

SYSTÖK ONLINE-WORKSHOP, 23.10.2023

WASSERSTOFF ALS NEUER ENERGIETRÄGER IN DER LUFTFAHRT

Mit Beiträgen von:

Axel Claßen, Thorsten Ehlers, Markus Kühlen, Klaus Lütjens, Janina Scheelhaase – Institut für Luftverkehr (LV)

Patrick Jochem & Jonas Eschmann – Institut für Vernetzte Energiesysteme (VE)

Martin Winter – Institut für Verkehrsforschung (VF)

Vorbereitung und Moderation:

Sven Maertens, Florian Wozny – Institut für Luftverkehr (LV)



Wasserstoff im Luftverkehr

- Baustein zur Dekarbonisierung des Luftverkehrs und somit zur
- Einhaltung der Klimaziele im Verkehrssektor (THG-Neutralität 2045/2050) notwendig
- Herausforderungen in der Umsetzung

Dieser **Workshop** im Rahmen des DLR-Projekts **SYSTÖK** („Strategische Optionen für Energieträger im Verkehr“) bringt Sie und uns als **Experten** der Luftfahrt und neuer Energieträger zusammen, um im DLR entwickelte **Thesen über Wasserstoff als neuen Energieträger in der Luftfahrt** zu diskutieren. Einem ca. 5-minütigen **Impulsvortrag** zu den jeweiligen Thesen folgt eine 5-10 minütige **Diskussion**.

Das Projekt SYSTÖK – Strategische Optionen für Energieträger im Verkehr



Beteiligte DLR-Institute:

- Institut für Verkehrsforschung (VF)
- Institut für Luftverkehr (LV)
- Institut für Vernetzte Energiesysteme (VE)
- Institut für Fahrzeugkonzepte (FK)

Laufzeit: 2022-24

Ziel: (Ökonomische) Analyse konsistenter Optionen für neue Energieträger im Verkehr

- Erarbeitung von (insgesamt acht) Technology und Policy Briefs
- Diskussion in Workshops mit Stakeholdern
- Zielgruppe Policy Brief: Entscheider*innen der Politik, v.a. im nationalen Bereich
- Zielgruppe Technology Brief: Entscheider*innen in der Industrie und deren Interessenvertreter*innen

Zeitplan des Workshops

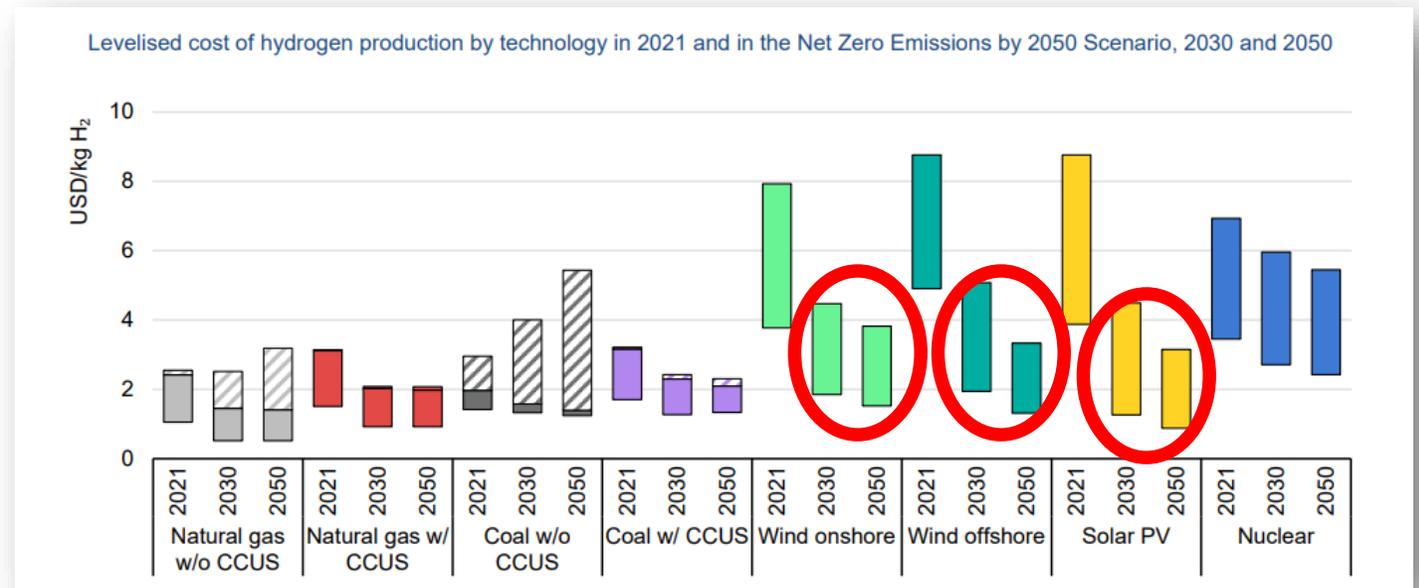


Zeit	These
10:00-10:10	Vorstellung (Martin Winter, Institut für Verkehrsforschung; Klaus Lütjens, Institut für Luftverkehr)
10:10-10:25	„Wasserstoff wird in der Herstellung deutlich teurer sein als fossiles Kerosin, aber günstiger als synthetische Kraftstoffe.“(Patrick Jochem, Jonas Eschmann, Institut für Vernetzte Energiesysteme)
10:25-10:40	„Die hohe gewichtsbezogene Energiedichte von Wasserstoff ist für die Luftfahrt bedeutender als für bodengebundene Verkehrsträger und könnte daher trotz technischer Herausforderungen eine luftfahrttechnische Nutzung begünstigen.“ (Markus Kühlen, Institut für Luftverkehr)
10:40-10:55	„Auf Basis von fortgeschrittenen Flüssigwasserstofftanks und weiteren Technologieentwicklungen könnte Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt für Flugzeuge in allen Marktsegmenten mit abnehmendem Nutzen für lange Distanzen nutzbar sein.“(Markus Kühlen, Institut für Luftverkehr)
10:55-11:10	„Für die Betankung von Flugzeugen mit Wasserstoff sind hohe Investitionen und geeignete Flächen für neue Infrastrukturen an Flughäfen notwendig.“ (Axel Claßen, Institut für Luftverkehr)
11:10-11:25	„Die Klimawirkung infolge von CO ₂ - und nicht-CO ₂ -Effekten ist für Wasserstoffflugzeuge im Vergleich zu mit Kohlenwasserstoffen betriebenen Flugzeugen besonders niedrig.“ (Thorsten Ehlers, Institut für Luftverkehr)
11:25-11:40	„Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff in der Luftfahrt ist nur bei einer hohen globalen Bepreisung von CO ₂ -Emissionen und weiteren klimaerwärmenden Emissionen („Nicht-CO ₂ -Effekte“) gegeben.“ (Janina Scheelhaase, Institut für Luftverkehr)
11:40-11:55	„Die Entwicklung von Wasserstoffflugzeugen muss einhergehen mit hoher Planungssicherheit bei der Regulierung, dem Hochlauf der Erzeugung von grünem Wasserstoff und dem Infrastrukturausbau an Flughäfen.“ (Janina Scheelhaase, Institut für Luftverkehr)

These 1: Wasserstoff wird in der Herstellung deutlich teurer sein als fossiles Kerosin, aber günstiger als synthetische Kraftstoffe. (1)



- Aktuelle Kosten (2021) von grünem Wasserstoff liegen bei >4 €/kg.
- Zur Einordnung: Laut Industrieverbänden liegt der maximale Nachfragepreis bei ca. 2,50 €/kg.



[Global Hydrogen Review 2022 - IEA](#)

These 1: Wasserstoff wird in der Herstellung deutlich teurer sein als fossiles Kerosin, aber günstiger als synthetische Kraftstoffe. (2)

- Wasserstoffpreis könnte sich optimistisch bei ca. 2,60 €/kg (85 €/MWh) einpendeln.
- Das ist aber mit großer Unsicherheit verbunden (vgl. Ölpreise).
- Verflüssigt steigt der Preis auf ca. 4,85 €/kg.
- Dieselbe Energiemenge in SAF kostet aufgrund des benötigten Kohlenstoffs und der Synthese-Energie ca. 80 % mehr (d.h. ca. 280 €/MWh).
- Fossiler JET-A Preis:
 - 2019: 50 €/MWh
 - 2022: 87,5 €/MWh (ca. 1/3)

Ähnl. Größenordnung!

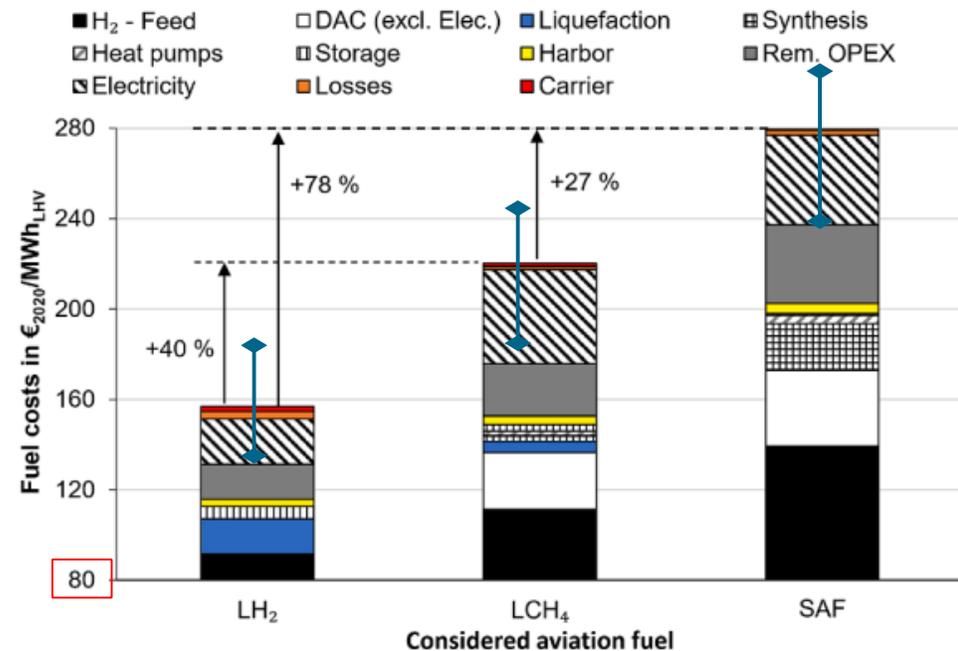


Fig. 19. Cost comparison of aviation fuels | Case A.

Costs for renewable aviation fuel on exemplary flight paths | per person and one-way.

ID	From	To	Energetic content [MWh _{th}]	Fossil fuel costs 2019 [€ ₂₀₁₉]	Fossil fuel costs 2022 [€ ₂₀₂₂]	Equiv. cost LH ₂ [€ ₂₀₂₀]	Equiv. cost LCH ₄ [€ ₂₀₂₀]	Equiv. cost SAF [€ ₂₀₂₀]
1	MUC	HAM	0.16	8	14	25	35	45
2	CJU	GMP	0.25	12	22	39	55	70

These 2: Die hohe gewichtsbezogene Energiedichte von Wasserstoff ist für die Luftfahrt bedeutender als für bodengebundene Verkehrsträger und könnte daher trotz technischer Herausforderungen eine luftfahrttechnische Nutzung begünstigen

Der Luftverkehr stellt andere Anforderungen an mögliche alternative Energieträger als der Straßenverkehr, sodass sich auch die Bewertung der Alternativen unterscheidet.

Bewertungskriterium	H ₂	SAF	Batterie
Gewichtsbezogene Energiedichte	+	o	- / - - (LV) - (StV)
Volumenbezogene Energiedichte	-	+	- / - - (LV) - (StV)
Energiebilanz (Well-to-Wake/Wheel)	o	-	+
Verbleibende Klimawirkung (Nicht-CO2-Effekte)	o (LV) + (StV)	- (LV) + (StV)	+
Investitionen (Technologie und Infrastruktur)	-	o	-
Anwendbarkeit für Bestandsflotte	-	+	-

Batterien sind im Luftverkehr technisch **nur für Kurzstreckenflugzeuge** umsetzbar

Energiebilanz und Klimawirkung motivieren die Nutzung von Batterien für StV und LV

H₂ verspricht im **Vergleich zu SAF**, die **bessere Lösung** hinsichtlich Energiebilanz und Klimawirkung zu sein. Dafür ist Wasserstoff **aber schwieriger umzusetzen.**

These 3: Auf Basis von fortgeschrittenen Flüssigwasserstofftanks und weiteren Technologieentwicklungen könnte Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt für Flugzeuge in allen Marktsegmenten mit abnehmendem Nutzen für lange Distanzen nutzbar sein (1)

Wasserstoff kann in der Luftfahrt über Brennstoffzellen und Elektromotoren oder über Verbrennungstriebwerke für die Erzeugung von Schub genutzt werden.

- **Brennstoffzellen** versprechen **höhere Energieeffizienz**, aber sind durch geringe Leistungsdichten auf die Anwendung in Kurzstreckenflugzeugen begrenzt
- **Verbrennungstriebwerke** (Gasturbinen) erreichen **höhere Leistungsdichten** und sind für Mittel- und Langstreckenflugzeuge geeignet
- Sowohl bei Brennstoffzellen als auch bei Gasturbinen wird der **Wasserstoff in flüssiger Form** genutzt werden, um die volumenbezogene Energiedichte im Vergleich zur gasförmigen Form zu verbessern

These 3: Auf Basis von fortgeschrittenen Flüssigwasserstofftanks und weiteren Technologieentwicklungen könnte Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt für Flugzeuge in allen Marktsegmenten mit abnehmendem Nutzen für lange Distanzen nutzbar sein (2)

Neuere Studien zeigen, dass Wasserstoff auch für Langstreckenflugzeuge technisch umsetzbar ist (<10% zusätzliche Blockenergie). [1-3]

Welche Technologien braucht es, damit Wasserstoff in allen Marktsegmenten eingesetzt werden kann?

- **Leistungsstarke Brennstoffzellen** (Kurzstrecke)
- **Effiziente und emissionsarme Wasserstoffverbrennungstriebwerke** (Mittel- & Langstrecke)
- **Flüssigwasserstofftanks mit hoher gewichtsbezogener Energieeffizienz**
 - Annahmen in der Literatur: 30% (pessimistisch) bis 85% (optimistisch) für $m_{LH2}/(m_{LH2} + m_{tank})$

[1] Wöhler et al. (2023, DLR-SL): Design and Assessment of Long Range Aircraft Concepts with focus on Fossil Kerosene, Sustainable Aviation Fuel and Liquid Hydrogen as Energy Carriers

[2] Kossarev et al. (2022, TU München): Comparative environmental life cycle assessment and operating cost analysis of long-range hydrogen and biofuel fueled transport aircraft

[3] Troeltsch et al. (2020, Bauhaus Luftfahrt): Hydrogen Powered Long Haul Aircraft with Minimized Climate Impact

These 4: Für die Betankung von Flugzeugen mit Wasserstoff sind hohe Investitionen und geeignete Flächen für neue Infrastrukturen an Flughäfen notwendig (1)



Parallelität von Infrastrukturen
und physikalische
Besonderheiten erzeugen
zusätzlichen Flächenbedarf

- Unterschiedliche Topologien zur Versorgung, Lagerung und Betankung mit Wasserstoff, abhängig von Verkehrsstruktur und Mengenbedarf
(Tankfahrzeuge → Pipeline & Verflüssigung)
- Zusätzliche Infrastruktur parallel zu Kerosin/SAF Infrastruktur erforderlich
- Platzbedarf z.B. durch Treibstofflager, Tankerstellflächen und ggf. Verflüssigungsanlage

These 4: Für die Betankung von Flugzeugen mit Wasserstoff sind hohe Investitionen und geeignete Flächen für neue Infrastrukturen an Flughäfen notwendig (2)



Hohe Investitionen u. lange
Vorausplanungsfristen
erfordern Planungssicherheit

Unterstützende
Standardisierung und
Regulierung erforderlich

- Zu stellende Infrastrukturen erzeugen hohe Investitionskosten, z.B. für
 - H₂-Pufferspeicher für 3 Tage
 - Pipeline-Anschluss
 - Verflüssigungsanlage
- Hoher Energiebedarf, z.B. für Verflüssigung
- Operative Unwägbarkeiten – z.B. Sicherheitsabstände und Parallelität von Turnaround-Prozessen noch nicht verbindlich geklärt

These 5: Die Klimawirkung infolge von CO₂- und nicht-CO₂-Effekten ist für Wasserstoffflugzeuge im Vergleich zu mit Kohlenwasserstoffen betriebenen Flugzeugen besonders niedrig (1)



Die Klimawirkung der Luftfahrt
ist komplex.

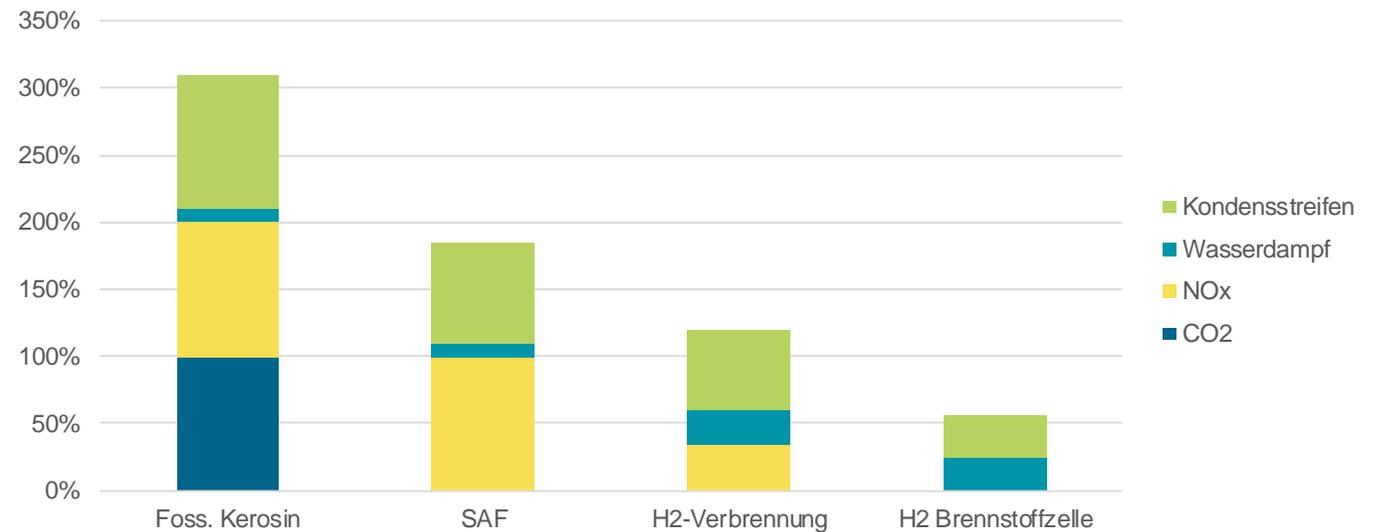
Sowohl SAF als auch H₂
bieten die Möglichkeit, sie zu
reduzieren.

- Die Klimawirkung der Luftfahrt setzt sich zusammen aus CO₂, H₂O, Kondensstreifenzirren, NO_x und anderen Effekten
- Mit grünem Wasserstoff können CO₂-Emissionen komplett vermieden werden
- Auch andere Emissionen können reduziert werden, dies ist abhängig von der technischen Umsetzung

These 5: Die Klimawirkung infolge von CO₂- und nicht-CO₂-Effekten ist für Wasserstoffflugzeuge im Vergleich zu mit Kohlenwasserstoffen betriebenen Flugzeugen besonders niedrig (2)

Auch die Verwendung von SAF ermöglicht eine Reduktion der Klimawirkung, die Einsparpotentiale von H₂ sind aber höher.

Zusammensetzung der Klimawirkung (GWP bis 2100)



Quelle: CleanSky 2

- Zukünftige Triebwerke erlauben auch die Verbrennung von SAF mit verringerten Emissionen von NO_x und Kondensstreifen, das Potential von H₂ ist aber höher

These 6: Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff in der Luftfahrt ist nur bei einer hohen globalen Bepreisung von CO₂-Emissionen und weiteren klimaerwärmenden Emissionen („Nicht-CO₂-Effekte“) gegeben (1)



Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffflugzeugen ist ohne staatliche Maßnahmen innerhalb der nächsten Jahrzehnte voraussichtlich nicht gegeben.

- Wasserstoffbetriebene Flugzeuge werden zukünftig in **wirtschaftlicher Konkurrenz** zu Flugzeugen stehen, die mit herkömmlichen, kohlenwasserstoffbasierten Treibstoffen angetrieben werden.
- **(Zusätzliche) Kosten** durch H₂-Nutzung: Forschungs- und Entwicklungskosten für wasserstoffbetriebene Flugzeuge; Investitionskosten für neu zu errichtende Infrastruktur an Flughäfen sowie Produktions- und ggf. Transportkosten (LKW/Pipeline).

These 6: Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff in der Luftfahrt ist nur bei einer hohen globalen Bepreisung von CO₂-Emissionen und weiteren klimaerwärmenden Emissionen („Nicht-CO₂-Effekte“) gegeben (2)



EU-Emissionshandel (EU-ETS) für den Luftverkehr setzt Preisanreize für Einsatz von alternativen Kraftstoffen im Luftverkehr im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR).

- Wenn die **Politik den Einsatz von H₂** in der Luftfahrt **vorantreiben** will, muss der Einsatz von Wasserstoff im Luftverkehr durch **politische Maßnahmen** unterstützt werden.
- **Grundsätzlich** in Frage kommen: Ge- und Verbote (z. B. ab dem Jahr 20XX verpflichtender H₂-Einsatz zu X%), direkte Subventionen an Fluggesellschaften und/oder Flughäfen oder Preisanreize (z. B. EU-ETS)

These 7: Die Entwicklung von Wasserstoffflugzeugen muss einhergehen mit hoher Planungssicherheit bei der Regulierung, dem Hochlauf der Erzeugung von grünem Wasserstoff und dem Infrastrukturausbau an Flughäfen (1)

Lange Planungssicherheit für Luftfahrtindustrie von großer ökonomischer Bedeutung. Politik entscheidet bislang in der Regel deutlich kurzfristiger.

- Damit sich die für die Entwicklung und Produktion erforderlichen **sehr hohen Investitionen** amortisieren können, ist aus Sicht der Entwickler und Produzenten von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen eine **möglichst lange Planungssicherheit** von großer Bedeutung.
- Idealerweise sollte diese Planungssicherheit aufgrund der langen Lebensdauer von Flugzeugen **mehrere Jahrzehnte** betragen, was angesichts der Kurzfristigkeit vieler politischer Entscheidungen in der Praxis **kaum realisierbar** sein dürfte.

These 7: Die Entwicklung von Wasserstoffflugzeugen muss einhergehen mit hoher Planungssicherheit bei der Regulierung, dem Hochlauf der Erzeugung von grünem Wasserstoff und dem Infrastrukturausbau an Flughäfen (2)

Global einheitliche H₂-
Maßnahmen im Luftverkehr
wünschenswert – in der
Praxis kaum umsetzbar.

- Da der **Markt für (Verkehrs-)flugzeuge international** ist, sollten Rahmenbedingungen zur Unterstützung der Einführung von H₂-Flugzeugen zumindest **europäisch einheitlich**, besser noch **global einheitlich** gestaltet werden. Dies dürfte jedoch mit Blick auf die Heterogenität der politischen Schwerpunktsetzungen der (großen) Luftverkehrsstaaten der Welt **kaum erfüllbar** sein.

These 7: Die Entwicklung von Wasserstoffflugzeugen muss einhergehen mit hoher Planungssicherheit bei der Regulierung, dem Hochlauf der Erzeugung von grünem Wasserstoff und dem Infrastrukturausbau an Flughäfen (3)

Politik und
Luftverkehrswirtschaft
müssen den Markthochlauf
von Wasserstoff Hand-in-
Hand vorantreiben;
Pilotvorhaben können den
Weg ebnen.

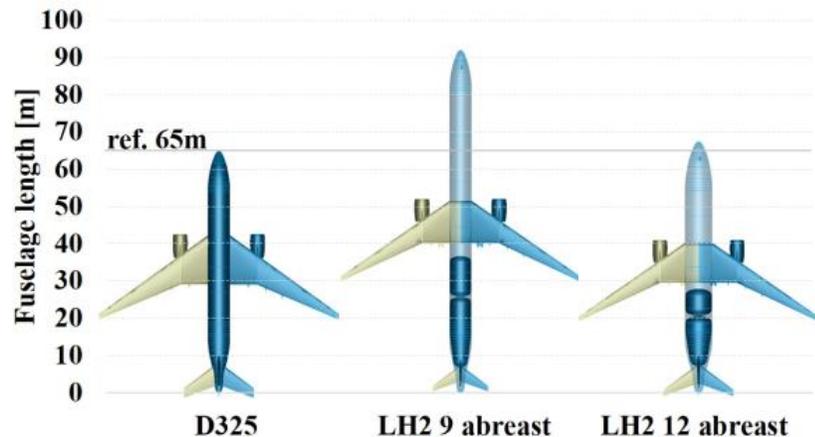
- Zeitlich parallel sollten **Erzeugung bzw. Import von grünem Wasserstoff** vorangetrieben werden. Dies ist essentielle Bedingung für einen erfolgreichen Markthochlauf von H_2 im Luftverkehr. Hier sind Politik und Luftverkehrswirtschaft gleichermaßen aufgefordert.
- Schließlich sollte zeitgleich **Infrastruktur zur Nutzung von H_2 an Flughäfen** ausgebaut werden. Die Flughäfen müssen in H_2 -Lagerungs- und Betankungsinfrastruktur investieren und vermutlich für viele Jahre **mindestens zwei parallele Lagerungs- und Betankungssysteme** vorhalten und betreiben.

BACKUP



These 3 (Backup 1): Auf Basis von fortgeschrittenen Flüssigwasserstofftanks und weiteren Technologieentwicklungen könnte Wasserstoff als Energieträger in der Luftfahrt für Flugzeuge in allen Marktsegmenten mit abnehmendem Nutzen für lange Distanzen nutzbar sein

Ziel des Papers [1] ist die Nachmodellierung der A350-900 mit verschiedenen Energieträgern für einen Markteintritt in 2035



		D325	D325+		D325+		D325+	
			Kerosene		SAF		LH2	
<u>Masses</u>								
MTOM	[kg]	280000	273115	-2.5%	269701	-3.7%	232401	-17.0%
MLM	[kg]	206800	205242	-0.8%	204375	-1.2%	213784	3.4%
MZFM	[kg]	195600	194778	-0.4%	194303	-0.7%	210914	7.8%
OEM	[kg]	141700	140928	-0.5%	140453	-0.9%	157064	10.8%
MFM	[kg]	113400	103314	-8.9%	100593	-11.3%	35463	-68.7%
Block fuel (4000 nm)	[kg]	45994	43630	-5.1%	42473	-7.7%	16058	-65.1%
Block energy (4000 nm)	[GJ]	1989.2	1887.0	-5.1%	1870.9	-5.9%	1908.0	-4.1%
<u>Propulsion</u>								
Equivalent static thrust (Sea-level/ISA)	[kN]	374.8	360.3	-3.9%	360.3	-3.9%	295.6	-21.1%
TSFC cruise (mid cruise/ISA/Ma=0.85)	[g/kN/s]	15.23	14.70	-3.5%	14.45	-5.1%	5.13	-66.3%
TSEC cruise (mid cruise/ISA/Ma=0.85)	[J/N/s]	658.90	635.97	-3.5%	636.52	-3.4%	609.55	-7.5%
<u>Aerodynamics</u>								
Sref	[m ²]	445	421	-5.4%	414	-7.0%	353	-20.7%
cL cruise (mid cruise/Ma=0.85)	[-]	0.433	0.469	8.4%	0.47	8.5%	0.469	8.4%
cLmaxL	[-]	2.15	2.36	9.8%	2.36	9.8%	2.8	30.2%
L/D cruise (mid cruise/Ma=0.85)	[-]	20.57	20.87	1.5%	20.9	1.6%	19.24	-6.5%

[1] Wöhler et al. (2023, DLR-SL): Design and Assessment of Long Range Aircraft Concepts with focus on Fossil Kerosene, Sustainable Aviation Fuel and Liquid Hydrogen as Energy Carriers