

Europa-Universität Flensburg

ZÜGig voran

Mit Hydrails zur Energiewende im Schienenpersonennahverkehr?

Ein Modellprojekt für die Einführung regenerativen Wasserstoffs als
Kraftstoff im Schienenpersonennahverkehr Norddeutschlands

Abschlusspräsentation zur Master-Thesis von Sören Nissen (Matrikel-Nr. 548380)

Energie- und Umweltmanagement (M. Eng.)

Flensburg, 05.03.2019

Agenda

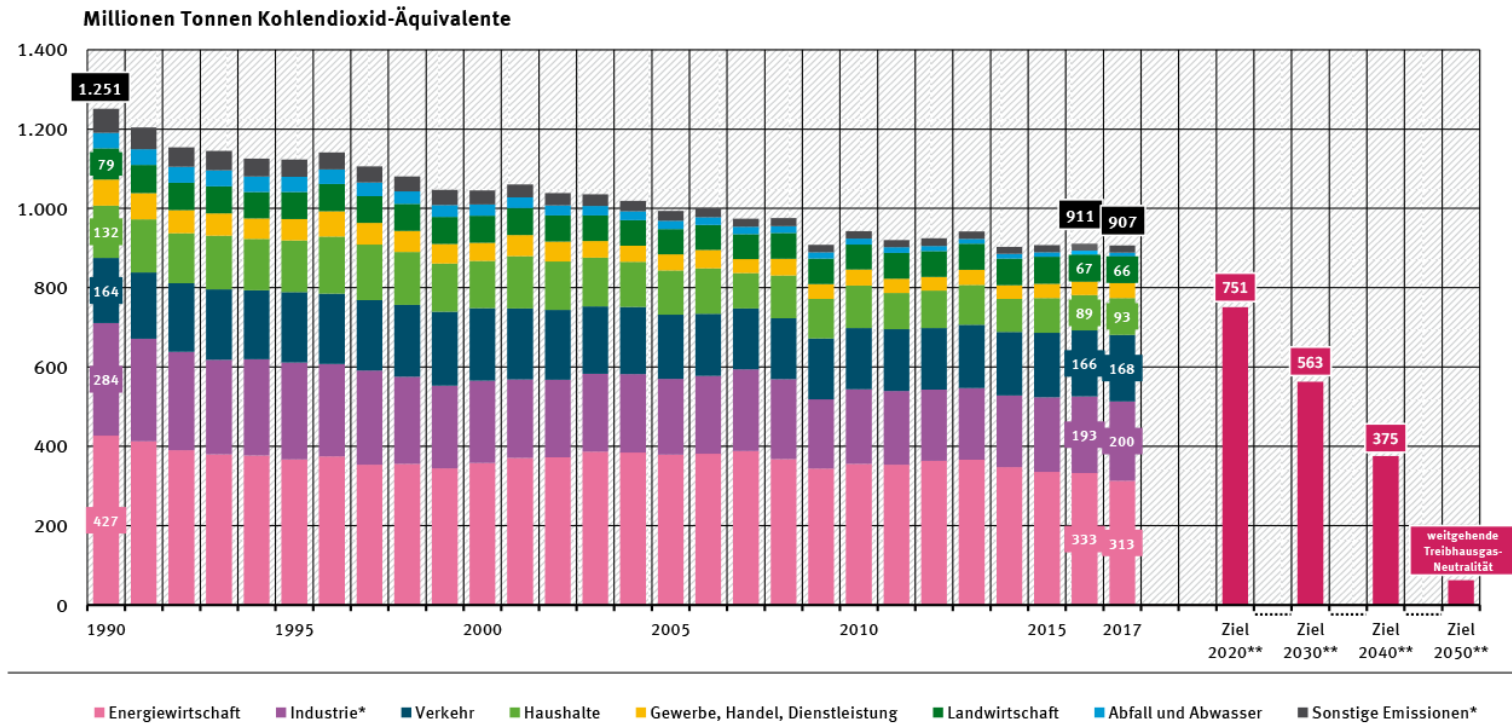
1. Ausgangssituation und Problembeschreibung
2. Regenerativer Wasserstoff als Energieträger
3. Wasserstoff im Schienenverkehr: Status Quo
4. Modellprojekt: ZÜGig voran
5. Ergebnisse der Projektarbeitspakete
6. Fazit

1. Ausgangssituation und Problembeschreibung

- Wachsender Anteil erneuerbarer Energien (EE) an der Energieversorgung in Deutschland...
 - 2017: 36 % des Bruttostromverbrauchs, Wärme 13,2 % & und Verkehr 5,2 %
 - Ziele: bis 2030 65 % an der Stromversorgung
bis 2050 weitgehende Emissionsfreiheit
- ...stellt den Energiesektor vor neue Herausforderungen
 - Netzausbau schreitet nur schleppend voran
 - Entschädigungszahlungen i.H.v. 610 Millionen EUR an EE-Anlagenbetreiber für nicht produzierten Strom aufgrund fehlender Netzkapazitäten

1.1 Historie und Ziele der THG-Emissionen

Emission der von der UN-Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase



Emissionen nach Kategorien der UN-Berichterstattung ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

* Industrie: Energie- und prozessbedingte Emissionen der Industrie (1.A.2 & 2);

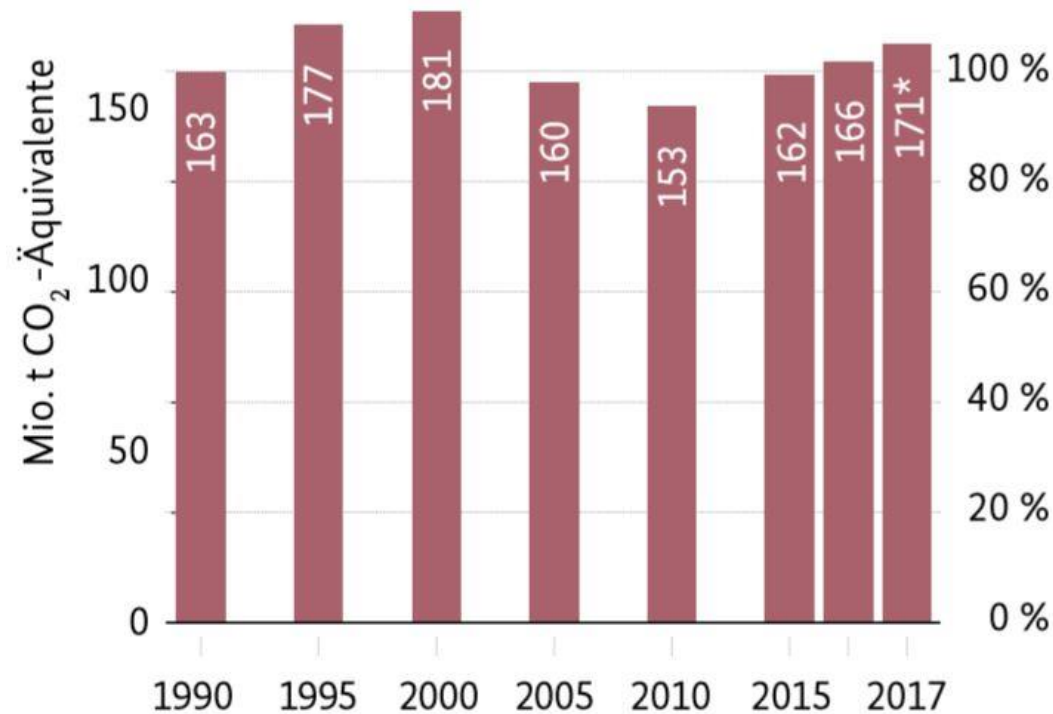
Sonstige Emissionen: Sonstige Feuerungen (CRF 1.A.4 Restposten, 1.A.5 Militär) & Diffuse Emissionen aus Brennstoffen (1.8)

** Ziele 2020 bis 2050: Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Inventarberichte zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 bis 2017 (Stand 01/2019)

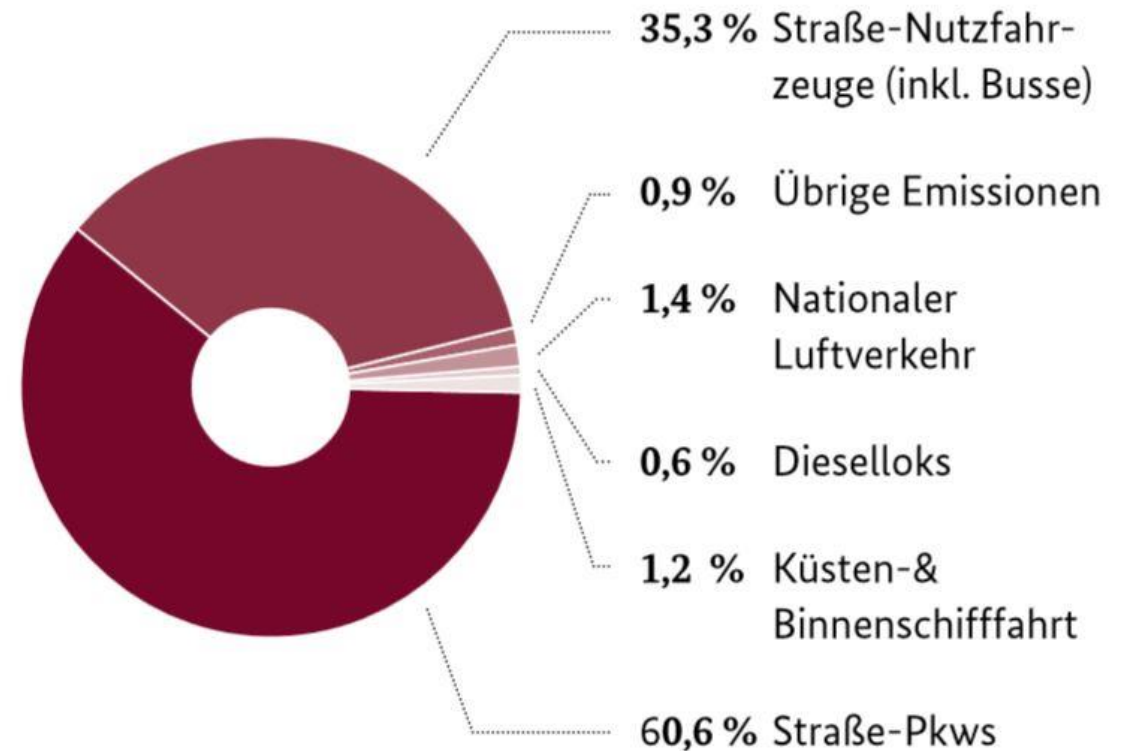
Quelle: Umweltbundesamt, 2018, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/klimaschutzziele-deutschlands>

1.2 THG-Emissionen im Verkehrssektor



* Schätzung

Quelle: UBA (2018a); Schätzung 2017
basierend auf Pressemitteilung 09/2018



Quelle: UBA (2018a)

Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2018, S. 39

1.3 Elektrifizierung des Schienenverkehrs

- Auf Bundesebene ca. 60 % der Bahnstrecken elektrifiziert
- In Schleswig-Holstein lediglich 30 %
 - „Die Elektrifizierung des Schienenverkehrs passt gut für das Energiewendeland Schleswig-Holstein“ (von Kalben, et al., 2017, S. 7)
- Elektrifizierung umfasst nicht nur Oberleitungsbau, sondern auch alternative innovative Antriebe
 - OL-Bau auf regionalen Bahnstrecken häufig unrentabel oder nicht gewollt
 - Wasserstoffbrennstoffzellenantriebe in Triebzügen für den SPNV eine vielversprechende Alternative

1.4 Hydrails für den SPNV

- Weltweit erster Wasserstoffbrennstoffzellenzug (Hydrail) des Herstellers Alstom in Niedersachsen im Einsatz
- Keine operationellen Einschränkungen gegenüber konventionellen Dieseltriebzügen zu erwarten
 - Dank vergleichbarer Reichweiten und Tankzeiten
 - Wesentlicher Vorteil gegenüber batterieelektrischen Antrieben
- Mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff direkte Kopplung zu den erneuerbaren Energien möglich
- Forschungsfrage: Wie lässt sich regenerativer Wasserstoff in den SPNV integrieren?

2. Regenerativer Wasserstoff als Energieträger

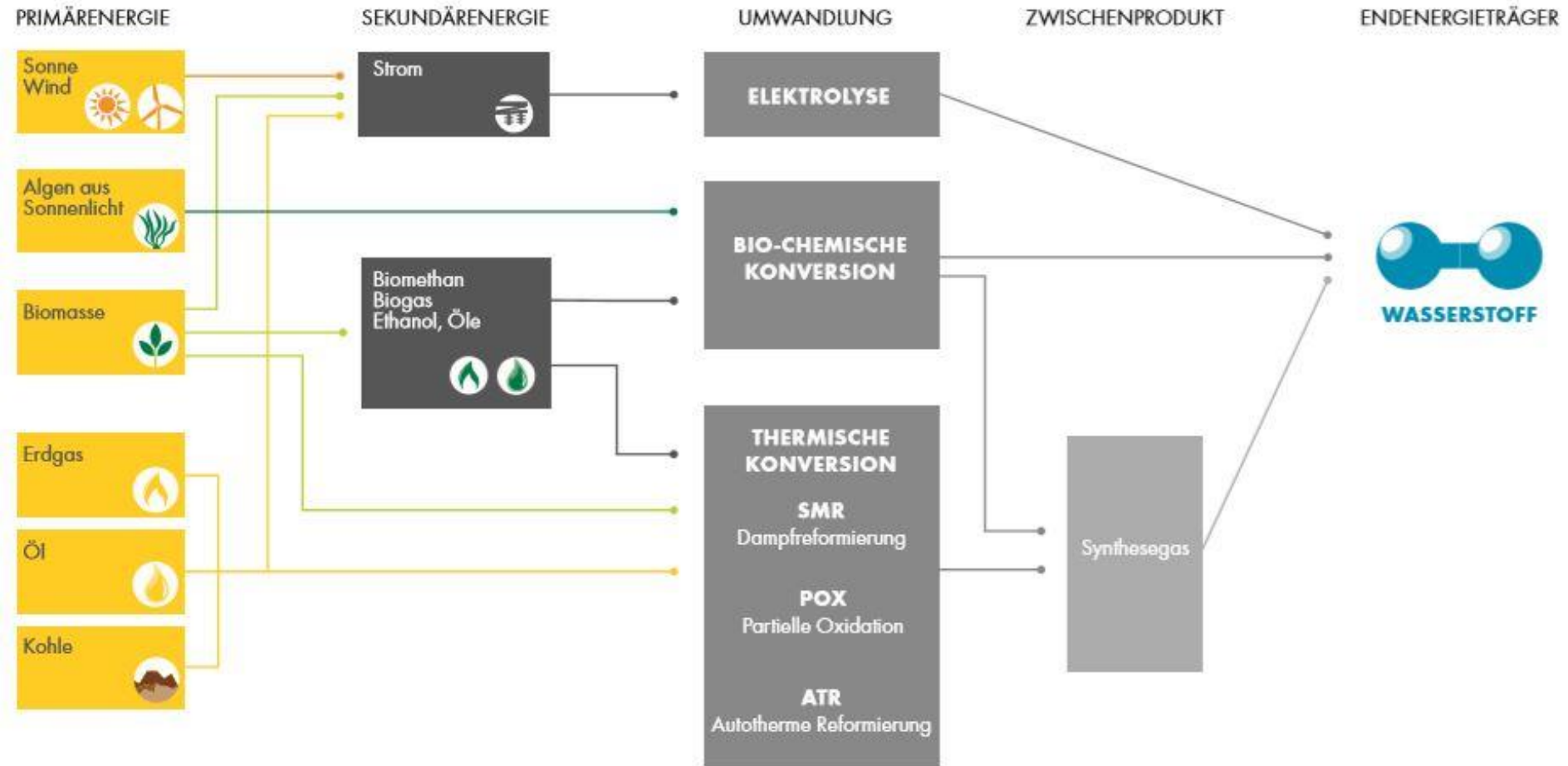
- Wasserstoff (H₂) ist:
 - Ein Universalenergieträger
 - Weder toxisch noch umweltschädlich
 - Wesentlich leichter als Luft
 - Mit einer hohen gravimetrischen und niedrigen volumetrischen Energiedichte ausgestattet
 - Das Element mit der höchsten Diffusionsfähigkeit
 - Als Gefahrstoff klassifiziert, allerdings nicht gefährlicher oder weniger gefährlich als andere Brennstoffe

2.1 Datentabelle für Wasserstoff

Kategorie	Wert I	Einheit (Wert I)	Wert II	Einheit (Wert II)
unterer Heizwert	3,000	kWh/Nm ³	10,800	MJ/Nm ³
	2,359	kWh/l _{LH2}	8,495	MJ/l _{LH2}
	33,330	kWh/kg	120,000	MJ/kg
oberer Heizwert	3,540	kWh/Nm ³	12,750	MJ/Nm ³
	2,790	kWh/l _{LH2}	10,040	MJ/l _{LH2}
	39,410	kWh/kg	141,860	MJ/kg
Dichte	0,0899	kg/Nm ³	70,790	kg/m ³ _{LH2}
Siedepunkt (bei p ₀ = 1 bar)	20,390	K		
Explosionsgrenze in Luft			4,0 - 77,0	Vol.-%
Detonationsgrenze in Luft			18,3 - 59,0	Vol.-%
Diffusionskoeffizient	0,610	cm ² /s		

Quelle: Linde Gas GmbH, 2013, https://www.linde-gas.at/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110_tcm550-169419.pdf

2.2 Wasserstoffherstellung



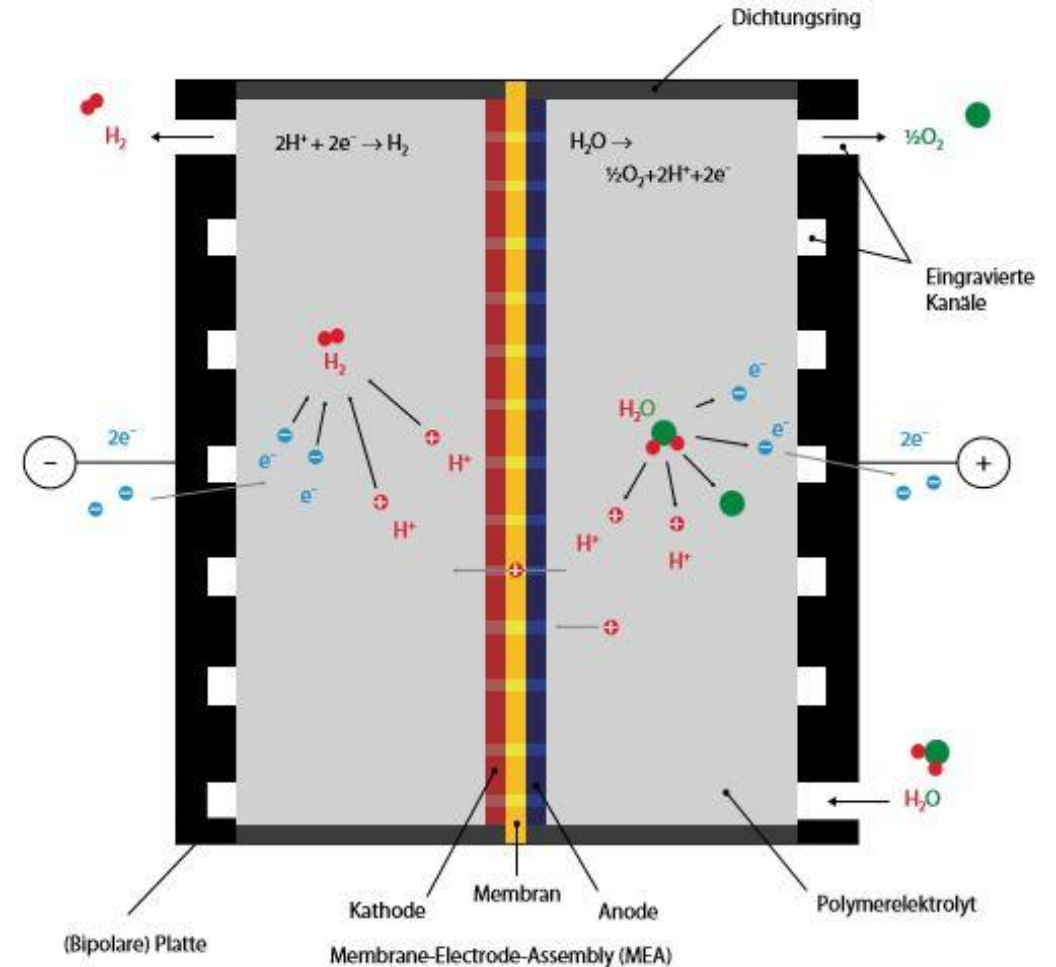
Quelle: Adolf, et al., 2017, S. 12

2.3 Wasserelektrolyse

- Anteil bei lediglich ca. 5 % des weltweiten H₂-Bedarfs
- Erneuerbare Energien noch mit einer untergeordneten Rolle
- Wasser wird durch Zufuhr elektrischer Energie aufgespalten:
 - $H_2O_{(l)} + \Delta H_R \rightarrow H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)}$
- Gegenwärtig relevante Elektrolyseverfahren
 - Alkalische Elektrolyse
 - PEM-Elektrolyse
 - Hochtemperaturelektrolyse

2.4 PEM-Elektrolyse

- Vielversprechendste Technologie für die Kopplung mit EE
 - Gute Teillastfähigkeit und schnelle Systemantwort
- Großes Kostenreduktionspotential
 - Zukünftige Wasserstoffgestehungskosten im Bereich von 2-4 EUR/kg_{H2} möglich



Quelle: Sterner & Stadler, 2014, S. 324

2.5 Energetische Anwendung im Verkehr

- Druckgasspeicherung in Druckgasbehältern gegenwärtig von größter Bedeutung hinsichtlich Speicherung und Transport
- Transport per LKW-Trailer mit bis zu 1.000 kg am weitesten verbreitet
- Verteilung über Wasserstofftankstellen
- Fahrzeugseitige energetische Umwandlung mittels „kalter Verbrennung“ in PEM-Brennstoffzellen
- Busse und PKW bereits in Serienfertigung
- Erste Einsätze leichter Schienenfahrzeuge für regionalen SPNV

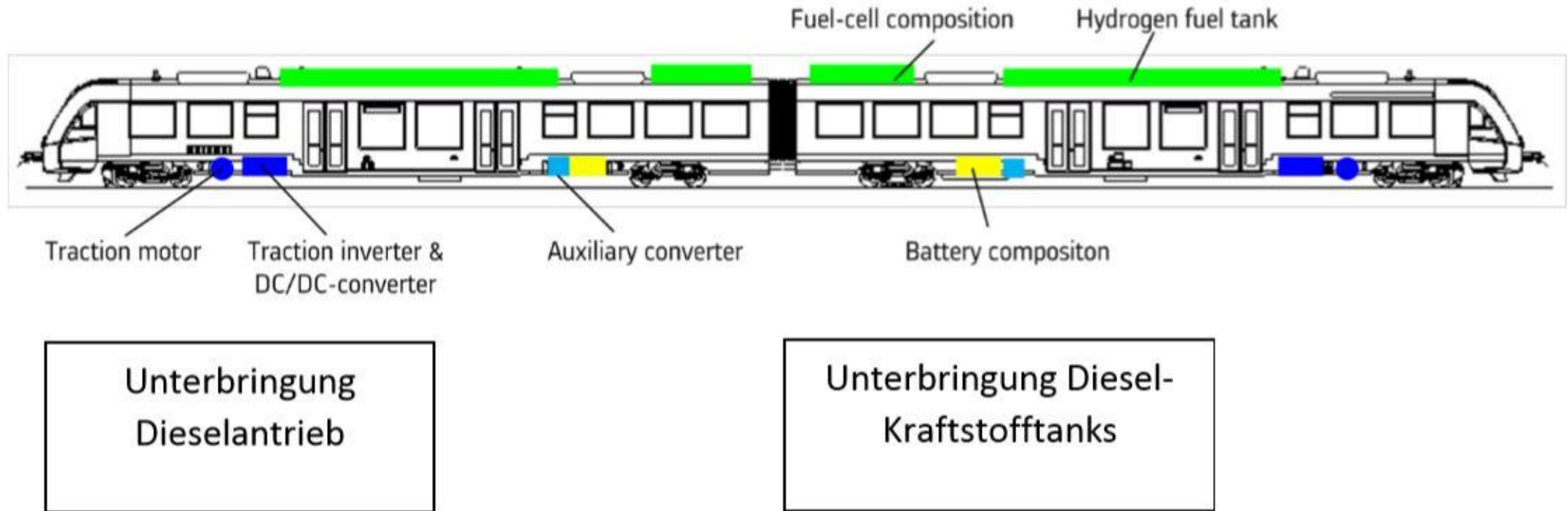
2.6 Perspektive für regenerativen Wasserstoff

- Größter Konkurrent ist und bleibt auf absehbare Zeit die Erdgasdampfreformierung
- Wasserelektrolyse in Verbindung mit EE wird deutlich an Bedeutung gewinnen
 - Windenergie mit dem größten Zukunftspotential
 - PEM-Elektrolyse mit Windstrom kann wettbewerbsfähig werden
- Wasserstoffkosten frei Tankstelle von 3-4 EUR/kg_{H2} möglich
- Chance der ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit in Verbindung mit der Notwendigkeit des Einsatzes unter ökologischen Aspekten

3. Wasserstoff im Schienenverkehr: Status Quo

- Erste Einsätze von Wasserstoffbrennstoffzellenzügen in Deutschland
 - iLINT vom französischen Fahrzeughersteller Alstom
 - Mit 180 kg_{H2} bei 350 bar Reichweiten bis 750 km erreichbar
 - Hoher Antriebswirkungsgrad mit 45 % (Verbrauch: 0,23-0,34 kg_{H2}/km)
 - Vergleichbare Tankzeiten von ca. 20 Min. pro Zug
- Neben Niedersachsen planen weitere Bundesländer wie Hessen, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein den Einsatz von Hydrails
- Einbindung regenerativen Wasserstoffs kann durch Befreiung staatlich induzierter Strompreisbestandteile und Vergabekriterien bei Ausschreibungen gefördert werden

3.1 iLINT



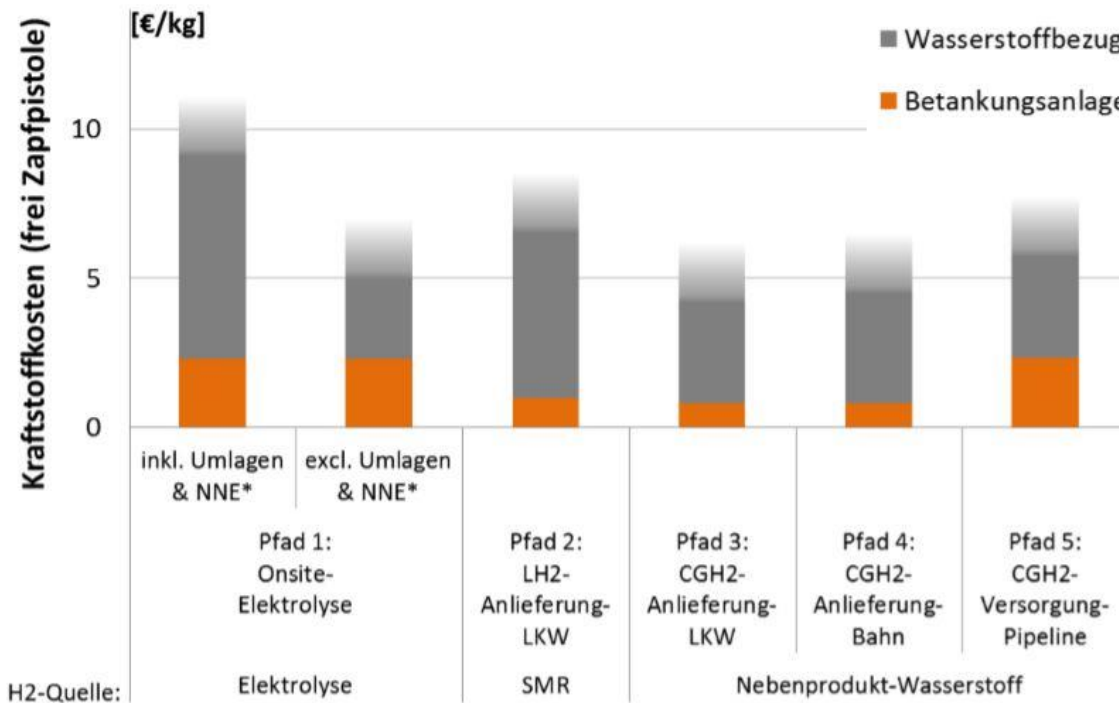
Quelle: NOW GmbH, 2016, S. 98

3.2 Vergleich der Bereitstellungspfade

Kraftstoffkosten

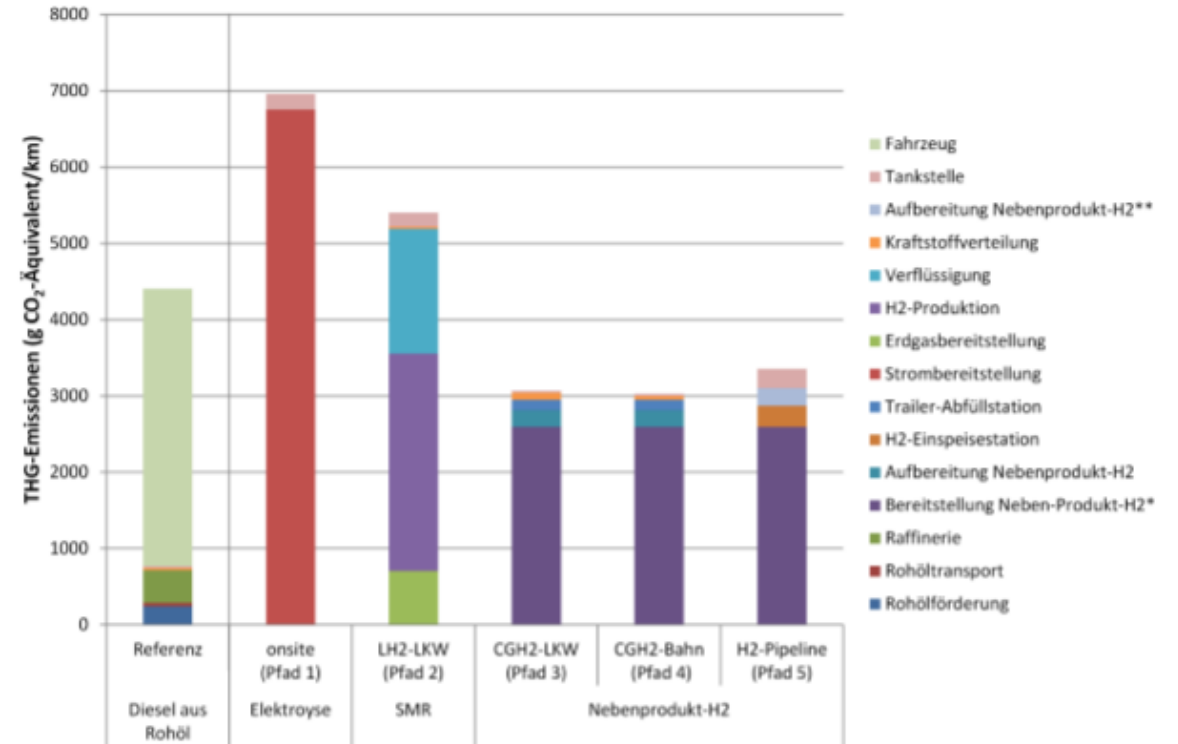
vs.

THG-Emissionen



*Für Elektrolysestrom: (anteilige) EEG-Umlage, sonstige Umlagen und Netznutzungsentgelte (NNE); jeweils ohne Stromsteuer

Quelle: NOW GmbH, 2016, S. 66



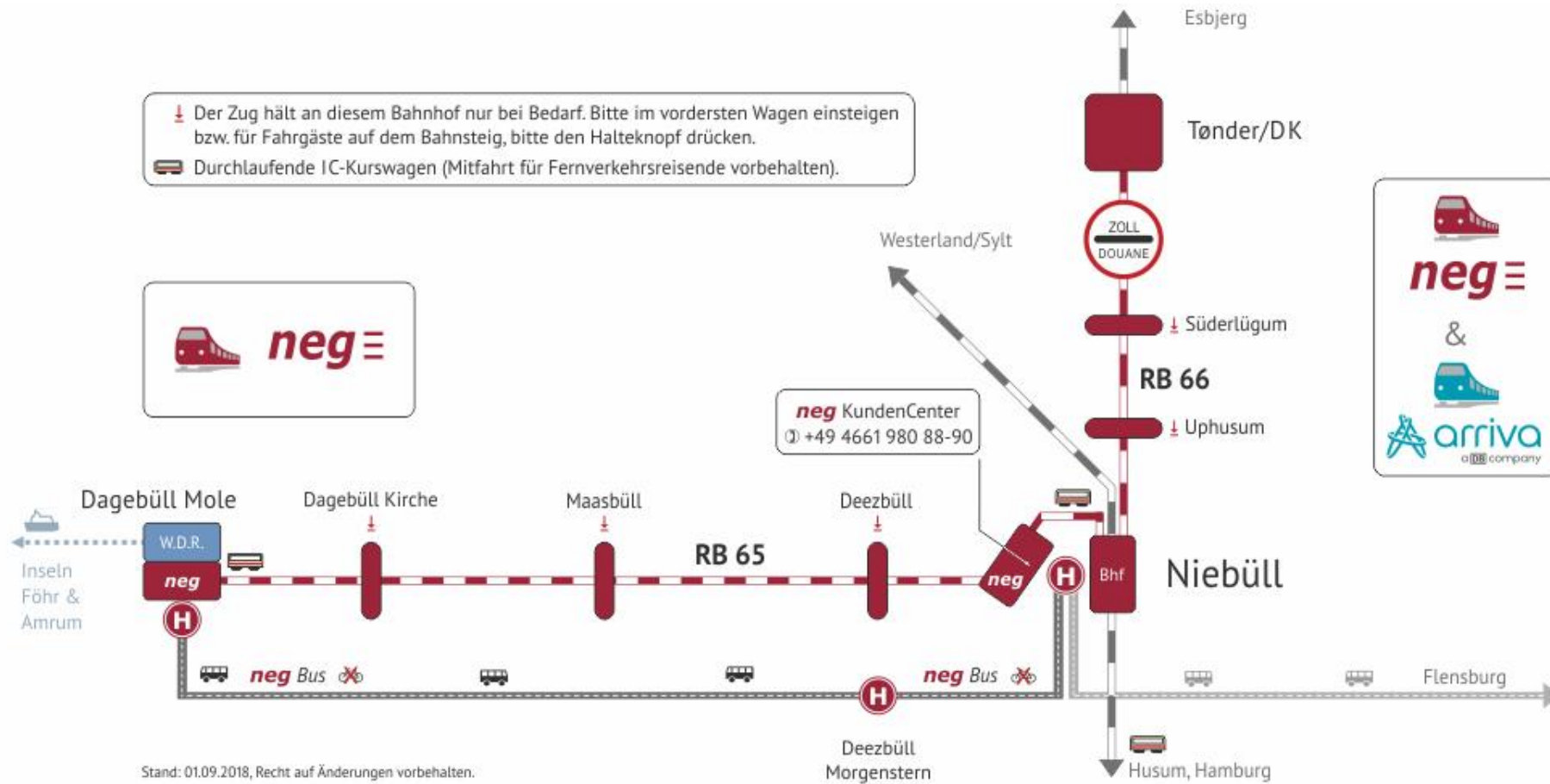
*Bestehende Nutzung von Nebenprodukt H₂ wird durch Erdgas ersetzt; **H₂-Aufbereitung vor Ort an der Tankstelle

Quelle: NOW GmbH, 2016, S. 71

4. Modellprojekt: ZÜGig voran

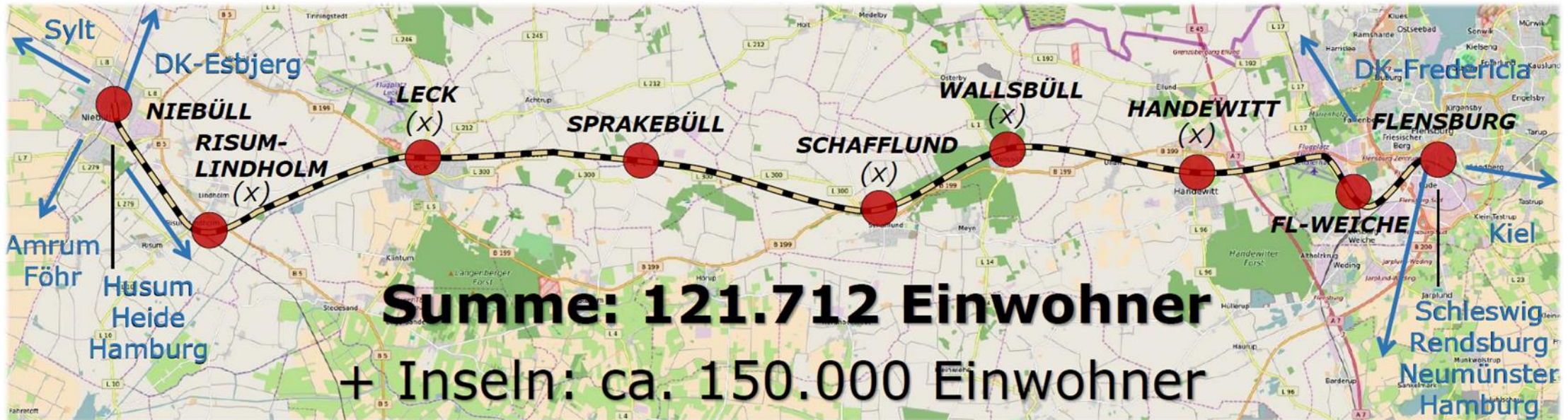
- Vergleich BAU vs. alternativem Betrieb mit iLINTs auf den betrachteten Strecken
 1. Energieverbrauchsrechnung und Energieeffizienzvergleich
 2. Vergleich der THG-Emissionen „Well-to-Wheel“
 3. Kostenvergleichsrechnung unter Betrachtung verschiedener Szenarien
 4. Vorplanungen zur Realisierung des Modellprojektes
- Ausschließlicher Einsatz regenerativen Wasserstoffs
 - GP Joule als Wasserstofflieferant
 - Druckgasspeicherung für Transport und Verteilung über Tankstellen

4.1 Betrachtete Strecken (1/2)



Quelle: neg Niebüll GmbH, 2018, <https://www.neg-niebuell.de/index.php/fahrplaene/streckennetz>

4.1 Betrachtete Strecken (2/2)



Quelle: Dewald-Kehrer, Präsentation, 2016, <https://www.neg-niebuell.de/index.php/infrastruktur/infrastruktur-projekte/bahn-niebuell-flensburg>

4.2 Business as Usual

	Niebüll – Dagebüll	Niebüll – Tondern	Niebüll – Flensburg
Liniennummer	RB 65	RB 66	RB 67
Triebwagen	VT 71A/B BR 629 VT505/506 BR 629 T4 BR 5047	LINT 41 BR 648	LINT 54 BR 622 LINT 54 BR 622 LINT 54 BR 622
Kurswagen	i.d.R. 2 Eurofirma-Wagen zzgl. 1 Heizwagen		
Streckenlänge	13,791 km	13,054 km	43,817 km
Fahrtzeit	19 Min.	13,5 Min.	41 Min.
Umläufe p.a.	ca. 3700 ohne Kurswagen ca. 800 mit Kurswagen	ca. 3400	ca. 5800

5. Ergebnisse der Projektarbeitspakete

- Szenario-Betrachtung
 - Grundszenarien 2021, 2026 und 2031 und Szenario-Kombinationen
- Energieverbrauchsrechnung
 - Modellierung mit Hilfe von DYNAMIS
- Vergleich der THG-Emissionen
 - „Well-to-Wheel“-Analyse und Monetarisierung der potentiell einzusparenden Emissionen
- Kostenvergleichsrechnung
 - Annahme gleicher Einnahmen aus Fahrgastbetrieb und Sensitivitätsanalysen
- Vorplanungen zur Projektrealisierung
 - Erstellung einer Roadmap

5.1 Energieverbrauchsrechnung (1/2)

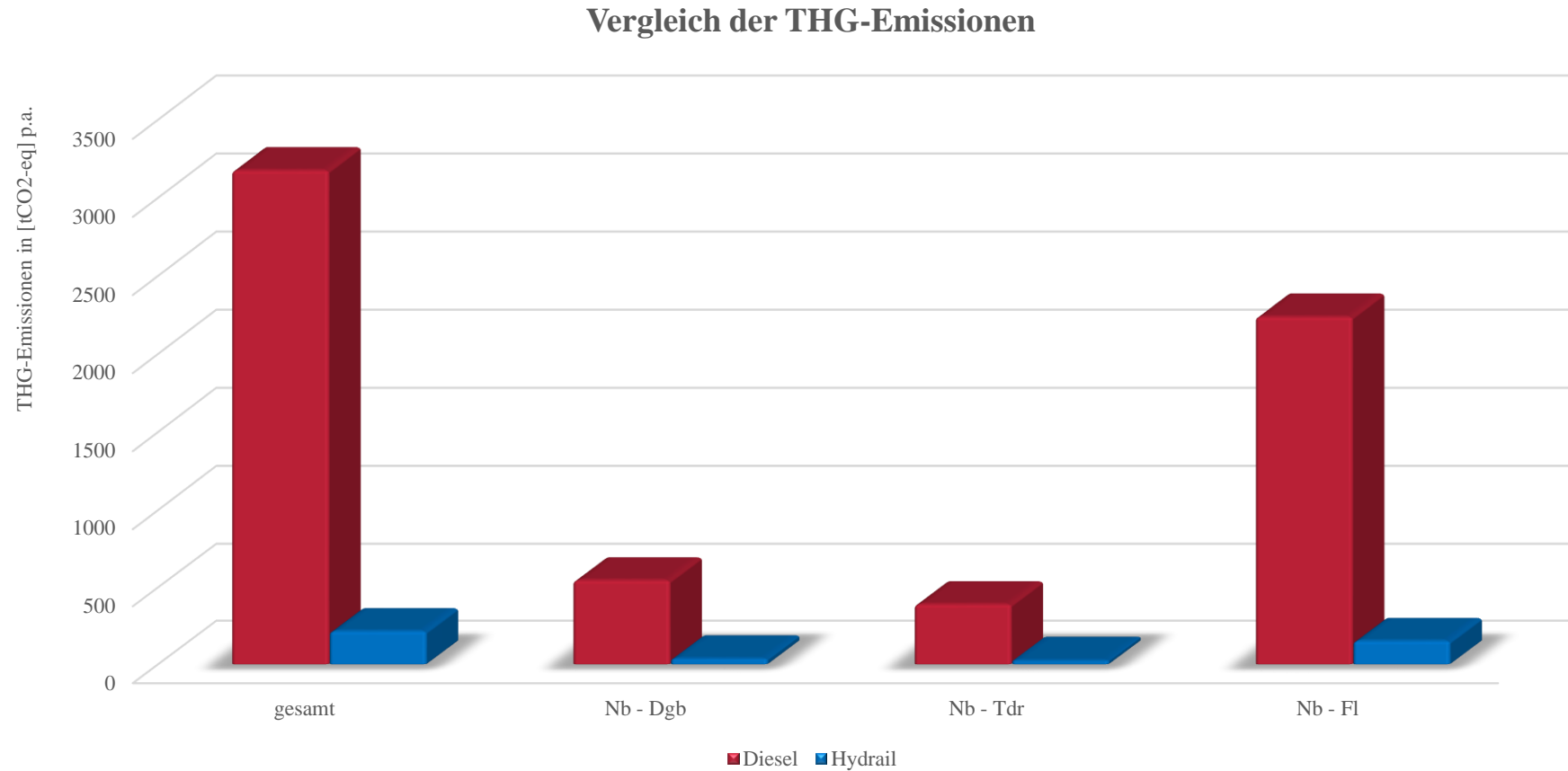
Nr.	Strecke / Umläufe	Business as Usual		Betrieb mit Hydrails		Energieersparnis	
		Diesel	EV	H ₂	EV	absolut	relativ
		[l/km]	[kWh]	[kg/km]	[kWh]	[kWh]	[%]
1a	Niebüll – Dagebüll	1,39	192	0,267	123	68,8	35,9
	Dagebüll – Niebüll	1,36	188	0,263	121	67,0	35,7
	3700 Umläufe p.a.	1,37	1.400 × 10³	0,265	901 × 10³	502 × 10³	35,8
1b	Niebüll – Dagebüll	2,98	411	0,577	265	146	35,5
	Dagebüll – Niebüll	2,87	396	0,555	255	141	35,6
	800 Umläufe p.a.	2,93	647 × 10³	0,567	417 × 10³	230 × 10³	35,5
2	Niebüll – Tondern	1,03	135	0,290	126,22	8,47	6,29
	Tondern – Niebüll	0,997	130	0,279	121,33	8,88	6,82
	3.400 Umläufe p.a.	1,01	901 × 10³	0,284	842 × 10³	59,0 × 10³	6,55
3	Niebüll – Flensburg	1,31	572	0,292	426	146	25,5
	Flensburg – Niebüll	1,20	527	0,268	391,56	135	25,7
	5.800 Umläufe p.a.	1,26	6.380 × 10³	0,280	4.740 × 10³	1.950 × 10³	25,6
	Gesamt		9.330 × 10³		6.900 × 10³	2.420 × 10³	26,0

5.1 Energieverbrauchsrechnung (2/2)

- Täglicher Wasserstoffbedarf etwa 635 kg
 - Niebüll – Flensburg 400 kg
 - Niebüll – Dagebüll 136 kg
 - Niebüll – Tondern 71 kg
- Angenommene Effizienzsteigerungen: 8 % ab 2026 und 12 % ab 2031

	Szenario 1: 2021		Szenario 2: 2026		Szenario 3: 2031	
	Verbrauch [t _{H2}]	Ersparnis [%]	Verbrauch [t _{H2}]	Ersparnis [%]	Verbrauch [t _{H2}]	Ersparnis [%]
Niebüll – Dagebüll	39,5 t _{H2}	35,7 %	36,4 t _{H2}	40,9 %	34,8 t _{H2}	43,4 %
Niebüll – Tondern	25,3 t _{H2}	6,55 %	23,2 t _{H2}	14,0 %	22,2 t _{H2}	17,8 %
Niebüll – Flensburg	142 t _{H2}	25,6 %	131 t _{H2}	31,6 %	125 t _{H2}	34,6 %
Gesamt	207 t _{H2}	26,0 %	190 t _{H2}	31,9 %	182 t _{H2}	34,9 %

5.2 Vergleich der THG-Emissionen (1/2)

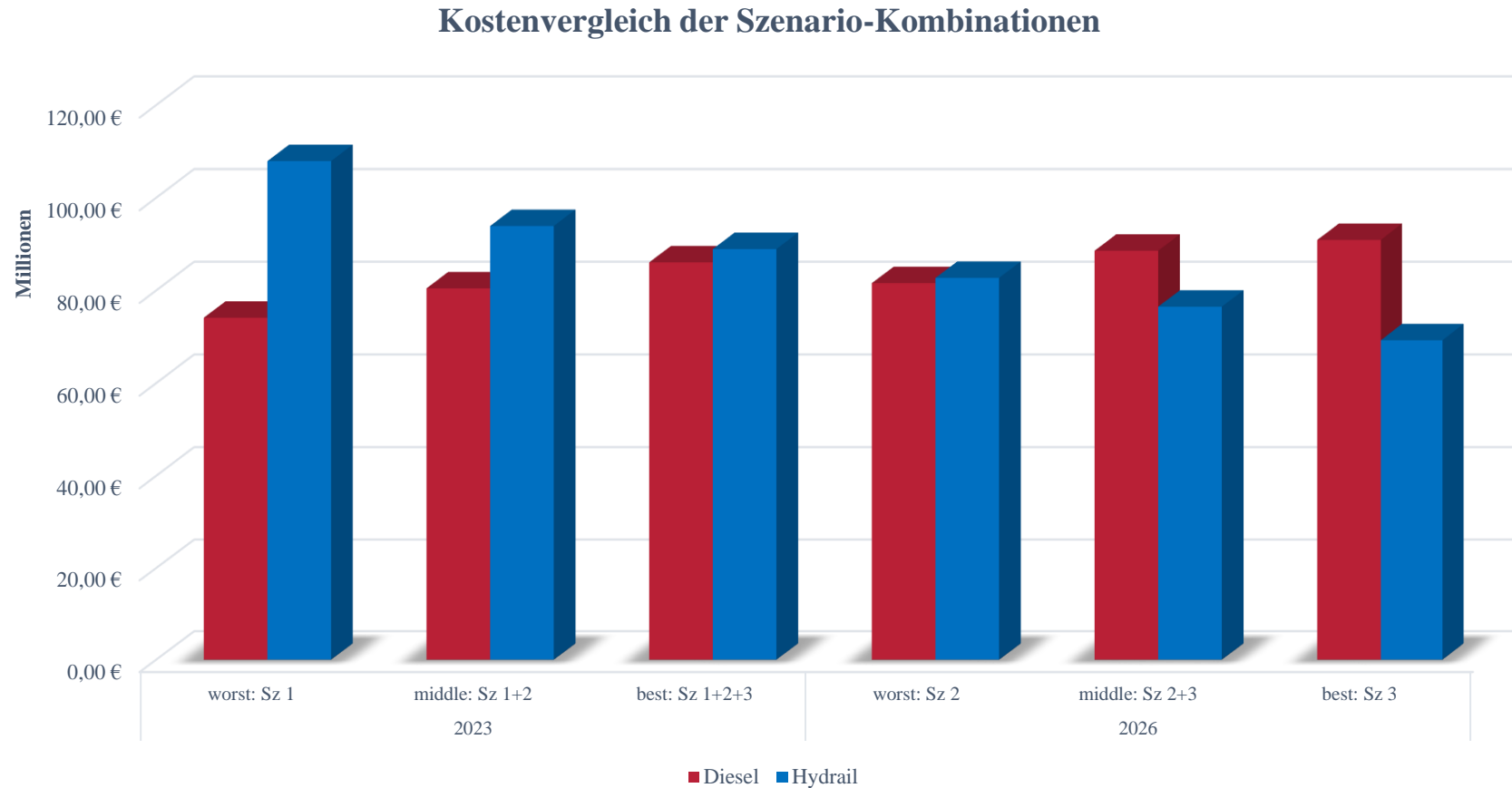


5.2 Vergleich der THG-Emissionen (2/2)

- Einsparpotential bei ca. 93 %
 - Strecke Niebüll – Flensburg weist absolut das höchste Einsparpotential auf
- Monetarisierung der Emissionseinsparungen:

	CO₂-Preis [EUR/t _{CO2-eq}]	Wert der CO_{2eq}-Ersparnisse [EUR]	pot. Subvention [EUR/kg _{H2}]
Szenario 1: 2021	10 EUR/t _{CO2-eq}	29.596,55 EUR	0,14 EUR/kg _{H2}
Szenario 2: 2026	20 EUR/t _{CO2-eq}	59.193,09 EUR	0,31 EUR/kg _{H2}
Szenario 3: 2031	30 EUR/t _{CO2-eq}	88.789,64 EUR	0,49 EUR/kg _{H2}

5.3 Kostenvergleichsrechnung (1/2)



5.3 Kostenvergleichsrechnung (2/2)

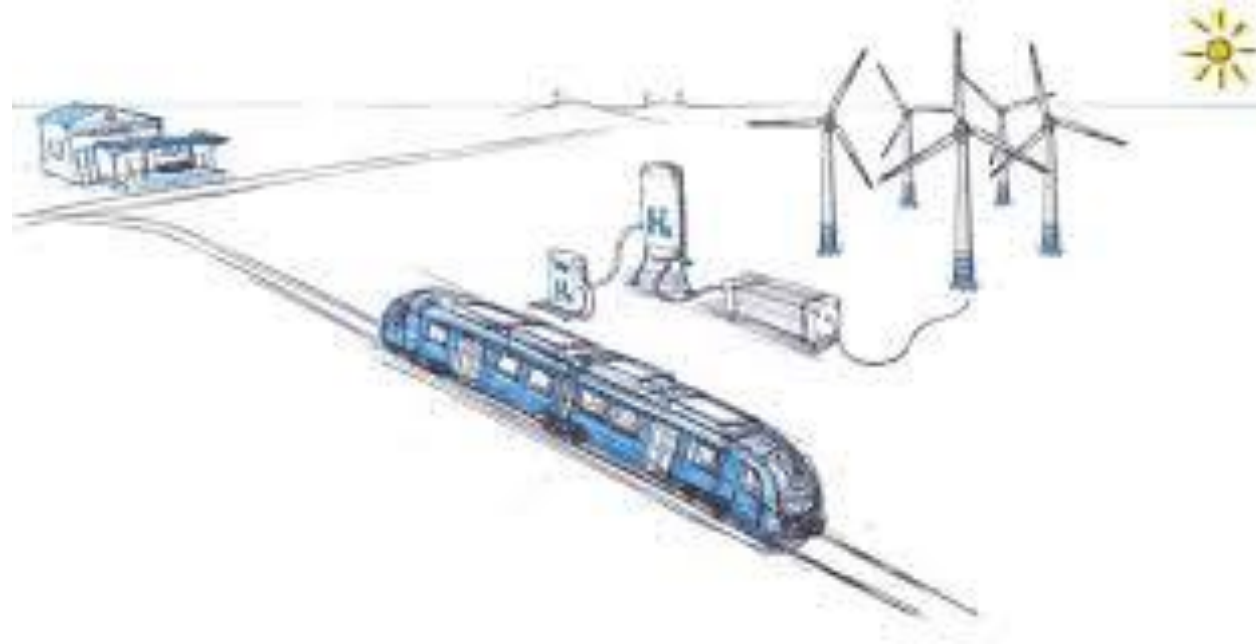
		Diesel [Mio. EUR]	Hydrail [Mio. EUR]	Diff. [Mio. EUR]	relativ [%]
Gesamtbetrachtung	Kapitalkosten	41,7 Mio.	57,4 Mio.	15,7 Mio.	37,6 %
	Treibstoffkosten	26,9 Mio.	25,3 Mio.	-1,53 Mio.	-5,67 %
	Betriebskosten	11,9 Mio.	11,2 Mio.	-0,699 Mio.	-5,87 %
	Summe	80,5 Mio.	98,9 Mio.	13,4 Mio.	16,7 %
Niebüll – Dagebüll	Kapitalkosten	15,9 Mio.	22,5 Mio.	6,60 Mio.	41,5 %
	Treibstoffkosten	5,90 Mio.	4,84 Mio.	-1,07 Mio.	-18,1 %
	Betriebskosten	2,07 Mio.	1,95 Mio.	-0,122 Mio.	-5,92 %
	Summe	23,87 Mio.	29,3 Mio.	5,41 Mio.	22,7 %
Niebüll – Tondern	Kapitalkosten	7,95 Mio.	12,0 Mio.	4,05 Mio.	50,9 %
	Treibstoffkosten	2,60 Mio.	3,09 Mio.	0,495 Mio.	19,1 %
	Betriebskosten	1,46 Mio.	1,38 Mio.	-0,0770 Mio.	-5,29 %
	Summe	12,0 Mio.	16,5 Mio.	4,47 Mio.	37,2 %
Niebüll – Flensburg	Kapitalkosten	20,9 Mio.	29,6 Mio.	8,78 Mio.	42,1 %
	Treibstoffkosten	18,4 Mio.	17,4 Mio.	-0,957 Mio.	-5,21 %
	Betriebskosten	8,39 Mio.	7,89 Mio.	-0,499 Mio.	-5,95 %

6. Fazit

- Bisherige Vorhaben dominiert von Wasserstoff aus der Erdgasdampfreformierung und Nebenprodukt-Wasserstoff
- Hinreichend effektiver Beitrag zu den Klimaschutzzielen nur mit regenerativem Wasserstoff möglich
- Schleswig-Holstein bietet sehr gute Voraussetzungen
- ZÜGig voran offenbart eine Möglichkeit zur Integration regenerativen Wasserstoffs in den SPNV
- Durch Synergiepotentiale effektiver Integrator für EE in den Verkehrssektor
- Landes- und bundespolitische Rahmenbedingungen und Anreize gefordert

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

- Fragen und Antworten



Quelle: Google Bilder, 2019,
https://www.google.de/search?q=emissionsfreier+schienenverkehr&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjgk5aevOngAhUqMuwKHQYABsEQ_AUIDygC&biw=1438&bih=727#imgrc=PW8QwTIlaNl2UM: