

Die Rolle von Wasserstoff in einem zunehmend klimaneutralen Energie- (und Industrie-) System

Online-Fachtagung E-Control

» Wasserstoff – wie wird aus dem Hype ein tatsächlicher Beitrag zur Energiewende «

Dr. Felix Chr. Matthes

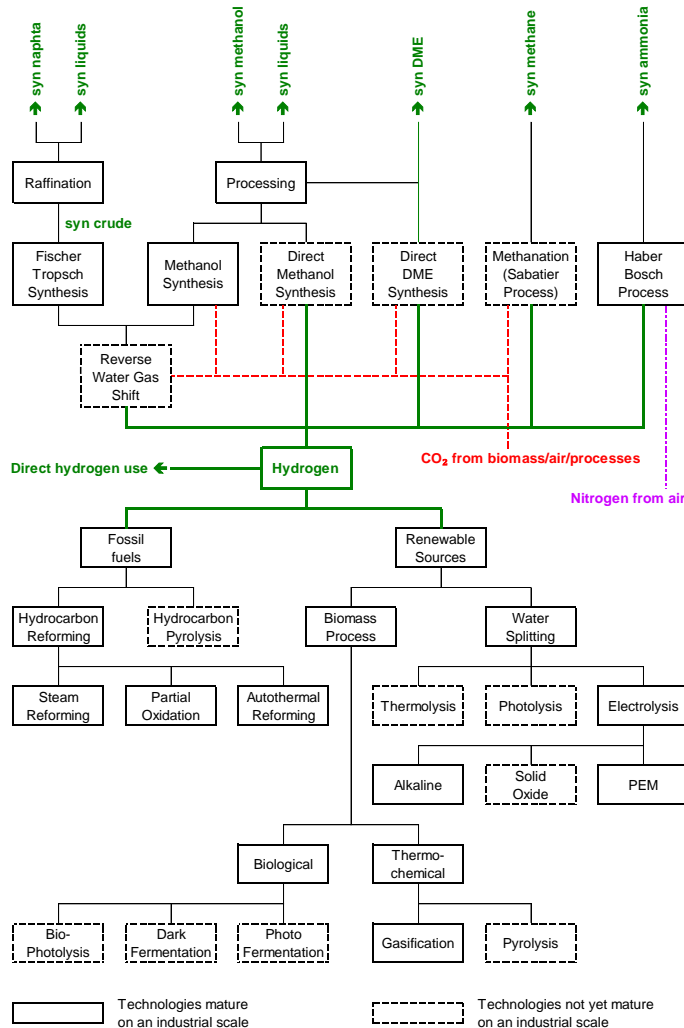
Berlin, 29. April 2021

Wasserstoff in einer klimaneutralen Volkswirtschaft

Warum es im Kern geht

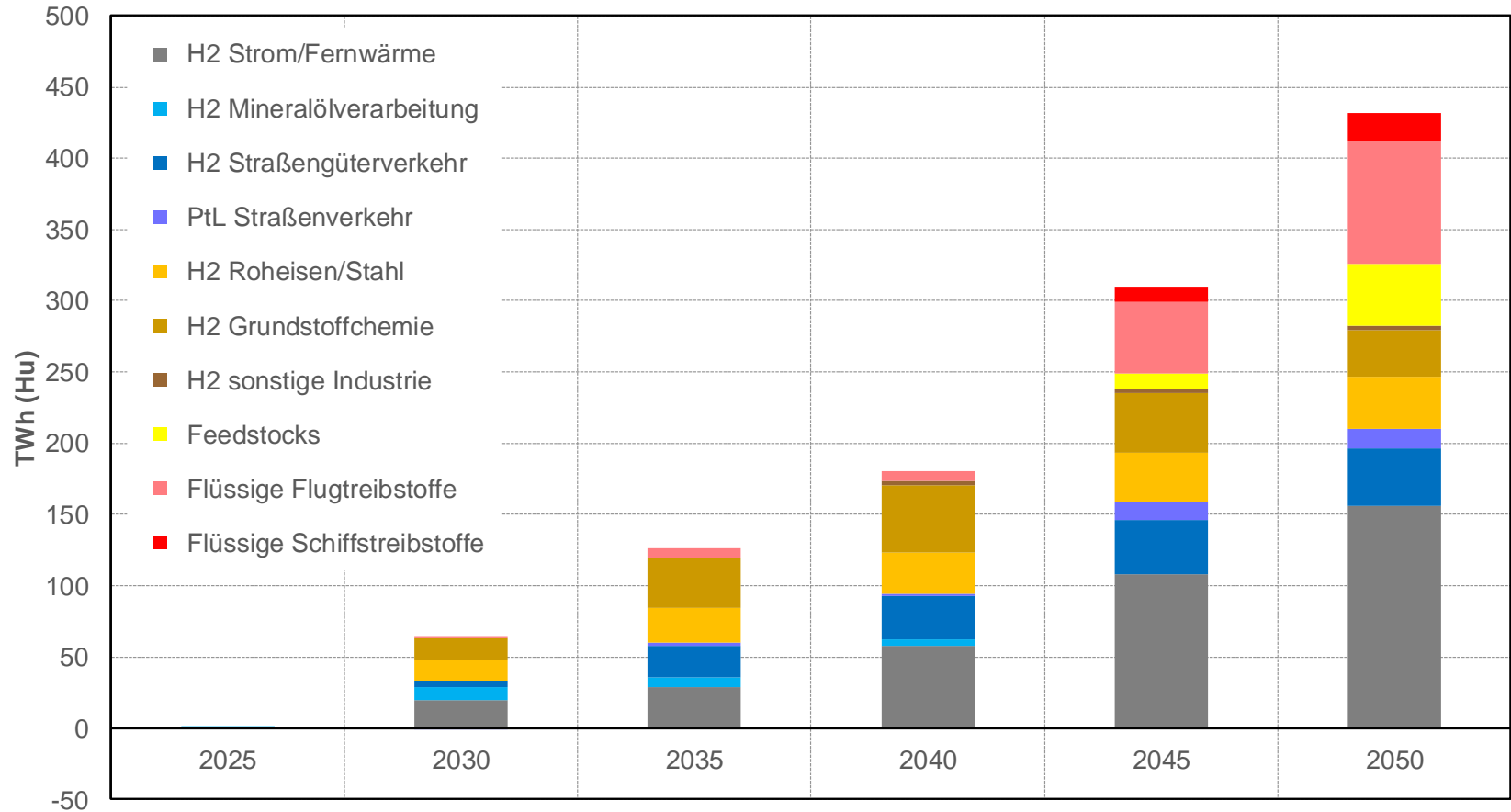
- **Wasserstoff ist die vierte Säule einer klimaneutralen Volkswirtschaft**
 1. Energieeffizienz
 2. Erneuerbare Energien zum Direkteinsatz und zur Stromerzeugung
 3. Elektrifizierung
 4. Wasserstoff und wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe
 5. Sonstiges & negative Emissionen
- **Klimaneutraler Wasserstoff**
 - erfordert große Mengen an grünem Strom
 - kann in begrenzten Menge und Zeiträumen auch (als weitgehend klimaneutraler Wasserstoff) aus Erdgas mit CCS erzeugt werden
 - ist heute sehr teuer und bleibt auch langfristig relativ teuer (erfordert auch perspektivisch hohe CO₂-Preisniveaus für die Kostenparität)
 - wird großteils aus Regionen mit guten Erzeugungsbedingungen importiert werden (müssen), Herausforderung: Transportoptionen

Wasserstoff in einer klimaneutralen Volkswirtschaft Mehr eine Plattform als „nur“ ein Energieträger/Rohstoff



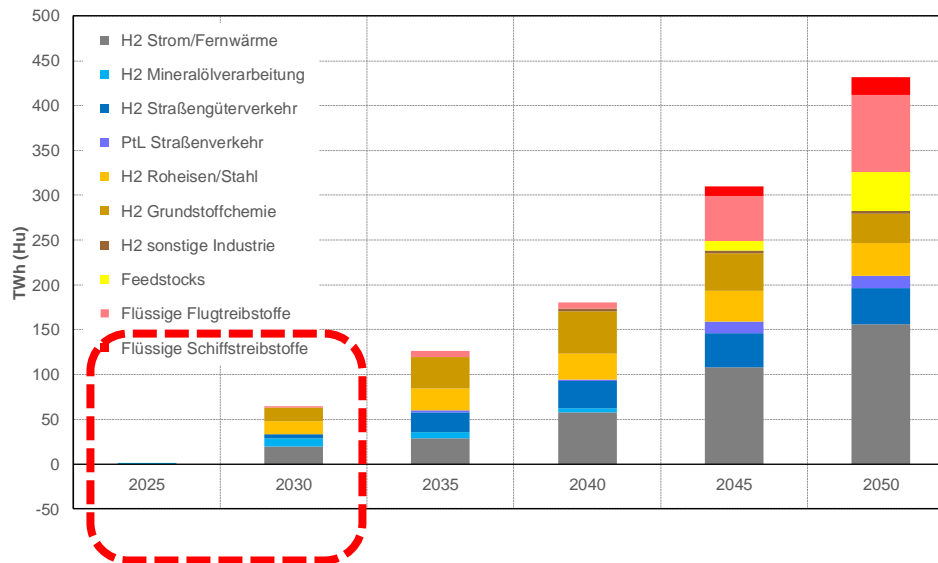
- **vielfältige Herstellungspfade**
 - grau: aus fossilen Energieträgern ohne CCS
 - grün: vollständig aus (zusätzlichen) erneuerbaren Energien (Elektrolyse)
 - blau: aus Erdgas (Dampf-reformierung) + CCS
 - türkis: aus Erdgas (Pyrolyse) (Produkte: H₂ + Kohlenstoff)
 - pink/gelb: aus Kernenergie
- **direkte Nutzung von Wasserstoff**
- **vielfältige Herstellungspfade für wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe**

Wasserstoff & wasserstoffbasierte Energieträger/Rohstoffe Treibhausgasneutrales Deutschland: Mengen & Trajektorien (1)



Wasserstoff & wasserstoffbasierte Energieträger/Rohstoffe Treibhausgasneutrales Deutschland: Mengen & Trajektorien (2)

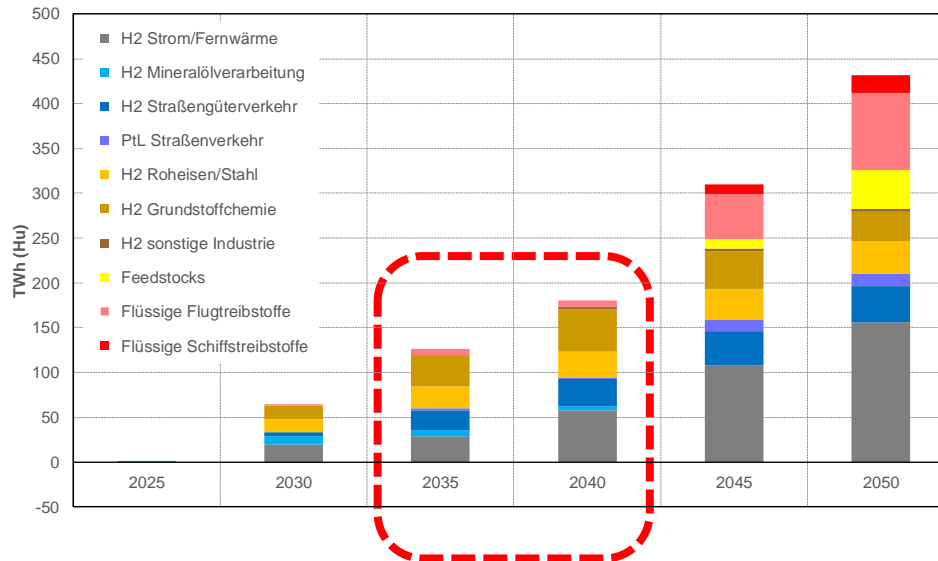
Phase 1 bis 2030
1a (bis 2025): Strukturierung & Initiierung
1b (2025/2030): beginnender Volumenhochlauf
Industrie & Raffinerien



- Strom-/Fernwärme: Integration variabler regenerativer Stromerzeugung (Ausbauzielen von ca. 70% bei mäßig steigendem Stromverbrauch) in Kombination mit Fernwärme (Treiber: Umbau des Stromsystems)
- Industrie: Initialphase eines relativ stetigen Hochlaufs (Treiber: Struktur der Kapitalstöcke, tlw. Vermeidungskosten)
- Raffinerien: Ersatz fossilen Wasserstoffs (Treiber: Vermeidungskosten)
- Verkehr: Markttest und ggf. Anfang des Markthochlaufs für Wasserstoff-Lkw (Schwerlast-Ferngüterverkehr)
- sonst nur Nischenanwendungen
- Infrastrukturkonzeption und Umsetzung von No-regret-Infrastrukturen
- Innovationsvorlauf

Wasserstoff & wasserstoffbasierte Energieträger/Rohstoffe Treibhausgasneutrales Deutschland: Mengen & Trajektorien (3)

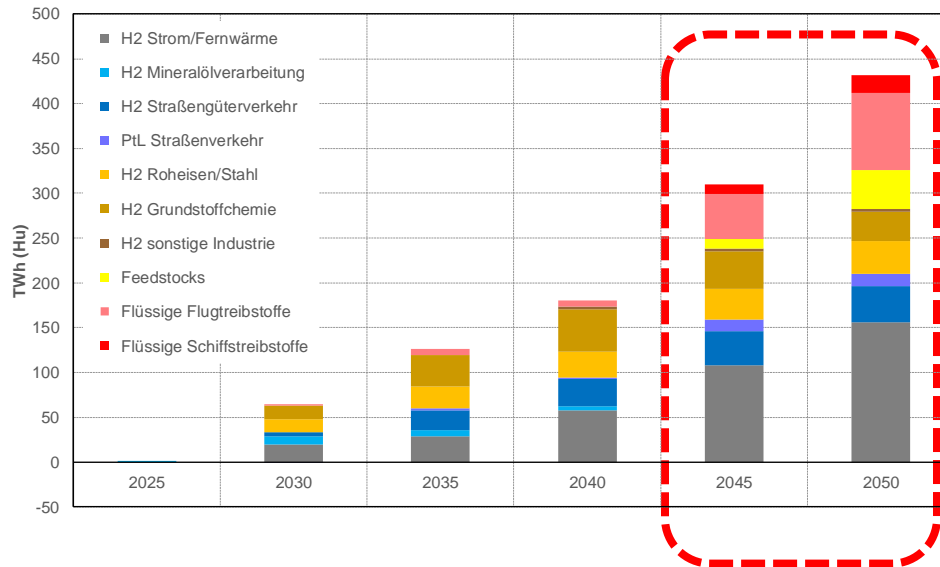
Phase 2 bis 2040 2a (bis 2035): Volumenhochlauf Fernlast-LKW und synthetische Flugtreibstoffe



- Strom-/Fernwärme: Variable regenerative Stromerzeugung (Ausbauziele Richtung 80% bei stark steigendem Stromverbrauch) in Kombination mit Fernwärme (Treiber: Umbau des Stromsystems, grüne Fernwärme)
- Industrie: fortgesetzter stetiger Hochlauf inklusive Sektorausweitung (Treiber: Struktur der Kapitalstöcke, tlw. Vermeidungskosten)
- Raffinerien: abnehmende Bedeutung (Treiber: Produktnachfrage)
- Verkehr: Markthochlauf für Wasserstoff-Lkw (Schwerlast-Ferngüterverkehr) sowie erster PtL-Segmente im Flugverkehr (kritische Phase 2a)
- sonst nur Nischenanwendungen
- Umsetzung längerfristig robuster Infrastrukturen
- Innovationsvorlauf

Wasserstoff & wasserstoffbasierte Energieträger/Rohstoffe Treibhausgasneutrales Deutschland: Mengen & Trajektorien (4)

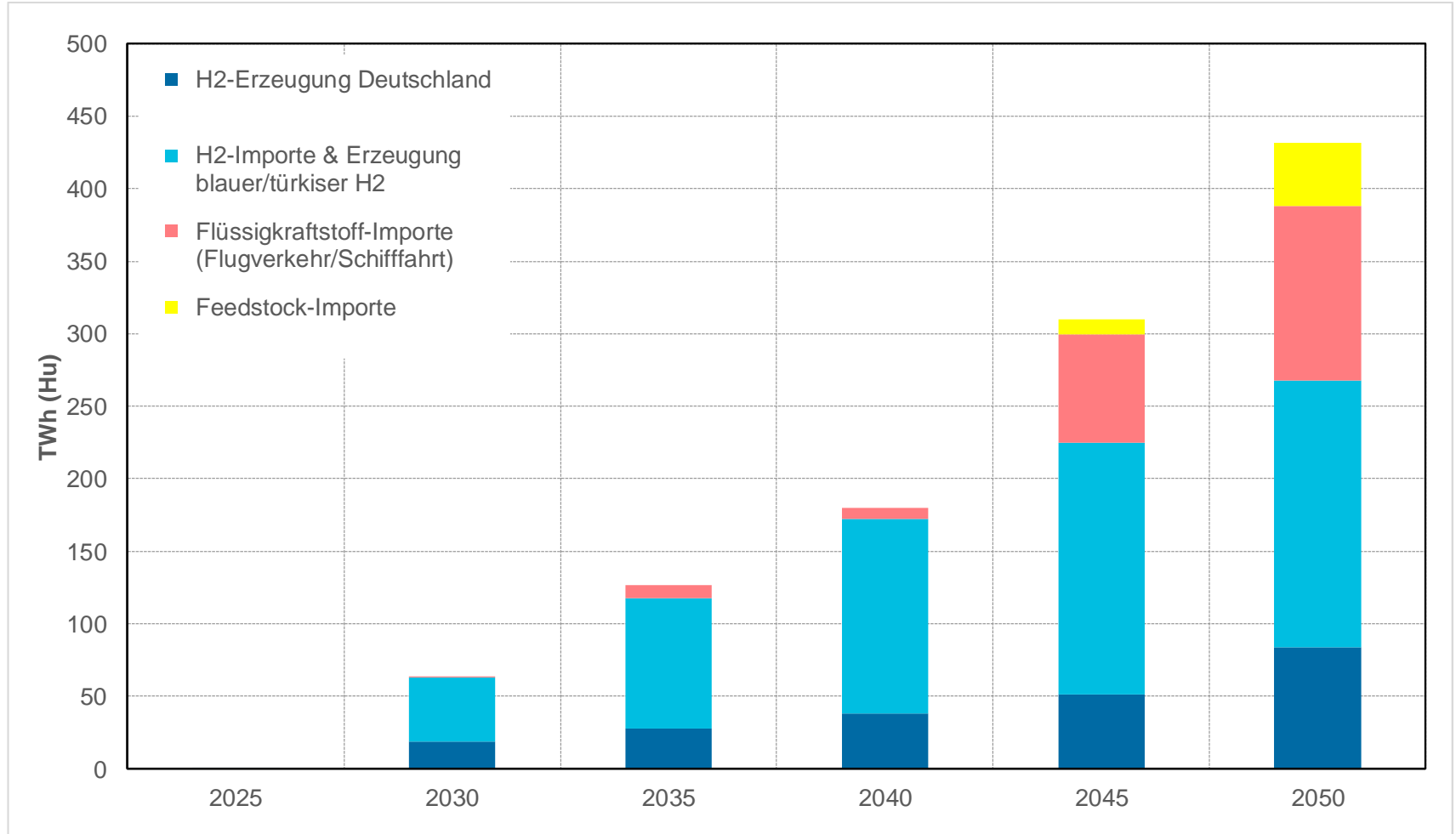
Phase 3 bis 2050
3a (bis 2045): Durchbruch synthetische Flugtreibstoffe, Volumenhochlauf synthetische Schifffahrtstreibstoffe & grünes Naphta
3b (2045/2050): Durchbruch grünes Naphta



- Strom-/Fernwärme: Regenerative Vollversorgung Strom & Fernwärme bei weiterhin stark steigendem Stromverbrauch (Treiber: Umbau des Stromsystems, grüne Fernwärme)
- Industrie: fortgesetzter stetiger Hochlauf, grünes Naphta als neuer großvolumiger Feedstock (kritische Phase 3a, Treiber: Struktur der Kapitalstöcke, Klimaneutralität)
- Verkehr: PtL-Segment im Flugverkehr im Flugverkehr wird dominierend, PtL-Segment in der Schifffahrt entwickelt sich stark (kritische Phase 3a, Treiber: Klimaneutralität)
- sonst nur Nischenanwendungen
- voll entwickelte Infrastrukturen (gasförmig, flüssig)
- Innovationsvorlauf

Wasserstoff & wasserstoffbasierte Energieträger/Rohstoffe

Treibhausgasneutrales Deutschland: Importe (1)



Wasserstoff & wasserstoffbasierte Energieträger/Rohstoffe

Treibhausgasneutrales Deutschland: Importe (2)

Importe und deren Determinanten

- einheimisches Angebot an sehr preisgünstigem regenerativen Strom und guten Auslastungen
- ausländisches und globales Angebot
- Transportkosten



Phase 1

- 1/3 heimischer grüner Wasserstoff
- XX% Importe grünen Wasserstoffs aus näherem europäischen Ausland
- XX% Erzeugung blauer Wasserstoff an Küstenstandorten

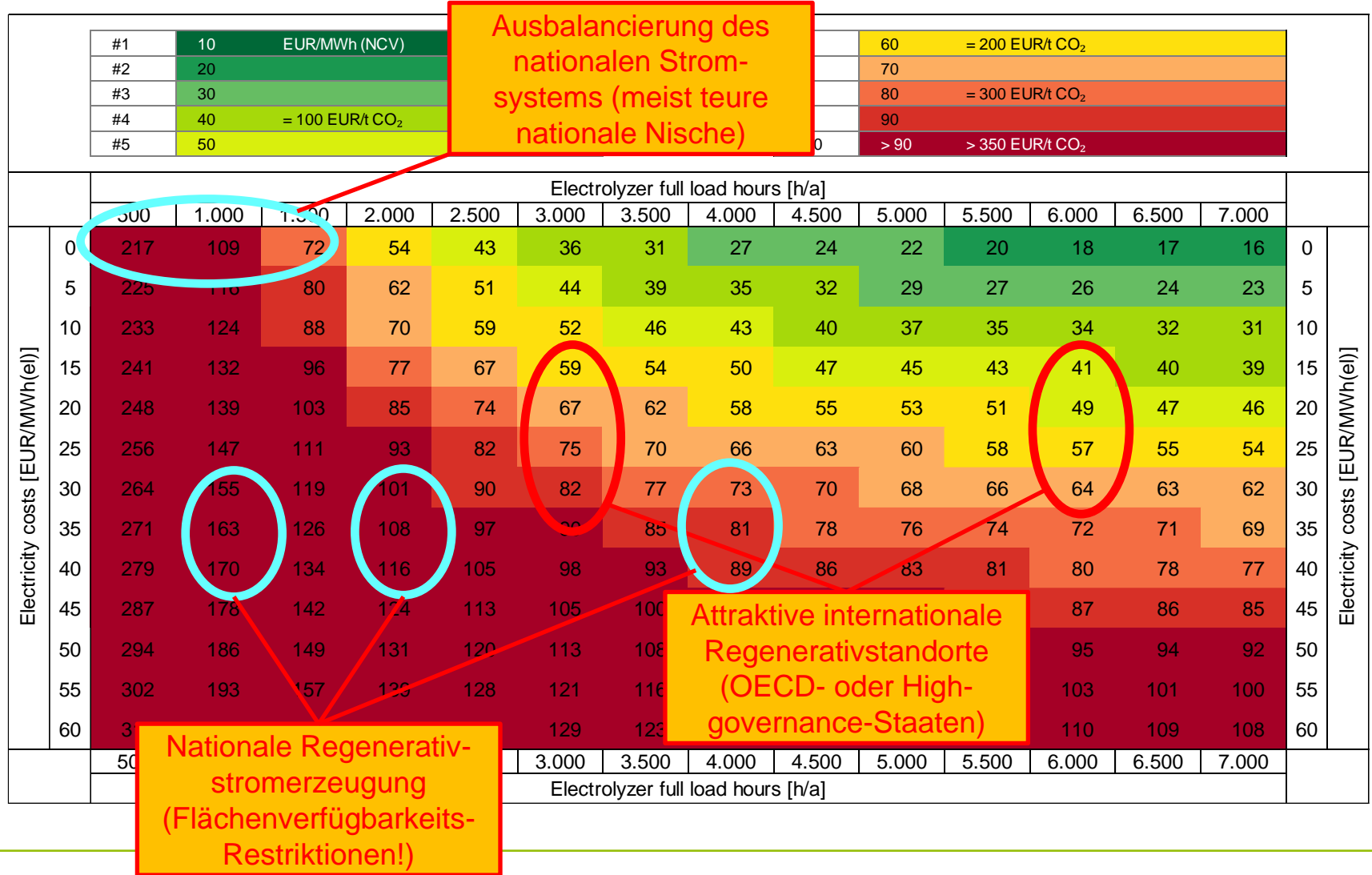
Phase 2

- 1/4...1/5 heimischer grüner Wasserstoff
- XX% Importe grünen Wasserstoffs aus näherem europäischen Ausland
- XX% Importe grünen Wasserstoffs aus MENA-/Nahost
- begrenzter Sockel an blauem/türkisen Wasserstoff
- offene Frage: Wasserstoffimporte aus Russland/GUS

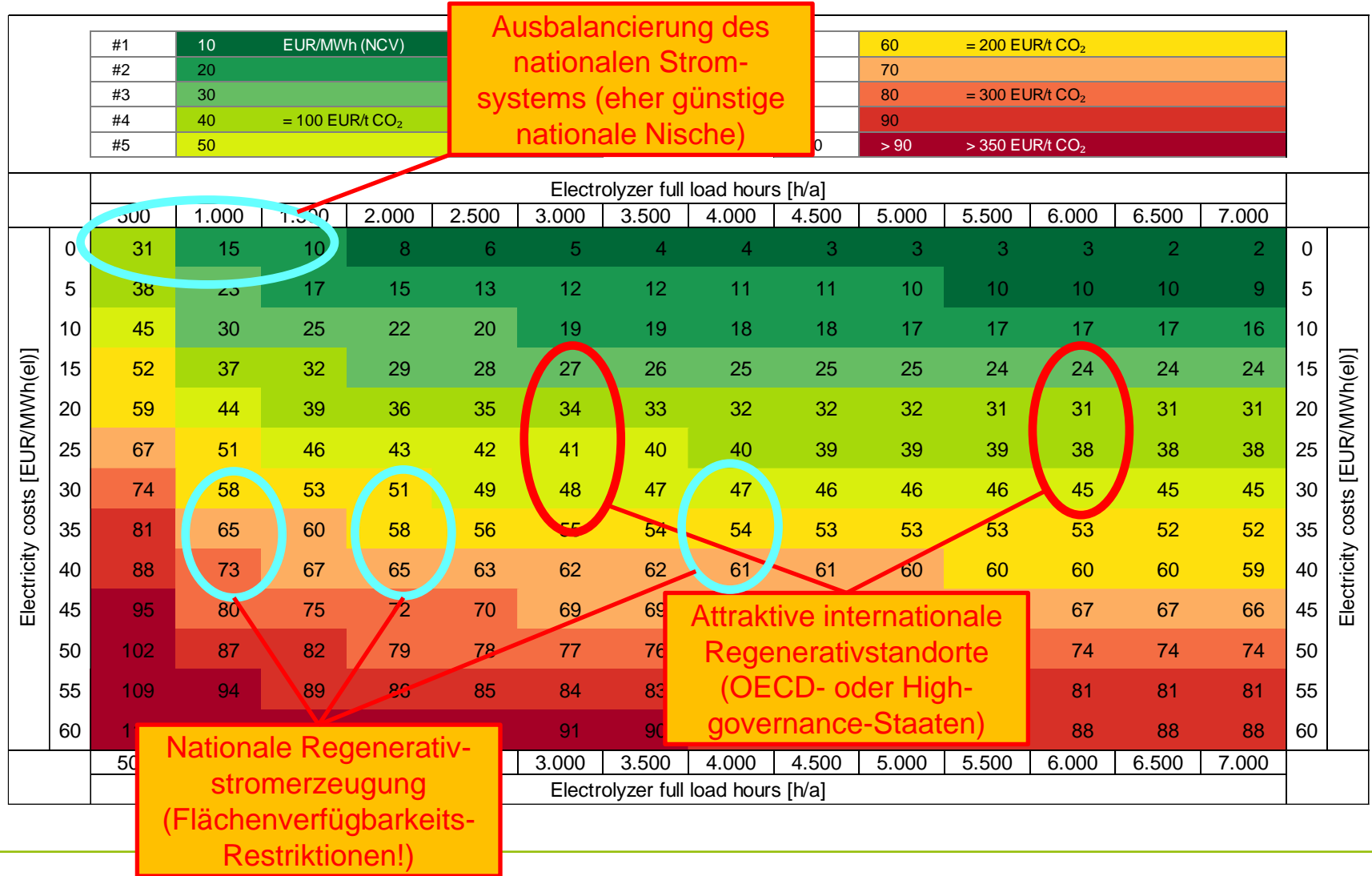
Phase 3

- 1/3...1/5 heimischer grüner Wasserstoff
- globale Importe grünen Wasserstoffs
- globale Importe synthetischer Treibstoffe und Feedstocks

Kosten von grünem Wasserstoff Status Quo (ohne Transportkosten, 5% WACC)



Kosten von grünem Wasserstoff Durchbruch-Szenario (ohne Transportkosten, 5% WACC)



Kosten von grünem Wasserstoff

Durchbruch-Szenario (mit Transportkosten 0.5 €/kg H₂, 5% WACC)

		Electrolyzer full load hours [h/a]															
		500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000	5.500	6.000	6.500	7.000		
Electricity costs [EUR/MWh(EL)]	0	35	25	22	20	19	18	18	17	17	17	17	17	17	16	0	Electricity costs [EUR/MWh(EL)]
	5	42	32	28	27	26	25	25	24	24	24	23	23	23	23	5	
	10	48	38	35	33	32	32	31	31	31	30	30	30	30	30	10	
	15	55	45	42	40	39	38	38	37	37	37	37	37	37	36	15	
	20	62	52	48	47	46	45	45	44	44	44	43	43	43	43	20	
	25	68	58	55	53	52	52	51	51	51	50	50	50	50	50	25	
	30	75	65	62	60	59	58	58	57	57	57	57	57	57	56	30	
	35	82	72	68	67	66	65	65	64	64	64	63	63	63	63	35	
	40	88	78	75	73	72	72	71	71	71	70	70	70	70	70	40	
	45	95	85	82	80	79	78	78	77	77	76	76	76	76	76	45	
	50	102	92	88	87	86	85	85	84	84	83	83	83	83	83	50	
55	108	98	95	93	92	92	91	91	90	90	90	90	90	90	55		
60	115	105	102	100	99	98	98	97	97	96	96	96	96	96	60		
		500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000	5.500	6.000	6.500	7.000		
		Electrolyzer full load hours [h/a]															

#1	10	EUR/MWh (NCV)
#2	20	
#3	30	
#4	40	= 100 EUR/t CO ₂
#5	50	

#6	60	= 200 EUR/t CO ₂
#7	70	
#8	80	= 300 EUR/t CO ₂
#9	90	
#10	> 90	> 350 EUR/t CO ₂

Attraktive internationale
Regenerativstandorte
(OECD- oder High-
governance-Staaten)

Kosten von blauem Wasserstoff

Status quo (ohne Transportkosten, 5% WACC)

		CO ₂ price [€/t]															
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325		
Natural gas costs [EUR/MWh(NCV)]	6	31	32	32	33	34	35	35	36	37	38	38	39	40	41	6	Natural gas costs [EUR/MWh(NCV)]
	8	34	35	35	36	37	38	38	39	40	41	41	42	43	44	8	
	10	37	38	38	39	40	41	41	42	43	43	44	45	46	46	10	
	12	40	40	41	42	43	44	44	45	46	46	47	48	49	49	12	
	14	43	43	44	45	46	47	47	48	49	49	50	51	51	52	14	
	16	45	46	47	48	48	49	50	51	51	52	53	54	54	55	16	
	18	48	49	50	51	51	52	53	54	54	55	56	57	57	58	18	
	20	51	52	53	54	54	55	56	56	57	58	59	59	60	61	20	
	22	54	55	56	56	57	58	59	59	60	61	62	62	63	64	22	
	24	57	58	59	59	60	61	62	62	63	64	64	65	66	67	24	
26	60	61	61	62	63	64	64	65	66	67	67	68	69	70	26		
28	63	64	64	65	66	67	67	68	69	70	70	71	72	73	28		
30	66	67	67	68	69	69	70	71	72	72	73	74	75	75	30		
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325		
		CO ₂ price [€/t]															

#1	10	EUR/MWh (NCV)
#2	20	
#3	30	
#4	40	= 100 EUR/t CO ₂
#5	50	

#6	60	= 200 EUR/t CO ₂
#7	70	
#8	80	= 300 EUR/t CO ₂
#9	90	
#10	> 90	> 350 EUR/t CO ₂

Produktion in Deutschland (z.B. an Küstenstandorten mit Offshore-CCS)

52

Kosten von synthetischen Flüssigkraftstoffen Status quo (ohne Transportkosten, 5% WACC)

		CO ₂ supply costs [€/t]																
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325			
Hydrogen costs [EUR/MWh(NCV)]	30	55	62	68	75	81	88	95	101	108	115	121	128	135	141	30		
	40	68	74	81	88	94	101	108	114	121	128	134	141	148	154	40		
	50	80	87	94	100	107	114	120	127	134	140	147	154	160	167	50		
	60	93	100	107	113	120	127	133	140	147	153	160	167	173	180	60		
	70	106	113	119	126	133	139	146	153	159	166	173	179	186	193	70		
	80	119	126	132	139	146	152	159	166	172	179	186	192	199	206	80		
	90	132	138	145	151	158	164	171	178	185	192	198	205	212	218	90		
	100	145	151	158	164	171	178	185	191	198	205	211	218	225	231	100		
	110	157	164	171	178	185	191	197	204	211	217	224	231	237	244	110		
	120	170	177	184	190	197	204	210	217	224	230	237	243	250	257	120		
	130	183	190	196	203	210	216	223	230	236	243	250	256	263	270	130		
	140	196	203	209	216	223	229	236	242	249	256	262	269	276	282	140		
	150	209	215	222	229	235	242	249	255	262	269	275	282	289	295	150		
			0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325		
			CO ₂ supply costs [€/t]															

Produktion an günstigen globalen Regenerativstandorten (OECD) mit klimaneutralem CO₂

#6	110	= 200 EUR/t CO ₂
#7	120	
#8	130	
#9	140	= 300 EUR/t CO ₂
#10	> 140	> 300 EUR/t CO ₂

#1	60	EUR/MWh (NCV)
#2	70	
#3	80	= 100 EUR/t CO ₂
#4	90	
#5	100	

Kosten von synthetischen Flüssigkraftstoffen Durchbruch-Szenario (mit Transportkosten 2 €/MWh, 5% WACC)

		CO ₂ supply costs [€/t]																
		0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325			
Hydrogen costs [EUR/MWh(NCV)]	30	50	56	63	70	76	83	90	96	103	109	116	123	129	136	30		
	40	62	69	75	82	89	95	102	109	115	122	129	135	142	149	40		
	50	75	81	88	95	101	108	115	121	128	134	141	148	154	161	50		
	60	87	94	100	107	114	120	127	134	140	147	154	160	167	174	60		
	70	100	106	113	120	126	133	140	146	153	159	166	173	179	186	70		
	80	112	119	125	132	139	145	152	159	165	172	179	185	192	199	80		
	90	125	131	138	145	151	158	165	172	179	185	192	198	204	211	90		
	100	137	144	150	157	164	170	177	183	190	196	203	210	217	224	100		
	110	150	156	163	170	176	183	190	196	203	210	217	223	229	236	110		
	120	162	169	175	182	189	195	202	209	216	222	229	235	242	249	120		
	130	175	181	188	195	201	208	215	221	228	234	241	248	254	261	130		
	140	187	194	200	207	214	220	227	234	240	247	254	260	267	274	140		
	150	200	206	213	220	226	233	240	246	253	259	266	273	279	286	150		
			0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325		
			CO ₂ supply costs [€/t]															

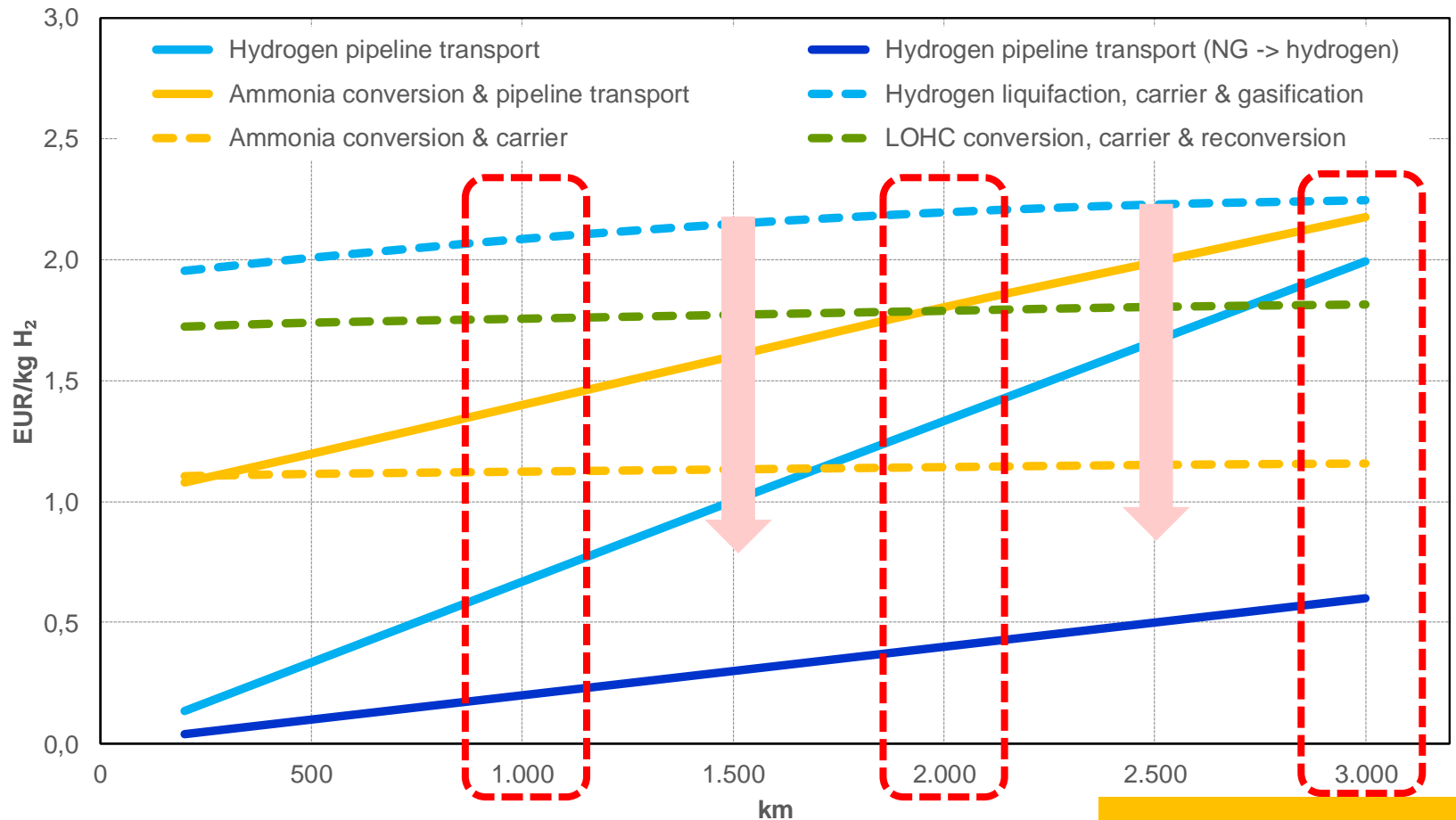
#1	60	EUR/MWh (NCV)
#2	70	
#3	80	= 100 EUR/t CO ₂
#4	90	
#5	100	

#6	110	= 200 EUR/t CO ₂
#7	120	
#8	130	
#9	140	= 300 EUR/t CO ₂
#10	> 140	> 300 EUR/t CO ₂

Produktion an günstigen globalen Regenerativstandorten (OECD) mit klimaneutralem CO₂

Merkposten: Die Kosten von Wasserstoff-Langstreckentransport

Derzeitiger Stand – derzeitige Erwartungen



Hinweis:
1 €/kg ~ 30 €/MWh (H_u)

Auf dem Weg zum Durchbruch-Szenario für Wasserstoff Benchmarks für Kostensenkung & aktuelle Handlungsfelder

- **Die zentralen (Kosten-) Ziele**

- Grünstrom-Einstandskosten frei Elektrolyse ≤ 40 €/MWh
- Elektrolyse-Investkosten von heute ca. 700 €/kW um $\geq 75\%$ senken
- Auslastung der Elektrolyseanlagen von ≥ 4.000 Stunden sichern
- internationale Antransportkosten auf 0,5 €/kg H₂ senken/begrenzen
- fossile Energieträger mit ≥ 150 €/t CO₂ bepreisen

- **Vielfältige Optionen/Notwendigkeiten zur Schließung der (heutigen/ zukünftigen) Wirtschaftlichkeitslücke**



- Betriebskostenentlastung
- Investitionskostenentlastung
- Produktförderung
- Nutzungsverpflichtungen
- CO₂-Bepreisung

Wasserstoff in einer klimaneutralen Volkswirtschaft

Was sind die (aktuellen) Kernkonflikte

- **Notwendigkeit einer aktiven Sektorallokation**
 - unstrittig: Eisen- und Stahl- sowie Chemieindustrie, spezifische Wärmeprozesse in der Industrie, Luftverkehr (SynFuels), internationale Seeschifffahrt (SynFuels), Ausbalancierung des auf variablen erneuerbaren Energien beruhenden Stromsystems
 - einiger Wahrscheinlichkeit: Langstrecken-Schwerlast-Lkw (BSZ & H₂)
 - strittig: Personenkraftwagen/leichte Nutzfahrzeuge (Brennstoffzelle & Wasserstoff bzw. SynFuels), Niedertemperatur-Wärme (Gebäude)
- **Aufwuchs & regulatorischer Rahmen für die (Pipeline-) Infrastruktur**
- **Farbenlehre**
 - unstrittig: die langfristig notwendigen (großen) Mengen sind grün
 - strittig: kann/soll blauer/türkiser Wasserstoff in den nächsten zwei Dekaden eine Rolle spielen
- **Nachhaltigkeit von Wasserstoffimporten jenseits der Bewertungsdimension Klimaneutralität**

Zum Nachlesen

- **Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland.**
 Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.

- **Öko-Institut (2020): Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Energieträger und Rohstoffe. Eine Überblicksuntersuchung.**
 Studie gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit



Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr. Felix Chr. Matthes
Energy & Climate Division
Büro Berlin
Borkumstraße 2
D-13189 Berlin
f.matthes@oeko.de
www.oeko.de
twitter.com/FelixMatthes

