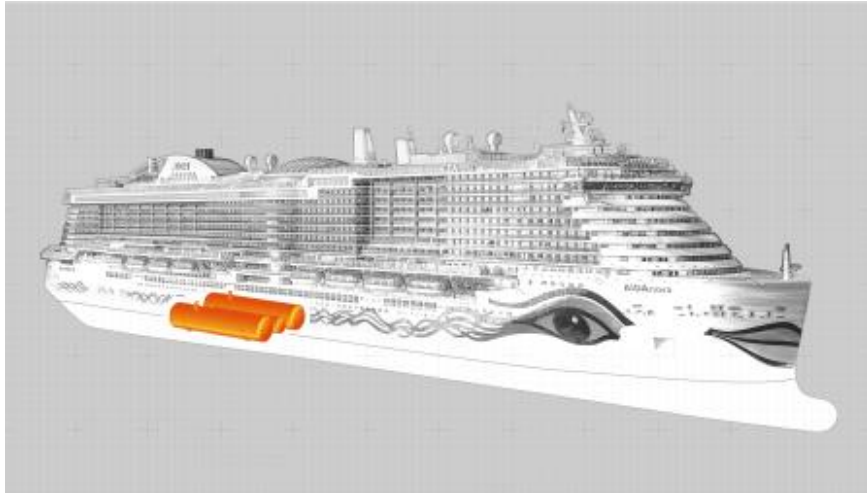


Quelle: www.merkur.de/niedersachsen/neues-kreuzfahrtschiff-aidacosma-erreicht-das-offene-meer-zr-91070505.html



Seminar - 08. November 2021 - Bremen



3 LNG Tanks

Material: X8Ni9
Plattenstärke: bis zu 50 mm
Durchmesser: 7,75 und 5,0 m
Gesamtvolumen: 3.627 m³
Speichermenge: 1.500 t (LNG)

Helios-Klasse

Länge / Breite / Tiefgang: 337 m / 42 m / 8,8m
Vermessung: 183.800 BRZ
Generatorleistung: 61.760 kW_{eI}
Besatzung: 1.682
Zugel. Passagierzahl: 6.554



Quelle: www.ilsenburger-grobblech.de/de/erfolgsgeschichten/lng-projekte/aida-nova.html

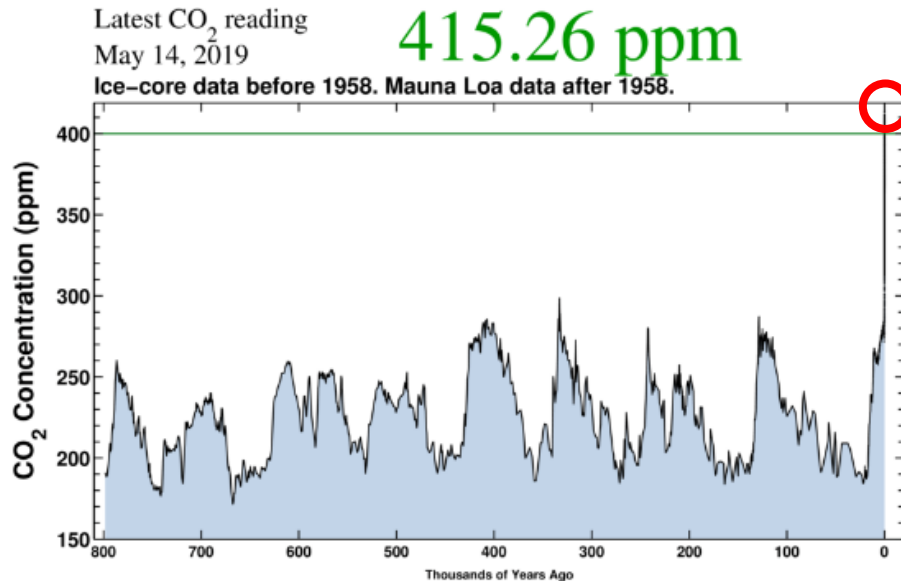
1. LNG = Liquefied Natural Gas - aufbereitetes Erdgas, welches durch Abkühlung auf -162°C kondensiert.
2. LNG besteht im Wesentlichen aus den beiden Hauptkomponenten Methan (CH_4) und Ethan (C_2H_6).
3. Durch Verflüssigung erhöht sich die Dichte um etwa das 600-fache.
4. In thermisch sehr gut isolierten Behältern kann LNG über längere Zeiträume verlustfrei gelagert werden.
5. Durch die Aufbereitung ist LNG „sauberer“ und damit wertvoller als Erdgas.
6. LNG wurde zum ersten Mal 1917 in den USA hergestellt.
7. Ende 2019 betrug die weltweite LNG-Verflüssigungskapazität 427 Millionen t/a (Quelle: GIIGNL Annual Report 2020)
8. Die Internationale Energieagentur (IEA) prognostiziert, dass bis 2040 bis zu 60 % des weltweiten Erdgases als LNG verteilt werden [Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWI)].

Im Erdgas sind noch Bestandteile wie Stickstoff, Sauerstoff, CO_2 , etc. enthalten, die vor der Verflüssigung entfernt werden müssen.

Das ist flüssiger Stickstoff – kein LNG!



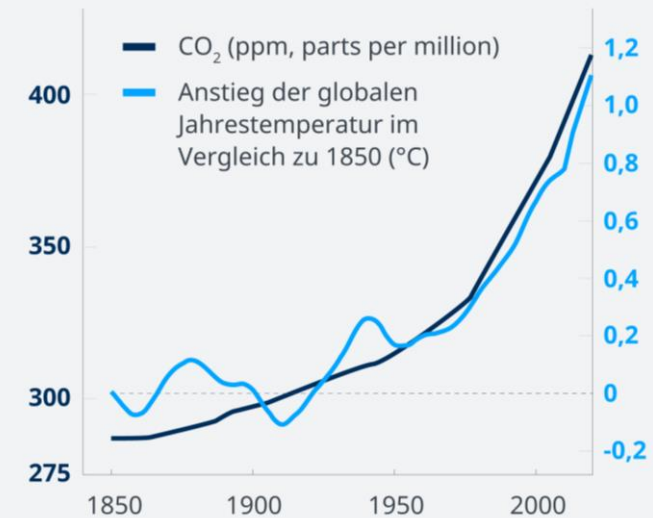
- Lagerfähig - ohne Gasverlust - in isolierten Druckbehältern
- Farb- und geruchlos
- Nicht toxisch, nicht karzinogen
- Nicht wassergefährdend
- Nicht odoriert (keine Geruchserkennung)
- Leckagen an einem LNG System sind optisch, anhand einer weißen Wolke (kondensierte Luftfeuchtigkeit), zu erkennen
- Verdampfendes LNG ist zunächst schwerer als Luft und bleibt am Boden. Durch die Wärme aus der Umgebung wird das NG leichter als Luft und steigt nach oben
- Unisolierte LNG-Leitungen bilden sofort eine Eisschicht, die sich mit der Zeit zu einer dicken Schicht (wie eine Isolierung) aufbaut



Quelle: www.energiezukunft.eu/klimawandel/erde-erreicht-hoechsten-co2-gehalt-der-menschheitsgeschichte/

CO₂ heizt die Erde auf

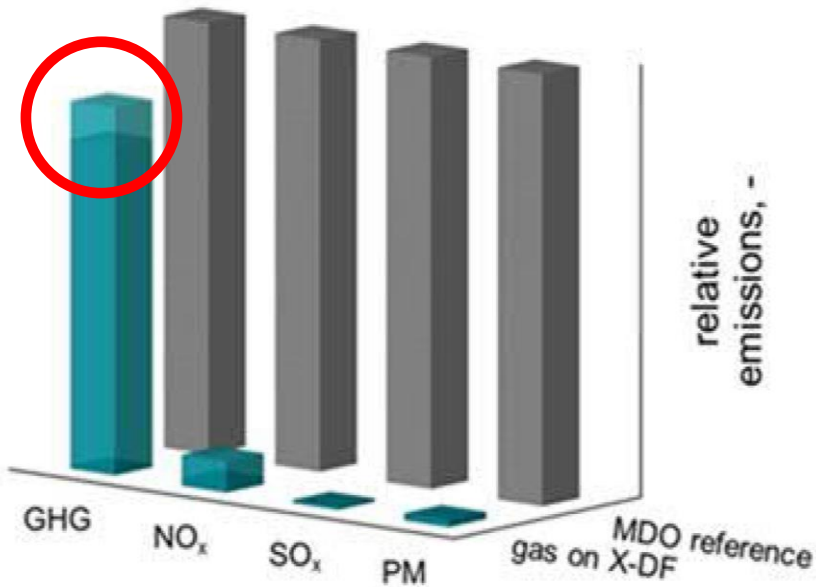
Hitze durch Zunahme von CO₂ in der Atmosphäre



Quellen: NOAA, WMO, IPCC, Hadley Centre | 2020

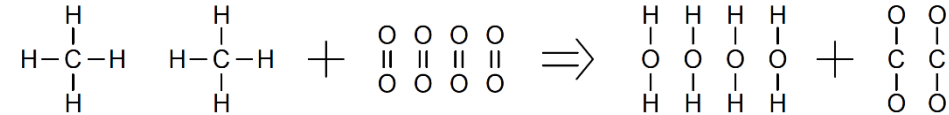
Quelle: www.dw.com/de/klimaschutz-wie-lsst-sich-co2-aus-der-atmosphre-entfernen-aufforstung-humus-biokohle-beccs/a-54639354

Overview Pollutants - Including CO_{2eq}



Quelle: CIMAC Congress, Vancouver June 10-14, 2019; „WinGD 12X92DF, the Development of the Most Powerful Otto Engine Ever“; Schneiter, D.

Methan:

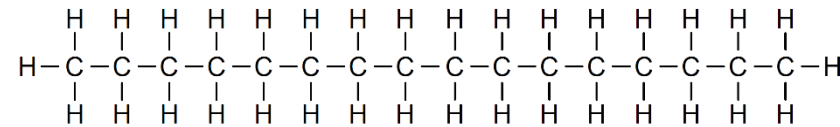


$$1 \text{ kg CH}_4 + 3,9 \text{ kg O}_2 \Rightarrow 2,2 \text{ kg H}_2\text{O} + 2,7 \text{ kg CO}_2$$

Mit 13,9 kWh(H_i)/kg_{Methan} => 197 g_{CO2}/kWh (H_i)

Bis zu 26 % weniger CO₂

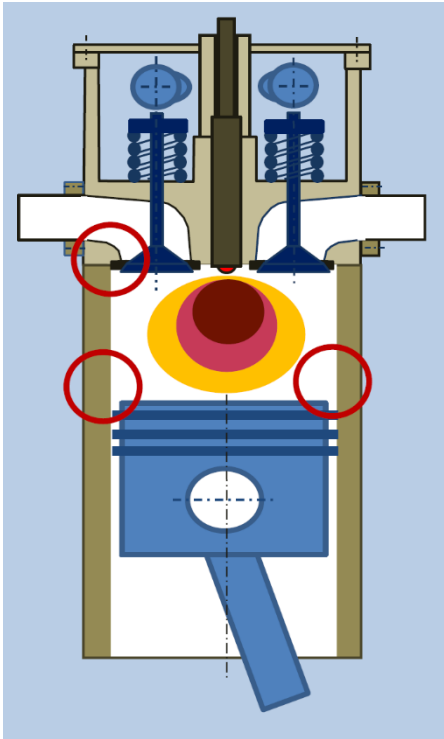
Diesel:



$$1 \text{ kg C}_{16}\text{H}_{34} + 3,5 \text{ kg O}_2 \Rightarrow 1,4 \text{ kg H}_2\text{O} + 3,1 \text{ kg CO}_2$$

Mit 11,6 kWh(H_i)/kg_{Diesel} => 267 g_{CO2}/kWh (H_i)

Methanschlupf durch unvollständige Verbrennung



Quelle: Meyer, Freerk; "Methanverluste beim Einsatz von LNG als Kraftstoff" – Workshop am 16. 12. 2013 im MARIKO, Leer

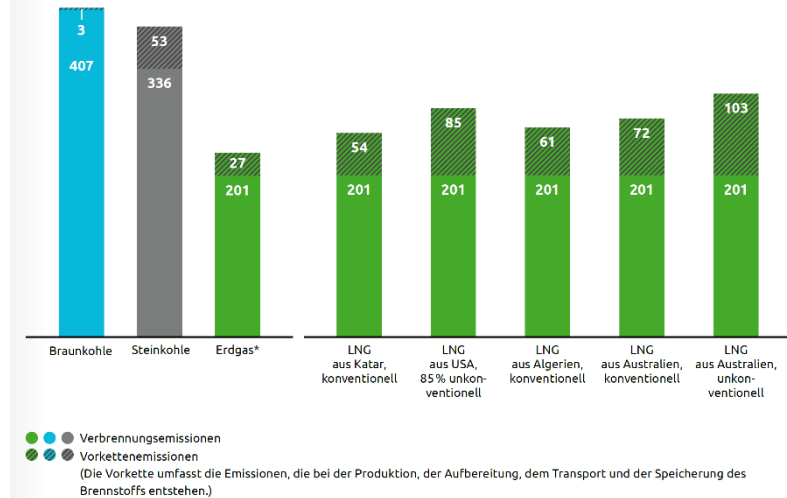
Tabelle 1: Spezifische Treibhausgasemissionen über den Produktlebensweg von Erdgas im Jahr 2014 gemäß DBI-Studie

in g/GJ		Gastransport, Speicherung und Verteilung innerhalb Zentral-EU	Gasauflbereitung	Gas-transport1)	Gasproduktion	Entfernung von CO2 und H2S	Total
Deutschland	CO ₂	134,7	819,5	0,0	2005,2	2172,3	5131,8
	CH ₄	66,8	6,1	0,0	18,1	0,0	90,9
	N ₂ O	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
	CO	0,0	0,6	0,0	2,5	0,0	3,2
Niederlande	CO ₂	127,3	24,2	1,1	924,0	0,8	1077,5
	CH ₄	66,8	0,0	6,0	11,0	0,0	83,8
	N ₂ O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	CO	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	1,3
Norwegen	CO ₂	131,3	269,3	269,3	1438,1	16,8	3431,8
	CH ₄	66,8	1,7	1,7	15,4	0,0	85,9
	N ₂ O	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2
	CO	0,0	0,2	0,6	2,6	0,0	3,4
Russland (gewichteter Mittelwert)	CO ₂	146,2	0,0	11791,0	856,5	2,4	12797,0
	CH ₄	66,8	0,0	69,2	11,7	0,0	147,7
	N ₂ O	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
	CO	0,0	0,0	1,5	1,4	0,0	6,0

¹⁾ Gastransport bis zur Außengrenze von Zentral-EU (im Fall von Norwegen und Russland) oder in ein anderes Land in Zentral-EU (betrifft Deutschland und Niederlande, da das Produktionsland in Zentral-EU liegt).

Quelle: Umweltbundesamt; Kurzstudie; „Bewertung der Vorkettenemissionen bei der Erdgasförderung in Deutschland“; 02/2018

Treibhausgasemissionen von Erdgas und anderen Fossilen Energieträgern in Gramm CO₂-Äquivalente pro Kilowattstunde

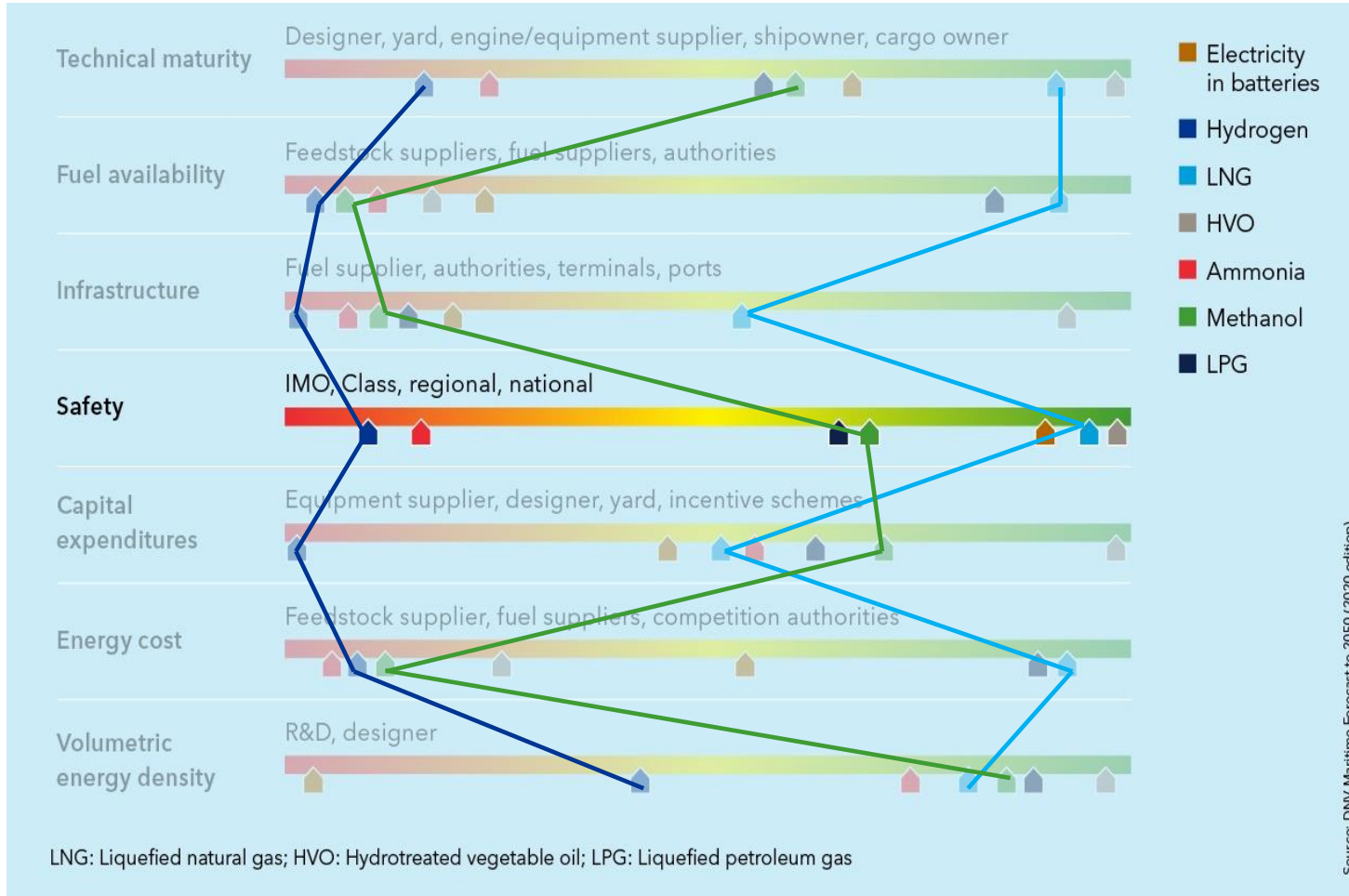


* leitungsgebundenes, in Deutschland verwendetes Erdgas
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA (2019), ifeu (2015), DBI (2021), thinkstep (2017)

Quelle: Zukunft Gas; „Vorkettenemissionen von Erdgas“; Mai 2021

CO₂-Äquivalent (CO₂-eq) = Summe aller Emissionen multipliziert mit ihren jeweiligen GWP (Global Warming Potential)

Alternative Fuel Barrier Dashboard



Quelle: www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Closing-the-safety-gap-in-an-era-of-transformation.html

SlowMo: Falltest zum Erhalt der EU-Zertifizierung nach R110 - LNG-Zylindertank für LKW



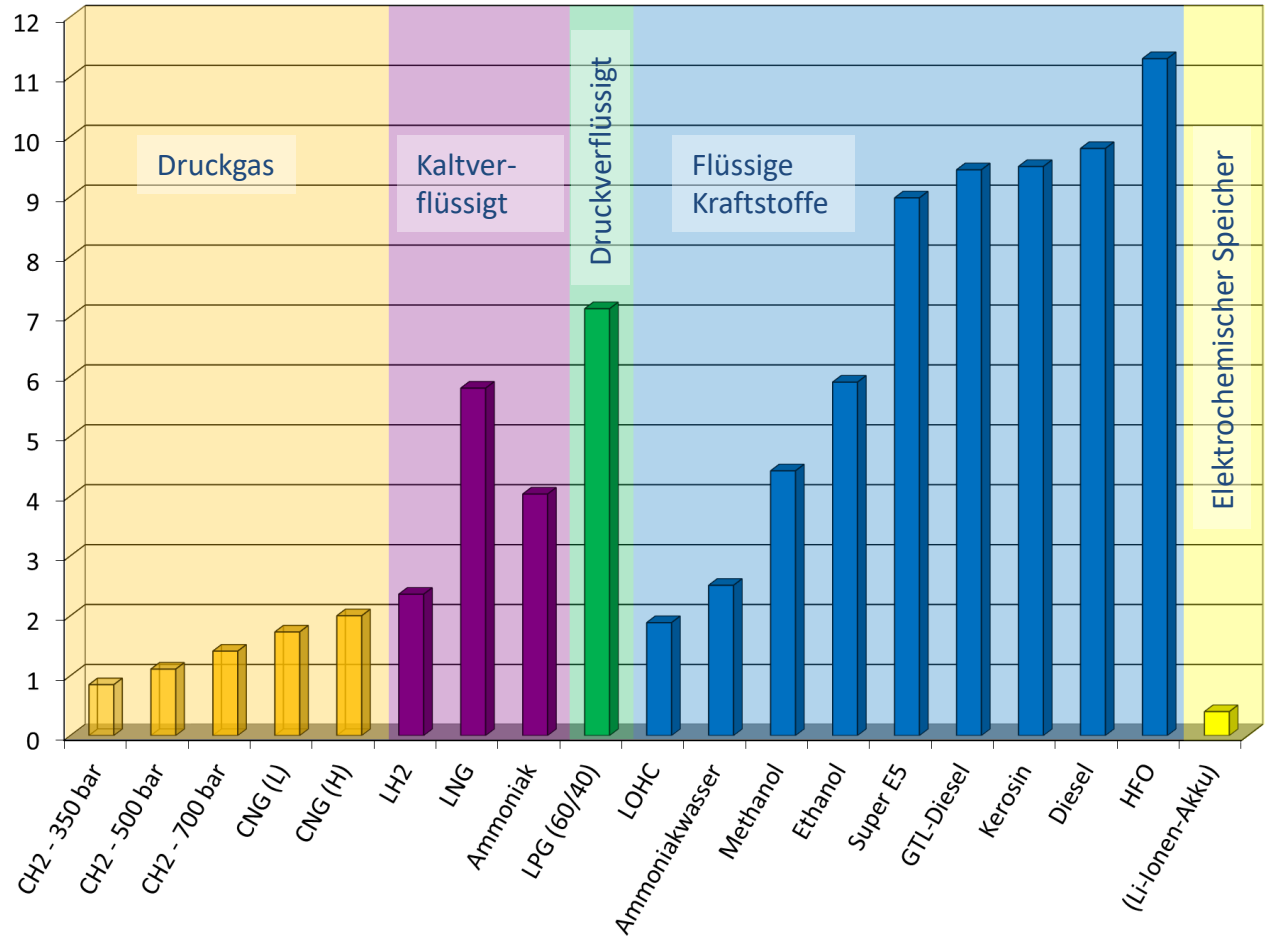
Reale Geschwindigkeit!



Volumenspezifische
Energiedichte
kWh (H_i) / Liter
Ohne Behälter!

Abkürzungen:

- (H_i): Lower Calorific Value
- CH₂: Compressed Hydrogen
- LH₂: Liquefied Hydrogen
- CNG: Compressed Natural Gas (200 bar)
- LNG: Liquefied Natural Gas
- LPG: Liquefied Petrol Gas
- LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier
- GTL: Gas-to-Liquid
- HFO: Heavy Fuel Oil

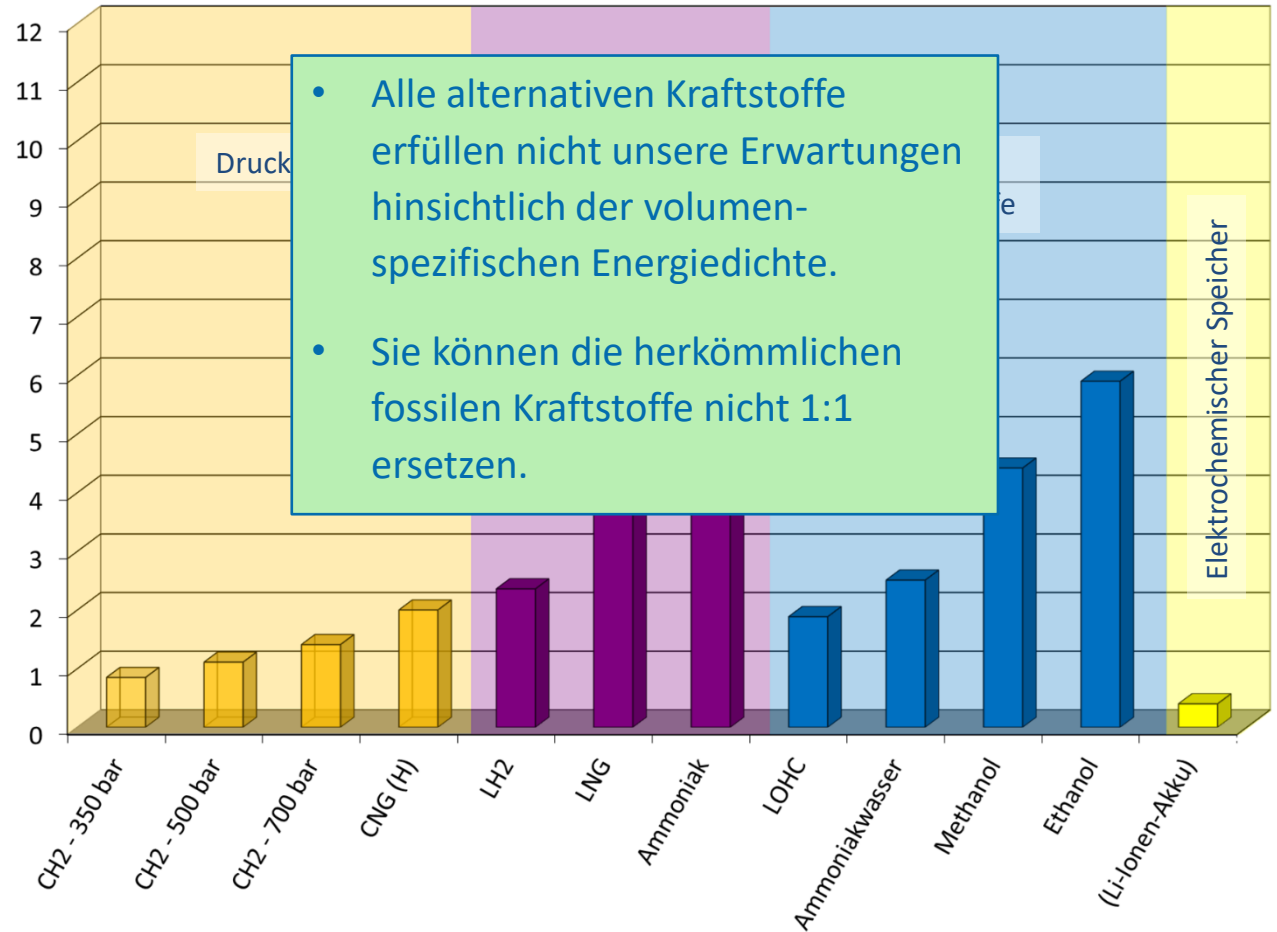


„Je geringer die Energiedichte eines alternativen Energieträgers, umso enghaschiger muss die Tank- oder Lade-Infrastruktur sein!“

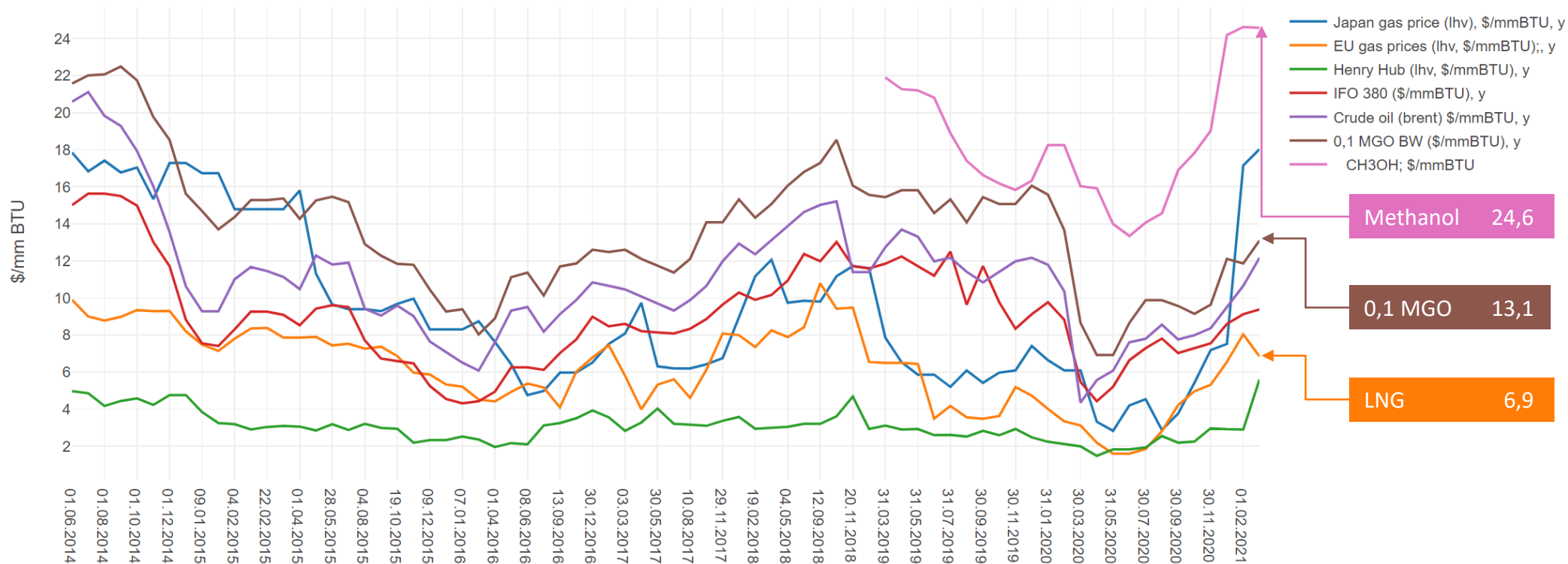
Volumenspezifische
Energiedichte
kWh (H_i) / Liter
Ohne Behälter!

Abkürzungen:

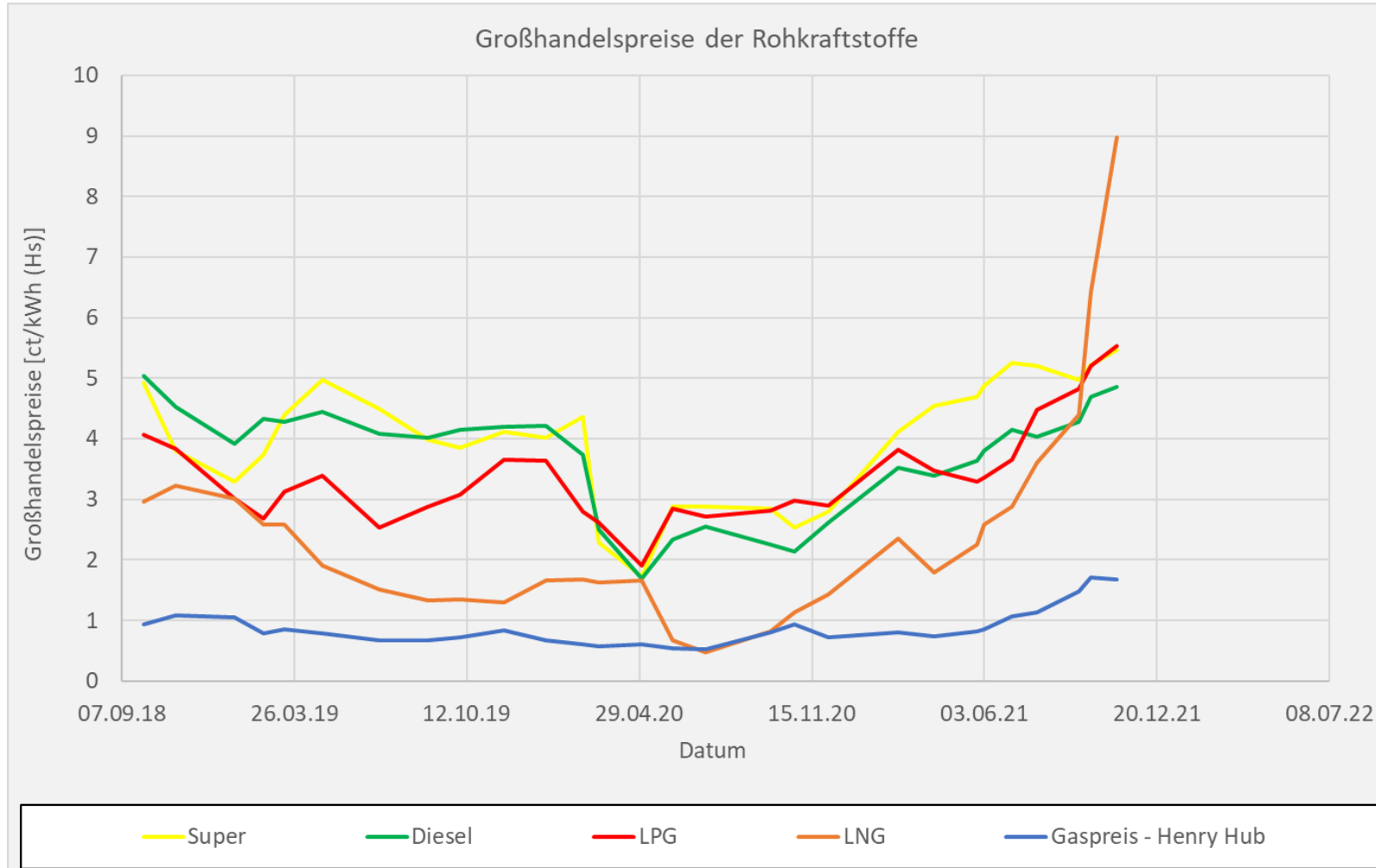
(H_i): Lower Calorific Value
CH₂: Compressed Hydrogen
LH₂: Liquefied Hydrogen
CNG: Compressed Natural Gas (200 bar)
LNG: Liquefied Natural Gas
LPG: Liquefied Petrol Gas
LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier



Aktuelle Preisentwicklungen – Stand: 28. Februar 2021



Quelle: www.dnv.com/maritime/lng/current-price-development-oil-and-gas.html



Kraftstoff	Ø- Endverbraucher- preis		Alle Werte in ct/kWh (H _i)						Energiesteuer in €/t _{CO2}
			Brutto	Netto	Energiesteuer	CO ₂ Abgabe	Großhandelspreis	Marge	
Diesel	1,549	€/l	15,97	13,42	4,85	0,67	5,18	2,72	180,64
Super E5	1,679	€/l	18,70	15,71	7,18	0,65	5,97	1,91	275,36
Autogas	0,799	€/l	11,21	9,42	2,48	0,59	6,02	0,32	105,28
LNG	2,499	€/kg	18,51	15,56	1,39	0,52	9,95	3,70	67,26
Wasserstoff	9,500	€/kg	28,53	23,97	-	-	-	-	-

Statusdatum: 04.11.2021

Endverbraucherpreise für das westliche Ruhrgebiet (nach clever-tanken.de)

Strom-Gestehungskosten in Deutschland

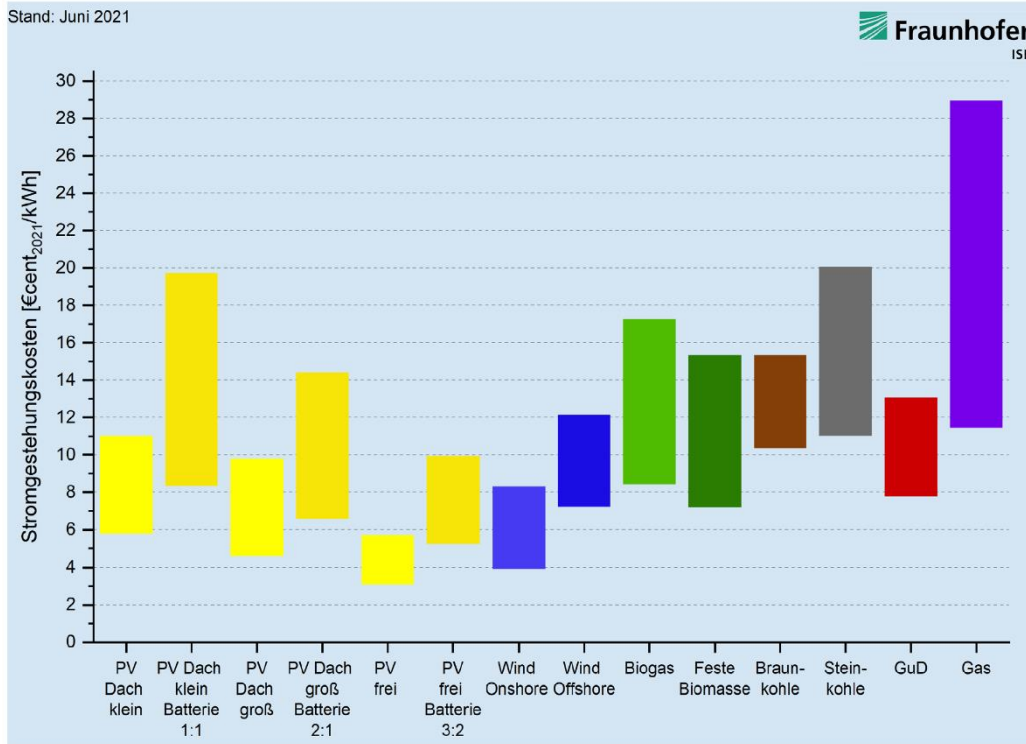


Abbildung 1: Stromgestehungskosten für erneuerbare Energien und konventionelle Kraftwerke an Standorten in Deutschland im Jahr 2021. Spezifische Anlagenkosten sind mit einem minimalen und einem maximalen Wert je Technologie berücksichtigt. Das Verhältnis bei PV-Batteriesystemen drückt PV-Leistung in kWp gegenüber Batterie-Nutzkapazität in kWh aus.

Quelle: Fraunhofer ISE; "Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien"; Juni 2021

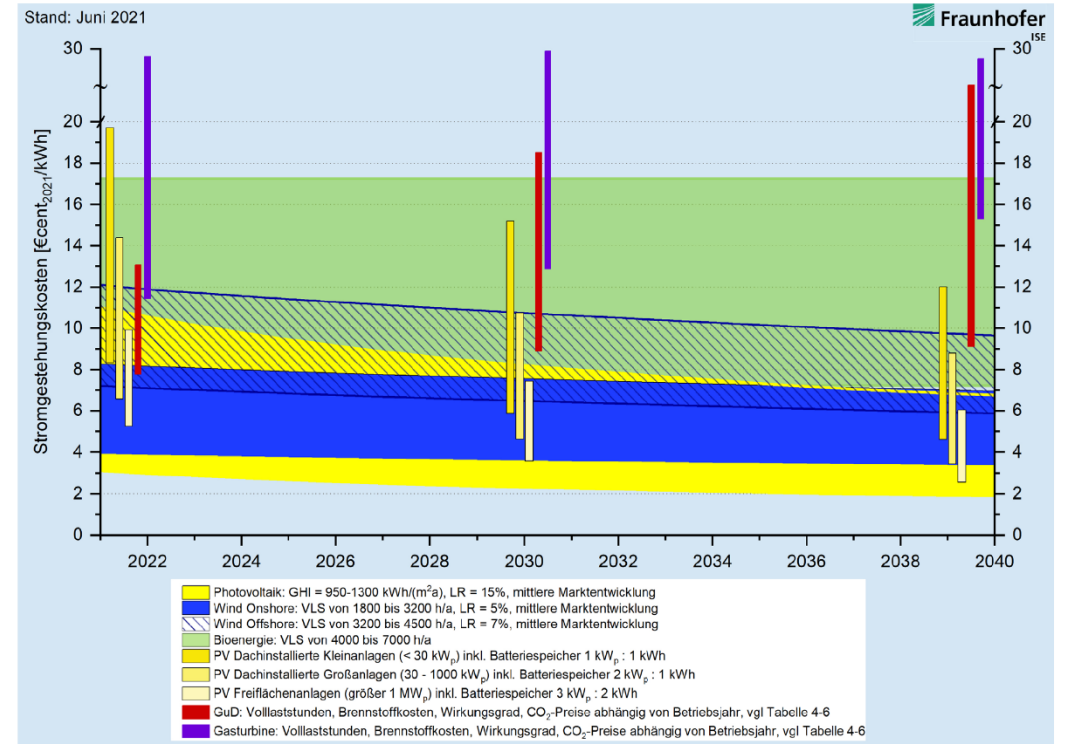


Abbildung 2: Lernkurvenbasierte Prognose von Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien und konventioneller Kraftwerke in Deutschland bis 2040. Berechnungsparameter in Tabelle 1 bis 6. Der LCOE-Wert pro Bezugsjahr bezieht sich jeweils auf eine Neuanlage im Bezugsjahr.

Quelle	Wert	Einheit	Beschreibung	Quelle
Solarenergie	640	kWp/ha	Durchschn. Peak-Leistung pro km ²	www.watson.ch/wirtschaft/leben/977378309-so-gross-muss-eine-pv-anlage-fuer-den-strombedarf-der-gesamten-welt-sein
	3,3	kWh _{el} /(kWp*d)	Solarenergie pro kWp pro Tag (München)	
	770.880	kWh _{el} /(ha*a)	Solarenergie pro Hektar und Jahr	
Biomasse Raps	1.190	l _{öl} /(ha*a)	Menge an Rapsöl pro Hektar und Jahr	www.de.wikipedia.org/wiki/Biodiesel/Liste_der_Ölpflanzenträge
	9,7	kWh (H _i)/l _{öl}	Heizwert von Rapsöl	
	11.543	kWh (H _i)/(ha*a)	Heizwert von Rapsöl pro Hektar und Jahr	
Wasserstoff aus Solarenergie	60	kWh _{el} /kgH ₂	El. Energiebedarf zur Herstellung eines kg H ₂	
	12.848	kgH ₂ /(ha*a)		
	33,3	kWh (H _i)/kgH ₂	Gewünschte max. Leistung des Elektrolyseurs	
	427.838	kWh (H _i)/(ha*a)	Heizwert von Solar-Wasserstoff pro Hektar und Jahr	

Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland
 Basierend auf Satellitendaten und Bodenwerte aus dem DWD-Messnetz
 Mittlere Jahressummen, Zeitraum: 1981 - 2010

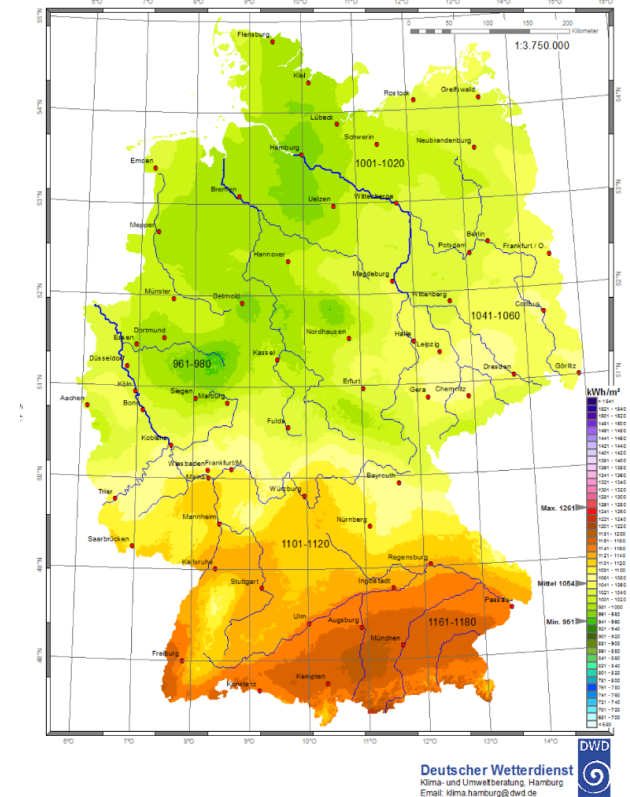


Abbildung 29: Mittlere Jahressumme der Globalstrahlung [kWh/m²] in der Bundesrepublik Deutschland von 1981-2010 (DWD 2013)

Quelle: Fraunhofer ISE; "Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien"; Juni 2021

ca. 320 – 360 kg Lademenge H₂



Betriebsdruck: 200 bar

Quelle: www.trailer-online.de/de/bildergalerie/

ca. 1.024 kg Lademenge H₂



Betriebsdruck: 380 bar

Quelle: www.krafthand.de/artikel/neue-speichertechnologie-von-linde-zum-effizienteren-transport-von-wasserstoff-13296/

LH₂-Tanklastwagen



Quelle: www.linde-gas.de/de/images/WASSERSTOFFTAG-03_WOLF_HANDOUT_tcm565-71312.pdf

ca. 3.300 kg Lademenge LH₂



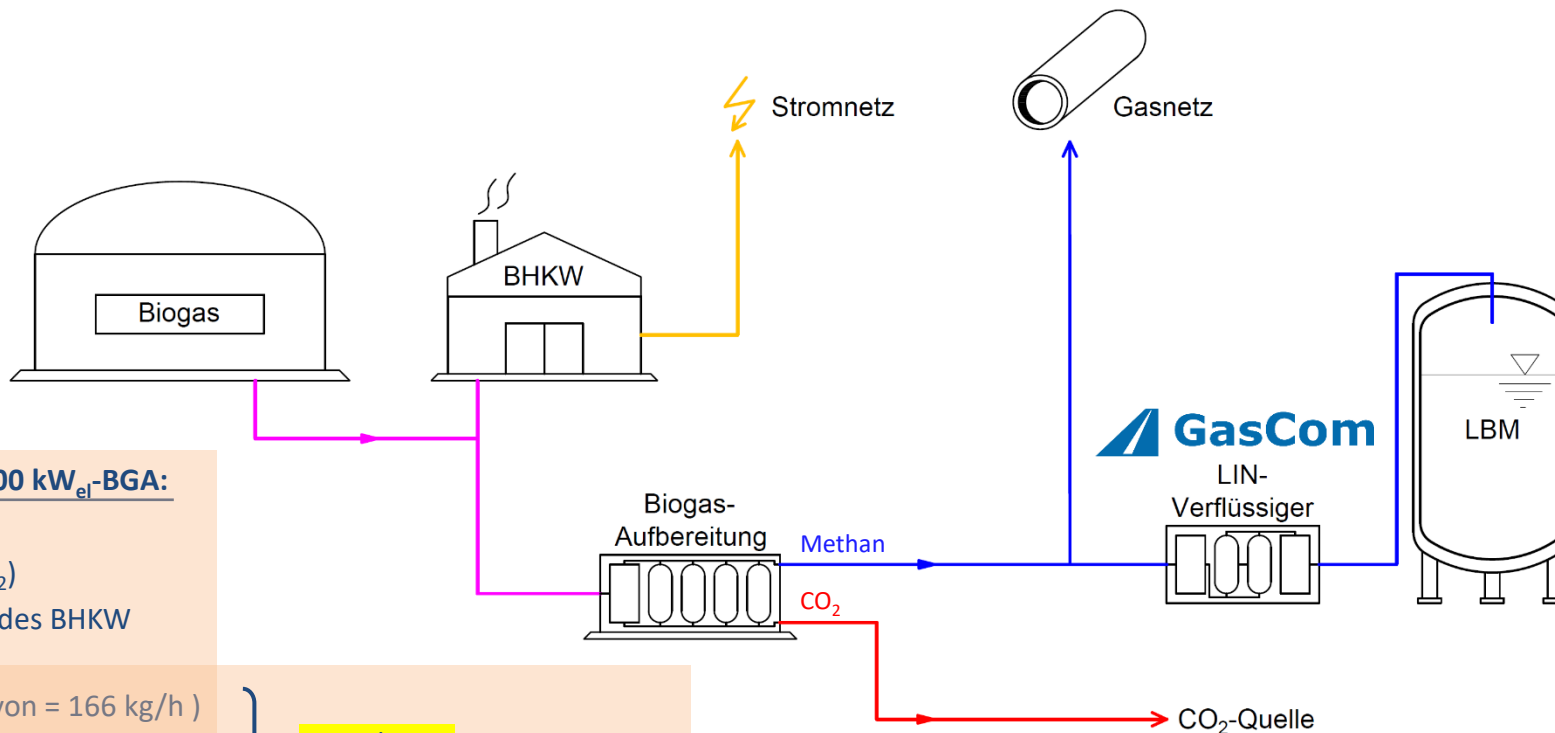
...oder 19.300 kg LNG (hier SNG)

Abkürzungen:

BGA: Biogasanlage

BHKW: Blockheizkraftwerk

LBM: Liquefied Bio-Methane



Abschätzung der Stoffströme einer 500 kW_{el}-BGA:

- 55 Vol.-% CH₄ + 45 Vol.-% CO₂
(31 Gew.-% CH₄ + 69 Gew.-% CO₂)
- 39 % elektrischer Wirkungsgrad des BHKW

=> 92 kg/h CH₄

=> 208 kg/h CO₂ → (80 % davon = 166 kg/h)

+ 30 kg/h H₂ } 60 kg/h CH₄

Braucht 1.800 kW_{el} (Elektrolyse)



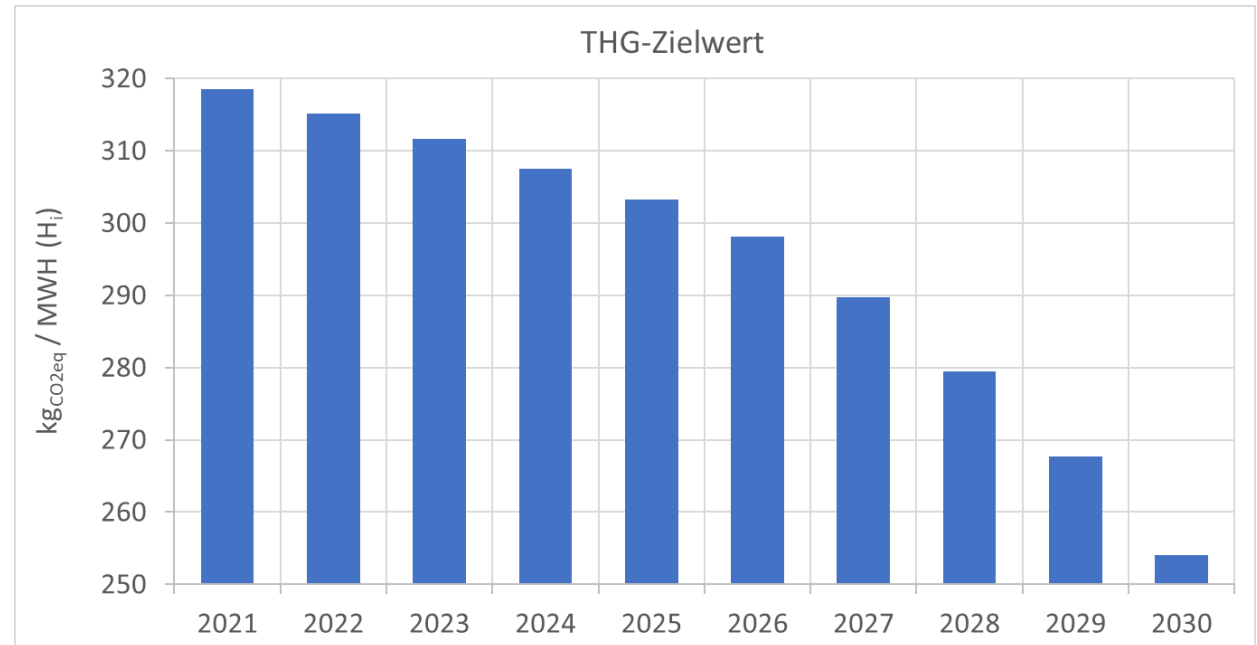
Sabatier-Verfahren (Methanisierung)

Ein stark exothermer Prozess (setzt Wärme frei)

THG-Emissionen konventioneller und fortschrittlicher Kraftstoffe nach 38. BImSchV

Werte in $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{eq}}/\text{MWh}$ (H_i)

Ottokraftstoffe	335,9
Dieselmkraftstoffe	342,4
LPG	265,0
CNG	249,5
LNG	268,2
H ₂ (blau/türkis)	189,7
H ₂ (grau)	375,5
H ₂ (braun)	843,8



Der Inverkehrbringer von Kraftstoffen, die höhere THG-Emissionen verursachen als der Zielwert, muss für die zu hohen THG-Werte entweder eine Ausgleichszahlung von $600 \text{ €/t}_{\text{CO}_2\text{eq}}$ leisten oder die negativen THG-Quoten anderer Energieträger kaufen.

Aktueller Quotenpreis: $>400 \text{ €/t}_{\text{CO}_2\text{eq}}$



Allgemeines Modell eines Schiffs nach dem PERFECt-Konzept. (Photo-Credit: DNV GL)

Quelle: www.dnvgl.de/news/kraftentfaltung-ohne-kolben-gtt-cma-cgm-und-dnv-gl-praesentieren-studie-zu-grosscontainerschiffen-mit-Ing-gas-und-dampfturbinenantrieb-42088

- elektrischer Antrieb mit Stromgeneratoren und Batteriespeicher – „All-Electric-Design“
- durch Gleichteile-Strategie sinken die spezifischen Kosten und gleichzeitig steigt die Variabilität des Antriebssystems
- kann über Batteriespeicher auch regenerativen Strom nutzen
- hocheffiziente Energiewandlung, Propulsion und Rumpfform – benötigt weniger Energie pro Transportleistung als heute
- nutzt einen Energieträger (Kraftstoff) der heute schon verfügbar ist, der weltweit durch regenerative Quellen erzeugt werden kann und eines Tages günstiger ist, als fossile Kraftstoffe

› **Vielen Dank!**

E-S-K

Engineering Service Kreuz

Dr.-Ing. Can Gernot Kreuz

Email: c.kreuz@e-s-k.com