

Ausblick auf Energieträger und Emissionsfaktoren der Zukunft: Strom, Gas (inkl. „fracking“) und H₂

Uwe R. Fritsche, Wissenschaftlicher Leiter
Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien

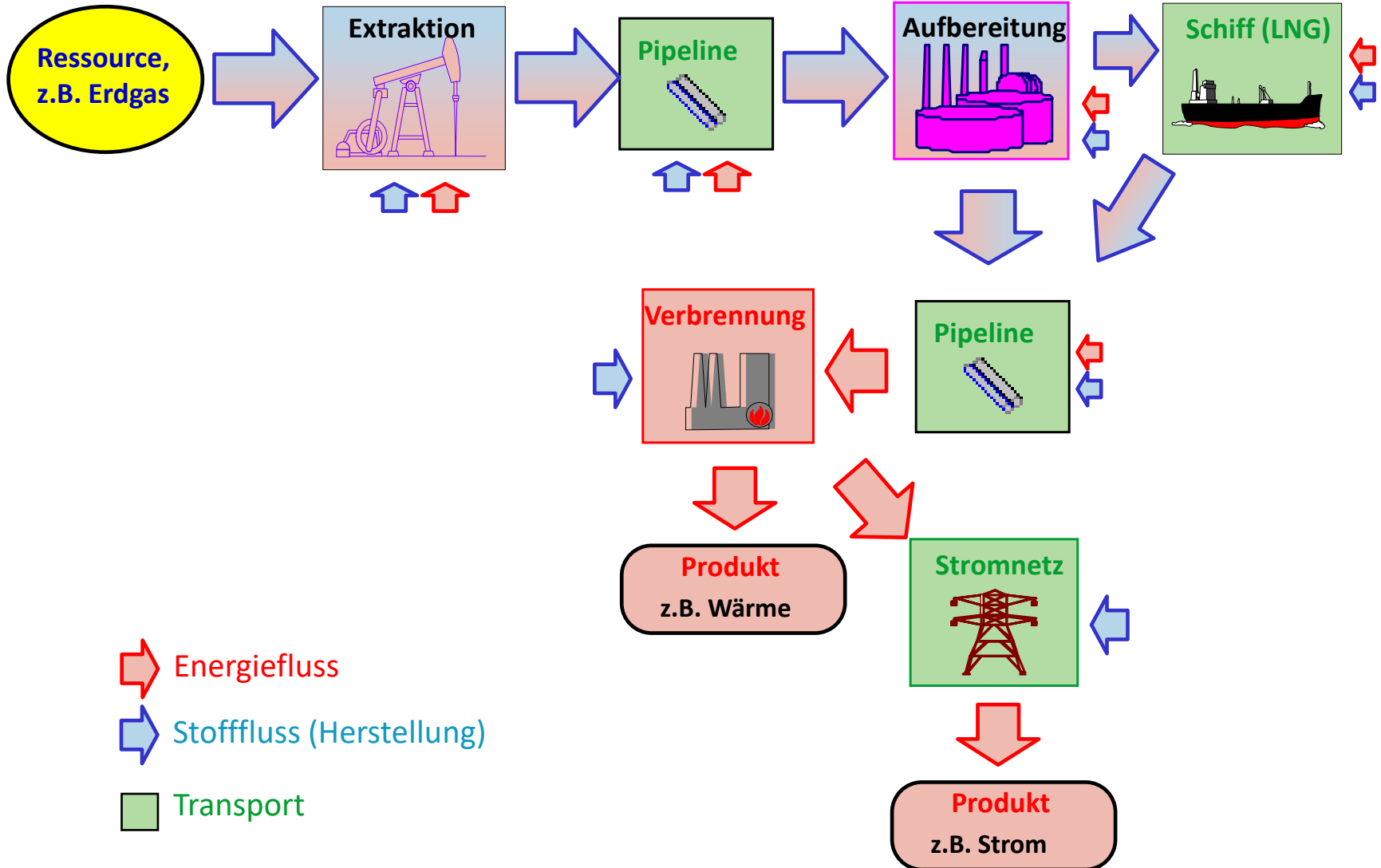
**Präsentation zur Fachtagung Energieberatung 2022 (online)
12.7.2022**

- Künftige Emissionsfaktoren für Bereitstellung von Strom, Gas und H₂
- Szenario-Daten 2030-2050: **NECP** + (vereinfacht) **dena-Leitstudie 2021** + **Klimaneutrales Deutschland 2045**
- Bilanzierung mit **GEMIS**
 - kumulierter nichterneuerbarer Energie-Verbrauch (KEV_{NE})
 - Treibhausgase (THG): CO₂ und CO₂-Äquivalente (GWP₁₀₀)

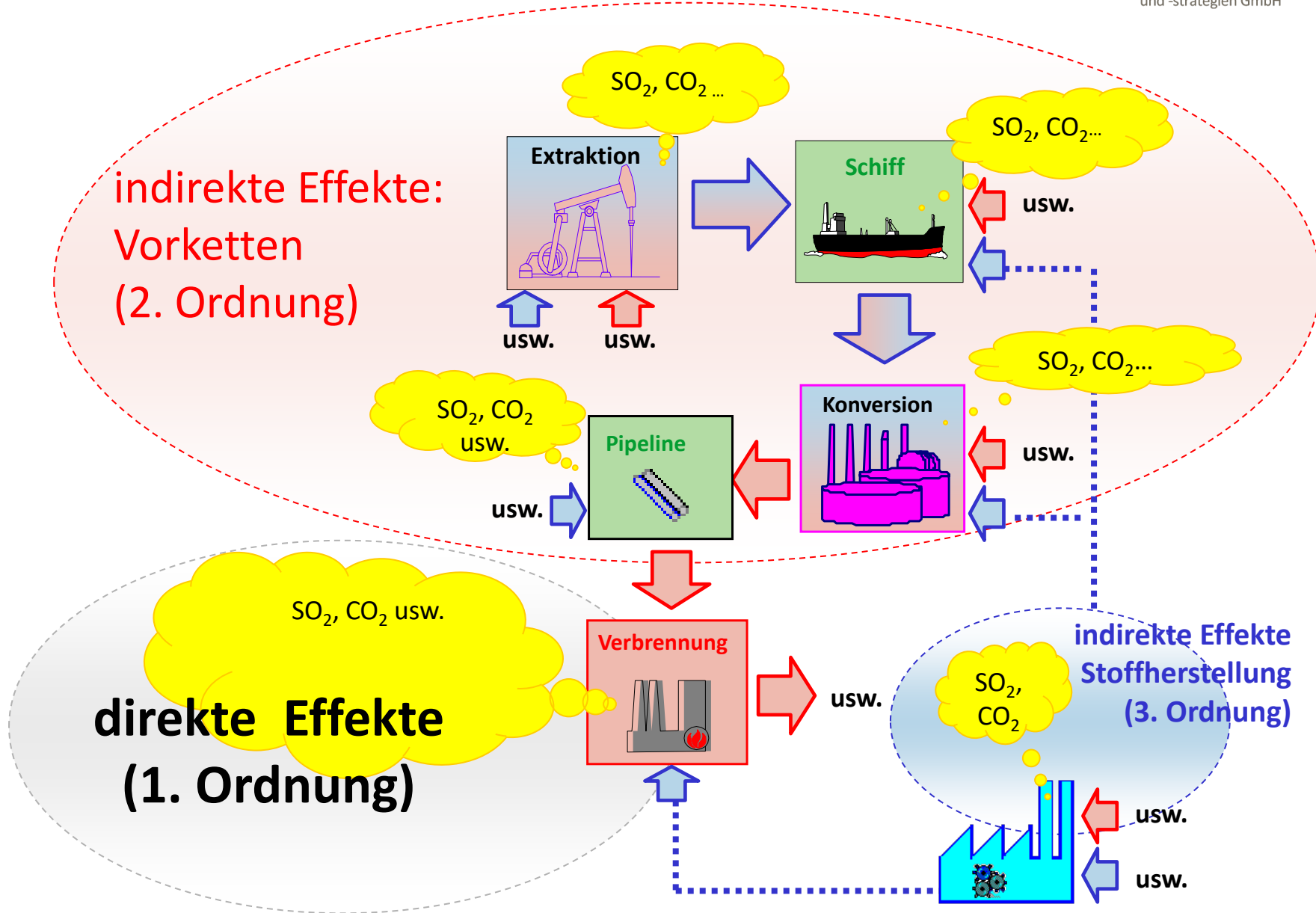
Bilanzierung mit GEMIS

- Globales Emissions-Modell integrierter Systeme (seit 1989!)
- ...bilanziert **Outputs** (z.B. Strom, Plastik) von Prozessen zurück bis Ressourcen (z.B. Gas- oder Ölförderung)
- ...berechnet **Lebenszyklen** für Outputs inkl. Herstellung, Transporte und (bei Interesse) Entsorgung
- ...über statistische Bilanzen je kWh, kg, P*km hinaus auch für **Szenarien** (2030-2050)
- Ergebnisse: Umweltaspekte (CO₂- und SO₂-Äq., Reststoffe, Fläche, KEV, Fläche...), Kosten, Beschäftigte (direkt und indirekt) und Umsätze
- Daten für > 50 Länder und > 10.000 Prozesse

Prozesskette Energie in GEMIS



Direkte und indirekte Effekte



Kraftwerkspark-Dynamik...

Erzeugung [TWh]	Statistische Daten							Szenario-Daten NECP	
	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2030	2050
AKW	140,6	91,8	84,6	76,3	76,0	75,1	64,4	0	0
Braunkohle	145,9	154,5	149,5	148,4	145,6	114,0	91,7	56,0	0
Steinkohle	117,0	117,7	112,2	93,6	82,6	57,5	43,1	39,0	0
Erdgas	89,3	62,0	81,3	86,7	81,6	90,0	91,9	97,0	18,0
Öl	8,7	6,2	5,8	5,6	5,1	4,8	4,3	3,0	1,0
Wasserkraft	27,4	24,9	26,1	26,2	17,7	19,7	18,6	21,0	21,0
Windkraft onshore	37,6	71,4	67,6	87,9	90,5	101,2	103,7	137,0	224,0
Windkraft offshore	0,2	7,8	12,5	17,7	19,5	24,7	27,3	76,0	272,0
Solar-PV	11,7	38,7	38,1	39,4	45,8	46,4	50,6	94,0	183,0
Geothermie	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	3,0	2,0
Biomasse	29,6	44,6	45,0	45,0	44,7	44,4	44,9	41,5	34,5
Hausmüll ^a	4,7	5,8	5,9	6,0	6,2	5,8	5,7	5,5	6,5
andere ^b	20,4	21,5	21,9	21,0	27,6	25,7	25,5	9,0	2,0
Summe^c	633,1	647,0	650,8	653,9	642,9	609,4	571,9	582,0	764,0

^a = biogener Anteil; ^b = inkl. Gicht-/Kokereigas, nicht-biogener Hausmüll; ^c = ohne Pumpstrom; Werte gerundet

Quelle: AGEb (2021) und BMWi (2021) für 2010-2020; für 2030 und 2050: Prognos et al. (2020a+b)

NECP noch ohne Vorziehung Klimaneutralitätsziel auf 2045 - Anpassung nötig: mehr Erneuerbare schon bis 2030

Ergebnisse Strom 2030 - 2050

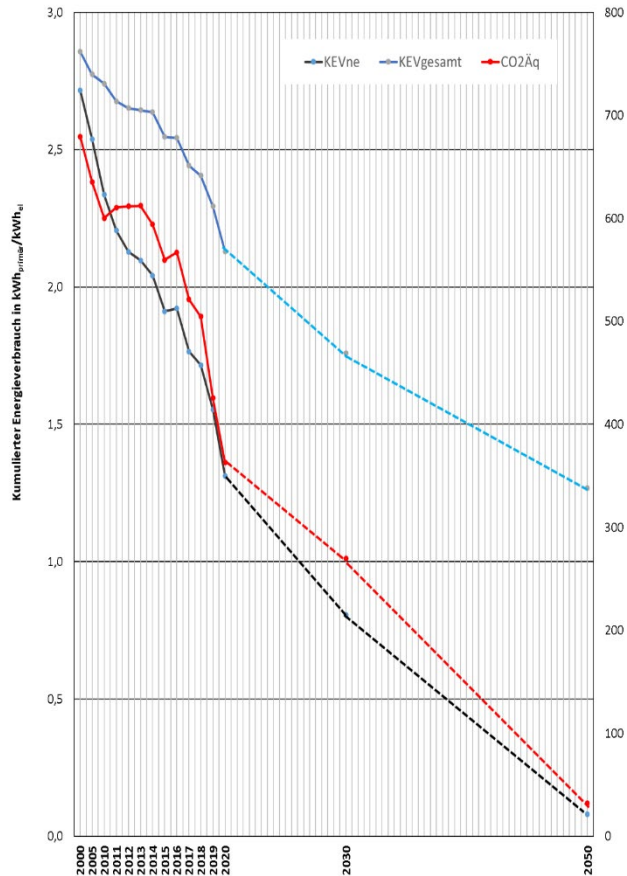
Option	Kumulierter Energieverbrauch (KEV) [kWh _{primär} /kWh _{el}]		THG-Emissionen [g/kWh _{el}]	
	KEV _{NE}	KEV _{ges}	CO ₂ Äq	CO ₂
Strom lokal 2030 NECP	0,81	1,76	268	257
Strom lokal 2050 NECP	0,08	1,27	32	29
Kraftwerkspark 2030 NECP	0,78	1,71	259	249
Kraftwerkspark 2050 NECP	0,07	1,23	30	28

KEV_{ges} = gesamter KEV; KEV_{NE} = KEV nicht-erneuerbar; CO₂-Äquivalente für GWP₁₀₀ nach IPCC (2013)

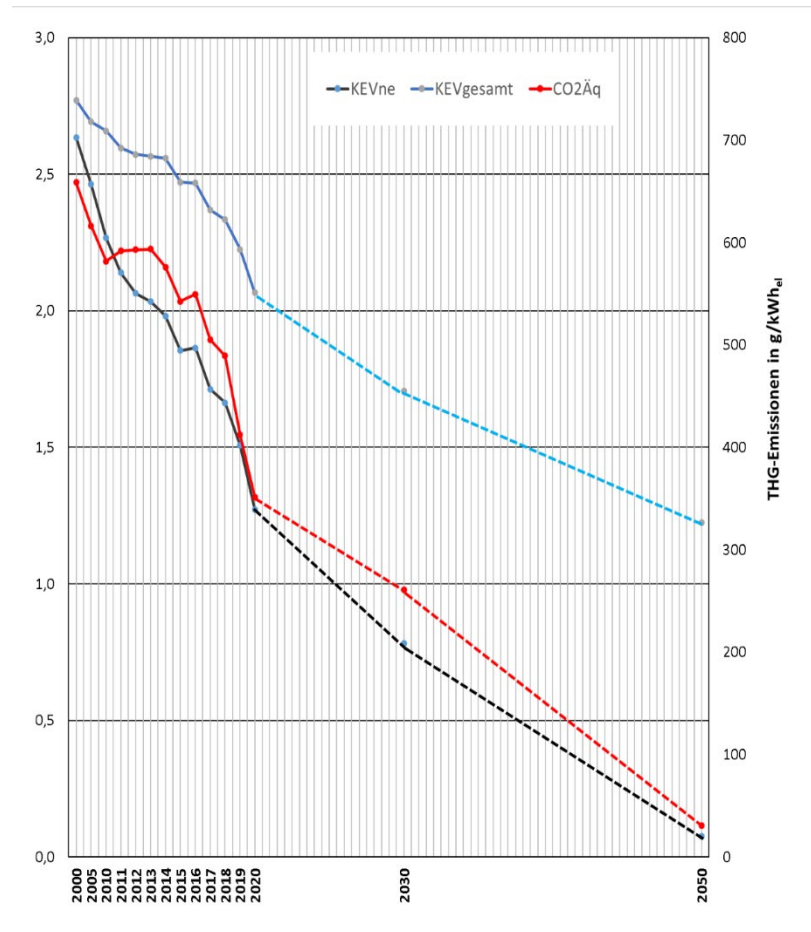
Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 5.1

NECP noch ohne Vorziehung Klimaneutralitätsziel auf 2045 - Anpassung nötig: mehr Erneuerbare schon bis 2030

Ergebnisse Strom: 2000 - 2050



verbraucherseitig (lokales Stromnetz)



erzeugerseitig (Kraftwerkspark)

NECP noch ohne Vorziehung Klimaneutralitätsziel auf 2045 - Anpassung nötig: mehr Erneuerbare schon bis 2030

Kraftwerkspark-Dynamik NECP vs. 2045

Erzeugung [TWh]	Szenario-Daten NECP (2020)		dena Leitstudie (2021)		KN2045 (Prognos et al. (2021))	
	2030	2050	2030	2045	2030	2045
AKW	0	0	0	0	0	0
Braunkohle	56	0	5	0	3	0
Steinkohle	39	0	11	0	20	0
Erdgas	97	18	137	3	134	0
Öl	3	1	0	0	0	0
Wasserkraft	21	21	17	16	21	21
Windkraft onshore	137	224	216	303	149	293
Windkraft offshore	76	272	93	199	90	236
Solar-PV	94	183	123	235	137	339
Geothermie	3	2	0	0		
Biomasse	42	35	24	21	38	10
Hausmüll ^a	6	7	5	1		
andere ^b	9	2	0	65	12	62
Summe^c	582	764	631	843	604	961

^a = biogener Anteil; ^b = inkl. Gicht-/Kokereigas, nicht-biogener Hausmüll; bei dena & KN2045: „grüner“ H2

^c = ohne Pumpstrom

Quelle: für NECP 2030 und 2050: Prognos et al. (2020a+b); für dena Leitstudie: dena (2021); für KN2045: Prognos, ÖKO & WI (2021)

Ausblick: 2030 und 2045 vs. 2050

- **dena-Leitstudie 2021 & KN2045:**
Szenarien zu Klimaneutralität-Zielerreichung bis 2045
- **Grobe Kraftwerkspark** für 2030 und 2045

Option	Kumulierter Energieverbrauch (KEV) [kWh _{primär} /kWh _{el}]		THG-Emissionen [g/kWh _{el}]	
	KEV _{NE}	KEV _{ges}	CO ₂ Äq	CO ₂
Kraftwerkspark 2030 NECP	0,78	1,71	260	249
Kraftwerkspark 2030 (dena)	0,48	1,42	121	115
Kraftwerkspark 2030 (KN)	0,53	1,53	138	130
Kraftwerkspark 2045 (dena)	0,03	1,22	13	11
Kraftwerkspark 2045 (KN)	0,02	1,30	20	19
Kraftwerkspark 2050 NECP	0,07	1,23	30	28

KEV_{ges} = gesamter KEV; KEV_{NE} = KEV nicht-erneuerbar; CO₂-Äquivalente für GWP₁₀₀ nach IPCC (2013)

Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS 5.1 aus Basis von NECP (Prognos et al. 2020) und dena (2021) sowie Prognos, ÖKO & WI (2021)

THG/KEV-Bilanzen Erdgas

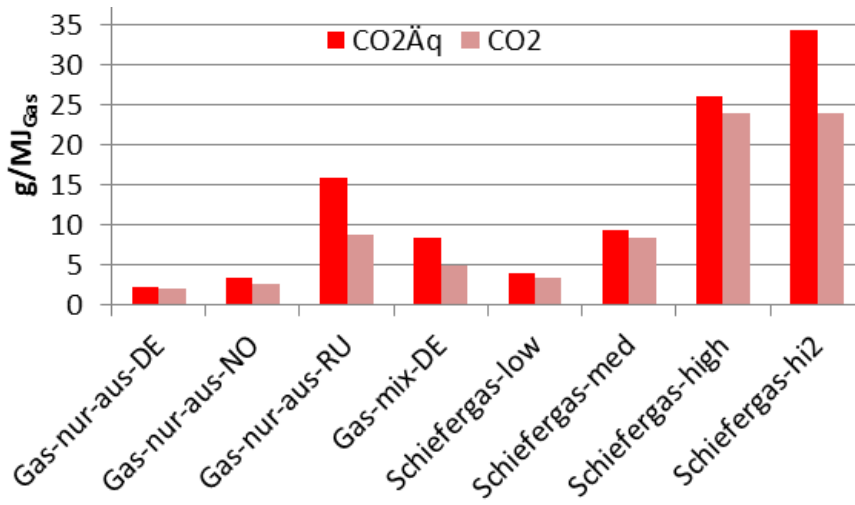
Option [g/kWh Vorkette]	CO _{2eq}	CO ₂	CH ₄
Pipeline\Gas-DE-2019-mix	31,0	18,2	0,42
Pipeline\Gas-DE-2020-mix	32,2	18,8	0,44
Pipeline\Gas-DE-2030-mix	33,7	20,4	0,44
Pipeline\Gas-DE-2019-mix-lokal	31,8	18,3	0,45
Pipeline\Gas-DE-2020-mix-lokal	33,0	18,9	0,46
Pipeline\Gas-DE-2030-mix-lokal	34,5	20,4	0,46
Option [g/kWh Endenergie]	CO _{2eq}	CO ₂	CH ₄
Gas-DE-2019-mix (Endenergie)	233,1	219,5	0,45
Gas-DE-2020-mix (Endenergie)	233,5	220,1	0,44
Gas-DE-2030-mix (Endenergie)	234,9	221,6	0,44
Gas-DE-2019-mix-lokal (Endenergie)	233,1	219,5	0,45
Gas-DE-2020-mix-lokal (Endenergie)	234,3	220,2	0,46
Gas-DE-2030-mix-lokal (Endenergie)	235,7	221,6	0,46

KEV _{ges}	KEV _{NE}	KEV _{RE}
1,120	1,118	0,002
1,124	1,123	0,002
1,135	1,133	0,002
1,120	1,118	0,002
1,125	1,123	0,002
1,136	1,133	0,002
KEV _{ges}	KEV _{NE}	KEV _{RE}
1,120	1,118	0,002
1,124	1,123	0,002
1,135	1,133	0,002
1,120	1,118	0,002
1,125	1,123	0,002
1,136	1,133	0,002

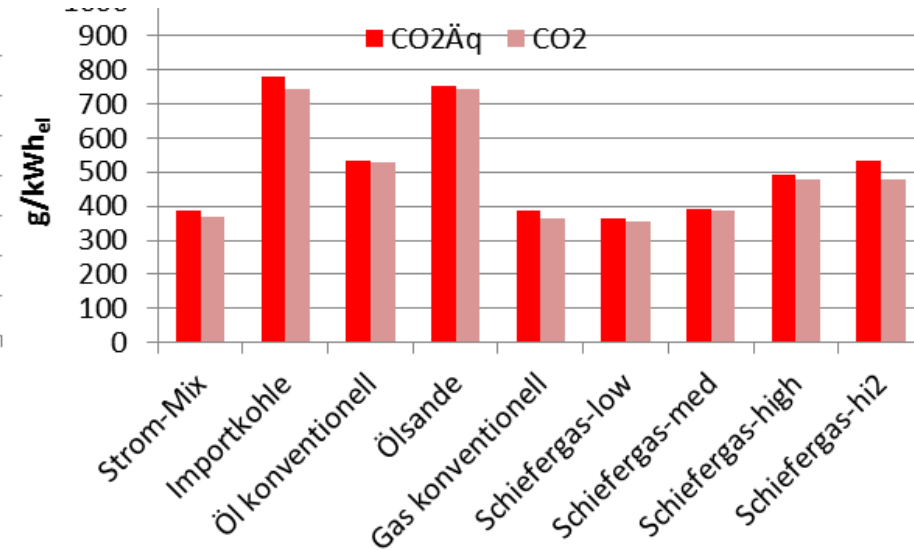
Quelle: GEMIS 5.0, Betrachtungshorizont Deutschland + Ausland, mit GWP₁₀₀ berechnet
Endenergie: Emissionen inkl. Gas-Verbrennung mit 100% Nutzungsgrad (theoretisch!)

Daten für 2030 enthalten (noch) keine Beiträge durch Importe von LNG (u.a. aus US-fracking) und H₂

Klimabilanzen 2020: Gas



bezogen auf bereitgestelltes Gas frei Verbraucher
(ohne Gasverbrennung)



bezogen auf bereitgestellten Strom frei Verbraucher
(mit Gasverbrennung)

Quelle: Modellierung mit GEMIS; hi2 = inkl. CH₄ aus post-production; Daten für GWP₁₀₀ nach IPCC

Überblick zu H₂-Routen

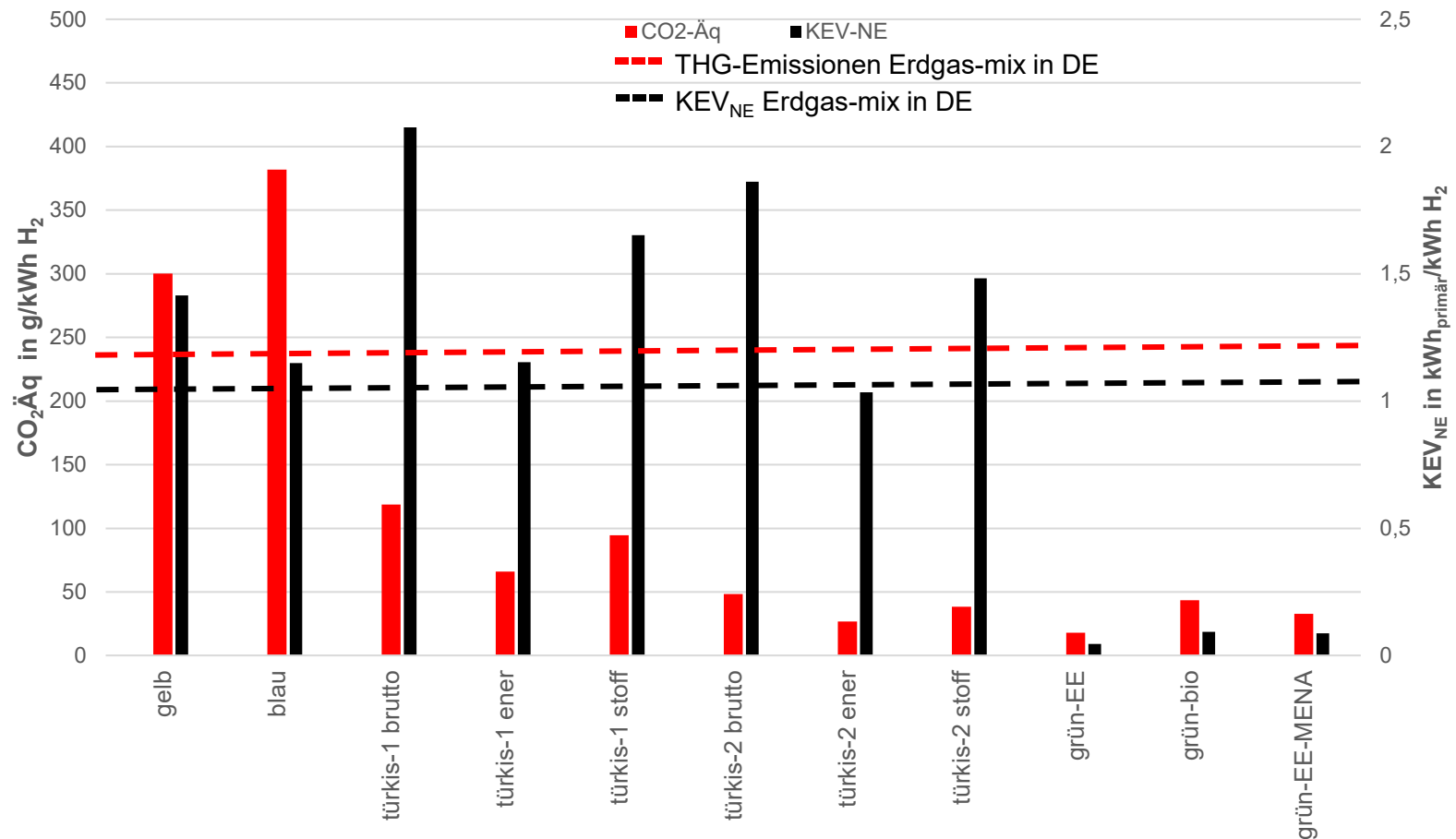
- **grau:** Dampfreformierung von Erdgas in Deutschland (DE), **keine** CO₂-Abscheidung
- **gelb:** Elektrolyse (PEM) in DE mit Strom aus deutschem Erzeugungsmix (Netzbezug)
- **blau:** Dampfreformierung von Erdgas **in Norwegen**, dort auch Abscheidung und geologische Speicherung (CCS), H₂-Transport nach DE über Beimischung zu Erdgas-Pipeline
- **türkis-1:** Pyrolyse Erdgas-Mix in DE mit Strom aus **nationalem Mix**, Bruttobilanz sowie **Allokation** über Energie (Heizwert des festen Kohlenstoffs) bzw. über Masse (Menge des festen Kohlenstoffs)
- **türkis-2:** Pyrolyse Erdgas-Mix in DE mit Strom aus **erneuerbarem Strommix**
- **grün-EE:** Elektrolyse (PEM) in DE mit **Strom aus erneuerbaren Energien** (Mix on- und offshore-Wind sowie PV)
- **grün-Bio:** Dampfreformierung von Synthesegas **aus Biomasse in DE** (Mix Abfall und Reststoffe)
- **grün-EE-MENA:** Elektrolyse (PEM) in der MENA-Region mit **Strom aus erneuerbaren Energien** (Mix Wind- und PV-Strom, lokale Bereitstellung), H₂-Transport nach DE über Beimischung zu Erdgas-Pipeline

KEV-/THG-Bilanzen für H₂-Routen

	Kumulierter Energieverbrauch (KEV) [kWh _{primär} /kWh H ₂]		THG-Emissionen [g/kWh H ₂]	
	KEV _{NE}	KEV _{ges}	CO ₂ Äq	CO ₂
H₂-Route in 2030				
<i>Erdgas-lokal (zum Vergleich), je kWh_{end}</i>	1,07	1,17	228	220
grau (Erdgas DE-mix, SMR)	1,41	1,54	300	291
gelb (PEM mit DE-Strommix)	1,15	2,51	382	367
blau (Erdgas-NO mit SMR + CCS, Gas-Pipeline mit H ₂ , Transport nach DE)	1,48	1,48	53	52
türkis-1 (Pyrolyse), DE-Strommix, Brutto-Bilanz	2,08	2,50	119	105
türkis-1 (Pyrolyse), DE-Strommix, energetische Allokation	1,15	1,39	66	58
türkis-1 (Pyrolyse), DE-Strommix, stoffliche Allokation	1,65	1,99	94	83
türkis-2 (Pyrolyse), DE-EE-Strom, Brutto-Bilanz	1,86	2,31	48	37
türkis-2 (Pyrolyse), DE-EE-Strom, energetische Allokation	1,03	1,29	27	21
türkis-2 (Pyrolyse), DE-EE-Strom, stoffliche Allokation	1,48	1,84	39	29
grün-EE (PEM mit DE-EE-Strom)	0,05	1,47	18	16
grün-bio (biogenes Synthesegas + SMR in DE)	0,09	2,95	43	29
grün-EE-MENA (PEM mit lokalem EE-Strom, Gas-Pipeline für H ₂ -Transport nach DE)	0,09	1,54	33	29

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 5.1; CO₂-Äquivalente für GWP₁₀₀ nach IPCC (2013); KEV_{ges} = gesamter KEV; KEV_{NE} = KEV nicht-erneuerbar; alle Angaben bezogen auf den H₂-Heizwert (H_i); SMR = Dampfreformierung; NO = Norwegen; CCS = carbon capture and storage; DE = Deutschland; EE = Erneuerbare Energien; MENA = Middle East and Northern Africa (Naher Osten und Nordafrika; NO = Norwegen)

KEV/THG-Bilanzen H₂-Routen 2030



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 5.1; alle Angaben bezogen auf H₂-Heizwert (H_i); CO₂-Äquivalente für GWP₁₀₀ nach IPCC (2013); KEV_{NE} = KEV nicht-erneuerbar; EE = Erneuerbare Energien; MENA = Middle East and Northern Africa (Naher Osten und Nordafrika)

Mehr Informationen zu GEMIS

Kostenlos unter

<https://iinas.org/downloads/gemis-downloads/>

(auch ausgewählte Ergebnisdaten als **Excel**)

Ausgewählte GEMIS-**Daten** (per browser):

www.probas.umweltbundesamt.de

Kontakt: uf@iinas.org