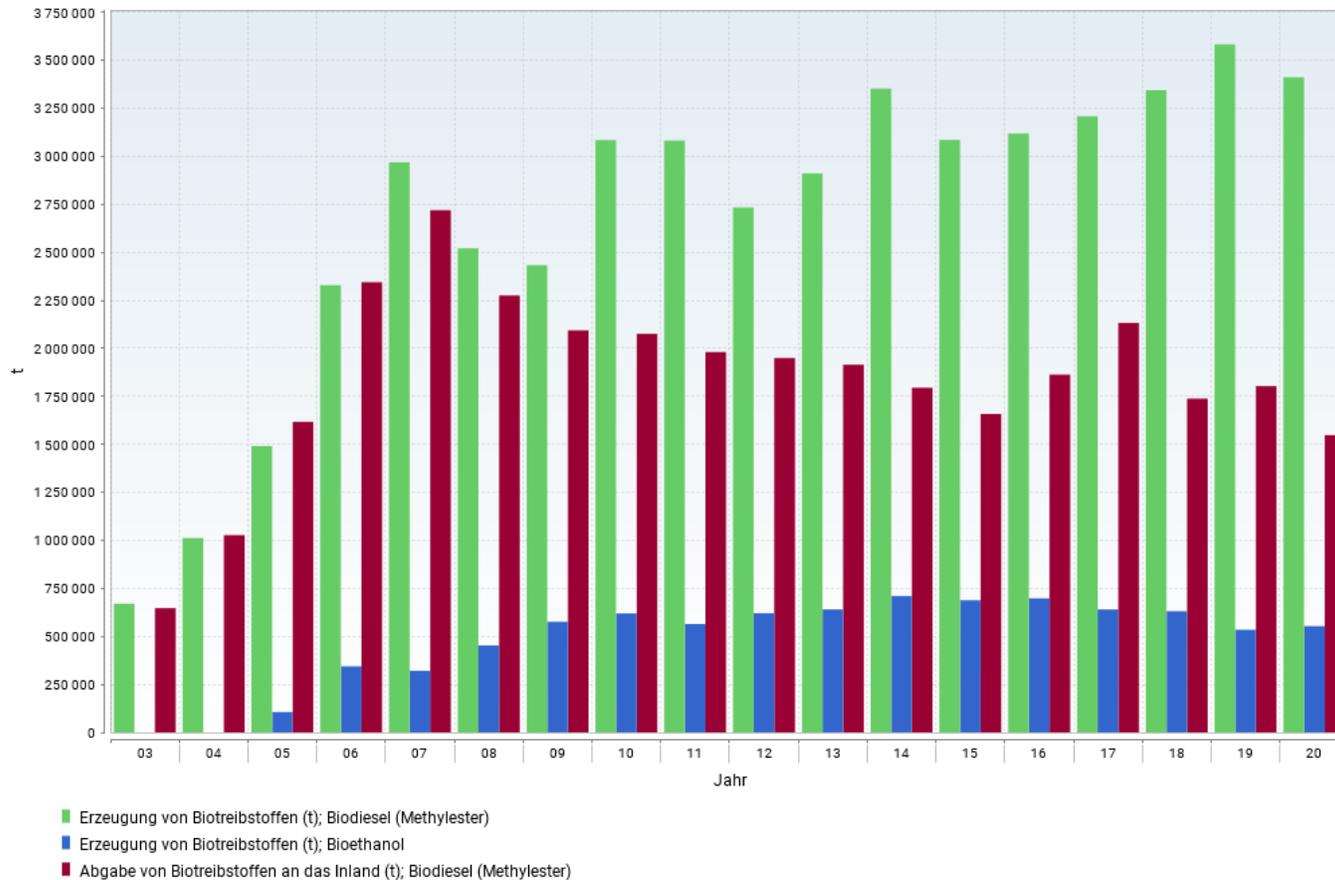
## Ammoniak

- Kohlenstofffrei
- Toxisch
- Einsatz als  $\text{H}_2$  Träger und Brennstoff



# Biokraftstoffe

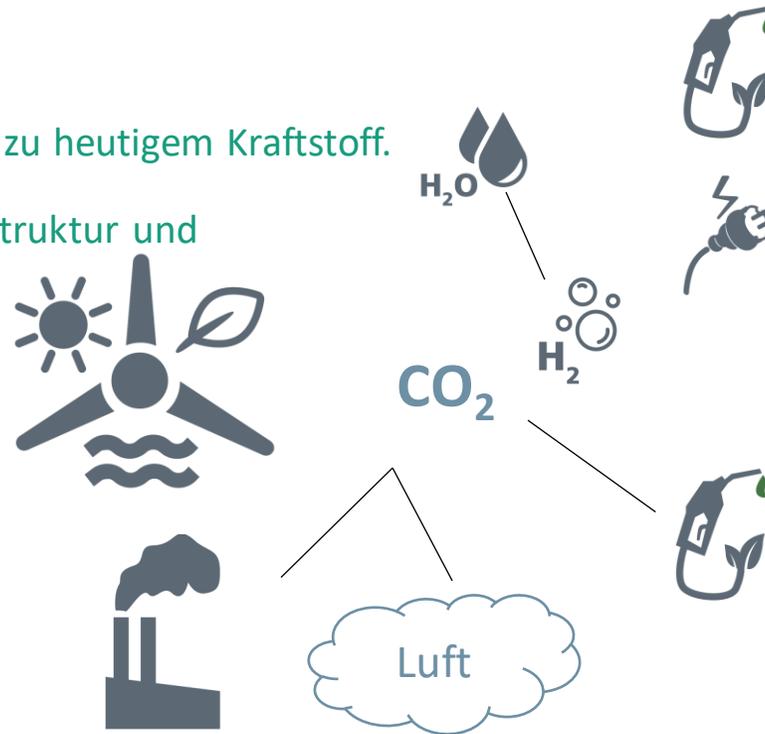
Erzeugung, Abgabe und Ausfuhr von Biotreibstoffen:  
Deutschland, Jahre, Biotreibstoffe  
Erhebung über Biotreibstoffe  
Deutschland



- **Ethanol, Biodiesel** und hydrierte Pflanzenöle tragen schon heute signifikant zum Klimaschutz bei
- Problematisch: Nutzung von Nahrungs- und Futtermitteln
- Rohstoffverfügbarkeit
- Nutzung von Reststoffen deutlich energieintensiver

# Biokraftstoffe/efuels

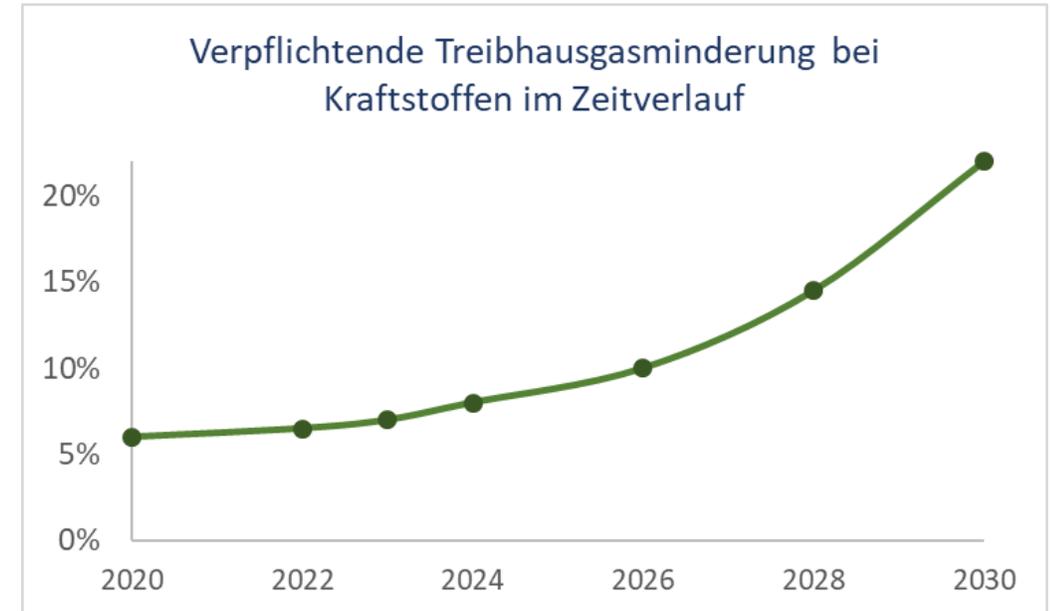
- Vergasung von Biomasse Synthesegas (CO/H<sub>2</sub>) und anschließender Aufbau von Kohlenwasserstoffen aus dem Synthesegas (Fischer Tropsch, Methanol)
- E-fuels Herstellung von Wasserstoff und CO aus Wasser und CO<sub>2</sub> mit Hilfe von Strom
- Wasserstoff aus der Elektrolyse von Wasser
- Efuels kosten das Drei- bis Fünffache im Vergleich zu heutigem Kraftstoff.
- Enormer Strombedarf und Investitionen in Infrastruktur und Anlagentechnik
- Wesentlicher Kostenfaktor sind die Stromkosten
- In jedem Fall immenser Bedarf an Regenerativem Strom



# Gesetzliche Vorgaben THG-Quote

Treibhausgasminderungs-Quote wird von aktuell 6 % schrittweise auf **22 % im Jahr 2030** angehoben.

- Transformationsprozess: starker Anstieg ab 2026
- Mehrere Erfüllungsoptionen: Biokraftstoffe, Wasserstoff, PtX, Strom für E-Fahrzeuge
- Neben gesetzlichen Vorgaben gibt's es zunehmend Selbstverpflichtungen von Unternehmen, Verbänden, Nationen zur CO2 Senkung
- Neben der Quote sind **Taxonomie Verordnung, Berichtsverpflichtung** wirksame Hebel insbesondere für zukünftige Investitionen



# Gesetzliche Vorgaben

- Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln werden auf das aktuelle Niveau begrenzt (4,4 %).
- Schrittweiser Ausschluss von Palmöl bis 2023
- Hohe THG-Quote bietet sehr starken Anreiz für grünen Wasserstoff und Folgeprodukte (PtX-Kraftstoffe).
- Luftverkehr: Verpflichtung für strombasiertes Kerosin ab 2026, schrittweise Anhebung auf 2 % in 2030
- Elektromobilität: starke Förderung durch Mehrfachanrechnung, dadurch profitieren Betreiber von Ladepunkten, Elektrofahrzeugen und -flotten.
- Fortschrittliche Biokraftstoffe aus Reststoffen: starke Förderung mit ambitionierten Mindestquoten (2,6 % im Jahr 2030) und durch Doppelanrechnung darüber hinausgehender Mengen

## Überblick Umsetzung RED II, Änderung des Bundestages

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
THG-Quote (CO <sub>2</sub> -Minderung) laut Bundestagsbeschluss vom 25. Mai 2021	7 %	8 %	9,25 %	10,5 %	12 %	14,5 %	17,5 %	21 %	25 %
THG-Quote (CO <sub>2</sub> -Minderung) laut Entwurf der Bundesregierung	6,5%	7%	8%	8%	10%	10%	14,5%	14,5%	22%
Nahrungs- und Futtermittelpflanzen (Obergrenze, energetisch)	4,4 %								
Altspeiseöle und tierische Fette (Obergrenze, energetisch)	1,9 %								
Fortschrittliche Biokraftstoffe (Mindestanteil, energetisch)	2022	2023	2024	2025	2026	2028	2030		
	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,7 %	1,0 %	1,7 %	2,6 %		
	Mengen oberhalb des Mindestanteils werden mit Faktor 2 angerechnet. POME wird nur einfach angerechnet, ist weiterhin auf den Mindestanteil anrechenbar.								
Wasserstoff und PtX-Kraftstoffe	Mengen werden mit Faktor 2 angerechnet (Raffinerien und Straßenverkehr)								
Strom	Mengen werden mit Faktor 3 angerechnet (Strom aus öffentlichen Ladepunkten, private Elektrofahrzeuge, Fahrzeugflotten)								
Luftverkehr	Quote für PtL-Kerosin: 0,5 % in 2026, 1 % in 2028, 2 % in 2030								
Palmöl	2022					ab 2023			
	0,9 %					0 %			
Co-Processing	Gesetzlicher Ausschluss bleibt; Bundestag fordert die Bundesregierung auf (Entschließung), die Anrechenbarkeit durch BImSchV zu ermöglichen. Gemäß BImSchG dürfen nur Reststoffe (Anhang IX Teil A der RED II, fortschrittliche Biokraftstoffe) eingesetzt werden.								
UER-Maßnahmen	Können nur noch bis einschließlich 2026 angerechnet werden								
Biogener Wasserstoff	Einsatz in Straßenfahrzeugen (nicht in Raffinerien) aus Reststoffen (Anhang IX Teil A) wird ab dem 1.7.2023 angerechnet. BImSchV regelt notwendige Kriterien.								
Sonstiges	Verweis auf unvergällten Alkohol bleibt. Bunderegierung legt ab 2024 dem Bundestag einen Bericht zur THG-Quote vor (Technologien, Kosten, Verfügbarkeit).								
	© BMU   Stand: 22.09.2021								

# Fazit

---

- Die gesamte Energiemenge ist begrenzt, weshalb die Effizienz enorm wichtig ist
- Andererseits sind in vielen Anwendungen Speicherung, Energiedichte, Transport, Infrastruktur von übergeordneter Bedeutung:
  - Flugverkehr, Schiffsverkehr
  - Landwirtschaft, Militär, Bau, Notstromaggregate
- Neben den reinen operativen Kosten insbesondere für Strom entscheiden auch die Investitionen in Infrastruktur und Transport
- Hinzu kommen Faktoren wie Energieverfügbarkeit, Energie-Import, technische Umsetzung
- Alle Punkte müssen zukünftig berücksichtigt werden, d. h. die Energieträger oder Lösungen werden diverser und individueller, abhängig von Einsatzgebiet, Region und Sektorenkopplung

---

# VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

---

## Kontakt

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits-  
und Energietechnik UMSICHT  
Osterfelder Straße 3  
46047 Oberhausen  
[www.umsicht.fraunhofer.de](http://www.umsicht.fraunhofer.de)



Andreas Menne  
Abteilungsleiter | Low Carbon Technologies  
Telefon: +49 (0) 208-8598-1172  
E-Mail: [andreas.menne@umsicht.fraunhofer.de](mailto:andreas.menne@umsicht.fraunhofer.de)